

Protutaktni način rada termoelektričnih generatora pri korištenju otpadne toplinske energije audio pojačala snage u AB-klasi

Škalic, Ivan

Doctoral thesis / Disertacija

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:179:739286>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-05**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture - University of Split](#)



SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Ivan Škalic

**PROTUTAKTNI NAČIN RADA
TERMOELEKTRIČNIH GENERATORA PRI
KORIŠTENJU OTPADNE TOPLINSKE
ENERGIJE AUDIO POJAČALA SNAGE U AB-
KLASI**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2024.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Ivan Škalic

*Protutaktni način rada termoelektričnih generatora pri
korištenju otpadne toplinske energije audio pojačala
snage u AB-klasi*

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2024.

Doktorska disertacija je izrađena na Zavodu za elektroniku i računarstvo,
Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

Mentor: Prof. dr. sc. Ivan Marinović

Rad br. 203

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

Ključne riječi: audio pojačalo snage u AB-klasi, termoelektrični generator, toplinsko-električni model, prikupljanje otpadne toplinske energije pojačala, protutaktni način rada termoelektričnih generatora, stupanj efikasnosti

Znanstveno područje: tehničke znanosti

Znanstveno polje: elektrotehnika

Znanstvena grana: elektronika

Institucija na kojoj je rad izrađen: Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

Mentor rada: Prof. dr. sc. Ivan Marinović

Broj stranica: 119

Broj slika: 80

Broj tablica: 17

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 121

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. Prof. dr. sc. Sven Gotovac, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split
2. Prof. dr. sc. Mojmil Cecić, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split
3. Izv. prof. dr. sc. Josip Musić, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split
4. Izv. prof. dr. sc. Ivo Stančić, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split
5. Prof. dr. sc. Saša Vlahinić, Tehnički fakultet, Rijeka

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. Prof. dr. sc. Sven Gotovac, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split
2. Prof. dr. sc. Mojmil Cecić, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split
3. Izv. prof. dr. sc. Josip Musić, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split
4. Izv. prof. dr. sc. Ivo Stančić, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split
5. Prof. dr. sc. Saša Vlahinić, Tehnički fakultet, Rijeka

Disertacija obranjena dana: 23. rujna 2024.

Protutaktni način rada termoelektričnih generatora pri korištenju otpadne toplinske energije audio pojačala snage u AB-klasi

Sažetak

Audio pojačalo snage u AB-klasi je i dalje među najčešće korištenom klasom pojačala u audio sustavima koja zahtijevaju visoku kvalitetu reprodukcije zvuka. Glavna prednost ove klase pojačala su mala izobličenja izlaznog signala, dok se kao nedostatak ističe relativno nizak iznos efikasnosti. Taj nedostatak za posljedicu ima generiranje velikih iznosa otpadne energije, a koja se u najvećoj mjeri disipira u obliku topline na izlaznim tranzistorima. S obzirom da su korištena sklopovska rješenja u svrhu povećanja efikasnosti pojačala dosegla svoj vrhunac, tako se u ovoj disertaciji drugačijim pristupom nastojala povećati efikasnost cjelokupnog sustava s uključenim pojačalom snage. Primjenom termoelektričnih generatora na izlaznim tranzistorima, nastojalo se prikupiti što veći iznos otpadne toplinske energije, te je zatim pretvoriti u električnu energiju. Pretvorena energija se može iskoristiti na više načina, a hipoteza je da se s povratom te energije u krug napajanja pojačala, znatno može povećati stupanj efikasnosti sustava s pojačalom snage u AB-klasi.

Disertacija započinje razvojem toplinsko-električnog modela termoelektričnog sustava sa pojačalom snage. Model kao ulazni parametar uzima snagu disipiranu na izlaznim tranzistorima, a model omogućava analizu utjecaja parametara sustava na ostvarene temperature i generiranu snagu na potrošaču termoelektričnog generatora. Analiza različitih toplinskih spojeva je također obuhvaćena modelom, redom su to pojedinačno spojeni generator, toplinsko serijski i toplinsko paralelni spoj generatora. Rezultati proizašli simulacijom modela su potvrdili određene početne pretpostavke, ali su istovremeno i ukazali na nove izazove. Na osnovu izmjerenih vrijednosti na laboratorijskom prototipu, provedena je verifikacija modela. S obzirom na ograničenja modela, istraživanje se nastavilo mjerenjima na uspostavljenom laboratorijskom prototipu.

Toplinsko serijski spoj generatora se pokazao kao najbolji izbor za primjenu u pretvorbi toplinske energije disipirane na izlaznim tranzistorima. Međutim, kod takvog spoja se pojavljuje problem generiranja visokih temperatura na izlaznim tranzistorima. Kao rješenje, predložen je i teorijski analiziran protutaktni način rada termoelektričnih generatora. S različitim vremenima prebacivanja između sustava u predloženom načinu rada, moguće je kontrolirati temperaturu na izlaznim tranzistorima. Osim navedenog, napravljena je i analiza utjecaja različitih frekvencija ulaznog signala, te utjecaj primjene hladila različitih toplinskih otpora, na ostvarene temperature i generirane snage u sustavu. Na kraju, predstavljena je i procjena povećanja stupnja efikasnosti sustava s pojačalom i napravljena je analiza isplativosti primjene termoelektričnih generatora.

Ključne riječi: audio pojačalo snage u AB-klasi, termoelektrični generator, toplinsko-električni model, prikupljanje otpadne toplinske energije pojačala, protutaktni način rada termoelektričnih generatora, stupanj efikasnosti

Push-pull mode of thermoelectric generators operation in AB-class audio power amplifier energy harvesting process

Abstract

AB-Class power audio amplifier remains among the most used amplifier classes in audio systems that require high-quality sound reproduction. The main advantage of this amplifier class is the low distortion of the output signal, while the drawback is relatively low efficiency. This drawback results in the generation of large amounts of waste energy, which is mostly dissipated as heat on the output transistors. Given that circuitry solutions aimed at increasing the efficiency of amplifier have reached their peak, this dissertation adopts a different approach to enhance the overall system efficiency. By applying thermoelectric generators to the output transistors of the amplifier, aim was to collect as much waste heat energy as possible and convert it into electrical energy. The converted energy can be used in various ways, and the hypothesis is that by returning converted energy to the amplifier's power supply circuit, the efficiency of the AB-Class power can be significantly increased.

The dissertation starts by developing a thermal-electric model of the thermoelectric system with a power amplifier. The model uses the power dissipated on the output transistors as an input parameter, allowing for the examination of the influence of system parameters on the achieved temperatures and the power output at the generator's load. The model also includes the analysis of different thermal connections of thermoelectric generators, individually connected generators, thermal series, and thermal parallel connections of the generators. The results confirmed certain initial assumptions but also indicated new challenges. Based on measured values on a laboratory prototype, the model was verified. Considering certain model limitations, the research continued with measurements on the established laboratory prototype.

The thermal series connection of the generators proved to be the best choice for application on the output transistors in terms of generated power. However, this connection generates high temperatures on the output transistors. To address this issue, a push-pull operating mode of thermoelectric generators was proposed and analysed. With different switching times between systems in the proposed mode, it is possible to control the temperature on the output transistors. The impact of different input signal frequencies and the use of heatsinks with different thermal resistances on the achieved temperatures and generated power was analysed. Finally, an evaluation of the improved efficiency of the system with power amplifier was presented, along with an analysis of the cost-effectiveness of utilizing thermoelectric generators for this purpose.

Keywords: AB-Class power amplifier, thermoelectric generator, thermal-electric model, power amplifier energy harvesting, push-pull mode of thermoelectric generators operation, amplifier efficiency level

Zahvala

Zahvaljujem se obitelji na neizmornoj potpori, razumijevanju i strpljenju tijekom izrade doktorske disertacije. Njihova vjera u mene bila je neprocjenjiva motivacija i izvor snage.

Sadržaj

Sažetak	iv
Abstract	v
Zahvala.....	vi
Sadržaj.....	vii
Popis tablica	ix
Popis slika	x
Popis kratica.....	xv
1. UVOD	1
1.1. Motivacija.....	1
1.2. Pregled strukture disertacije	2
1.3. Pregled dosadašnjeg istraživanja	3
1.3.1. Modeliranje sustava s TEG-ovima	14
1.3.2. Primjena TEG-ova na pojačalima snage.....	24
1.3.3. Isplativost primjene TEG-ova.....	26
1.4. Hipoteze.....	30
1.5. Očekivani znanstveni doprinosi.....	31
2. TOPLINSKO-ELEKTRIČNI MODEL TERMOELEKTRIČNOG SUSTAVA ..	32
2.1. O Simscape-u.....	32
2.2. Modeliranje termoelektričnog sustava.....	37
2.3. Ograničenja modela.....	53
3. LABORATORIJSKI PROTOTIP TERMOELEKTRIČNOG SUSTAVA	55
3.1. Rezultati mjerenja i verifikacija modela	57
3.2. Protutaktni način rada TEG-ova	73
3.2.1. Utjecaj različitih vremena prebacivanja.....	75
3.2.2. Utjecaj frekvencije ulaznog signala.....	84

3.2.3. Utjecaj hladila različitih toplinskih otpora.....	90
4. PROCJENA POVEĆANJA STUPNJA EFIKASNOSTI SUSTAVA.....	96
5. ZAKLJUČAK	100
LITERATURA	102
PRILOG	110

Popis tablica

Tablica 1.1 Konstantni iznosi koeficijenata materijala Bi_2Te_3	15
Tablica 2.1 Izmjereni iznosi snage na korištenom pojačalu snage	38
Tablica 2.2 Generirana energija u periodu zagrijavanja i hlađenja	47
Tablica 2.3 Ovisnost rezultata ostvarenih PP modelom o promjeni ulaznih parametara.	51
Tablica 2.4 Ovisnost rezultata ostvarenih KP modelom o promjeni ulaznih parametara	52
Tablica 3.1 Parametri različitih modela korištenih TEG-ova	58
Tablica 3.2 Snaga na potrošaču i efikasnost pretvorbe različitih modela TEG-ova	62
Tablica 3.3 Usporedba rezultata ostvarenih nakon optimizacije pojačala	66
Tablica 3.4 Usporedba rezultata ostvarenih istim modelom TEG-a (pojedinačni spoj) ..	67
Tablica 3.5 Generirana energija u 10-minutnom vremenskom intervalu rada pojačala ..	74
Tablica 3.6 Rezultati u taktnom i protutaktom načinu rada ('hladilo #2')	82
Tablica 3.7 Rezultati u taktnom i protutaktom načinu rada (maksimalni gradijent)	83
Tablica 3.8 Usporedba izmjerenih rezultata pri različitim frekvencijama ulaznog signala	89
Tablica 3.9 Dimenzije korištenih hladila	90
Tablica 3.10 Rezultati u taktnom i protutaktom načinu rada ('hladilo #1' i 'hladilo #3')	95
Tablica 4.1 Efikasnost pretvorbe energije i procjena povećanja efikasnosti sustava (u postotnim poenima)	97
Tablica 4.2 Vrijeme povrata investicije u protutaktom načinu rada	98

Popis slika

Slika 1.1 Seebeckov efekt u zatvorenoj petlji različitih vodiča.....	4
Slika 1.2 Peltierov efekt u zatvorenoj petlji različitih materijala.....	5
Slika 1.3 Thomsonov efekt u samostalnom vodiču: a) apsorpcija toplinske energije; b) otpuštanje toplinske energije	6
Slika 1.4 Unutarnja struktura TEG-a.....	7
Slika 1.5 Presjek termopara u TEG-u.....	9
Slika 1.6 Koeficijenti α , σ i λ za različite skupine materijala: a) iznos faktora snage; b) iznos toplinske vodljivosti u poluvodičima	12
Slika 1.7 Iznosi faktora izvrsnosti u ovisnosti o temperaturi za: a) n-tip poluvodiča; b) p-tip poluvodiča.....	12
Slika 1.8 Temperaturno promjenjivi koeficijenti za Bi_2Te_3 : a) apsolutni iznos Seebeckovih koeficijenata; b) koeficijent toplinske vodljivosti; c) električna otpornost.....	16
Slika 2.1 Komponente u Simscape-u korištene za izradu toplinskog modela: a) toplinski otpornik; b) prijenos topline kondukcijom; c) toplinska masa; d) toplinska referentna točka; e) senzor temperature; f) izvor temperature; g) kontrolirani izvor toplinskog toka; h) hladilo	33
Slika 2.2 Komponente u Simscape-u korištene za izradu električnog modela: a) otpornik; b) promjenjivi otpornik; c) električna referentna točka; d) kontrolirani naponski izvor; e) senzor napona; f) senzor struje.....	35
Slika 2.3 Dodatne komponente u Simscape-u korištene kod modeliranja: a) metoda rješavanja; b) pretvarač Simulink ulaznog signala u fizički signal; c) pretvarač fizičkog ulaznog signala u Simulink signal.....	36
Slika 2.4 Audio pojačalo snage u AB-klasi: a) prikaz korištenog pojačala; b) graf ovisnosti izlazne snage i efikasnosti o ulaznoj snazi	38
Slika 2.5 Montažna shema testiranog termoelektričnog sustava	39
Slika 2.6 Toplinski spojevi: a) pojedinačno spojeni TEG; b) toplinsko serijski spoj TEG-ova; c) toplinsko paralelni spoj TEG-ova.....	40
Slika 2.7 Toplinski dio modela termoelektričnog sustava u Simulinku	41
Slika 2.8 Vrijednosti parametara korištenih u modelu: a) n-tip poluvodiča; b) hladila ...	42
Slika 2.9 Električni dio modela termoelektričnog sustava u Simulinku.....	43
Slika 2.10 Dio modela za računanje temperaturno promjenjivih koeficijenata.....	43

Slika 2.11 Potpuni toplinsko-električni model razvijen u Simulink okruženju	44
Slika 2.12 Temperaturni gradijent i temperatura tople strane (simulacija): a) pojedinačni spoj; b) toplinsko serijski spoj; c) toplinsko paralelni spoj	46
Slika 2.13 Pojedinačni spoj (simulacija): a) napon na prilagođenom potrošaču; b) generirana snaga i energija.....	47
Slika 2.14 Temperaturno promjenjivi koeficijenti u pojedinačnom spoju (simulacija): a) ukupan Seebeckov koeficijent; b) koeficijent toplinske vodljivosti; c) električna otpornost	48
Slika 2.15 Temperatura tople strane u pojedinačnom spoju (PP model) uslijed: a) povećanja disipirane snage; b) smanjenja disipirane snage.....	49
Slika 2.16 Temperaturni gradijent u pojedinačnom spoju (PP model) uslijed: a) povećanja disipirane snage; b) smanjenja disipirane snage.....	50
Slika 2.17 Generirana snaga i energija na potrošaču u pojedinačnom spoju (PP model) uslijed: a) povećanja disipirane snage; b) smanjenja disipirane snage	50
Slika 3.1 Laboratorijski prototip sustava za termoelektričnu pretvorbu energije	56
Slika 3.2 Termoelektrični sustav: a) eksperimentalna postavka; b) zagrijavanje izlaznih tranzistora.....	57
Slika 3.3 Pojedinačni spoj SP1848-27145: a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent	58
Slika 3.4 Pojedinačni spoj SP1848-27145: a) napon na potrošaču i napon otvorenog kruga; b) generirana snaga na potrošaču	59
Slika 3.5 Toplinsko serijski spoj SP1848-27145: a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent	60
Slika 3.6 Toplinsko serijski spoj SP1848-27145: a) napon na potrošaču i napon otvorenog kruga za TEG #1; b) ukupno generirana snaga	60
Slika 3.7 Toplinsko paralelni spoj SP1848-27145: a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent	61
Slika 3.8 Toplinsko paralelni spoj SP1848-27145: a) napon na potrošaču i napon otvorenog kruga za TEG #1; b) ukupno generirana snaga	61
Slika 3.9 Pojedinačni spoj SP1848-27145 (optimizirano pojačalo): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent	63
Slika 3.10 Pojedinačni spoj SP1848-27145 (optimizirano pojačalo): a) napon na potrošaču; b) generirana snaga na potrošaču	64

Slika 3.11 Toplinsko serijski spoj SP1848-27145 (optimizirano pojačalo): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent	64
Slika 3.12 Toplinsko serijski spoj SP1848-27145 (optimizirano pojačalo): a) ukupno generirana snaga; b) naponi na potrošačima za TEG#1 i TEG#2 pri izlaznoj snazi od 50 W.....	65
Slika 3.13 Toplinsko paralelni spoj SP1848-27145 (optimizirano pojačalo): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent	65
Slika 3.14 Ukupno generirana snaga u toplinsko paralelnom spoju (optimizirano pojačalo, SP1848-27145).....	66
Slika 3.15 Pojedinačni spoj (verifikacija): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent	68
Slika 3.16 Toplinsko serijski spoj (verifikacija): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent	68
Slika 3.17 Toplinsko paralelni spoj (verifikacija): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent	69
Slika 3.18 Napon na potrošaču za pojedinačno spojeni TEG (verifikacija)	69
Slika 3.19 Generirana snaga na potrošaču u pojedinačnom spoju SP1848-27145 za različite žanrove glazbe.....	71
Slika 3.20 Ostvarene temperature u pojedinačnom spoju SP1848-27145 za različite žanrove glazbe: a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent.....	71
Slika 3.21 Generirana snaga na potrošaču u pojedinačnom spoju SP1848-27145 različitih audio signala iz: a) pop kategorije; b) elektronske, rock, jazz i klasične kategorije glazbe	72
Slika 3.22 Pojedinačni spoj SP1848-27145 (10-minutni režim rada pojačala): a) temperatura tople strane; b) generirana energija na potrošaču	73
Slika 3.23 Toplinsko serijski spoj SP1848-27145 (10-minutni režim rada pojačala): a) temperatura tople strane; b) ukupno generirana energija.....	74
Slika 3.24 Pojedinačni spoj u taktom načinu rada (10 kHz, 'hladilo #2'): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent	75
Slika 3.25 Energija u taktom načinu rada pojedinačnog spoja (10 kHz, 'hladilo #2')....	76
Slika 3.26 Toplinsko serijski spoj u taktom načinu rada (10 kHz, 'hladilo #2'): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent.....	76
Slika 3.27 Energija u taktom načinu rada toplinsko serijskog spoja (10 kHz, 'hladilo #2')	77

Slika 3.28 Pojedinačno spojeni i toplinsko serijski spoj u taktom načinu rada (10 kHz, 'hladilo #2', maksimalni gradijent): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent	78
Slika 3.29 Generirana energija u taktom načinu rada kod pojedinačno spojenog i toplinsko serijskog spoja (10kHz, 'hladilo #2', maksimalni gradijent)	78
Slika 3.30 Temperature hladila: a) u pojedinačnom spoju generatora; b) toplinsko serijskom spoju generatora.....	79
Slika 3.31 Generirana energija u protutaktnom načinu rada (10 kHz, 'hladilo #2', neprekidno): a) pojedinačni spoj; b) toplinsko serijski spoj	80
Slika 3.32 Generirana energija u protutaktnom načinu rada (10 kHz 'hladilo #2', 30s): a) pojedinačni spoj; b) toplinsko serijski spoj	81
Slika 3.33 Generirana energija u protutaktnom načinu rada (10 kHz, 'hladilo #2', 60s): a) pojedinačni spoj; b) toplinsko serijski spoj	81
Slika 3.34 Generirana energija u protutaktnom načinu rada (10 kHz, 'hladilo #2', 120s): a) pojedinačni spoj; b) toplinsko serijski spoj	82
Slika 3.35 Generirana energija u protutaktnom načinu rada (10 kHz, 'hladilo #2', maksimalni gradijent): a) pojedinačni spoj; b) toplinsko serijski spoj	83
Slika 3.36 Valni oblici ulaznog i izlaznog signala pojačala pri frekvenciji od 10 kHz ...	84
Slika 3.37 Valni oblici ulaznog i izlaznog signala pojačala: a) pri 60 Hz; b) pri 74.6 kHz	85
Slika 3.38 Pojedinačni spoj u taktom načinu rada (500 Hz, 'hladilo #2'): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent	85
Slika 3.39 Generirana energija u taktom načinu rada pojedinačnog spoja (500 Hz, 'hladilo #2')	86
Slika 3.40 Pojedinačni spoj u taktom načinu rada (1 kHz, 'hladilo #2'): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent	86
Slika 3.41 Generirana energija u taktom načinu rada pojedinačnog spoja (1 kHz, 'hladilo #2')	87
Slika 3.42 Pojedinačni spoj u taktom načinu rada (5 kHz, 'hladilo #2'): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent	87
Slika 3.43 Generirana energija u taktom načinu rada pojedinačnog spoja (5 kHz, 'hladilo #2')	88
Slika 3.44 Pojedinačni spoj u taktom načinu rada (20 kHz, 'hladilo #2'): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent	88

Slika 3.45 Generirana energija u taktnom načinu rada pojedinačnog spoja (20 kHz, 'hladilo #2')	89
Slika 3.46 Hladila različitih toplinskih otpora: 'hladilo #1', 'hladilo #2' i 'hladilo #3'.....	90
Slika 3.47 Pojedinačni spoj u taktnom načinu rada ('hladilo #1'): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent	91
Slika 3.48 Generirana energija u taktnom načinu rada pojedinačnog spoja ('hladilo #1')	91
Slika 3.49 Toplinsko serijski spoj u taktnom načinu rada ('hladilo #1'): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent	92
Slika 3.50 Energija u taktnom načinu rada toplinsko serijskog spoja ('hladilo #1')	92
Slika 3.51 Pojedinačni spoj u taktnom načinu rada ('hladilo #3'): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent	93
Slika 3.52 Generirana energija u taktnom načinu rada pojedinačnog spoja ('hladilo #3')	93
Slika 3.53 Toplinsko serijski spoj u taktnom načinu rada ('hladilo #3'): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent	94
Slika 3.54 Energija u taktnom načinu rada toplinsko serijskog spoja ('hladilo #3')	94
Slika 4.1 Vrijeme povrata investicije	99

Popis kratica

A	površina poprečnog presjeka (mm ² , cm ²)
Al ₂ O ₃	aluminijev oksid
Bi ₂ Te ₃	bizmutov telurid
cm	centimetar
cm ²	kvadratni centimetar
D	dužina trajanja radnog ciklusa (%; engl. <i>Duty Cycle</i>)
DC-DC	pretvarač istosmjernog napona
E	ukupna električna energija generirana na potrošaču ili potrošačima (mWh)
F	faktor popunjenosti (engl. <i>Fill Factor</i>)
Hz	herc
I	jakost električne struje (A)
K	kelvin
KS	kratki spoj
kg	kilogram
KP	konstantni parametri
l _p , l _n	visina poluvodiča p i n-tipa (cm)
m	metar; omjer otpora potrošača i unutarnjeg električnog otpora
mA	miliamper
min	minuta
mm	milimetar
mm ²	kvadratni milimetar
MPPT	praćenje točke maksimalne snage (engl. <i>Maximum Power Point Tracking</i>)
mWh	milivat sat
N	broj termoparova u termoelektričnom generatoru
OK	otvoreni krug
P	električna snaga (W)
PP	promjenjivi parametri
PS	pojedinačno spojeni termoelektrični generator
PWM	kontrolni signal s promjenjivom širinom impulsa (engl. <i>Pulse Width Modulation</i>)
Q	toplinska energija (W)
R	električni otpor (Ω)
RF	radiofrekvencijski (engl. <i>Radio Frequency</i>)
s	sekunda

T	temperatura (K, °C)
T _{AVG}	srednji iznos temperature na krajevima termoparova (K)
T _H , T _{HLADNO}	temperatura hladne strane termoelektričnog generatora (K, °C)
T _T , T _{TOPLO}	temperatura tople strane termoelektričnog generatora (K, °C)
TEC	termoelektrični hladnjak (engl. <i>Thermoelectric Cooler</i>)
TEG	termoelektrični generator (engl. <i>Thermoelectric Generator</i>)
TS	toplinsko serijski spoj termoelektričnih generatora
U	napon (V)
V	volt
W	vat
z	faktor izvrsnosti materijala (K ⁻¹ , engl. <i>Figure of Merit</i>)
α	apsolutni iznos Seebeckovog koeficijenta materijala (μV/K)
η	efikasnost
κ	koeficijent toplinske vodljivosti materijala (W/(mK))
λ	toplinska vodljivost (W/(mK))
π	apsolutni iznos Peltierovog koeficijenta materijala (V)
ρ	električna otpornost (Ωcm)
σ	električna vodljivost (S/cm)
τ	apsolutni iznos Thomsonovog koeficijenta materijala (μV/K)
Ω	om
ΔT	temperaturni gradijent (K, °C)
ΔU	razlika potencijala (V)
°C	stupanj Celzijev
1-D	jednodimenzionalno
3-D	trodimenzionalno
€	euro
\$	dolar

1. UVOD

1.1. Motivacija

Pojačala su jedna od najčešće korištenih sklopova u elektronici, koja izvršavaju čitav niz funkcija u sustavima gdje se primjenjuju. Ovisno o dizajnu i primjeni, pojačala rade s određenim iznosom efikasnosti, što za posljedicu ima razvijanje otpadne energije, najčešće u obliku topline na izlaznim tranzistorima. Za pojačala snage koja rade s velikim iznosima izlazne snage i niskom efikasnosti, iznosi otpadne toplinske energije mogu biti značajni. Motivacija kojom se pristupilo istraživanju i izradi ove disertacije je ustanoviti na koji se način navedena otpadna energija može najefikasnije prikupiti i pretvoriti u električnu energiju. Početna ideja je povratak energije u krug napajanja pojačala, čime bi povećali efikasnost sustava s pojačalom snage u AB-kласi.

Audio pojačalo snage u AB-kласi zbog svog dobrog odnosa između kvalitete reprodukcije zvuka i efikasnosti, je i dalje najkorištenija klasa pojačala u audio sustavima visokih performansi. Navedenu klasu karakteriziraju smanjena prijelazna izobličenja uslijed protutaktnog načina rada izlaznih tranzistora u odnosu na pojačalo snage u B-kласi, dok je istovremeno iznos efikasnosti povećan u odnosu na pojačala snage u A-kласi. U audio sustavima je česta upotreba i pojačala u D-kласi, koje ima povećan iznos efikasnosti u odnosu na AB-kласu, međutim po pitanju kvalitete reprodukcije zvuka, AB-klasa je inferiorna. Iako je u odnosu na A i B-kласu, efikasnost pojačala u AB-kласi povećana, to je i dalje njen glavni nedostatak. Zbog velikih iznosa otpadne toplinske energije koju disipiraju izlazni tranzistori, najčešće postoji potreba za korištenjem hladila velikih dimenzija, što pak znatno podiže cijenu takvog sustava.

Zbog niza prednosti koje posjeduju u svojoj primjeni i radu, u odnosu na ostale toplinske strojeve, primjena termoelektričnih generatora, TEG-ova (engl. *Thermoelectric Generators*), se pokazala kao najprikladnija metoda za prikupljanje navedene otpadne toplinske energije. Proces termoelektrične pretvorbe se odvija preko Seebeckovog efekta [1]. Osnovna građevna jedinica generatora je termopar, koji na svojim krajevima generira napon, ako se oni nalaze na različitim temperaturama. U svrhu generiranja većih iznosa napona, potrebno je električno spojiti veći broj termoparova u serijski spoj. Prednosti primjene termoelektričnih generatora u odnosu na ostale toplinske spojeve je njihova direktna pretvorba toplinske energije u električnu, trenutčan odziv na toplinsku pobudu, ne sadrže pokretne dijelove niti radni plin, što ih čini nečujnim u radu i ne zahtijevaju servisiranje. Karakterizira ih dug radni vijek i mogućnost jednostavne adaptacije na

sustav gdje se primjenjuju, jer su dostupni u različitim dimenzijama. Nedostatak koji ponajviše ograničava njihovu primjenu je nizak iznos efikasnosti termoelektrične pretvorbe.

Nakon proučavanja dostupne literature, zaključak je da problematika primjene generatora na pojačalima snage nije u potpunosti istraženo područje. Literatura se svodi na svega nekoliko radova primjene generatora na RF (engl. *Radio Frequency*) pojačalima snage, ali ne i na audio pojačalima snage. Efikasnost termoelektrične pretvorbe u velikoj mjeri ovisi o materijalu izrade termoparova, ali i o dizajnu cijelog sustava, što pak nije dovoljno istraženo u dostupnoj literaturi. Korišteni simulacijski modeli u literaturi najčešće uzimaju u obzir niz pojednostavljenja, što pak utječe na ostvarene rezultate, a analiza isplativosti primjene generatora na pojačalima snage nije napravljena. Osim navedenog, u disertaciji će biti predstavljena i teorijska analiza protutaktnog načina rada termoelektričnih generatora, a čija bi primjena omogućila regulaciju temperature na izlaznim tranzistorima i ujedno bi se ostvario veći iznos efikasnosti termoelektrične pretvorbe.

1.2. Pregled strukture disertacije

Disertacija se sastoji od ukupno 5 poglavlja, uključujući uvod i zaključak. Nakon iznesene motivacije istraživanja, predstavljen je pregled dosadašnjeg istraživanja, te su navedene hipoteze i očekivani znanstveni doprinosi disertacije. Sami pregled dosadašnjeg istraživanja se sastoji od tri potpoglavlja, naziva „Modeliranje sustava s TEG-ovima“, „Primjena TEG-ova na pojačalima snage“ i „Isplativost primjene TEG-ova“.

Drugo poglavlje naziva „Toplinsko-električni model termoelektričnog sustava“ se sastoji od tri potpoglavlja. Prvo su prikazane osnovne informacije o programskom okruženju Simscape-u i komponentama (blokovima) koje će se koristiti pri izradi modela termoelektričnog sustava. Zatim je prikazan toplinsko-električni model sustava, koji kao ulazni parametar uzima disipiranu snagu na izlaznim tranzistorima pojačala snage. Korištenjem modela moguće je razmotriti kako pojedina komponenta sustava utječe na iznose temperatura i generiranih snaga termoelektričnih generatora. Simulacijom modela prikazani su određeni rezultati koji su dali smjernice za sljedeću fazu istraživanja. Na kraju poglavlja navedena su ograničenja korištenog modela.

Treće poglavlje naziva „Laboratorijski prototip termoelektričnog sustava“ je podijeljeno u dva potpoglavlja. Prvo je predstavljena eksperimentalna postavka na kojoj su se vršila mjerenja, a koje se u osnovu sastoji od pojačala snage u AB-klasi, tj. izlaznih tranzistora, termoelektričnog

generatora i hladila. Na uspostavljenoj postavci izvršena su mjerenja, te je napravljena usporedba rezultata ostvarenih korištenjem različitih toplinskih spojeva i modela generatora. Potpoglavlje završava usporedbom eksperimentalno izmjerenih rezultata i rezultata ostvarenih simulacijom modela. U drugom potpoglavlju predstavljen je protutaktni način rada generatora, te su navedeni prednosti i nedostatci korištenja takvog načina rada. Također, u potpoglavlju je analiziran utjecaj različitih vremena prebacivanja, frekvencija ulaznog signala i hladila različitih toplinskih otpora na iznos generirane energije termoelektričnog generatora i efikasnost termoelektrične pretvorbe.

Četvrto poglavlje naziva „Procjena povećanja stupnja efikasnosti sustava“ sadrži procjenu povećanja stupnja efikasnosti sustava s pojačalom u postotnim poenima, na osnovu izmjerenih rezultata na uspostavljenoj eksperimentalnoj postavci. Poglavlje završava analizom isplativosti primjene termoelektričnih generatora na pojačalu snage u AB-klasi.

Posljednje poglavlje sadrži zaključak na temelju napravljenog istraživanja u disertaciji, a zatim je prikazan pregled korištene literature, prilozi disertacije i životopis doktoranda, posebno na hrvatskom i engleskom jeziku.

1.3. Pregled dosadašnjeg istraživanja

Ovo potpoglavlje je koncipirano na način da prvo sadrži osnovne informacije o pojavama koje se odvijaju u termoelektričnom efektu, a zatim i o konstrukciji termoelektričnog generatora. Efikasnost termoelektrične pretvorbe generatora najviše ovisi o materijalu izrade termoparova, ali i o dizajnu cjelokupnog sustava. Problematika povezana s utjecajem oba navedena faktora će biti prikazana u nastavku. Područja primjene generatora moguće je podijeliti ovisno da li su na raspolaganju manji ili veći iznosi toplinske energije, pa će u nastavku potpoglavlja biti navedena samo najčešća područja primjene u oba slučaja.

Potpoglavlje je dodatno podijeljeno na tri dijela. Prvi dio se odnosi na pregled literature iz modeliranja sustava s termoelektričnim generatorima, bilo da je riječ o toplinskom, električnom ili pak integriranom modelu cjelokupnog sustava. U nastavku će zatim biti predstavljen pregled različitih pristupa modeliranju, te ograničenja najčešće korištenih modela iz literature. Drugim dijelom potpoglavlja predstavljena je primjena termoelektričnih generatora na pojačalima snage. Iako u literaturi nema mnogo radova u tom području, svi oni će biti prikazani u nastavku teksta. Treći dio potpoglavlja sadrži pregled literature iz područja isplativosti primjene termoelektričnih generatora u raznim sustavima.

Termoelektrični efekt je pojava u kojoj se vrši pretvorba toplinske energije u električnu ili obratno. Mehanizmi koji se odvijaju u takvom efektu su poznati stoljećima i samu pretvorbu je moguće objasniti kroz tri različita efekta: Seebeckov, Peltierov i Thomsonov efekt [2-4].

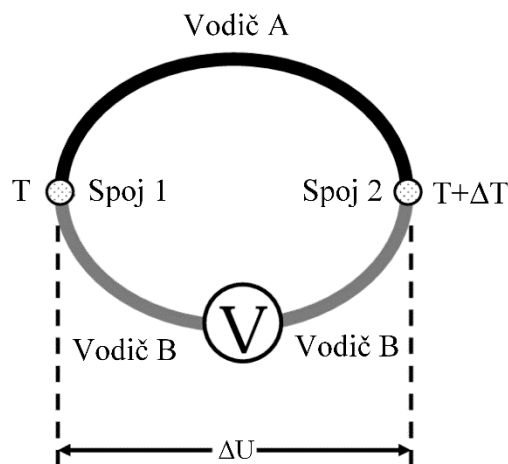
Prvi efekt povezan sa termoelektričnim efektom otkrio je njemački fizičar Thomas Johann Seebeck 1821. godine, koji je zapazio kada se točke spoja dva različita vodiča drže na različitim temperaturama, dolazi do otklona magnetske igle u blizini vodiča. Početni zaključci su bili kako je riječ o nekoj vrsti magnetskog efekta, ali danas taj efekt objašnjavamo generiranjem napona i protjecanjem struje u zatvorenoj petlji dva različita vodiča (slika 1.1). Iznos generiranog napona je definiran izrazom:

$$\Delta U = (\alpha_A - \alpha_B)\Delta T, \quad (1.1)$$

gdje su:

α_A, α_B – apsolutni iznosi Seebeckovog koeficijenta spojenih vodiča ($\mu\text{V/K}$),

ΔT – temperaturni gradijent (razlika) na spojevima vodiča (K).



Slika 1.1 Seebeckov efekt u zatvorenoj petlji različitih vodiča [2]

Seebeckov koeficijent je intrinzično svojstvo svakog vodiča. Za generiranje napona nije nužno da se radi o spoju dva različita vodiča, efekt se odvija i u samostalnom vodiču, pod uvjetom da mu se krajevi nalaze na različitim temperaturama. Za vodiče je iznos koeficijenta temperaturno neovisna veličina koja iznosi svega nekoliko $\mu\text{V/K}$, dok je za poluvodiče to temperaturno ovisna veličina, te ovisno o gustoći primjesa poprima vrijednosti reda veličine nekoliko stotina $\mu\text{V/K}$.

Francuski fizičar Jean Charles Peltier je u svom eksperimentu 1834. godine pokazao da će jedan spoj dva različita vodiča otpustiti, a drugi spoj primiti toplinsku energiju, ako su vodiči

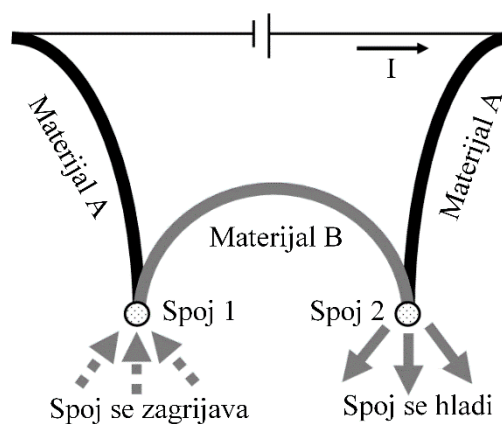
spojeni na vanjski izvor napona i ako kroz njih protječe struja (slika 1.2). Peltier nije u potpunosti mogao objasniti nastalu pojavu, već mu je u tome pomogao Heinrich Lenz četiri godine kasnije. Lenz je ustanovio da je Peltierov efekt reverzibilan, odnosno da se spoj koji se zagrijavao, uslijed promjene polariteta struje, sada hladi. Iznos razmijenjene toplinske energije je definiran izrazom:

$$Q_P = (\pi_A - \pi_B)I, \quad (1.2)$$

gdje su:

π_A, π_B – apsolutni iznosi Peltierovih koeficijenata spojenih vodiča (V),

I – struja protjecana zatvorenom petljom.



Slika 1.2 Peltierov efekt u zatvorenoj petlji različitih materijala [2]

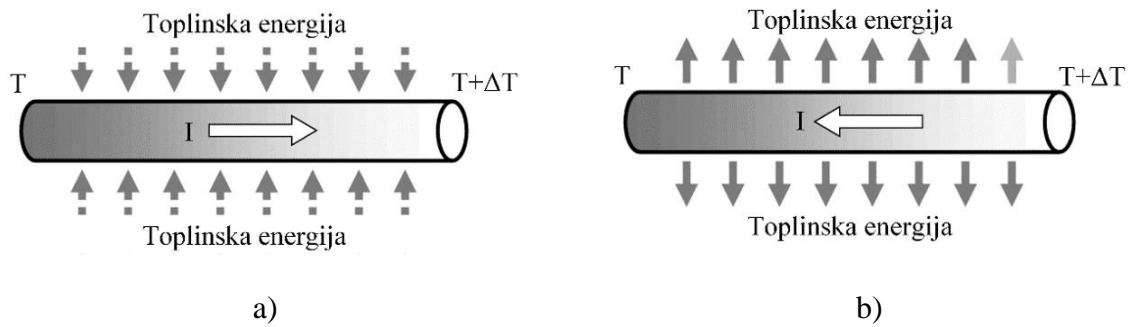
Poveznicu između Seebeckovog i Peltierovog efekta je napravio engleski fizičar William Thomson (Lord Kelvin) 1851. godine, dokazavši postojanje još jednog reverzibilnog mehanizma u termoelektričnom efektu. Naime, on je ustanovio da dolazi do otpuštanja ili primanja toplinske energije duž homogenog vodiča izloženog temperaturnom gradijentu, kroz kojeg protječe struja (slika 1.3). Prethodna dva efekta smo promatrali kroz razliku koeficijenata spojenih materijala, međutim u sljedećem izrazu toplinske energije, Thomsonov koeficijent je svojstvo samostalnog vodiča. Ako je smjer struje u vodiču jednak smjeru porasta temperature, tada će se vodič dodatno zagrijati, a ako je smjer struje suprotan, vodič će otpustiti energiju u okolinu. Iznos razmijenjene toplinske energije duž vodiča predstavljen je izrazom:

$$Q_T = \tau I \Delta T, \quad (1.3)$$

gdje je:

τ – apsolutni iznos Thomsonovog koeficijenta vodiča ($\mu\text{V/K}$),

ΔT – temperaturni gradijent (razlika) na krajevima vodiča (K).



Slika 1.3 Thomsonov efekt u samostalnom vodiču: a) apsorpcija toplinske energije; b) otpuštanje toplinske energije [2]

Zagrijavanje uslijed Thomsonovog efekta je u modelima najčešće zanemareno, iz razloga što je iznos tog zagrijavanja znatno manji u odnosu na Jouleovo zagrijavanja, pogotovo za male iznose temperaturnog gradijenta. Iznos generirane topline uslijed protjecanja struje I vodičem naziva se Jouleovo zagrijavanje i definirano je izrazom:

$$Q_J = I^2 R, \quad (1.4)$$

gdje je R električni otpor vodiča (Ω).

Osim otkrića Thomsonovog efekta, Thomson je povezoa Seebeckov i Peltierov koeficijent jednadžbom 1.5, te Thomsonov i Seebeckov koeficijent jednadžbom 1.6:

$$\pi_{AB} = \alpha_{AB} T, \quad (1.5)$$

$$\tau = T_{AVG} \frac{d\alpha}{dT}, \quad (1.6)$$

gdje su:

π_{AB} – relativan iznos Peltierovog koeficijenta na spoju vodiča ($\pi_A - \pi_B$),

α_{AB} – relativan iznos Seebeckovog koeficijenta na spoju vodiča ($\alpha_A - \alpha_B$),

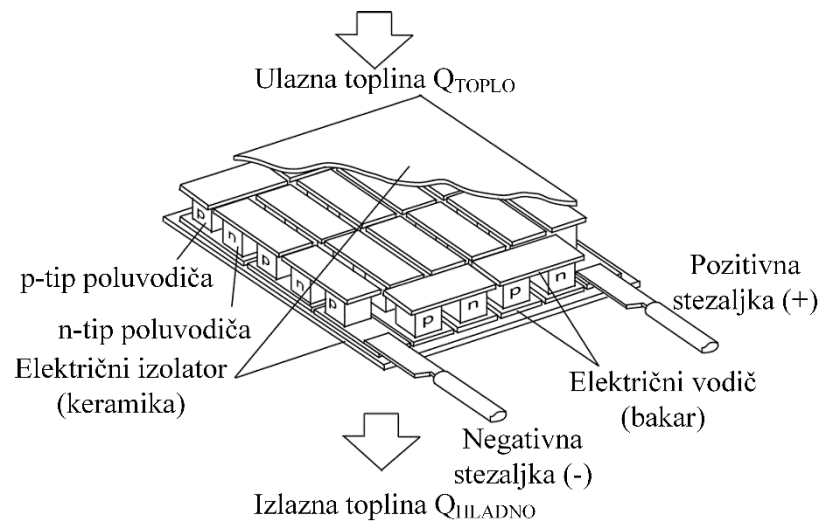
T – temperatura spoja vodiča (K),

T_{AVG} – srednji iznos temperature na krajevima vodiča (K).

Uvrštavanjem izraza (1.5) u (1.2), dobije se izraz za Peltierovo zagrijavanje preko Seebeckovog koeficijenta:

$$Q_P = \alpha_{AB} I T. \quad (1.7)$$

Termoelektrični generatori su poluvodički uređaji koji vrše direktnu pretvorbu toplinske energije u električnu, na osnovu Seebeckovog efekta. S obzirom da termopar generira samo mali iznos električnog napona u prisustvu temperaturne razlike na svojim krajevima, termoelektrični generator se sastoji od velikog broja termoparova električno spojenih serijski, dok su toplinski spojeni paralelno. Izgled i unutarnja struktura jednog takvog generatora je prikazana na slici 1.4.



Slika 1.4 Unutarnja struktura TEG-a [5]

Poluvodički materijali su pokazali najbolja svojstva u primjeni u termoelektričnom području, pa se upravo oni najčešće koriste za izradu termoparova. Kako bi termoparovi za ostvareni gradijent na svojim krajevima generirali najveći iznos napona, termoparovi su napravljeni od poluvodiča s različitim tipovima primjese, n i p-tip poluvodiča. Negativni iznos Seebeckovog koeficijenta za poluvodič n-tipa pridonosi ukupnom povećanju relativnog Seebeckovog koeficijenta, a potom i napona na krajevima termopara, jednadžba (1.1). O izboru materijala izrade termoparova, kao i o svojstvima koja bi materijal trebao posjedovati da bi bio dobar u ovom području, više govora će biti u nastavku ovog potpoglavlja. Kako bi se smanjila mogućnost oštećenja termoparova, a i kako bi ih međusobno električno izolirali, termoparovi su smješteni između supstrata (najčešće izrađenih od keramike). Materijal supstrata bi trebao posjedovati dobra mehanička svojstva i biti dobar provodnik topline, dok bi električno trebao predstavljati izolator [6, 7].

S obzirom da se termoelektrični generator sastoji od velikog broja termoparova, tako je na osnovu dosadašnje analize termoparova moguće definirati sve parametre i za termoelektrični generator. Izraz (1.8) za unutarnji električni otpor generatora R_{TEG} i izraz (1.9) za iznos toplinske vodljivosti generatora K_{TEG} u obzir uzimaju isključivo doprinose termoparova. Utjecaj i iznosi

ostalnih komponenti koje u manjoj mjeri utječu na navedene vrijednosti nisu uzete u obzir. Tako npr. nije uzet u obzir doprinos toplinskog otpora keramičkih supstrata ili pak električnog otpora bakrenih pločica koje spajaju termoparove, na ukupan iznos toplinske vodljivosti ili unutarnjeg električnog otpora. Unutarnji električni otpor i toplinska vodljivost termoelektričnog generatora definirani su izrazima:

$$R_{TEG} = NR_{pn} = N \left(\rho_p \frac{l_p}{A_p} + \rho_n \frac{l_n}{A_n} \right), \quad (1.8)$$

$$K_{TEG} = NK_{pn} = \left(\kappa_p \frac{A_p}{l_p} + \kappa_n \frac{A_n}{l_n} \right), \quad (1.9)$$

gdje je:

N – ukupan broj termoparova u termoelektričnom generatoru,

R_{pn} – električni otpor pojedinog termopara,

K_{pn} – toplinska vodljivost pojedinog termopara,

ρ_p i ρ_n – električna otpornost p i n-tipa poluvodiča (Ωcm),

l_p i l_n – visina p i n-tipa poluvodiča (cm),

A_p i A_n – površina poprečnog presjeka p i n-tipa poluvodiča (cm^2),

κ_p i κ_n – koeficijent toplinske vodljivosti p i n-tipa poluvodiča ($\text{W}/(\text{mK})$).

Kada je na krajevima termoelektričnog generatora uspostavljena razlika temperature, generator uspostavlja napon otvorenog kruga jednak:

$$U_{OK} = N(\alpha_p - \alpha_n)(T_{TOPLO} - T_{HLADNO}), \quad (1.10)$$

gdje su:

T_{TOPLO} – temperatura toplije strane generatora (K ili $^{\circ}\text{C}$),

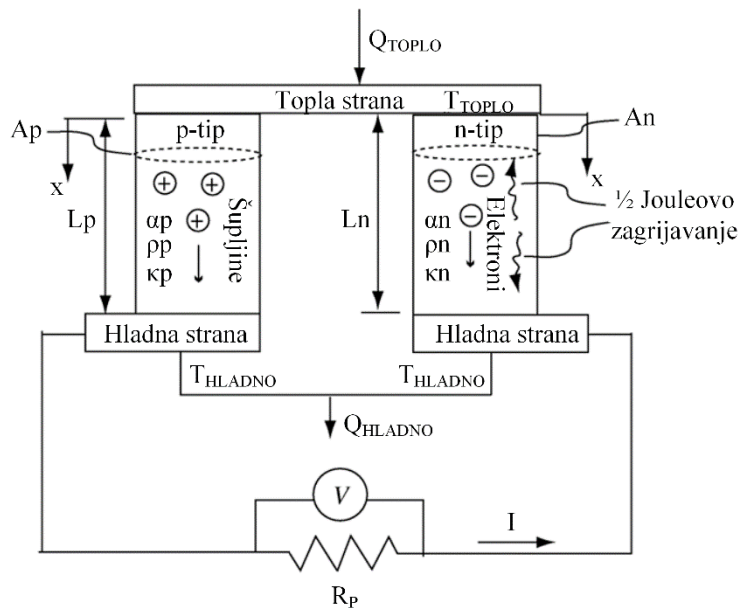
T_{HLADNO} – temperatura hladnije strane generatora (K ili $^{\circ}\text{C}$).

Diferencijalna jednadžba vođenja topline kroz poluvodič protjecan strujom, uzimajući u obzir spomenute termoelektrične efekte, definirana je izrazom:

$$\vec{\nabla}(\kappa \vec{\nabla} T) + j^2 \rho - T \frac{d\alpha}{dT} j \vec{\nabla} T = 0, \quad (1.11)$$

gdje je j gustoća električne struje (A/cm^2).

Prvi član u jednadžbi (1.11) se odnosi na širenje topline kondukcijom u smjeru padajućeg iznosa temperature, drugi član predstavlja Jouleovo zagrijavanje termopara, dok je treći član posljedica Thomsonovog efekta, čiji je iznos jednak nuli za slučaj upotrebe temperaturno neovisnog iznosa Seebeckovog koeficijenta. Na osnovu jednadžbe (1.11) primjenjive na termopar prikazan na slici 1.5, uz određene pretpostavke, mogu se odrediti ukupni iznosi ulazne i izlazne toplinske energije na krajevima termoelektričnog generatora. Pretpostavke su da je riječ o stacionarnom stanju i da se toplina širi samo u jednoj dimenziji (1-D). Istovremeno, pretpostavka je da je vođenje topline radijacijom i konvekcijom, kao i utjecaj kontaktnih električnih i toplinskih otpora zanemareno, te da je korišten temperaturno neovisan iznos Seebeckovog koeficijenta [5].



Slika 1.5 Presjek termopara u TEG-u [5]

Jednadžba 1.11 se uz navedene pretpostavke svede na:

$$\frac{d}{dx} \left(\kappa A \frac{dT}{dx} \right) + \frac{I^2 \rho}{A} = 0. \quad (1.12)$$

Integracijom i primjenom graničnih uvjeta $T_{x=0} = T_{TOPLO}$ i $T_{x=L} = T_{HLADNO}$, izraz glasi:

$$\frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = \frac{I^2 \rho L}{2A^2 \kappa} - \frac{T_{TOPLO} - T_{HLADNO}}{L}. \quad (1.13)$$

Prema Thomsonu i Onsageru, vektor gustoće toplinskog toka je definiran izrazom:

$$\vec{q} = \alpha T \vec{j} - \kappa \vec{\nabla} T. \quad (1.14)$$

Ako navedenu jednadžbu primijenimo na zadani p i n-tip poluvodiča, dobijemo izraz za ukupan iznos toplinske energije koji ulazi na toploj strani termopara:

$$Q_{TOPLO} = (\alpha_p - \alpha_n)T_{TOPLO}I + (-\kappa A \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0})_p + (-\kappa A \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0})_n. \quad (1.15)$$

Nakon uvrštavanja izraza 1.13 u 1.15, dobije se iznos toplinske energije na toploj strani:

$$Q_{TOPLO} = (\alpha_p - \alpha_n)T_{TOPLO}I - \frac{1}{2}I^2 \left(\frac{\rho_p L_p}{A_p} + \frac{\rho_n L_n}{A_n} \right) + \left(\frac{\kappa_p A_p}{L_p} + \frac{\kappa_n A_n}{L_n} \right) (T_{TOPLO} - T_{HLADNO}). \quad (1.16)$$

Ekvivalentno izračunu ulazne toplinske energije, moguće je odrediti izraz za toplinsku energiju na hladnijem kraju termopara (izlaznu toplinsku energiju). Ako se pak termoelektrični generator sastoji od većeg broja termoparova, dobivene izraze je potrebno pomnožiti s njihovim ukupnim brojem, što je u izrazu (1.17) i (1.18) označeno slovom N . Predstavljeni izrazi ulazne i izlazne toplinske energije se nazivaju idealnim jednadžbama i često se koriste kod modeliranja [8-10].

$$Q_{TOPLO} = N \left[\alpha_{pn} T_{TOPLO} I - \frac{1}{2} I^2 R_{pn} + K_{pn} (T_{TOPLO} - T_{HLADNO}) \right], \quad (1.17)$$

$$Q_{HLADNO} = N \left[\alpha_{pn} T_{HLADNO} I + \frac{1}{2} I^2 R_{pn} + K_{pn} (T_{TOPLO} - T_{HLADNO}) \right]. \quad (1.18)$$

Prema zakonu o očuvanju energije, snaga generirana na izlaznim stezaljkama termoelektričnog generatora se može dobiti kao razlika ulazne i izlazne toplinske energije:

$$P_{Rp} = Q_{TOPLO} - Q_{HLADNO} = N \left[\alpha_{pn} I (T_{TOPLO} - T_{HLADNO}) - I^2 R_{pn} \right]. \quad (1.19)$$

Izlaznu snagu je moguće dobiti na osnovu poznate vrijednosti otpora potrošača R_p :

$$P_{Rp} = NI^2 R_p. \quad (1.20)$$

Izjednačavanjem izraza (1.19) i (1.20), te uvrštavanjem u izraz za napon na otporniku R_p , dobije se iznos izlaznog napona generiranog na potrošaču:

$$U_{Rp} = NIR_p = N\alpha_{pn}(T_{TOPLO} - T_{HLADNO}) - IR_{pn}. \quad (1.21)$$

Gornja granica efikasnosti termoelektrične pretvorbe generatora je određena s efikasnosti Carnotovog kružnog procesa. Teorija koja stoji iza navedenog procesa je da svaki toplinski stroj prima toplinsku energiju iz spremnika više temperature, te da samo dio energije pretvara u rad, dok ostatak topline bezuvjetno predaje spremniku niže temperature u sustavu. Računanje iznosa

efikasnosti pretvorbe termoelektričnog generatora je složeno, ali najviše ovisi o materijalu izrade termoparova, a zatim i o ostvarenom temperaturnom gradijentu na krajevima termoparova:

$$\eta = \frac{P_{RP}}{Q_{TOPLO}} = \frac{\Delta T}{T_{TOPLO}} \cdot \frac{\sqrt{1 + zT_{AVG}} - 1}{\sqrt{1 + zT_{AVG}} + \frac{T_{HLADNO}}{T_{TOPLO}}}, \quad (1.22)$$

gdje je z faktor izvrsnosti materijala (K^{-1}), čiji iznos određuje koliko se možemo približiti gornjoj granici efikasnosti pretvorbe. Autori radova u literaturi često isprepleću pojmove malog i velikog slova z , gdje se kod korištenja malog slova misli na faktor izvrsnosti materijala, dok veliko slovo označava faktor izvrsnosti termoelektričnog generatora [11, 12].

S obzirom da je mjerna jedinica faktora izvrsnosti recipročna jedinici temperature, tako se u praksi češće upotrebljava bezdimenzionalan parametar zT_{AVG} :

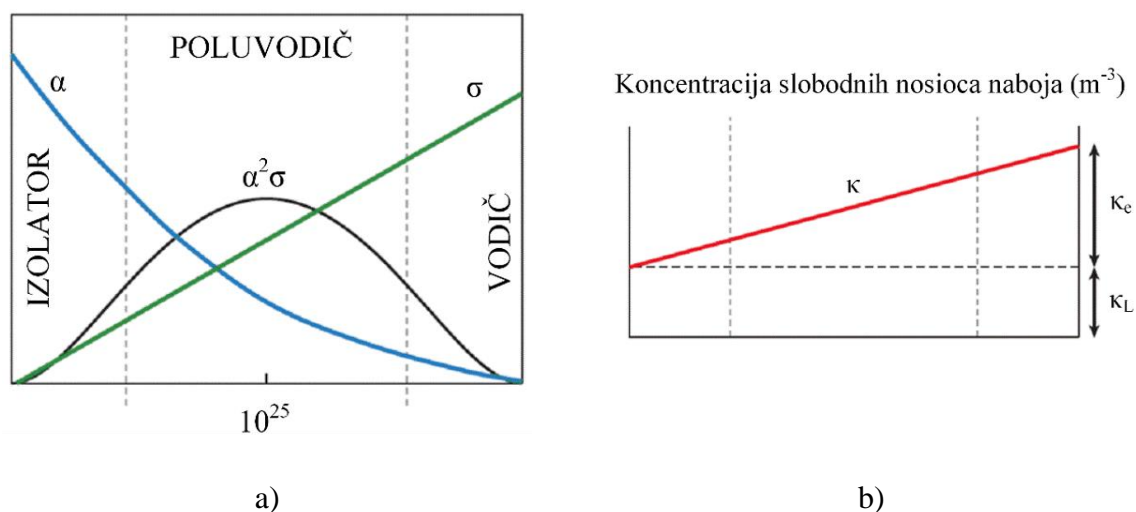
$$zT_{AVG} = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa} T_{AVG} \quad (1.23)$$

Da bi neki materijal bio pogodan za upotrebu u termoelektričnom području potrebno je da sadrži:

- što veći iznos Seebeckovog koeficijenta α , kako bi na izlaznim stezaljkama generirao što veći napon otvorenog kruga za ostvareni temperaturni gradijent.
- što veći iznos električne vodljivosti σ , kako bi Jouleovo zagrijavanje bilo minimalno.
- što manji iznos toplinske vodljivosti κ , kako bi povećali iznos temperaturnog gradijenta na krajevima termoelektričnog generatora.

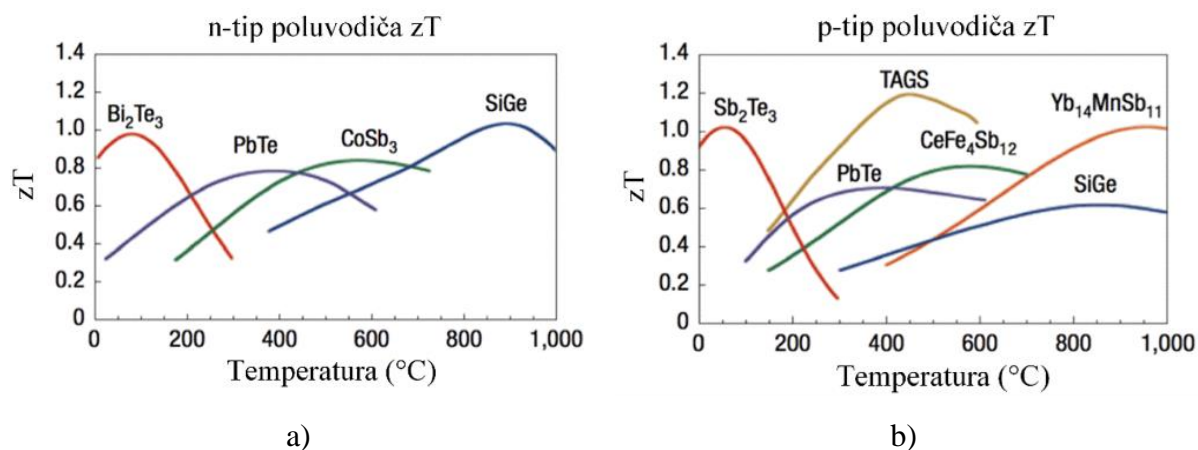
Brojnik faktora izvrsnosti naziva se faktor snage (engl. *Power Factor*) i jednak je umnošku kvadrata Seebeckovog koeficijenta i električne vodljivosti. Na iznos faktora snage utječe razina Fermijeve energije u promatranom materijalu, odnosno koncentracija slobodnih nosioca naboja. Iznos faktora snage za izolatore, poluvodiče i vodiče je prikazan na slici 1.6a. Sa grafa je vidljivo da faktor snage, označen crnom linijom, doseže najveći iznos kod poluvodiča, pri koncentraciji slobodnih nosioca naboja od $\sim 10^{25} \text{cm}^{-3}$. Konkretni iznosi na lijevoj i desnoj vertikalnoj osi nisu prikazani iz razloga što oni ovise o točno određenom materijalu iz skupine vodiča, izolatora ili poluvodiča. Grafom se nastojalo prikazati samo relativni iznosi faktora snage za različite skupine materijala. Promatrajući desnu vertikalnu os grafa na slici 1.6b, vidljivo je da se kod poluvodiča toplinska vodljivost sastoji od dvije komponente, vodljivosti uzrokovane vibracijom u kristalnoj rešetki (κ_L) i komponente uzrokovane gibanjem slobodnih nosioca naboja (κ_e) [13]. S obzirom da je komponenta κ_e direktno povezana s električnom vodljivošću, materijal s velikim iznosom električne vodljivosti posjeduje i veliki iznos toplinske vodljivosti. S ciljem povećanja faktora

izvrsnosti materijala, istraživači se fokusiraju na kontrolu mehanizma raspršenja fonona, kako bi se smanjio toplinski doprinos kristalne rešetke ukupnoj toplinskoj vodljivosti.



Slika 1.6 Koeficijenti α , σ i λ za različite skupine materijala: a) iznos faktora snage; b) iznos toplinske vodljivosti u poluvodičima [13]

Bizmutove legure (Bi) u kombinaciji sa telurijem (Te), selenom (Se) ili antimonom (Sb) su među najčešće korištenim materijalima za izradu termoparova u temperaturnom rasponu do ~ 450 K (176.85°C), a faktor izvrsnosti im se kreće u rasponu od 0.8-1 [14-17]. Materijali izrade termoparova utemeljeni na legurama olova (Pb) se koriste u temperaturnom rasponu do ~ 850 K (576.85°C), a legure silicija (Si) i germanija (Ge) za temperaturni raspon do ~ 1300 K (1026.85°C) (slika 1.7). Generalno, materijal koji posjeduje faktor izvrsnosti iznad 1 i faktor snage iznad $10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-2}$ smatra se dobrim termoelektričnim materijalom [15]. U posljednja dva desetljeća nije ostvaren značajan napredak faktora izvrsnosti kod Bi_2Te_3 , pa se smatra da je ostvaren njegov maksimalan potencijal.



Slika 1.7 Iznosi faktora izvrsnosti u ovisnosti o temperaturi za: a) n-tip poluvodiča; b) p-tip poluvodiča [18]

Za pretvorbu toplinske energije u električnu koriste se različite vrste tehnologija, a koje pak možemo razvrstati u dvije kategorije. Prva kategorija uključuje toplinske strojeve koji rade na principu poznatih termodinamičkih kružnih procesa, poput Rankineovog ciklusa, organskog Rankineovog ciklusa, Kalininog ciklusa i slično. Strojevi koji rade na principu kružnih procesa pretvaraju toplinsku energiju u mehaničku, a zatim korištenjem generatora, mehanička energija se pretvara u električnu. Klasični Rankineov ciklus je najefikasniji način pretvorbe energije kada je temperatura izvora toplinske energije u rasponu od 340-370°C. Međutim, ako temperatura ne doseže navedene iznose, češća je upotreba organskog Rankineovog ciklusa, koji umjesto vode kao radnog fluida, koristi organski fluid relativno niske temperature isparavanja [19]. Složenost izvedbe ovakvih strojeva, koji zahtijevaju korištenje turbina, generatora i sl., ali i relativno niske temperature generirane kod pojačala snage, su razlozi zbog kojih navedeni strojevi nisu pogodni za primjenu na pojačalima.

Predstavnik druge kategorije toplinskih strojeva je termoelektrični generator. Nedostaci koji ponajviše ograničavaju njihovu širu primjenu su niski iznosi efikasnosti pretvorbe energije, te globalno slabija zastupljenost na tržištu, što implicira njihovu visoku cijenu. Termoelektrični generatori unatoč navedenim nedostacima sadrže i određene prednosti u primjeni [20]:

- Ne sadrže pokretne dijelove, niti radni plin, pa su nečujni i ne zahtijevaju održavanje.
- Za razliku od ostalih toplinskih strojeva vrše direktnu pretvorbu energije.
- Fizičkim dimenzijama su prilagodljivi raznim područjima primjene.
- Izuzetno su pouzdani, obično premašuju 100 000 sati neprekidnog rada.
- Ekološki su prihvatljivi jer ne stvaraju nusprodukt u pretvorbi.
- Rade bez vibracija, što je posebno važno za primjenu u mehanički osjetljivom okruženju.
- Imaju trenutačan električni odziv na toplinsku pobudu, reda veličine nanosekundi.
- Mogućnost korištenja u širokom temperaturnom rasponu.

Primjena termoelektričnih generatora se najčešće razvrstava u dvije kategorije, upotreba u sustavima gdje se generiraju veliki iznosi otpadne toplinske energije, te onima gdje se generiraju mali iznosi otpadne toplinske energije. Termoelektrični generatori u takvim okruženjima mogu generirati iznose električne snage u rasponu od μ W do kW. Pregled najčešćih područja primjene termoelektričnih generatora, u skladu s najnovijim spoznajama, prikazan je u [21-23].

1.3.1. Modeliranje sustava s TEG-ovima

Modeliranje sustava s termoelektričnim generatorom kao sastavnim dijelom ili pak samog generatora izdvojenog u zasebnu cjelinu, predstavlja izazov zbog niza faktora. To se prvenstveno odnosi na kreiranje dva različita modela, toplinskog i električnog, a koji su međusobno zavisni. Na osnovu temperaturnog gradijenta u toplinskom modelu, generira se napon otvorenog kruga i dođe do protjecanja struje u električnom modelu ukoliko je strujni krug zatvoren. Navedeni iznos struje pak ima utjecaj na ostvarene temperature u toplinskom modelu prema jednadžbama (1.17) i (1.18). Dodatan izazov kod modeliranja su i temperaturno ovisni koeficijenti, a koji utječu na iznose napona otvorenog kruga, unutarnjeg električnog otpora i toplinsku vodljivost generatora. U nastavku potpoglavlja će biti objašnjeno na koji način i u kojoj mjeri promjenjivi koeficijenti ovise o temperaturi i kako istraživači prilikom izrade modela pristupaju tom izazovu. Tehnička dokumentacija termoelektričnih generatora najčešće ne sadrži sve potrebne informacije za izradu detaljnijeg modela generatora. Ostali parametri sustava, poput koeficijenta toplinske vodljivosti, specifičnog toplinskog kapaciteta i sl., nisu uvijek jednoznačni i poznati za korištene materijale u sustavu, što pak dovodi do odstupanja rezultata simulacije u odnosu na izmjerene rezultate. U svrhu ostvarenja najvećeg iznosa temperaturnog gradijenta i generirane snage, sustav je potrebno toplinski i električno prilagoditi. Na kraju će biti prikazan pregled najčešće korištenih metoda za praćenje točke maksimalne snage, MPPT (engl. *Maximum Power Point Tracking*), i razmotriti će se utjecaj hladila različitih toplinskih otpora na ostvarene temperature i napone u sustavu.

1.3.1.1. Temperaturno ovisni koeficijenti TEG-a

Raspodjela temperature duž termopara izloženog temperaturnoj razlici je nelinearna, što za posljedicu ima poteškoće prilikom određivanja iznosa temperaturno ovisnih koeficijenata. Uz primjenu aproksimativnih metoda, mogu se pronaći rješenja nelinearne diferencijalne jednadžbe vođenja topline. Zajednički zaključak većine autora je da nema velikih odstupanja u rezultatima, bilo da se koristi nelinearna ili linearna raspodjela temperature duž termopara, posebno za male iznose temperaturnog gradijenta i generirane struje [24-26]. Zbog navedenog, većina istraživača pretpostavljaju linearnu raspodjelu temperature duž termopara ili pak koriste konstantne iznose temperaturno ovisnih koeficijenata.

Najčešći pristup problematici računanja temperaturno ovisnih koeficijenata je korištenjem njihovih konstantnih vrijednosti. Za poluvodič Bi_2Te_3 najčešće korišteni iznosa koeficijenata, za p i n-tip, su prikazani u tablici 1.1 [27-29]. Poznavanjem točnog broja i dimenzija termoparova, te ostvarenih temperatura na krajevima generatora, moguće je korištenjem jednadžbi (1.8-1.10) izračunati unutarnji električni otpor, toplinsku vodljivost i napon otvorenog kruga generatora.

Tablica 1.1 Konstantni iznosi koeficijenata materijala Bi_2Te_3

Bi_2Te_3	n-tip	p-tip
Seebeckov koeficijent (V/K)	$-195 \cdot 10^{-6}$	$230 \cdot 10^{-6}$
Koeficijent toplinske vodljivosti κ (W/(mK))	1.4	1.2
Električna otpornost ρ (Ωm)	$1.35 \cdot 10^{-5}$	$1.75 \cdot 10^{-5}$

Drugi pristup problematici računanja temperaturno ovisnih koeficijenata je s empirijskim izrazima dobivenih od proizvođača generatora. Tako su u jednadžbama (1.24-1.26) predstavljeni izrazi za računanje koeficijenata (za materijal Bi_2Te_3) od strane Melcor grupacije, specijalizirane za proizvode iz područja termoelektrične tehnologije [30]. Koeficijenti se računaju s obzirom na srednji iznos temperature na krajevima termopara:

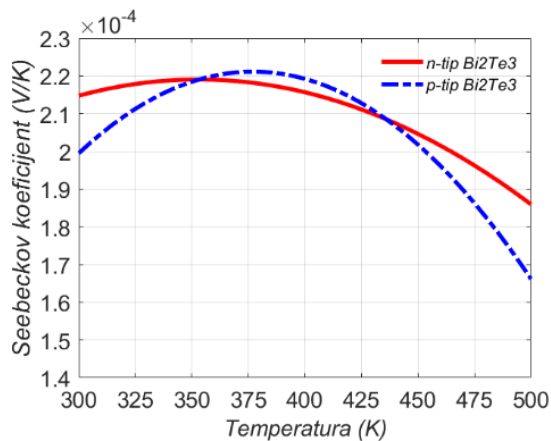
$$\alpha_p = -\alpha_n = (22224 + 930.6T_{AVG} - 0.9905T_{AVG}^2) \cdot 10^{-9} \frac{V}{K}, \quad (1.24)$$

$$\kappa_p = \kappa_n = (62605 - 277.7T_{AVG} + 0.4131T_{AVG}^2) \cdot 10^{-4} \frac{W}{mK}, \quad (1.25)$$

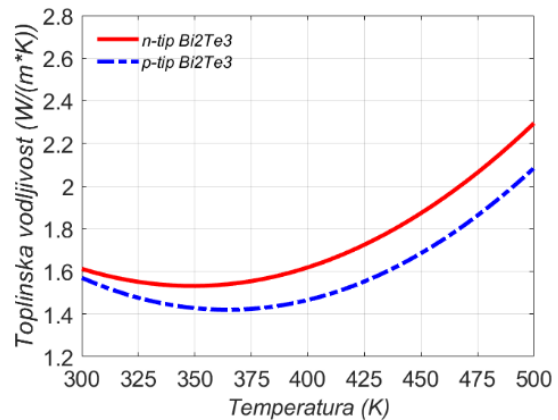
$$\rho_p = \rho_n = (5112 + 163.4T_{AVG} + 0.6279T_{AVG}^2) \cdot 10^{-10} \Omega m. \quad (1.26)$$

Navedeni način računanja koeficijenata je primjenjiv u svim situacijama gdje Jouleov efekt nije dominantan, a zbog dobrog poklapanja sa izmjerenim vrijednostima, često se koristi u literaturi prilikom modeliranja [31-35]. Empirijski izrazi za računanje Seebeckovog koeficijenta, ukupnog električnog i toplinskog otpora, predstavljen je i od strane Ferrotec grupacije [36]. Za razliku od Melcor-a, oni svoje izraze temelje na rezultatima ostvarenima sa TEC-om (engl. *Thermoelectric Cooler*). Izrazi predloženi od Melcor grupacije su pogodniji za računanje parametara generatora jer se temelje na materijalu izrade termopara Bi_2Te_3 , a ne na parametrima TEC-a.

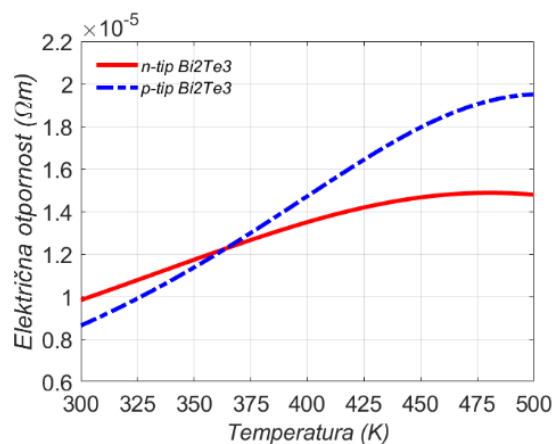
Temperaturnu ovisnost koeficijenata korištenog poluvodiča Bi_2Te_3 moguće je prikazati s polinomom višeg stupnja. Na osnovu koeficijenata polinoma za razmatrani poluvodič, mogu se grafički prikazati temperaturno ovisni koeficijenti u ovisnosti o temperaturi (slika 1.8) [37].



a)



b)



c)

Slika 1.8 Temperaturno promjenjivi koeficijenti za Bi_2Te_3 : a) apsolutni iznos Seebeckovih koeficijenata; b) koeficijent toplinske vodljivosti; c) električna otpornost

Na osnovu prikazanih grafova mogu se donijeti zaključci o iznosima temperaturno ovisnih koeficijenata uslijed porasta temperature. Koeficijenti polinoma na osnovu kojih su napravljeni grafovi često nisu jednoznačni u literaturi, iako je poluvodič isti (Bi_2Te_3). Do odstupanja u iznosu koeficijenata dolazi iz razloga što istraživači u različitim uvjetima i sa različitom tehnologijom određuju koeficijente polinoma, tj. mjerenje nije standardizirano [38-44].

Najpouzdanija metoda za računanje temperaturno ovisnih koeficijenata, uz uvjet linearne raspodjele temperature duž termopara, je korištenjem srednjeg iznosa koeficijenta za promatrani temperaturni interval. Izračun parametara generatora se provodi na osnovu izraza (1.27-1.29). Primjenom ove metode izračuna koeficijenata, u obzir je uzet i Thomsonov efekt, koji je ranije bio zanemaren. Parametri izračunati ovom metodom pokazuju dobra poklapanja s izmjerenim vrijednostima, pa se ova metoda računanja koeficijenata i parametara često koristi u literaturi.

$$U_{OK} = N \left(\int_{T_{HLADNO}}^{T_{TOPLO}} \alpha_p dT \right) - N \left(\int_{T_{HLADNO}}^{T_{TOPLO}} \alpha_n dT \right) \quad (1.27)$$

$$K_{TEG} = N \left(\int_{T_{HLADNO}}^{T_{TOPLO}} \kappa_n dt \right) \frac{1}{\Delta T} \frac{A_n}{L} + N \left(\int_{T_{HLADNO}}^{T_{TOPLO}} \kappa_p dt \right) \frac{1}{\Delta T} \frac{A_n}{L} \quad (1.28)$$

$$R_{TEG} = N \left(\int_{T_{HLADNO}}^{T_{TOPLO}} \rho_n dt \right) \frac{1}{\Delta T} \frac{L}{A_n} + N \left(\int_{T_{HLADNO}}^{T_{TOPLO}} \rho_p dt \right) \frac{1}{\Delta T} \frac{L}{A_p} \quad (1.29)$$

Autori su u [45] nelinearnu diferencijalnu jednadžbu vođenja topline sveli na integralnu, a zatim su na osnovu dobivenih rješenja izračunali parametre generatora. Izračunati parametri su zatim uspoređeni sa iznosima dobivenim korištenjem drugih metoda. Analiza sadrži usporedbu sa pet drugih metoda računanja koeficijenata, redom su to: konstantni iznosi koeficijenata, koeficijenti dobiveni na osnovu srednje temperature na krajevima generatora, izračunom srednjih vrijednosti koeficijenata primjenom integrala u razmatranom intervalu, te koeficijentima izračunatim preko linearnih i kvadratnih aproksimacija rješenja jednadžbe vođenja topline. Autori su zaključili da je iznos pogreške izračuna parametara manji od 1% primjenom metode izračuna srednjeg iznosa koeficijenta primjenom integrala. Također, pokazalo se da pogreška izračuna parametara raste s iznosom struje, zbog izraženijeg utjecaja Jouleovog i Thomsonovog efekta. Analiza usporedbe jednostavnih metoda izračuna koeficijenata, s onim složenijima, npr. utemeljenih na električnoj analogiji toplinskih parametara ili pak na konačnim elementima, napravljena je u [46]. Autori su predstavili prednosti i nedostatke pojedinog pristupa i naveli da razlika u ostvarenim rezultatima nije značajna. Zaključak većine autora u literaturi je da se zbog jednostavnosti realizacije, koriste konstantni iznosi koeficijenata. Analiza korištenja pet različitih metoda proračuna koeficijenata, kroz primjenu na tri različita modela je napravljena u [47]. Korištene metode prilikom izračuna Seebeckovog koeficijenta, električne i toplinske vodljivosti su: Lineykinova i Chenova metoda, a zatim i izrazi preuzeti od proizvođača termoelektričnih generatora, Lairda, Melcora i Ferroteca. Korišteni su jednostavni modeli, zatim unaprijeđeni modeli s različitim iznosima koeficijenata za p i n-tip poluvodiča, te model ostvaren električnom analogijom parametara. Zaključak autora je da nema značajnijeg odstupanja u ostvarenim rezultatima između pojedinih metoda računanja koeficijenata i korištenih modela.

1.3.1.2. Modeli TEG-a

Literatura sadrži čitav niz radova povezanih s različitim pristupima modeliranju sustava s uključenim termoelektričnim generatorom. U nastavku teksta će biti predstavljen kratak pregled najčešće korištenih modela, njihovih ograničenja, kao i najčešće razmatrani utjecaji parametara na efikasnost termoelektrične pretvorbe i iznos generirane snage na potrošaču. Od programskih okruženja koja se najčešće koriste za modeliranje i simulacije treba izdvojiti Ansys, COMSOL Multiphysics, MATLAB sa simulacijskim paketom Simulink, te SPICE, okruženje koje koristi analogiju između električnih i toplinskih parametara u svrhu uspostavljanja modela. Modeliranje i simulacija rada određenog sustava ima niz prednosti u odnosu na realizaciju fizičkog prototipa. Neke od prednosti izrade modela i simulacije su, bolje razumijevanje pozadine rada, mogućnost optimizacije sustava, a zatim i jednostavnije testiranje sustava uslijed promjenjivih parametara. S druge pak strane, bez fizičke realizacije prototipa sustava i izmjerenih vrijednosti na stvarnom sustavu, nije moguće verificirati napravljeni model i zaključiti koliko je on uistinu dobar.

Najčešće korišteno programsko okruženje za izradu modela termoelektričnog generatora je MATLAB ili njegovo simulacijsko okruženje Simulink. Za razliku od Ansys-a i COMSOL-a, gdje se većina analiza provodi na uspostavljenom toplinskom modelu, analize u MATLAB-u se češće temelje na izradi električnog modela, dok je izrada i analiza toplinskog modela najčešće zapostavljena. Autori su u [48] razvili električni model termoelektričnog generatora, uz primjenu promjenjivih iznosa Seebeckovog koeficijenta i električne otpornosti. Navedene iznose su autori odredili na temelju grafova predstavljenih od proizvođača generatora. Osim promjenjivih iznosa koeficijenata, autori su u radu ostvarili i električno prilagođenje sustava. Manjkavost korištenja predstavljenog modela je u tome što su koeficijenti poznati samo za točno određene temperature hladne strane (30, 50 i 80°C) i za točno određeni model generatora, što onemogućava primjenu ovog modela i za ostale modele termoelektričnih generatora. Bidirekcijski model generatora je napravljen u [49], pri čemu su autori koristili temperaturno promjenjive koeficijente dobivene od već spomenute Ferrotec grupacije, za izračun parametara generatora. Električni model koji u obzir uzima utjecaj kontaktnog toplinskog otpora, za različite uvjete rada, je napravljen u [50]. Model se temelji na Theveninovom ekvivalentu, a analitički izrazi za određivanje generiranog napona i unutarnjeg električnog otpora su izvedeni s obzirom na utjecaj kontaktnog toplinskog otpora, te uz razmatranje konstantnog temperaturnog gradijenta ili konstantnog toplinskog toka. Model razmatran s obzirom na konstantni gradijent je linearan i ovisi o električnim i toplinskim parametrima generatora, dok je model razmatran s obzirom na toplinski tok nelinearan i ovisi o

generiranom iznosu struje. Autori su u [51] napravili korekciju jednadžbi koje opisuju ponašanje generatora u električnom smislu, a koje su u velikom broju literature pogrešno izvedene. Zatim su kreirali električni model utemeljen na ispravnim matematičkim jednadžbama. Simulacijom je razmatran utjecaj iznosa otpora potrošača na generiranu snagu, te na efikasnost termoelektrične pretvorbe, pri čemu su korišteni konstantni iznosi temperaturno ovisnih koeficijenta. Jednostavni električni model termoelektričnog generatora i hladnjaka sa sučeljem prilagođenom korisniku je napravljen u Simulinku [52]. Autori su u [29] usporedili rezultate proizašle iz električnog modela uz korištenje konstantnih, a potom i temperaturno promjenjivih koeficijenata. Zaključak je kako je predstavljeni model sposoban nositi se sa dinamičkim promjenama temperature i izračunom parametara generatora u takvim uvjetima rada.

Zasigurno jedno od najdetaljnijih istraživanje povezano s analizom rada termoelektričnih generatora je prikazano u [53]. Autori su korištene metode za određivanje parametara generatora implementirali u grafičko korisničko sučelje „TeGDS“, koje je dostupno na MathWorks-u [54]. Problematiku svoga istraživanja temelje na činjenici da je većina parametara termoelektričnog generatora temperaturno ovisno, a da iznosi temperatura na krajevima termopara najčešće nisu poznati, već samo temperature na vanjskim dijelovima keramičkih supstrata. Pretpostavka je da navedena razlika temperature, izmjerene na krajevima supstrata i stvarne temperature ostvarene na krajevima termoparova, u većoj mjeri utječe na iznose temperaturno ovisnih koeficijenata, a samim tim i na izračunate parametre termoelektričnog generatora. Autori su predložili iterativnu metodu čijom je primjenom u simulaciji moguće odrediti točne iznose temperatura na krajevima termoparova, što pak doprinosi većoj točnosti izračunatih koeficijenata i parametara. Prilikom određivanja ostvarenih temperatura u sustavu, u obzir se uzimaju toplinska i električna svojstva pasivnih komponenti termoelektričnog generatora (keramičkih supstrata, bakrenih pločica i sl.). Koeficijenti se uzimaju kao temperaturno promjenjivi, dok se napon otvorenog kruga, unutarnji električni otpor i toplinska vodljivost računaju prema izrazima (1.27-1.29). Ulazni parametri na osnovu kojih se računaju svi ostali parametri u sustavu su iznos temperature tople i hladne strane na keramičkim supstratima. Postoji mogućnost razmatranja utjecaja čitavog niza parametara na iznos generirane snage na potrošaču, efikasnost pretvorbe i sl. Tako je korisniku omogućeno da mijenja parametre bilo koje sastavne komponente termoelektričnog generatora i razmatra njen utjecaj na spomenute iznose snage i efikasnosti. Točnost izračuna parametara korištenjem ovog modela je potvrđena s eksperimentalnim mjerenjima na komercijalno dostupnim generatorima. Odstupanja rezultata su unutar 3% i 4%, a metoda je u oba slučaja konvergirala u samo nekoliko iteracija. Usporedba eksperimentalno dobivenih rezultata i rezultata dobivenih na osnovu poviše

navedenog modela je napravljena u [55]. Prema autorima, odstupanja u rezultatima nastaje zbog netočnosti unesenih ulaznih podataka, te samih pogrešaka u eksperimentalnim mjerenjima.

COMSOL Multiphysics je programska platforma opće namjene, utemeljena na naprednim numeričkim metodama za modeliranje i simulaciju problema proizašlih iz interakcije jedne ili više fizikalnih efekata istovremeno. Osim COMSOL-a, programsko okruženje koje dosta često pronalazi primjenu kod izrade modela i simulacije u termoelektričnom području je Ansys, koji pruža širok spektar alata za simulaciju, uključujući elektromagnetsku analizu, analizu konačnih elemenata, toplinsku analizu i sl. S obzirom da ova okruženja sadrže sav mogući alat za analizu u toplinskoj domeni, istraživači korištenjem tih okruženja najčešće razmatraju utjecaj geometrije termoparova (oblika, visine i poprečnog presjeka), materijala izrade, a često se razmatra i utjecaj kontaktnih toplinskih otpora, hladila različitih toplinskih otpora i sl. na raspodjelu temperature u sustavu i iznos efikasnosti termoelektrične pretvorbe. Autori su u [56] proveli analizu utjecaja različitih oblika termoparova na iznos generiranog napona, kada ih se izloži temperaturnoj razlici na krajevima. Zanimljivo istraživanje u kojem je razmatran utjecaj toplinskog otpora hladila na iznose generirane snage i efikasnost pretvorbe je napravljen u [57]. Autori su u navedenom radu napravili i optimizaciju hladila s obzirom na širinu rebra i širinu prostora između rebara, s ciljem ostvarenja toplinske prilagodbe u sustavu. Iako u literaturi postoji čitav niz radova utemeljenih na modelima u COMSOL-u ili Ansys-u, provedbi optimizacije, razmatranju utjecaja parametara sustava na ostvarene rezultate i sl. [58-60], zaključci doneseni u [61] sažimaju velik broj ostalih istraživanja. Autori su u navedenom radu konstruirali 3-D model termoelektričnog generatora, a koji se sastoji od jednog termopara. Zatim su napravili analizu utjecaja različitih parametara na iznos generirane snage. Zaključci autora su sljedeći, oblik termopara u manjoj mjeri ima utjecaj na iznos generirane snage, sve dok su im poprečni presjeci jednakog iznosa. S porastom visine termopara, raste i efikasnost pretvorbe, dok generirana snaga prvo raste, a zatim opada.

U literaturi postoji čitav niz drugih programskih okruženja za modeliranje, pa se tako često električno i toplinsko modeliranje termoelektričnih generatora izvodi u SPICE okruženju, čija je primarna namjena simuliranje analognih elektroničkih sklopova. Modeli izrađeni u MATLAB-u su se više temeljili na električnom modeliranju, dok je SPICE okruženje pogodno za toplinsko modeliranje, na način da se napravi analogija između električnih i toplinskih parametara sustava. Tako se toplinski tok predstavi električnom strujom, temperaturni gradijent iznosom napona, a toplinski otpor izvora topline, generatora ili hladila, iznosom električnog otpora [62]. Autori su u [63] analizirali ponašanje termoelektričnog generatora u uvjetima visokih iznosa temperatura, a sami model se temelji na 1-D diferencijalnoj jednadžbi vođenja topline i analogiji parametara.

Autori su u [64] predstavili električni i toplinski model cjelokupnog sustava, a koji se sastoji od izvora topline, termoelektričnog generatora i hladila. Neki od ciljeva istraživanja u navedenom radu su optimizacija toplinskog modela, odabir parametara optimalnog generatora za ostvareni temperaturni gradijent i korišteno hladilo, oboje u svrhu generiranja maksimalne snage.

1.3.1.3. Električno i toplinsko prilagođenje sustava

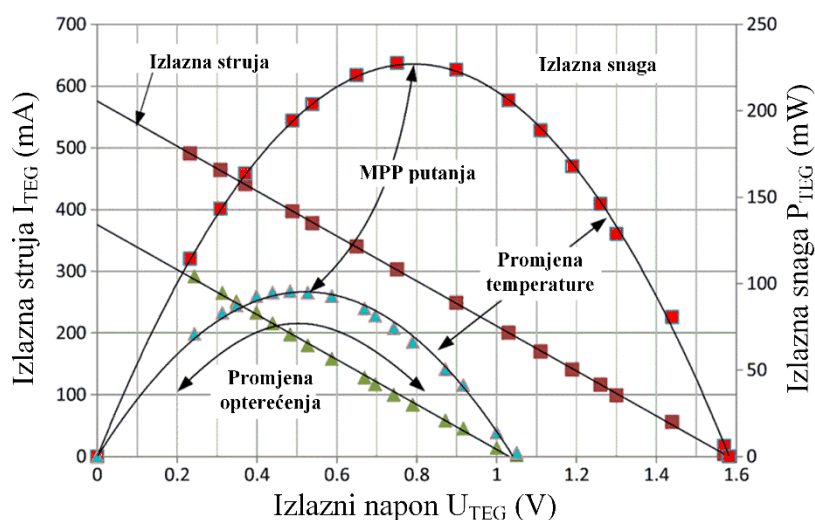
Efikasnost termoelektrične pretvorbe, osim o korištenim materijalima, broju i geometriji termoparova i svim faktorima do sada nabrojanim, ovisi i o dizajnu cjelokupnog sustava. Pregled dosadašnjih istraživanja iz područja dizajna sustava i njegovog utjecaja na efikasnost pretvorbe, biti će prikazano u ovom potpoglavlju. Kako bi termoelektrični generator generirao maksimalnu snagu, potrebno je ostvariti električnu i toplinsku prilagodbu sustava. S obzirom na nelinearnu P-U karakteristiku (odnos između snage i napona na potrošaču) i promjenjive iznose unutarnjeg električnog otpora i napona otvorenog kruga generatora, u svrhu generiranja maksimalne snage potrebno je koristiti neku od MPPT metoda. Navedene metode su najčešće implementirane preko DC-DC pretvarača, a metode se razlikuju ovisno o tehnici implementacije (analogno, digitalno), potrebnim sensorima za njihovu realizaciju, brzini konvergencije metode, troškovima izvedbe i sl. Velik broj MPPT metoda primjenjivih kod termoelektričnih generatora je proizašla iz metoda korištenih kod fotonaponskih modula. Toplinsko prilagođenje sustava podrazumijeva primjenu hladila točno određenih karakteristika, a koje će rezultirati maksimalnom razvijenom snagom na potrošaču. U nastavku potpoglavlja razmatran je utjecaj oba prilagođenja na generiranu snagu i na efikasnost termoelektrične pretvorbe.

Karakteristika snage prema naponu kod termoelektričnih generatora je nelinearna, dok je odnos struje prema naponu linearan. Na osnovu eksperimentalnih mjerenja predstavljenih u [65], na grafu slike 1.9 prikazane su navedene karakteristike za dva različita temperaturna gradijenta. Električni model termoelektričnog generatora se u osnovi sastoji od Theveninovog ekvivalenta, odnosno naponskog izvora i unutarnjeg električnog otpora. Na osnovu prikazanog grafa, točka maksimalne snage će biti ostvarena za:

$$U_{TEG} = \frac{1}{2} U_{OK}, \quad (1.30)$$

$$I_{TEG} = \frac{1}{2} I_{KS}. \quad (1.31)$$

gdje su I_{TEG} i U_{TEG} struja i napon na potrošaču, a I_{KS} struja kratkog spoja.



Slika 1.9 P-U i I-U karakteristika TEG-a za dva različita iznosa temperaturnog gradijenta [65]

Realizacija MPPT-a se u pravilu izvodi korištenjem DC-DC pretvarača, koji se priključi između termoelektričnog generatora i otpora potrošača. Ulazni otpor spomenutih pretvarača nije fiksnog iznosa, već ovisi o dužini trajanja radnog ciklusa (engl. *Duty Cycle*) kontrolnog PWM (engl. *Pulse Width Modulation*) signala. Odnosno, pretvarači prilagođavaju iznos ulaznog otpora iznosu unutarnjeg električnog otpora termoelektričnog generatora. Najčešće korišteni pretvarači za ovu primjenu su tzv. „Boost“ pretvarači, „Buck“ pretvarači ili „Buck-Boost“ pretvarači. Iznos ulaznih otpora pretvarača su predstavljeni izrazima (1.32-1.34) [66]. „Boost“ pretvarač mijenja iznos ulaznog otpora na način da ga smanjuje u odnosu na iznos stvarnog opterećenja R_P . „Buck“ pretvarač povećava iznos ulaznog otpora u odnosu na opterećenje, dok „Buck-Boost“ pretvarač ima sposobnost transformacije ulaznog otpora unutar cijelog kvadranta, od otpora iznosa 0Ω , do iznosa otpora potrošača.

$$R_{ulaznoBOOST} = R_P(1 - D)^2, \quad (1.32)$$

$$R_{ulaznoBUCK} = \frac{R_P}{D^2}, \quad (1.33)$$

$$R_{ulaznoBB} = R_P \left(\frac{1 - D}{D} \right)^2, \quad (1.34)$$

gdje je D vrijeme trajanja radnog ciklusa PWM signala i računa se kao omjer vremena za kojeg je signal u stanju logičke '1' i vremenskog perioda signala. Osim spomenutih, u literaturi postoji

čitav niz pretvarača koji se koriste u ove svrhe. Pregled najčešće korištenih pretvarača, zajedno sa prednostima, nedostacima i područjima primjene, prikazani su u [67].

Osnovni principi rada najčešće korištenih MPPT metoda, njihove prednosti i nedostaci u traženju točke maksimalne snage prikazane su u [68-79]. Navedene metode je moguće razvrstati s obzirom na kompleksnost implementacije, mogućnosti realizacije različitim tehnikama, brzini konvergencije, promatranim parametrima u krugu (struji i/ili naponu), cijeni implementacije ili efikasnosti pronalaska točke maksimalne snage [80-82].

Na generiranu snagu i efikasnost termoelektrične pretvorbe utječe i korištena metoda za disipaciju toplinske energije s hladne strane termoelektričnog generatora. U ovisnosti o području primjene termoelektričnih generatora, odlučujemo se za jednu od metoda disipacije. U literaturi i praksi se najčešće koristi pasivno hladilo jer ne zahtijeva dodatan utrošak energije za rad, iako upravo ono pokazuje najlošije performanse u odnosu na ostale metode disipacije energije. Osim navedenog, često se koristi i aktivno hlađenje hladila ventilatorom ili pomoću drugog fluida (npr. vodeno hlađenje), a rjeđe se koriste fazno promjenljivi materijali (engl. *Phase Change Material*) ili hlađenje metodom toplinskih cijevi (engl. *Heat Pipe Cooling*).

Autori su u [83] predstavili najčešće korištene metode za disipaciju toplinske energije, te su naveli prednosti i nedostatke pojedine metode. Također su izvedeni analitički izrazi s kojima se opisala pojedina metoda. Na osnovu predstavljenih izraza, moguće je odrediti toplinski otpor hladila i razmotriti utjecaj parametara hladila (npr. broj i dimenzija rebara) na iznos tog otpora. Utjecaj geometrije hladila i mehaničke sile pritiska između komponenti sustava, uslijed primjene termoelektričnih generatora na ispušnom sustavu automobila je prikazan u [84]. Zaključak je da broj rebara hladila utječe na iznos generirane snage sustava s termoelektričnim generatorom, ali samo do određenog broja, iznad kojeg razvijena snaga više ne raste proporcionalno broju rebara. Razmatran je i utjecaj mehaničke sile pritiska na iznos generirane snage, te je zaključeno da veći iznosi mehaničke sile pritiska doprinose smanjenju kontaktnog otpora, što pak doprinosi većem iznosu generirane snage na potrošaču. Analiza utjecaja parametara hladila, te važnost toplinske prilagodbe u sustavu s termoelektričnim generatorom je također aktualizirana u [57, 60].

Matematički model utemeljen na analogiji električnih i toplinskih parametara je prikazan u [64]. Primjenom modela moguće je odrediti korelaciju toplinskih otpora generatora i hladila, a koja će rezultirati maksimalnim iznosom generirane snage na potrošaču. Ujedno je i naveden primjer na koji način odabrati optimalan model termoelektričnog generatora (između ponuđenih) za korišteno hladilo, u određenim uvjetima rada. Analitički model korišten u svrhu generiranja

maksimalne snage, a koji u obzir uzima broj termoparova termoelektričnog generatora i toplinski otpor hladila, je prikazan u [85]. Korištenjem modela analizirana su dva scenarija, prvi je odabir optimalnog termoelektričnog generatora za dano hladilo, a drugi je odabir optimalnog hladila za korišteni generator. Još jednom se pokazalo da su veći iznosi generirane snage ostvareni manjim iznosima toplinskih otpora hladila, a iznos snage poprima maksimalnu vrijednost za slučaj kada je omjer toplinskog otpora hladila i termoelektričnog generatora jediničnog iznosa. Povećanjem broja termoparova, uz konstantni iznos ulazne toplinske energije, generirana snaga raste, a iznos efikasnosti termoelektrične pretvorbe opada.

Najveći broj radova u literaturi u kojima se razmatra toplinsko prilagođenje je iz područja korištenja topline ljudskog tijela kao izvora topline, u svrhu napajanja uređaja za nadzor zdravlja. Problem u navedenom području nastaje uslijed velikog iznosa toplinskog otpora ljudske kože i okoline, pa ostvareni temperaturni gradijent na samom generatoru bude malog iznosa i rezultira malim iznosom generirane snage. Izazovi i zaključci iz ostvarenja toplinske prilagodbe u ovom području prikazani su u [86-94].

1.3.2. Primjena TEG-ova na pojačalima snage

Literatura sadrži tek nekoliko radova povezanih sa primjenom termoelektričnih generatora na pojačalima snage, u svrhu prikupljanja i pretvorbe otpadne toplinske energije. Svim radovima je zajedničko što su koristili RF pojačala snage, te u literaturi ne postoji niti jedan rad povezan sa primjenom termoelektričnih generatora na audio pojačalima snage. Svi radovi će biti navedeni u nastavku potpoglavlja, kao i metode pristupa problemu koje su koristili autori, analize koje su napravili, te zaključke koje su donijeli na temelju ostvarenih rezultata.

Autori su u [95] predstavili problem velike količine otpadne toplinske energije generirane kod RF pojačala snage u baznim stanicama. Primjenom termoelektričnih generatora moguće je barem dio te energije prikupiti i pretvoriti u električnu energiju. Rad ne sadrži mnogo informacija o dizajnu cjelokupnog sustava, niti sadrži rezultate mjerenja, već su autori samo naveli na koje načine bi se pretvorena energija mogla iskoristiti. Prvi prijedlog autora je da se energija iskoristi za napajanje elektroničkih komponenti (sklopova) u okolini pojačala. Drugi prijedlog se odnosi na skladištenje pretvorene energije u akumulatorima, ukoliko one postoje u okolini sklopa. Treći

prijedlog je da pretvorenu energiju pokušamo vratiti u krug napajanja pojačala, čime bi povećali efikasnosti sustava s pojačalom snage.

Slično istraživanje, ali uz detaljniju analizu, te usporedbu rezultata ostvarenih mjerenjima i rezultata proizašlih iz simulacije modela, prikazano je u [96]. Mjerenja su izvršena na pojačalu snage E-klase u krugu odašiljača (1 W, 2.45 GHz). Korištena klasa pojačala bi trebala disipirati manje količine toplinske energije jer se izlazni tranzistori koriste kao sklopke (prekidači), čime je izbjegnuta linearni režim rada tranzistora u kojem disipiraju velike količine energije. Toplinski model primjene termoelektričnih generatora na pojačalu snage je napravljen analogijom između električnih i toplinskih parametara, u SPICE okruženju. Pretpostavka je da je riječ o stacionarnim uvjetima, tako da kondenzatori koji bi simulirali dinamičke promjene temperatura u sustavu nisu uključeni u model. Zagrijavanja pojačala je neravnomjerno, područje u okolini tranzistora se u većoj mjeri zagrijava u odnosu na ostatak pločice. Izmjereni temperaturni gradijent na krajevima termoelektričnog generatora u ustaljenom stanju iznosi 7.2 K, dok je simulacijom ostvaren iznos od 11.4 K. Posljedično, postoji i razlika u iznosu generirane snage, tako je izmjerena snaga na izlaznim stezaljkama generatora 1.1015 mW, dok je simulacijom generirana snaga od 2.1 mW.

Autori kao razlog odstupanja rezultata navode velike iznose kontaktnog toplinskog otpora, a koji nisu uzeti u obzir kod modeliranja. Zaključak je i da na efikasnost pretvorbe, osim odabira optimalnog termoelektričnog generatora, utječu i sve ostale komponente sustava, a kao prijedlog iskorištenja pretvorene energije navode da može poslužiti za napajanje senzora ili sklopovlja u okolini korištenog pojačala snage.

Problem neefikasnosti baznih stanica širokopojasnih mreža je obrađen u [97], a izvedeni zaključak je da neefikasnosti u velikoj mjeri pridonosi generiranje otpadne toplinske energije na izlaznim tranzistorima pojačala snage. Istraživanje se temelji na razvoju matematičkog modela termoelektričnog generatora, nastalog na osnovu jednadžbi proizašlih iz fizike prijenosa topline i definicije termoelektričnih efekata. Na osnovu modela izvršena je optimizacija broja, visine i poprečnog presjeka termoparova, s ciljem generiranja maksimalne snage i efikasnosti pretvorbe, pri čemu su u obzir uzeti različiti iznosi ulazne toplinske energije, različiti iznosi otpora hladila i promjenjive vrijednosti otpora potrošača. Zbog zaštite tranzistora, optimizacija je vođena pod uvjetom da temperatura tople strane ne prelazi 175°C. Broj termoparova se mijenjao u koracima od 25-2500, visina termoparova od 0.01-10 mm, toplinska energija od 20-100 W, toplinski otpor hladila od 0.1-1 K/W, a otpor potrošača je iznosio 5 Ω i 100 Ω .

Za slučaj ostvarene električne prilagodbe u krugu, iznos generirane snage na potrošaču je maksimalnog iznosa, a temperatura tople strane je smanjena u odnosu na slučaj korištenja otpora koji ne rezultira električnim prilagođenjem. Rezultati su bolji ako je toplinski otpor korištenog hladila manjeg iznosa. Ključan parametar za postizanje velikog iznosa temperaturnog gradijenta, a samim time i velikog iznosa razvijene snage na potrošaču, je visina termopara. Ako se poveća iznos ulazne toplinske energije, potrebno je smanjiti toplinski otpor generatora, da bi ograničili temperaturu tople strane. Na iznos toplinskog otpora generatora je moguće utjecati s promjenom broja termoparova i promjenom njihovog poprečnog presjeka. Ako je cilj smanjenje toplinskog otpora, potrebno je povećati iznose oba parametra. Efikasnost pretvorbe i iznos razvijene snage na potrošaču ovise o toplinskom otporu spojenog hladila, što je otpor manjeg iznosa, to su iznosi efikasnosti i razvijene snage na potrošaču većeg iznosa. Na osnovu rezultata ostvarenih pomoću modela, pokazano je da se uz temperaturu tople strane od 175°C, temperaturu okoline od 35°C i toplinske energije u iznosu od 20 W, može ostvariti efikasnost pretvorbe od gotovo 6%, čime bi povećali efikasnost pojačala snage za 4%, bazne stranice za 3% i širokopojasne mreže za 2%. Predstavljene rezultate treba uzeti s oprezom jer model nije verificiran izmjerenim rezultatima na eksperimentalnom prototipu.

Autori su u [98] zaključili da su sklopovska rješenja koja bi povećala efikasnost pojačala dosegla svoj vrhunac. Zatim su pokušali korištenjem ne sklopovskog rješenja, termoelektričnog generatora, prikupiti toplinsku energiju generiranu na izlaznim tranzistorima RF pojačala snage u F-klasi (10 W, 3.2-3.8 GHz). Namjera je da se pretvorena energija vrati u krug napajanja, čime bi se povećala efikasnost korištenog pojačala snage. Izneseni zaključci se temelje na izmjerenim rezultatima na eksperimentalnom prototipu sustava za pretvorbu energije. Analiza je napravljena s obzirom na iznos pretvorene energije za slučaj kada pojačalo radi u klasičnom režimu rada F-klase, za različite iznose izlazne snage (24-41.2 dBm). Povećanje efikasnosti korištenog pojačala u razmatranom režimu rada iznosi 1.1 postotnih poena.

1.3.3. Isplativost primjene TEG-ova

Toplinski strojevi koji rade na principu poznatih termodinamičkih kružnih procesa, poput Rankineovog ili Stirlingovog ciklusa, posjeduju daleko veće iznose efikasnosti termoelektrične pretvorbe pri velikim temperaturama i izlaznim snagama, u odnosu na primjenu termoelektričnih

generatora [99]. Iako je vrlo vjerojatno da generatori po pitanju efikasnosti ipak neće zamijeniti standardne toplinske strojeve, barem ne u skorijoj budućnosti, oni bi svejedno mogli igrati važnu ulogu u pretvorbi toplinske energije u električnu. Razlog navedenome je što je cijena utrošena za proizvodnju energije mnogo važniji faktor od efikasnosti pretvorbe. Osim pregleda literature iz područja ekonomske isplativosti primjene generatora, u ovom potpoglavlju će biti prikazan i kratak osvrt na literaturu u kojoj se razmatra radni vijek generatora, te se identificiraju kritični sastavni dijelovi koji ponajviše ograničavaju njihov radni vijek.

Autori su u [100] napravili analizu na temu troškovne učinkovitosti primjene generatora. Osim analize, predloženi su i jednostavni izrazi po pitanju dizajna generatora, a koji bi rezultirali električnom i toplinskom optimizacijom cjelokupnog sustava. Parametar na osnovu kojeg bi se vršila električna i toplinska optimizacija sustava je visina termopara. Optimalna visina termopara je određena u ovisnosti o svojstvima korištenog poluvodičkog materijala, toplinskim otporima izmjenjivača topline, kao i o faktoru popunjenosti F (engl. *Fill Factor*), a koji predstavlja omjer ukupne površine supstrata i površine pokrivena termoparovima. Na kraju rada autori su prikazali graf ovisnosti cijene utrošene za proizvodnju snage ($\$/W$) o cijeni materijala izrade termoparova ($\$/kg$) za različite iznose faktora izvrsnosti i faktora popunjenosti. Navedeni rad ne uzima u obzir cijenu korištenih hladila, što se smatra stavkom koja ponajviše utječe na cijenu izrade sustava s termoelektričnim generatorom. Kada se u obzir uzme i korištenje hladila, cijena poluvodičkog materijala u ukupnoj cijeni sustava sudjeluje s najviše četvrtinom ukupnog iznosa [101]. Autori su u [99] predstavili graf usporedbe cijena sirovih i obrađenih, najčešće korištenih, poluvodičkih materijala. Na osnovu grafa moguće je zaključiti da je cijena obrađenih materijala barem za red veličine veća od cijena sirovine od koje se isti taj materijal izrađuje.

Analiza troškovne učinkovitosti, koja u obzir uzima cijenu uspostave potpunog sustava za termoelektričnu pretvorbu, je napravljena u [102]. Autori analiziraju i vremenski period potreban da se generiranom energijom vrati uloženi novac (engl. *Payback Time*) za izradu takvog sustava, sastavljenog od većeg broja termoelektričnih generatora primijenjenih na geotermalnom izvoru energije. Autori su također napravili usporedbu početnog troška izrade ovog sustava sa troškom izrade fotonaponske elektrane jednake nazivne snage, zaključak je kako je sustav s generatorima isplativiji, a najveća prednost mu je što ne ovisi o vremenskim prilikama.

Istraživanje na temu ovisnosti iznosa temperaturnog gradijenta o vremenu potrebnom da se generiranom energijom vrate uložena sredstva u sustav je razmatrano u [103]. Isplata početne investicije pri temperaturnim gradijentima od 100, 150 i 200°C će nastupiti za 7, 5 i 1.7 godina.

Proračun vremena potrebnog za povrat početne investicije, uslijed primjene generatora za prikupljanje toplinske energije sunčevog zračenja, je razmatrano u [104]. Investicija uspostave takvog sustava iznosila bi 1000 €, a nazivna snaga koju bi bio u mogućnosti isporučiti je 1 kW. Na osnovu iznosa generirane energije, ovakav sustav bi se isplatio u 4.55 godina, dok bi cijena proizvedene energije na taj način iznosila 0.0441 €/kWh. Autori zaključuju da primjena ovakvog sustava za iste uvjete rada, daje bolje rezultate u odnosu na fotonaponsku elektranu.

Analiza i usporedba troškova izrade sustava s termoelektričnim generatorom i sustava koji rad zasniva na plinskoj turbini, u svrhu pretvorbe toplinske energije nastale izgaranjem fosilnih goriva je napravljena u [105]. Premda je početni trošak sustava s termoelektričnim generatorom nešto manjeg iznosa, zbog veće efikasnosti pretvorbe, sustav s plinskom turbinom se pokazao kao isplativija investicija za duži vremenski period. Također se navodi da rad termoelektričnog generatora u točki maksimalne snage ne znači nužno najmanji iznos cijene proizvedene energije, već je taj minimum ostvariv za slučaj kada generator radi neposredno nakon točke maksimalne snage, a prema točki maksimalne efikasnosti. Predstavljena je i ovisnost omjera visine termopara sa njenom idealnom vrijednošću o cijeni proizvedene energije. Autori su u [106] ostvarili slične zaključke s obzirom na utrošenu cijenu za proizvodnju nazivne snage. U literaturi se najčešće cijena proizvedene snage od 1 \$/W postavlja kao mjerilo na osnovu kojeg se određuje isplativost primjene pojedine tehnologije u praksi. Autori također navode cijenu hladila kao parametar koji najviše narušava isplativost primjene termoelektričnih generatora. Ako je cilj približiti se omjeru inicijalnog troška i proizvedene snage od 1 \$/W, za korišteno hladilo se mora postići omjer cijene od \$1 (W/°C). Autori su u [107] primjenom tehnike direktnog pisanja tintom (engl. *Direct Ink Writing*) utisnuli termoelektrični generator na stakleni supstrat kućanskog prozora, a sve u cilju prikupljanja toplinske energije sunčevog zračenja. Za održavanje temperaturne razlike, autori su umjesto hladila velikih dimenzija koristili geometrijski pristup. Inicijalni trošak izrade prototipa sustava iznosi 120 \$/W. Primjena generatora na automobilskom ispušnom sustavu predstavlja inicijalni trošak od 2000 \$, pri čemu takav sustav može generirati maksimalnu snagu od 480 W [108].

Kod primjene termoelektričnih generatora u okolini gdje je toplinska energija besplatna (sunčevo zračenje, nuklearne elektrane i sl.), minimalan omjer inicijalnog troška i proizvedene snage je ostvariv kada generator radi u okolini točke maksimalne snage. Međutim, ako toplinska energija nije besplatna, npr. nastaje namjernim sagorijevanjem fosilnih goriva, tada se prakticira da termoelektrični generator radi blizu točke maksimalne efikasnosti [109]. Navedeni rad sadrži sveobuhvatnu analizu utjecaja različitih parametara termoelektričnog generatora na iznos cijene

proizvedene energije. Između ostaloga, autori su izveli analitičke izraze za optimalne vrijednosti visine termopara i faktora popunjenosti, a koje će rezultirati minimalnom cijenom proizvedene energije. Slično istraživanje je napravljeno i u [110], odnosno optimizacija sustava koje rezultira minimalnim troškovima proizvedene snage. U istom radu je predstavljena i usporedba najčešće korištenih poluvodičkih materijala, a kriteriji usporedbe su vrsta materijala, cijena sirovine, iznos faktora izvrsnosti, optimalna vrijednost faktora popunjenosti, te područje primjene. Također, kao najvažniji parametar s obzirom na koji bi trebali promatrati primjenu termoelektričnih generatora ističu omjer inicijalnog troška izrade sustava i nazivno generirane snage tog sustava:

$$G = \frac{C}{P_{IZL}}, \quad (1.35)$$

gdje je C inicijalna investicija za izradu sustava. S obzirom da i C i P_{IZL} ovise o visini termopara i iznosu faktora popunjenosti, optimizaciju treba vršiti s obzirom na parametar G , a ne s obzirom na individualne vrijednosti parametara C i P_{IZL} . Autori kao generalni zaključak navode kako je cijena hladila glavna prepreka za širu primjenu termoelektričnih generatora.

Istraživanja na temu radnog vijeka termoelektričnih generatora se svode na identifikaciju i analizu najslabijeg sastavnog dijela tog generatora. Kao najslabija karika, a o kojem ovisi radni vijek čitavog termoelektričnog generatora, identificirana je metalna veza koja spaja termoparove na toploj strani. Najčešći materijal izrade navedene veze (pločice) je bakar (Cu) ili nikal (Ni), te se stoga njihova mehanička i kemijska svojstva najviše istražuju u literaturi. Navedena pločica u odnosu na keramički supstrat i poluvodički materijal izrade termoparova posjeduje najmanju čvrstoću, pa uslijed toplinskog naprezanja prvo dolazi do njenog oštećenja. Način rada u kojem dolazi do učestalog zagrijavanja i hlađenja generatora identificiran je kao nepoželjan, jer se time povećava vjerojatnost ranijeg oštećenja navedene metalne veze [111-116]. Autori su pak u [117] predložili novi dizajn veze, koji za cilj ima smanjenje toplinskog naprezanja i produženje radnog vijeka generatora za 68%. Navedeni rezultati su ostvareni simulacijom modela u COMSOL-u i primjene metode konačnih elemenata. Autori su također došli do zaključka da se minimalan broj ciklusa do oštećenja metalne veze može povećati s povećanjem debljine keramičkog supstrata. Slično istraživanje je napravljeno u [118], gdje je napravljena analiza oštećenja metalne veze, a zatim je i procijenjen radni vijek generatora uslijed toplinsko cikličkog načina rada. Zaključak je da povećanje toplinskog otpora metalne veze pozitivno utječe na radni vijek termoelektričnih generatora. Literatura ne sadrži ni točan ni minimalan broj radnih sati generatora, već radni vijek u velikoj mjeri ovisi o uvjetima primjene termoelektričnih generatora.

1.4. Hipoteze

Uzevši u obzir pregled dosadašnjeg istraživanja, zaključeno je kako u literaturi ne postoji integrirani toplinsko-električno model primjene termoelektričnih generatora na pojačalu snage. Model koji bi omogućio razmatranje utjecaja svih komponenti uspostavljenog termoelektričnog sustava na iznos generirane snage na potrošaču i efikasnost pretvorbe. Osim navedenog modela, u disertaciji se navodi i hipoteza koja se odnosi na povećanje iznosa efikasnosti termoelektrične pretvorbe uslijed primjene novog načina rada konfiguracije većeg broja generatora koji sudjeluju u procesu termoelektrične pretvorbe. Stoga su hipoteze doktorskog rada:

Hipoteza 1: vrlo mali stupanj efikasnosti pretvorbe energije TEG-ova moguće povećati na razini sustava primjenom novog načina rada konfiguracije više TEG-ova i optimizacijom cjelokupnog sustava pretvorbe energije.

Hipoteza 2: razvojem novog toplinsko-električnog simulacijskog modela rada TEG-ova sustav može optimizirati u odnosu na svoje parametre (iznos snage pojačala, veličine hladila i slično). Navedena optimizacija sustava bi omogućila korištenje većeg broja TEG-ova spojenih na hladila manjih dimenzija, čime bi se zaštitili izlazni tranzistori pojačala snage u AB-klasi od visokih temperatura štetnih po njihov radni vijek. To bi ujedno dovelo i do većeg stupnja „efikasnosti“ pojačala snage.

1.5. Očekivani znanstveni doprinosi

Očekivani znanstveni doprinosi ove disertacije su:

- Razvoj novog, protutaktnog (dinamičkog) načina rada konfiguracije TEG-ova u režimu izvan toplinske ravnoteže, a koji osigurava povrat energije i u periodu hlađenja TEG-ova. Razvoj uključuje i analizu različitih toplinskih konfiguracija TEG-ova koje osiguravaju veću efikasnost termoelektrične pretvorbe u odnosu na primjenu samo jednog TEG-a.
- Optimizacija toplinsko-električnog sustava s pojačalom snage u AB-klasi i primjenom TEG-ova na hladilima, sa svrhom prikupljanja i pretvorbe otpadne toplinske energije. Razmotrit će se utjecaj korištenja različitih vrsta TEG-ova (broja i geometrije termoparova), različitih iznosa ulazne toplinske energije, različitih iznosa toplinskih otpora hladila i slično, na iznos pretvorene energije i ostvarenih temperatura u sustavu.
- Procjena povećanja stupnja korisnosti sustava s pojačalom snage u AB-klasi uslijed primjene protutaktnog (dinamičkog) načina rada konfiguracije TEG-ova i analiza primjenjivosti povrata pretvorene energije u krug napajanja pojačala snage.

2. TOPLINSKO-ELEKTRIČNI MODEL TERMOELEKTRIČNOG SUSTAVA

Kroz izradu modela nekog sustava i njegovom simulacijom rada moguće je dobiti jasniju sliku ponašanja tog sustava i razmotriti koji sve parametri utječu na ostvarene rezultate. U ovom poglavlju je predstavljen integrirani toplinsko-električni model sustava za prikupljanje toplinske energije generirane na komplementarnom paru izlaznih tranzistora audio pojačala snage u AB-klasi. Primjenom termoelektričnih generatora, navedenu toplinsku energiju je moguće pretvoriti u električnu energiju.

Sustav će se modelirati u Simscape-u, dodatku MATLAB-a. Prvo potpoglavlje prikazuje usporedbu pri izradi modela korištenjem Simscape-a i Simulinka, a zatim su navedene prednosti i nedostaci pojedinog pristupa. Također, nabrojane su komponente (blokovi) koji će se koristiti pri izradi integriranog toplinsko-električnog modela. Poglavlje je zaključeno s ograničenjima i nedostacima predstavljenog modela.

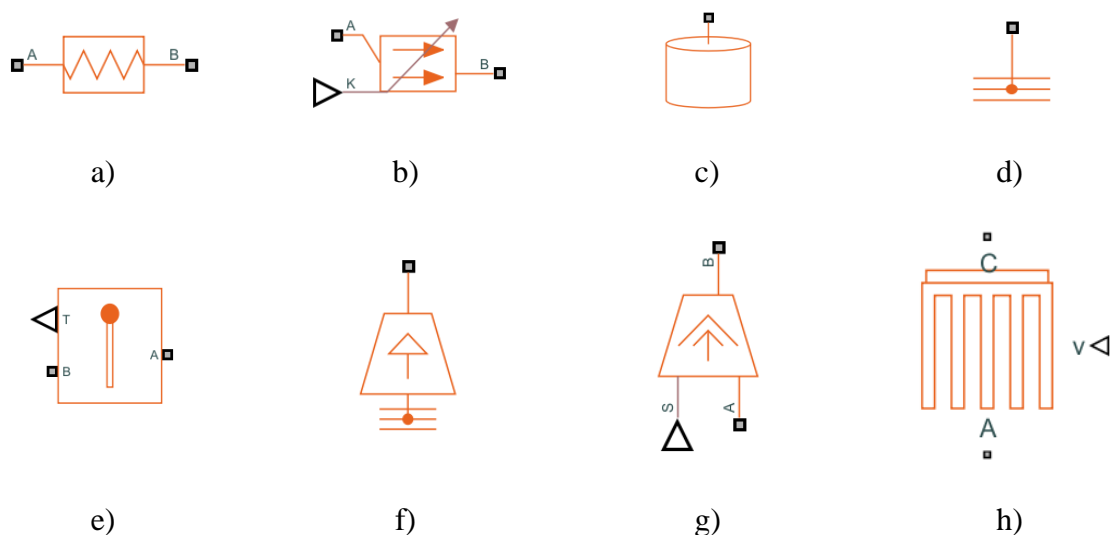
2.1. O Simscape-u

Simulink je dodatak MATLAB-u namijenjen modeliranju, simulaciji i analizi dinamičkih sustava. Izrada modela u navedenom okruženju podrazumijeva korištenje blokovskih dijagrama sa jednoznačno određenim ulazima i izlazima u blokove, odnosno tok signala između blokova u Simulinku je jednosmjernan. Izrada modela u Simulinku je primjer kauzalnog modeliranja (engl. *causal modeling*), te takva vrsta modeliranja nije prikladna za izradu modela velikih sustava ili kada postoje zahtjevi za učestalim izmjenama u modelu. S druge pak strane, primjer okruženja za nekauzalno modeliranje (engl. *acausal modeling*) je Simscape, također dodatak MATLAB-u. U literaturi se za nekauzalno modeliranje mogu pronaći sinonimi kako je riječ o modeliranju utemeljenom na jednadžbama (engl. *equation based*) ili pak kako se radi o fizičkom modeliranju (engl. *physical based*). Navedeno modeliranje se fokusira na opisivanju fizičkih sustava pomoću diferencijalnih i algebarskih jednadžbi, a sami tok signala nije unaprijed određen, tj. dvosmjernan je. Za svaku komponentu u Simscape-u dan je izvorni kôd koji opisuje funkciju koju komponenta izvršava. Taj kôd je podložan promjenama od strane korisnika, na način da je moguće prilagoditi funkciju komponente okruženju u kojem se nalazi. Iako oba pristupa izradi modela imaju svoje

prednosti i nedostatke, prednost korištenja nekauzalnog modeliranja je u njegovoj jednostavnosti izrade modela i naknadnih izmjena. Iako će se prikazani toplinsko-električni model u nastavku u većoj mjeri sastojati od Simscape komponenti, on će također sadržavati blokove iz Simulink biblioteke.

Zaključno, modeliranje korištenjem Simscape komponenti je dosta jednostavnije u odnosu na Simulink blokove, iz razloga što nije potrebno poznavati matematičke jednadžbe koje opisuju korištene komponente sustava. Simscape ujedno omogućava integraciju različitih domena fizike u jedan model, što olakšava simulaciju složenih sustava koji npr. uključuju električne, toplinske, mehaničke ili pak hidraulične komponente.

Na slici 2.1 prikazane su Simscape komponente korištene pri izradi toplinskog modela, a čija je integrirana inačica s električnim modelom predstavljena u potpoglavlju 2.2. Nazivi i kratki opis funkcije pojedine komponente predstavljeni su u nastavku.



Slika 2.1 Komponente u Simscape-u korištene za izradu toplinskog modela: a) toplinski otpornik; b) prijenos topline kondukcijom; c) toplinska masa; d) toplinska referentna točka; e) senzor temperature; f) izvor temperature; g) kontrolirani izvor toplinskog toka; h) hladilo

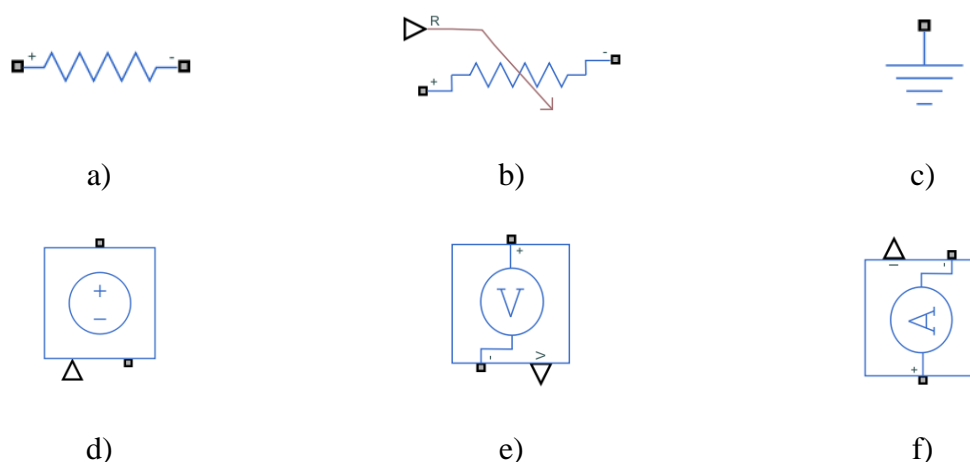
Na slici 2.1 prikazane su sljedeće komponente:

- a) **Toplinski otpornik** (engl. *Thermal Resistance*) – iznos toplinskog toka koji prolazi kroz ovaj otpornik je proporcionalan iznosu temperaturnog gradijenta na njegovim krajevima, a obrnuto proporcionalan vrijednosti toplinskog otpora.
- b) **Prijenos topline kondukcijom** (engl. *Conductive Heat Transfer*) – navedenim blokom se modelira prijenos topline u toplinskom sustavu vođenjem kroz sloj materijala. Iznos

toplinskog toka kroz sloj materijala je određen Fourierovim zakonom vođenja topline i proporcionalan je temperaturnom gradijentu, toplinskoj vodljivosti materijala i površini okomitoj na smjer toplinskog toka, a obrnuto je proporcionalan debljini sloja materijala. Toplinska vodljivost može biti konstantnog ili promjenjivog iznosa. U slučaju korištenja promjenjivog iznosa, vrijednost je moguće definirati preko fizičkog ulaza na priključku K ili preko tabličnih vrijednosti vodljivosti, u ovisnosti o temperaturi. Ako se vodljivost definira iznosom fizičkog signala, ona ne može poprimiti vrijednost manju od minimalno definiranog iznosa, čak i ako signal padne ispod te razine.

- c) **Toplinska masa** (engl. *Thermal Mass*) – primjenom ovog bloka modelira se pohrana unutarnje energije u toplinskom sustavu. Iznos temperaturnog prirasta je proporcionalan iznosu toplinskog toka kroz tijelo, a obrnuto proporcionalan umnošku mase i specifičnog toplinskog kapaciteta tijela
- d) **Toplinska referentna točka** (engl. *Thermal Reference*) – ovaj blok predstavlja referentnu točku u toplinskom sustavu u kojoj je temperatura jednaka iznosu apsolutne nule.
- e) **Senzor temperature** (engl. *Temperature Sensor*) – primjena ove komponente omogućava mjerenje temperature u toplinskom sustavu. Kroz senzor ne prolazi toplinski tok, čineći ga idealnim senzorom. Fizički signalni priključak T pamti razliku temperatura ostvarenih na priključcima A i B . Iznos temperature je pozitivan kada je temperatura na priključku A većeg iznosa od temperature na priključku B .
- f) **Izvor temperature** (engl. *Temperature Source*) – ovaj blok predstavlja idealan izvor energije u toplinskom sustavu, koji može održavati konstantnu apsolutnu temperaturu na priključku, bez obzira na iznos toplinskog toka u sustavu.
- g) **Kontrolirani izvor toplinskog toka** (engl. *Controlled Heat Flow Rate Source*) – ovaj blok predstavlja idealan izvor energije u toplinskom sustavu koji može održavati kontrolirani iznos toplinskog toka, bez obzira na temperaturnu razliku, pri čemu je iznos toplinskog toka definiran preko fizičkog signala na priključku S . Pozitivan toplinski tok znači da tok protječe sa priključka A prema priključku B .
- h) **Hladilo** (engl. *Heatsink*) – ovaj blok modelira hladilo ili pak izmjenjivač topline, koje se najčešće koristi za disipiranje topline u okolinu putem konvekcije. Ovaj blok je moguće parametrizirati na osnovu specifikacija hladila, iz dostupnih tablica svojstava prijenosa topline ili iz geometrije hladila, pretpostavljajući empirijsku korelaciju konvekcije. Ako se koristi prisilna konvekcija (aktivno hlađenje), signal na ulaznom priključku v određuje brzinu strujanja zraka. Standardne vrijednosti parametara fluida odnose se na zrak.

Na slici 2.2 prikazane su Simscape komponente korištene za izradu električnog modela.



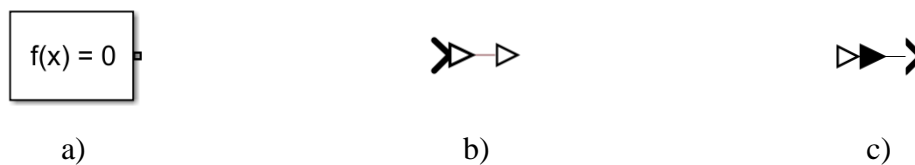
Slika 2.2 Komponente u Simscape-u korištene za izradu električnog modela: a) otpornik; b) promjenjivi otpornik; c) električna referentna točka; d) kontrolirani naponski izvor; e) senzor napona; f) senzor struje

Na slici 2.2 prikazane su sljedeće komponente:

- a) **Otpornik** (engl. *Resistor*) – strujno-naponska karakteristika linearnog otpornika je dana jednadžbom $U = IR$, gdje je R oznaka za otpor konstantne vrijednosti (Ω). Kada je smjer struje od pozitivnog prema negativnom priključku, uzima se da je smjer struje pozitivan. Ova konvencija osigurava da je snaga apsorbirana od strane otpornika uvijek pozitivna.
- b) **Promjenjivi otpornik** (engl. *Variable Resistor*) – ovaj blok predstavlja model linearnog otpornika promjenjive vrijednosti. Odnos između napona i struje predstavljen je izrazom $U = IR$, gdje je R numerička vrijednost definirana fizičkim signalom na priključku R . Definirani iznos minimalnog otpora sprječava negativne vrijednosti otpora. Smjer struje je pozitivan kada ona protječe od pozitivnog prema negativnom priključku.
- c) **Električna referentna točka** (engl. *Electrical Reference*) – ovaj blok predstavlja referentnu točku u električnom sustavu. Model mora sadržavati barem jedan električni referentni priključak (električno uzemljenje).
- d) **Kontrolirani naponski izvor** (engl. *Controlled Voltage Source*) – primjenom ovog bloka modelira se idealni naponski izvor koji je u mogućnosti održavati konstantan napon na stezaljkama, bez obzira na iznos struje koja prolazi kroz njega. Izlazni napon je definiran numeričkom vrijednosti signala spojenog na fizički priključak.

- e) **Senzor napona** (engl. *Voltage Sensor*) – ovaj blok predstavlja idealni senzor napona koji mjeri razliku potencijala između + i – priključaka, a izmjerena vrijednost napona je potom dostupna na fizičkom signalnom priključku.
- f) **Senzor struje** (engl. *Current Sensor*) – ovaj blok predstavlja idealni senzor struje koji se spaja u električni krug preko + i – priključaka, a izmjerena vrijednost struje je dostupna na fizičkom signalnom priključku.

Na slici 2.3 predstavljene su dodatne Simscape komponente koje će se koristiti pri izradi modela, njihovi nazivi i kratki opis funkcije su predstavljeni u nastavku.



Slika 2.3 Dodatne komponente u Simscape-u korištene kod modeliranja: a) metoda rješavanja; b) pretvarač Simulink ulaznog signala u fizički signal; c) pretvarač fizičkog ulaznog signala u Simulink signal

Na slici 2.3 prikazane su sljedeće komponente:

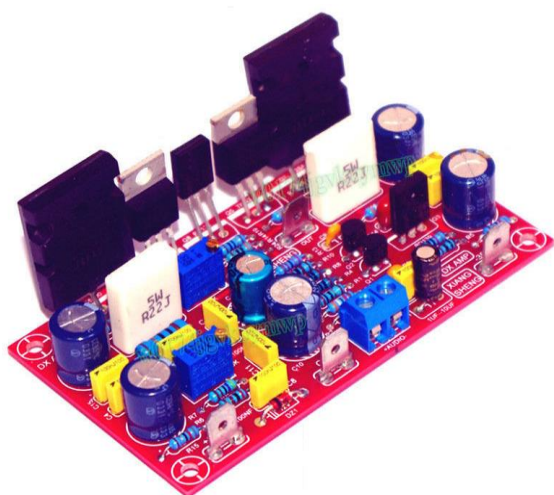
- a) **Metoda rješavanja** (engl. *Solver Configuration*) – simulacija sustava podrazumijeva računanje njegovih stanja u uzastopnim vremenskim koracima u razmatranom intervalu, koristeći pritom informacije koje pruža model. Proces računanja navedenih uzastopnih stanja sustava na osnovu modela poznat je kao rješavanje modela. Ne postoji univerzalna metoda rješavanja modela koja je primjenjiva na sve sustave. Stoga Simulink pruža skup programa, poznatih i kao rješavači, pri čemu svaki odražava određeni pristup rješavanja modela. Rješavače je moguće razdijeliti u dvije osnovne skupine. Prva podjela se odnosi s obzirom na vrstu i duljinu koraka, gdje je moguće odabrati fiksni ili promjenjivi korak. Izbor vrste i duljine koraka je kompromis između brzina izvođenja simulacije i točnosti generiranih rezultata. Druga podjela se odnosi na kontinuirane i diskretne rješavače, pri čemu je moguće koristiti kontinuirani rješavač, ali ne i diskretni rješavač, za modele koji sadrže i kontinuirana i diskretna stanja.
- b) **Pretvarač Simulink ulaznog signala u fizički signal** (engl. *Simulink-PS Converter*) – izraz mjerne jedinice u parametru „Input signal unit“ se dodjeljuje izlaznom fizičkom signalu, potvrdni okvir „Apply affine conversion“ se primjenjuje samo u slučaju mjernih jedinica s pomakom, kao što je npr. mjerna jedinica temperature. Ako odabrani rješavač zahtijeva derivacije ulaza, može ih se ili eksplicitno pružiti putem dodatnih signalnih

priključaka ili uključiti filtriranje ulaznog signala za izračun vremenskih derivacija. Filter prvog reda osigurava prvu derivaciju signala, dok filter drugog reda osigurava i drugu derivaciju. Za signale koji svoj iznos mijenjaju samo u određenim diskretnim vremenskim trenutcima, može se eksplicitno postaviti derivacija ulaznog signala na nulu.

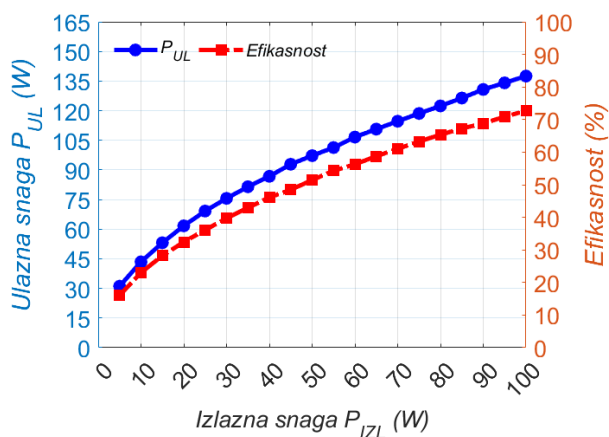
- c) **Pretvarač fizičkog ulaznog signala u Simulink signal** (engl. *PS-Simulink Converter*) – na osnovu ulaznog fizičkog signala vrši se pretvorba u Simulink izlazni signal, a čiji format odgovara formatu ulaznog signala. Postoji i opcija prikaza ulaznog vektora kao 1-D niza Simulink izlaznih signala. Potrebno je da se mjerna jedinica u parametru „Output signal unit“ slaže s mjernom jedinicom ulaznog fizičkog signala. Potvrđni okvir „Apply affine conversion“ se primjenjuje samo u slučaju mjernih jedinica s pomakom, kao što je npr. mjerna jedinica temperature.

2.2. Modeliranje termoelektričnog sustava

Istraživanje u ovom radu je provedeno na komercijalno dostupnom audio pojačalu snage u AB-klasi, nazivne izlazne snage 100 W, pri opterećenju od 4 Ω . Izgled korištenog pojačala je prikazan na slici 2.4a, dok je izmjereni graf ovisnosti izlazne snage o ulaznoj snazi dobivene iz ispravljača i efikasnosti, prikazan na slici 2.4b. Graf je dobiven tako da se izlazna snaga pojačala izračuna na osnovu izmjerene efektivne vrijednosti napona na potrošaču poznatog i konstantnog iznosa, a iznos ulazne snage izračunat je na osnovu izmjerenih iznosa struje i napona ispravljača. Efektivna vrijednost napona na potrošaču je izmjerena korištenjem digitalnog osciloskopa Rigol DS2102, dok su struja i napon koju daje ispravljač mjereni pomoću digitalnog multimetra UNI-Trend UT71A. Sa grafa je vidljivo da efikasnost pojačala nije konstantnog iznosa, već da ovisi o amplitudi ulaznog izmjeničnog signala. U teoriji, efikasnost audio pojačala snage u AB-klasi pri maksimalnoj vrijednosti izlaznog signala poprima vrijednost od $\pi/4$ (78.5%), u praksi je iznos efikasnosti ipak nešto nižeg iznosa. Za korišteno pojačalo u ovom istraživanju, pri maksimalnoj vrijednosti izlaznog signala, efikasnost poprima vrijednost od ~71%.



a)



b)

Slika 2.4 Audio pojačalo snage u AB-klassi: a) prikaz korištenog pojačala; b) graf ovisnosti izlazne snage i efikasnosti o ulaznoj snazi [119]

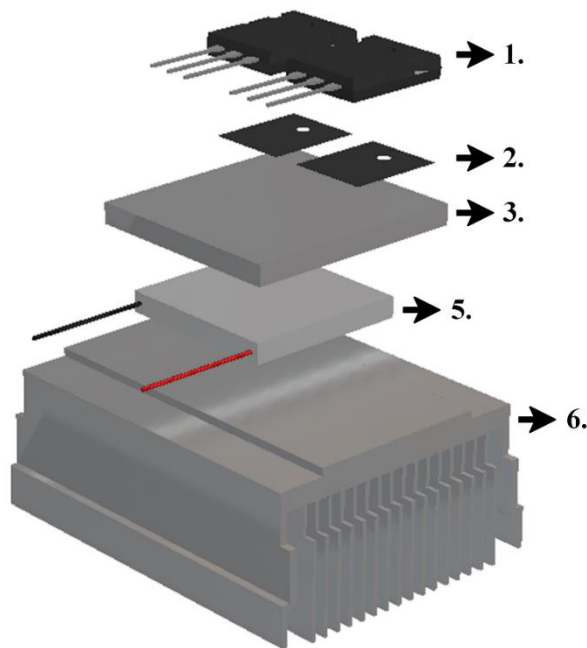
Iznosi ulazne snage za 4 različite vrijednosti izlazne snage koje će se razmatrati u ovom istraživanju su predstavljene u tablici 2.1. Na osnovu poznatih vrijednosti ulazne i izlazne snage, moguće je odrediti iznos disipirane snage, kao i efikasnost pojačala. Pri izradi modela, kao i u posljednjem poglavlju gdje se analizira procjena povećanja stupnja efikasnosti, pretpostavljeno je da svu razliku izlazne i ulazne snage disipiraju izlazni tranzistori u obliku toplinske energije, što nije u potpunosti točno. I ostale komponente pojačala se također zagrijavaju tijekom rada, ali u daleko manjoj mjeri od izlaznih tranzistora, što će kasnije biti potvrđeno termogramom.

Tablica 2.1 Izmjereni iznosi snage na korištenom pojačalu snage

P_{IZL} (W)	P_{UL} (W)	$P_{DISIPRANO}$ (W)	Efikasnost (%)
25	69.18	44.18	36.14
50	97.22	47.22	51.43
75	118.59	43.59	63.24
100	137.51	37.51	72.72

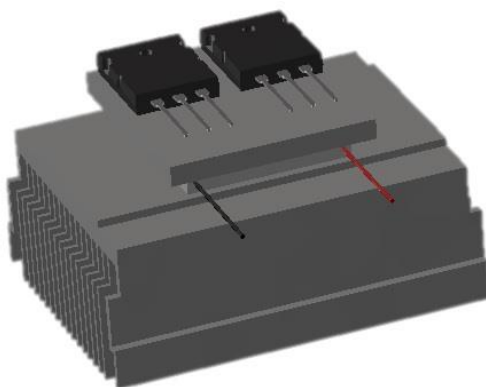
Termoelektrični sustav koji će se modelirati je prikazan na slici 2.5 i sastoji se od sljedećih komponenti:

1. komplementarnog para izlaznih tranzistora (Toshiba 2SC5200 i 2SA1943),
2. silikonskih liskuna korištenih u svrhu električne izolacije kolektora tranzistora,
3. raspršivača topline u obliku aluminijske ploče,
4. termovodljive paste nanijete na površine termoelektričnog generatora (nije prikazano),
5. termoelektričnog generatora,
6. hladila korištenog u svrhu disipacije toplinske energije na hladnoj strani generatora.

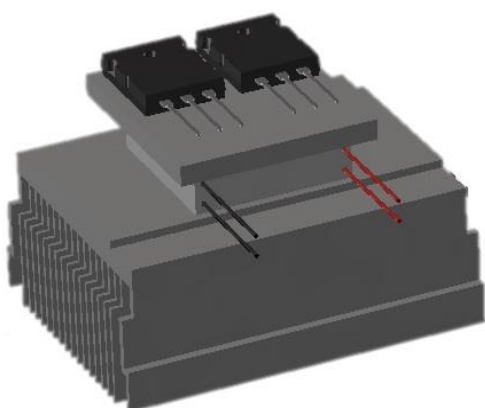


Slika 2.5 Montažna shema testiranog termoelektričnog sustava

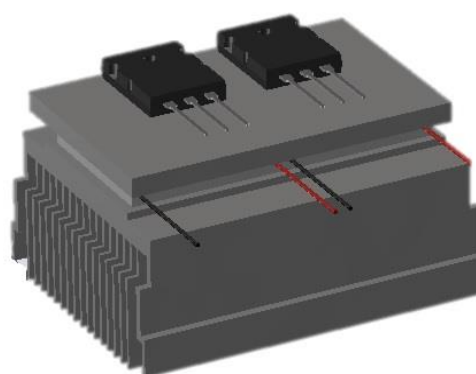
Osim pojedinačno spojenog termoelektričnog generatora, u ovoj disertaciji razmatrati će se i ostali toplinski spojevi generatora. Na slici 2.6a prikazan je pojedinačno spojeni generator, dok je na slici 2.6b prikazan toplinsko serijski spoj dva termoelektrična generatora, jedan iznad drugog. Treba naglasiti da toplinsko serijski ili paralelni spoj ne znači da su generatori spojeni u isti takav električni spoj, dapače, u nastavku rada svaki od tih generatora će biti spojen na vlastiti potrošač i razmatrati će se neovisno o drugome. Konfiguracija dva termoelektrična generatora u spoju jedan pokraj drugog se naziva toplinsko paralelni spoj i prikazan je na slici 2.6c. Osnovna uloga raspršivača topline je da posluži kao podloga za fiksiranje izlaznih tranzistora. Idealno bi bilo da je izrađen od materijala visokog iznosa toplinske vodljivosti (npr. bakar ili aluminij) i da mu je površina ekvivalentna površini generatora, međutim, u eksperimentalnoj postavci uslijed tehničkih ograničenja, korištene su ipak nešto veće površine raspršivača topline.



a)



b)

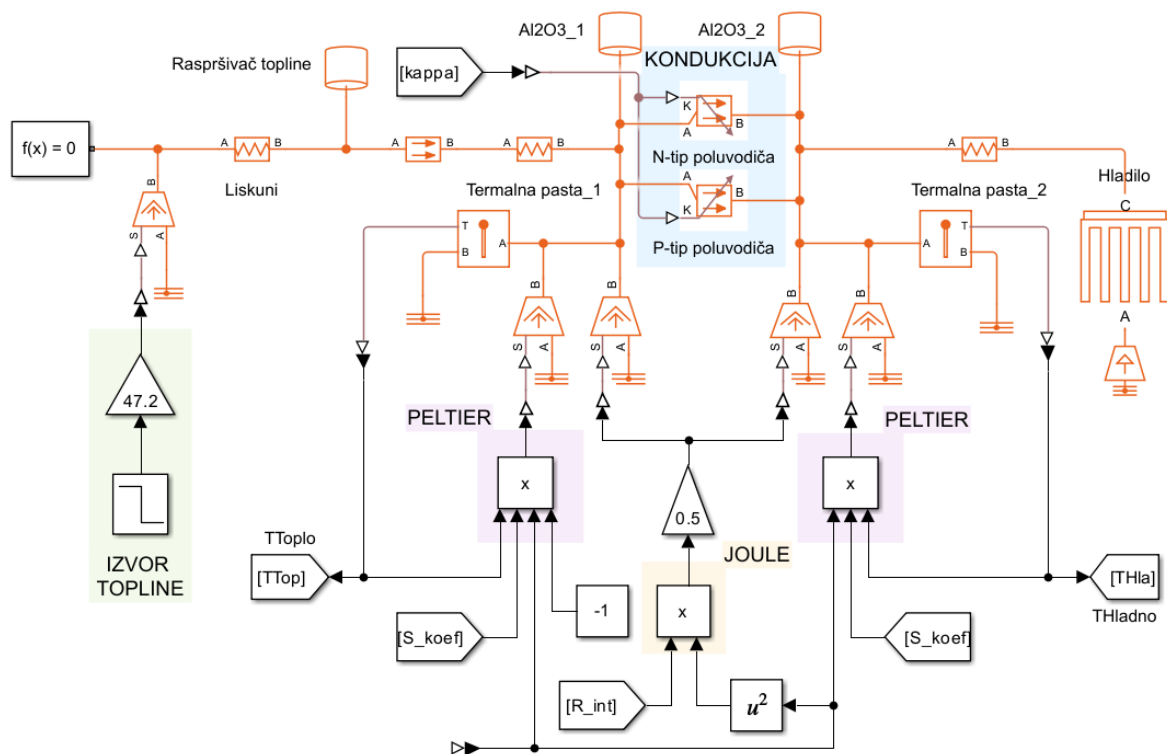


c)

Slika 2.6 Toplinski spojevi: a) pojedinačno spojeni TEG; b) toplinsko serijski spoj TEG-ova; c) toplinsko paralelni spoj TEG-ova [119]

Toplinski dio modela je prikazan na slici 2.7, a utemeljen je na jednadžbama za toplinsku energiju, izvedenim u izrazima (1.17) i (1.18). Kao izvor topline koji zagrijava sustav korištena je snaga disipirana na izlaznim tranzistorima, kada se na potrošaču pojačala razvija snaga od 50 W. Prema tablici 2.1, iznos disipirane snage u tom slučaju iznosi 47.2 W, pa je taj iznos preko „step“ funkcije spojen na ulaz sustava. Na slici je plavom bojom označen dio u kojemu se odvija proces vođenja (kondukcije) topline kroz p i n-tip poluvodiča. Ljubičastom bojom označeni su blokovi u kojima se računa snaga kojom se topli kraj termoparova hladi, a hladni kraj zagrijava, uslijed djelovanja Peltierovog efekta. Ovaj efekt je nepoželjan kada termoelektrični uređaj radi kao generator. Žutom bojom je označen blok u kojemu se računa iznos snage zagrijavanja uslijed Jouleovog efekta, a kojim se iznosom podjednako zagrijavaju oba kraja termopara [105].

Važno je naglasiti poveznicu između toplinskog i električnog dijela modela, s obzirom da su oni međusobno ovisni. Na osnovu ostvarenog temperaturnog gradijenta u toplinskom dijelu modela, generira se napon otvorenog kruga u električnom dijelu, a sve prema izrazu (1.10). Ako je strujni krug zatvoren na način da je spojen potrošač, dolazi do protjecanja struje tim krugom. Iznos struje preko Peltierovog i Jouleovog efekta direktno utječe na ostvarene iznose temperatura u toplinskom dijelu modela.



Slika 2.7 Toplinski dio modela termoelektričnog sustava u Simulinku

Pri izradi toplinskog modela korištene su sljedeće vrijednosti parametara koje definiraju njegove sastavne komponente:

- **toplinski otpor**: u literaturi najčešće spominjana vrijednost toplinskog otpora silikonskih liskuna za TO-3P kućišta tranzistora iznosi 0.4 K/W [120]. S obzirom da se izvor topline sastoji od komplementarnog para izlaznih tranzistora, tako je iznos toplinskog otpora za blok 'Liskuni' jednak 0.2 K/W. Korištena je komercijalno dostupna termo vodljiva pasta s iznosom toplinskog otpora $<1.451 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$. Iznos toplinskog otpora kod pojedinačno spojenog i za toplinsko serijski spoj termoelektričnih generatora je jednak 0.0907 K/W, uzimajući u obzir dodirnu površinu od 16 cm^2 , dok je za toplinsko paralelni spoj jednak 0.04535 K/W.

- **toplinska masa:** kao ulazne parametre zahtijeva težinu i specifični toplinski kapacitet korištenog materijala. Težina raspršivača topline ovisi o vrsti toplinskog spoja, a iznosi 42 g za pojedinačni i toplinsko serijski spoj ili 68 g za toplinsko paralelni spoj. Kako je materijal izrade raspršivača aluminij, vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta iznosi 903 J/(K*kg). Keramički supstrat je izrađen od aluminijevog oksida (Al₂O₃), čiji je iznos specifičnog toplinskog kapaciteta 451 J/(K*kg), a težina 7.84 g ili 15.68 g, ovisno o vrsti toplinskog spoja. Masa korištenih raspršivača topline je izmjerena digitalnom vagom.
- **prijenos topline kondukcijom:** ulazni parametri ovog bloka su definirani s Fourierovim zakonom o prijenosu topline, površinom, debljinom i toplinskom vodljivosti materijala. Blok kondukcije povezan s prijenosom topline iz raspršivača topline u sami generator je definiran površinom iznosa 32.5 cm² ili 53.3 cm² (izmjereno), ovisno o toplinskom spoju. Debljina raspršivača topline je 5 mm, a za iznos toplinske vodljivosti aluminija korištena je vrijednost od 237 W/(m*K). Drugi blok kondukcije u modelu predstavlja kondukciju topline kroz termoparove unutar generatora. Dimenzije termoparova korištenog modela generatora su izmjereni mikrometrom i prikazani na slici 2.8a. Iznos toplinske vodljivosti je razmatran za dva slučaja, primjenom konstantnih iznosa i temperaturno promjenjivih iznosa koeficijenata, dobivenih korištenjem srednje vrijednosti temperatura na krajevima generatora.
- **hladilo:** parametri koji definiraju korišteno hladilo u modelu su prikazani na slici 2.8b.

NAME	VALUE
Parameters	
Conductivity type	Variable input
Wall geometry	Planar
> Area	127*(1.2*1.2) 182.88 mm ²
> Thickness	1.2 mm
> Minimum thermal conductivity	0.1 W/(m*K)
Initial Targets	
Nominal Values	

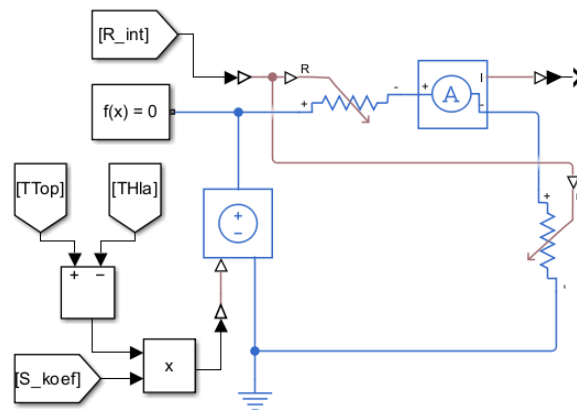
a)

NAME	VALUE
Steady State	
Parameterization	Assume rectangular parallel fins
Convection	Natural
> Fin height	30 mm
> Fin thickness	1 mm
> Fin depth	90.5 mm
> Number of fins	17
> Fin thermal conductivity	237 W/(K*m)
Fluid Properties	
Dynamics	
> Heatsink mass	212.91 g
> Heatsink specific heat	903 J/(K*kg)
Initial Targets	
Nominal Values	

b)

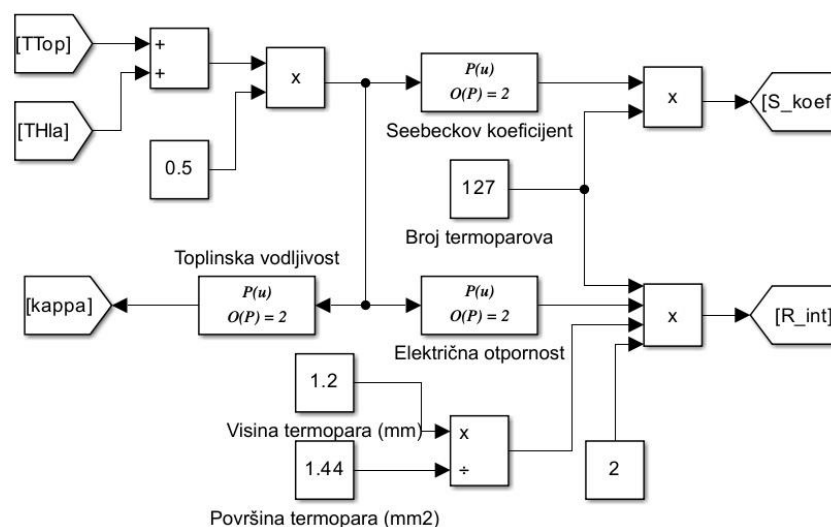
Slika 2.8 Vrijednosti parametara korištenih u modelu: a) n-tip poluvodiča; b) hladila

Termoelektrični generator u električnom smislu predstavlja realni naponski izvor koji se sastoji od kontroliranog naponskog izvora i unutarnjeg električnog otpora (slika 2.9). Naponski izvor će uvijek biti promjenjivog iznosa jer ovisi o temperaturnom gradijentu, dok će električni otpor u jednom slučaju biti promjenjiv, a u drugome konstantan, prilikom korištenja konstantnog koeficijenta električne otpornosti. Tehnika za praćenje točke maksimalne snage nije obuhvaćena prikazanim modelom, već je maksimalni prijenos snage s termoelektričnog generatora realiziran direktnim prilagođenjem iznosa otpora potrošača iznosu unutarnjeg električnog otpora.



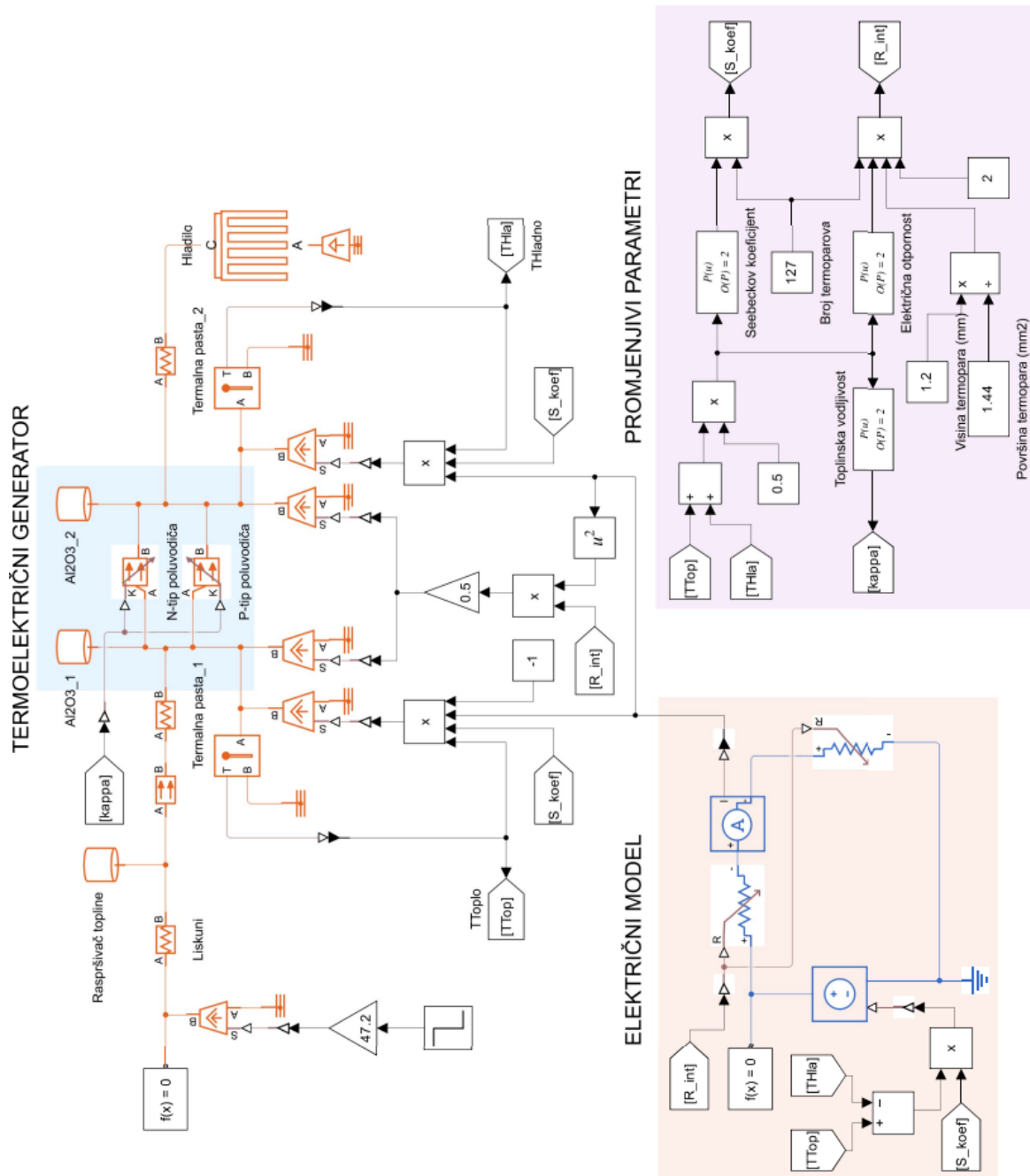
Slika 2.9 Električni dio modela termoelektričnog sustava u Simulinku

Podsustav prikazan na slici 2.10 služi za računanje temperaturno ovisnih koeficijenata i parametra unutarnjeg električnog otpora. Metoda računanja koeficijenata se temelji na izrazima (1.24-1.26). Za slučaj korištenja konstantnih koeficijenata, preuzete su vrijednosti koeficijenata iz tablice 1.1, a parametri se računaju na osnovu izraza (1.8-1.10).



Slika 2.10 Dio modela za računanje temperaturno promjenjivih koeficijenata

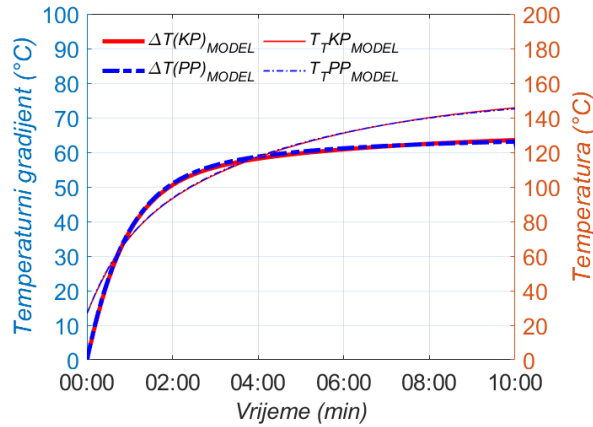
Potpuni toplinsko-električni model sustava prikazanog na slici 2.5, razvijen u Simscape okruženju, je predstavljen na slici 2.11. Model se sastoji od više povezanih podsustava, a koji su proanalizirani poviše u tekstu. Poveznica između toplinskog i električnog dijela modela je struja generirana u električnom modelu, a čiji iznos ima negativan utjecaj na ostvarene temperature u toplinskom dijelu modela. Podsustav za računanje temperaturno promjenjivih koeficijenata kao zadatak ima da u svakom trenutku simulacije, na osnovu temperatura, odredi iznos Seebeckovog koeficijenta, električne otpornosti i toplinske vodljivosti.



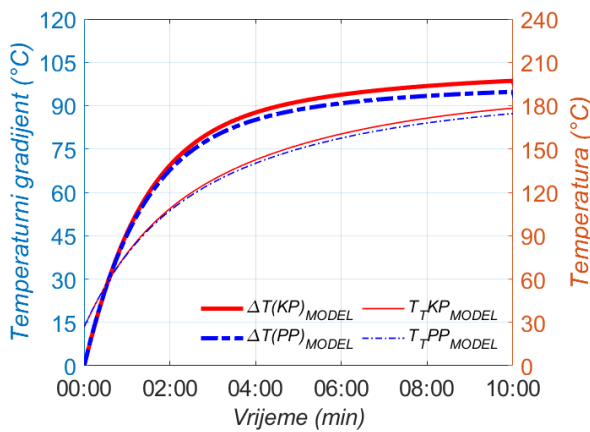
Slika 2.11 Potpuni toplinsko-električni model razvijen u Simulink okruženju

Prilikom simulacije korištena je metoda rješavanja promjenjivog koraka, te je programu prepušteno da samostalno odabere način s kojim će pristupiti rješavanju pozadinskih jednadžbi (engl. *Automatic solver selection*). Uvijek se odabirao „daessc“ rješavač (engl. *DAE solver for Simscape*), koji sadrži algoritme za rješavanje diferencijalno-algebarskih jednadžbi proizašlih iz modeliranja fizičkog sustava. Usporedbom rezultata ostvarenih primjenom „daessc“ algoritma i nekog drugog rješavača, donesen je zaključak da nema značajnih odstupanja u rezultatima, dok je jedina primjetna razlika u vremenu potrebnom za izvršenju simulacije. Ostvareni vremenski interval izvođenja simulacije u našem slučaju iznosio je 960 sekundi. Na ulaz toplinskog modela (slika 2.7) postavljena je „step“ funkcija, s ciljem analize protutaktnog načina rada generatora. Navedena funkcija osigurava da je toplinski izvor prvih 600 sekundi aktivan i nalazi se u stanju logičke '1', dok je preostalih 360 sekunda on neaktivan, tj. „step“ funkcija je u stanju logičke '0'. Navedenim načinom rada moguće je napraviti usporedbu iznosa energije generirane za vrijeme zagrijavanja sustava i u vremenu hlađenja istog tog sustava, kada je pojačalo ugašeno.

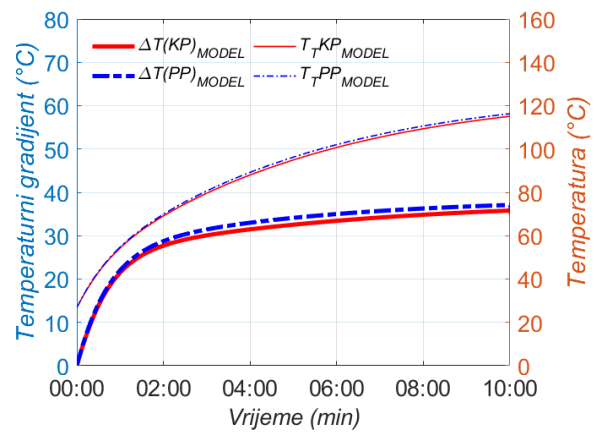
Nakon upoznavanja s programskim okruženjem Simscape i modeliranja termoelektričnog sustava, u nastavku će biti prikazani određeni rezultati iz toplinskog i električnog modela, a koji će nam poslužiti boljem razumijevanju rada ovog sustava. Na slikama 2.12 i 2.13 napravljena je usporedba ostvarenih rezultata primjenom konstantnih (KP_{MODEL}) i promjenjivih koeficijenata (PP_{MODEL}). Slika 2.12 prikazuje temperaturu tople strane i ostvareni temperaturni gradijent kod pojedinačno spojenog termoelektričnog generatora, te u toplinsko serijskom i paralelnom spoju. Iznos disipirane snage je određen na osnovu tablice 2.1, za slučaj kada pojačalo radi s izlaznom snagom od 50 W, a temperature su razmatrane u vremenskom intervalu od 10 minuta. Praksa je pokazala da audio pojačala snage najviše vremena provedu upravo pri radu na polovici nazivne snage, što je ujedno i razlog odabira navedene izlazne i disipirane snage kod simulacije. Grafovi prvenstveno ukazuju da je ostvareni temperaturni gradijent najvećeg iznosa za toplinsko serijski spoj generatora, zatim kod pojedinačno spojenog generatora i naposljetku za toplinsko paralelni spoj. Osim temperaturnog gradijenta (ΔT), vrlo važna stavka je i temperatura tople strane (T_T), s obzirom da poluvodičke komponente (uz neke izuzetke) uglavnom rade do temperature kućišta od 150°C. Iako bi se moglo zaključiti da je toplinsko serijski spoj generatora najbolji s obzirom na ostvareni temperaturni gradijent, u navedenom spoju se i generiraju najviši iznosi temperature tople strane, što je pak negativna posljedica korištenja takvog spoja. Temperatura tople strane u razmatranom spoju i vremenu prelaze spomenutih 150°C, te je zatim potrebno ugasiti pojačalo kako bi zaštitili izlazne tranzistore i generatore od oštećenja uslijed pregrijavanja.



a)



b)



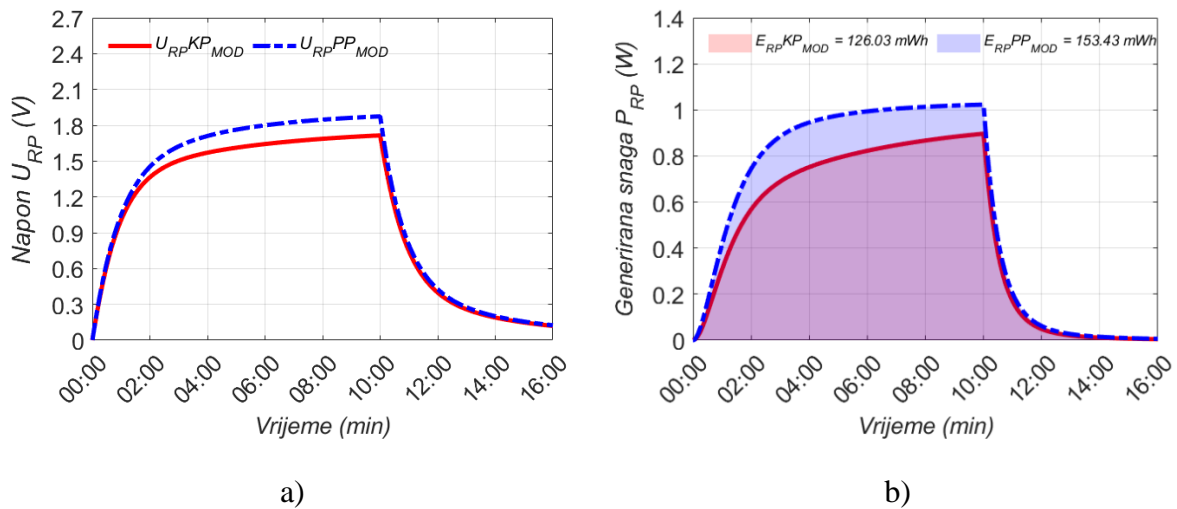
c)

Slika 2.12 Temperaturni gradijent i temperatura tople strane (simulacija): a) pojedinačni spoj; b) toplinsko serijski spoj; c) toplinsko paralelni spoj

Najmanji iznos temperature tople strane ostvaren je za toplinsko paralelni spoj, ali je tu ujedno riječ i o najmanjem iznosu temperaturnog gradijenta. Rezultati ostvareni primjenom pojedinačno spojenog termoelektričnog generatora pokazuju veliku razinu podudarnosti, neovisno koriste li se konstantni ili promjenjivi parametri. Rezultati ostvareni primjenom ostala dva toplinska spoja pokazuju veće iznose odstupanja u odnosu na pojedinačno spojeni generator.

Za razliku od temperature tople strane i temperaturnog gradijenta, generirani napon na prilagođenom potrošaču u pojedinačnom spoju generatora pokazuje određeno odstupanje (slika 2.13a). Odstupanje je većeg iznosa u grafu izračunate snage (energije) generirane na potrošaču iz razloga što model koji u obzir uzima promjenjive parametre koristi niže vrijednosti unutarnjeg električnog otpora, u odnosu na model s konstantnim iznosima parametara.

S obzirom na navedeno, izračunata snaga razvijena na prilagođenom potrošaču je manjeg iznosa u modelu koji koristi konstantne iznose koeficijenata.



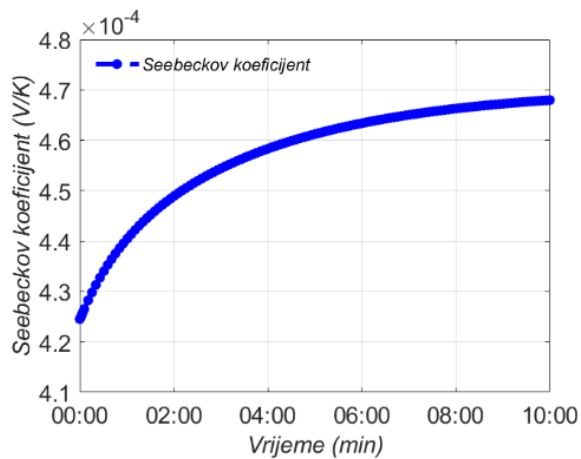
Slika 2.13 Pojedinačni spoj (simulacija): a) napon na prilagođenom potrošaču; b) generirana snaga i energija

Na slici 2.13 vidljivo je da generatori i nakon isključenja izvora topline (u 10. minuti) nastavljaju s generiranjem snage na prilagođenom potrošaču, sve dok temperaturni gradijent ne iščezne, što opet traje određeni vremenski period. Na osnovu grafova prikazanih na slici 2.13b, u tablici 2.2 su prikazani iznosi generirane energije na potrošaču u periodu zagrijavanja (do 10. minute), te u periodu hlađenja (nakon 10. minute). Iako se ne radi o velikom iznosu energije ostvarene tijekom hlađenja, reda veličine 10-ak % u odnosu na zagrijavanje, u ovom radu će se nastojati iskoristiti i ta energija, primjenom novog, protutaktnog načina rada termoelektričnih generatora. Primjena ovakvog načina rada bi osim prikupljanja energije za vrijeme hlađenja, s različitim vremenima prebacivanja omogućila kontrolu temperature izlaznih tranzistora.

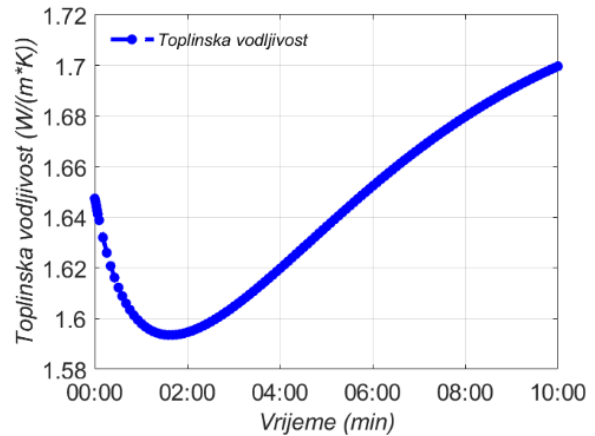
Tablica 2.2 Generirana energija u periodu zagrijavanja i hlađenja

Koeficijenti	Pojedinačno spojeni TEG			
	E _{KUPNO} (mWh)	E _{GRIJANJE} (mWh)	E _{HLADENJE} (mWh)	$\Delta E_{DODATNO}$ (%)
konstantni	126.03	116.3	9.7	8.34
promjenjivi	153.43	141.9	11.5	8.1

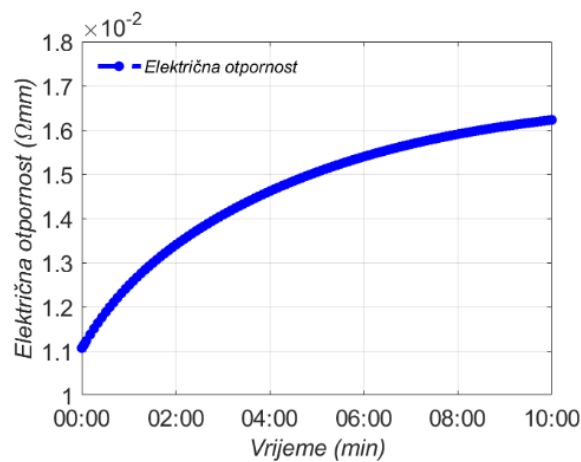
Na osnovu podsustava za računanje temperaturno ovisnih koeficijenata prikazanog na slici 2.10, promjenjivost koeficijenata, ukupan Seebeckov koeficijent termopara, toplinska vodljivost i električna otpornost pojedinog poluvodiča, za vrijeme simulacije, prikazana je na slici 2.14.



a)



b)



c)

Slika 2.14 Temperaturno promjenjivi koeficijenti u pojedinačnom spoju (simulacija): a) ukupan Seebeckov koeficijent; b) koeficijent toplinske vodljivosti; c) električna otpornost

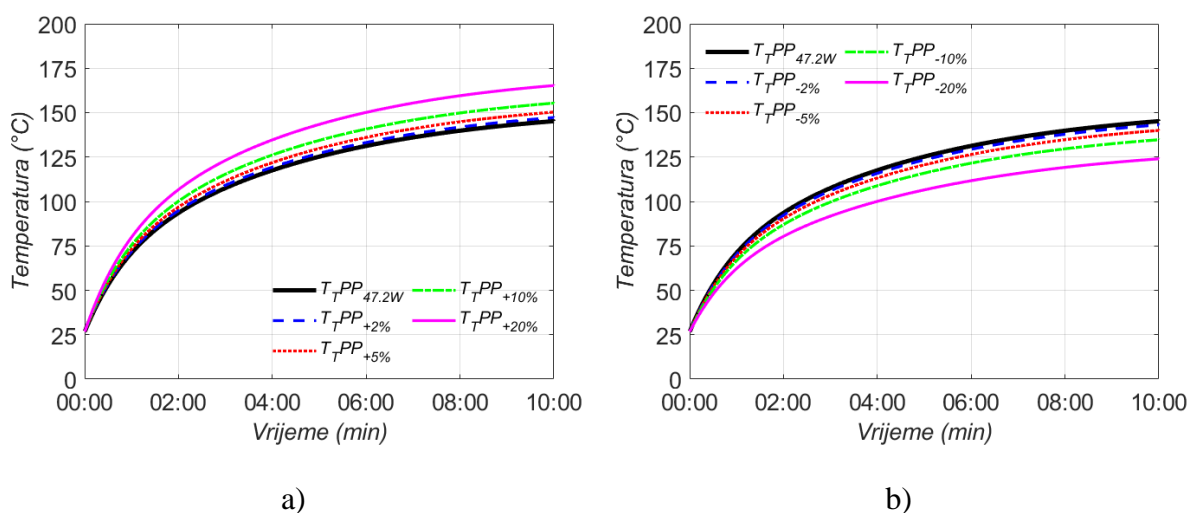
Zaključno, odstupanja u ostvarenim rezultatima proizašlih iz simulacije modela se nalaze u prihvatljivim granicama, bilo da su korišteni konstantni ili promjenjivi koeficijenti. Odstupanja su izraženija u temperaturama generiranim u toplinsko serijskom i paralelnom spoju generatora, nego li je to slučaj uz primjenu pojedinačno spojenog generatora. Iako odstupanja u generiranom naponu na prilagođenom potrošaču postoje, odstupanja u grafovima generirane snage (energije) na prilagođenom potrošaču su izraženija zbog različitih iznosa unutarnjih električnih otpora. Tek nakon verifikacije rezultata ostvarenih simulacijom modela, može se donijeti zaključak u kojoj mjeri i u kojim situacijama je predstavljeni model opravdan za korištenje.

Osjetljivost modelom ostvarenih rezultata u ovisnosti o iznosu ulaznog parametra modela i parametara komponenti koje sačinjavaju taj model, biti će razmatrana u nastavku potpoglavlja. Analiza je napravljena s pojedinačno spojenim termoelektričnim generatorom, dok su na model primijenjeni konstantni i promjenjivi parametri (koeficijenti). U razmatranje je uzeta promjena vrijednosti sljedećih parametara modela:

- iznosa disipirane snage koja zagrijava cjelokupni sustav,
- visine i poprečnog presjeka termoparova koji sačinjavaju termoelektrični generator,
- visine i poprečnog presjeka raspršivača topline,
- visine i dužine rebara korištenog hladila.

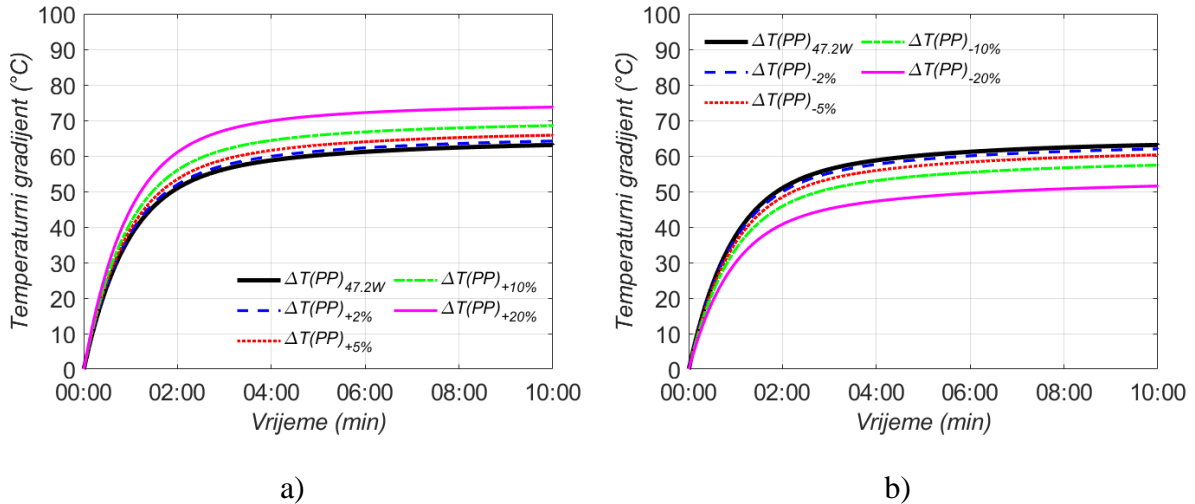
Navedeni iznosi su mijenjani s fiksnim postotkom u odnosu na njihovu početnu vrijednost, bilo da je riječ o povećanju ili smanjenju konačnog iznosa. Konkretno, iznosi parametara su mijenjani za 2, 5, 10 i 20%, te je promatrana temperatura tople strane i temperaturni gradijent za 10-minutni vremenski interval, te generirana energija na potrošaču u 16-minutnom vremenskom intervalu. Sva analiza je napravljena po uzoru na grafove na slikama 2.12 i 2.13b, kako bi dobivene iznose mogli usporediti s onim početnima, referentnima.

Promjena temperature tople strane uslijed primjene modela s promjenjivim parametrima i promjenjivih iznosa disipirane snage, prikazana je na grafovima slike 2.15. Očekivano, najveća odstupanja temperature nastaju pri korištenju 20-postotno promijenjenog iznosa ulazne snage.



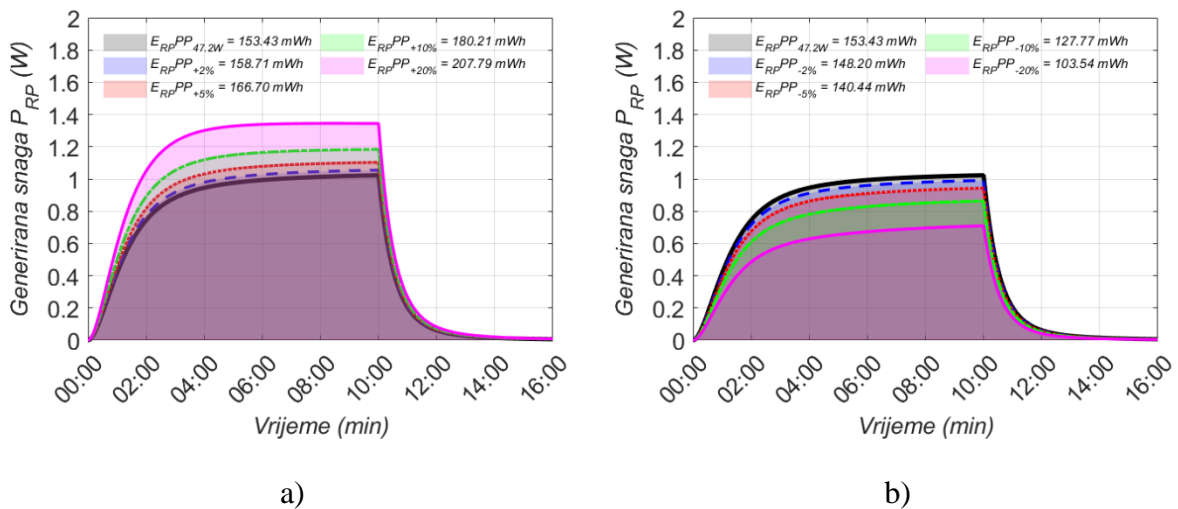
Slika 2.15 Temperatura tople strane u pojedinačnom spoju (PP model) uslijed: a) povećanja disipirane snage; b) smanjenja disipirane snage

Ostvareni temperaturni gradijent za isti toplinski spoj i uvjete je prikazan na slici 2.16. Sa slike je primjetno da povećanje ulazne toplinske snage (energije) rezultira povećanjem temperaturne razlike, obrnuto pak vrijedi za umanjene iznose ulazne snage (energije).



Slika 2.16 Temperaturni gradijent u pojedinačnom spoju (PP model) uslijed: a) povećanja disipirane snage; b) smanjenja disipirane snage

Generirana snaga i energija na spojenom potrošaču za uvećane i umanjene iznose ulazne energije je prikazana na slici 2.17. Generirana energija na potrošaču u navedenom vremenskom intervalu raste s porastom toplinske energije, a opada s njenim smanjenjem. Krivuljom crne boje označena je referentna karakteristika, dok su ostalim bojama označene karakteristike nastale pri povećanju ili smanjenju ulazne toplinske energije.



Slika 2.17 Generirana snaga i energija na potrošaču u pojedinačnom spoju (PP model) uslijed: a) povećanja disipirane snage; b) smanjenja disipirane snage

Na slikama 2.15-2.17 prikazani su grafovi temperature tople strane, temperaturne razlike i generirane energije na potrošaču, u ovisnosti o vremenu. Grafovi su nastali korištenjem modela s promjenjivim parametrima i pri različitim iznosima ulazne toplinske energije. Ista analiza je također napravljena i uz primjenu modela s konstantnim parametrima. Osim promjenjivih iznosa ulazne toplinske energije, razmatran je i utjecaj promjenjivih iznosa visine i poprečnog presjeka korištenih termoparova, raspršivača topline, te dimenzije rebara korištenog hladila. U tablici 2.3 je prikazana postotna promjena temperatura i energije, s obzirom na njihove početne vrijednosti navedene na dnu tablice, pri korištenju modela s promjenjivim parametrima.

Tablica 2.3 Ovisnost rezultata ostvarenih PP modelom o promjeni ulaznih parametara

Promjenjivi parametri		Postotna promjena						
		P _{DISIPIRANO}	Termoparovi		Raspršivač topline		Hladilo (rebra)	
			Visina	Presjek	Visina	Presjek	Visina	Dužina
+2%	T _T	1.42	0.77	-1.5	0	0	-0.21	-0.3
	ΔT	1.76	1.85	-3.63	0	0	0.11	0.17
	E _{RP}	3.45	1.56	-3	0	0	0.26	0.33
+5%	T _T	3.53	1.93	-3.62	0	0	-0.52	-0.76
	ΔT	4.36	4.64	-8.73	0	0	0.28	0.41
	E _{RP}	8.67	3.85	-7.3	0	0	0.52	0.78
+10%	T _T	7	3.84	-6.79	0	0	-1.02	-1.48
	ΔT	8.62	9.26	-16.41	0	0	0.55	0.79
	E _{RP}	17.47	7.5	-13.95	0	0	1.04	1.5
+20%	T _T	13.81	7.61	-12.08	0	0	-1.96	-2.83
	ΔT	16.9	18.39	-29.17	0	0	1.06	1.49
	E _{RP}	35.46	14.6	-25.49	0	0	1.96	2.87
-2%	T _T	-1.42	-0.77	1.59	0	0	0.22	0.32
	ΔT	-1.77	-1.87	3.84	0	0	-0.13	-0.17
	E _{RP}	-3.39	-1.5	3.13	0	0	-0.2	-0.26
-5%	T _T	-3.57	-1.93	4.14	0	0	0.55	0.8
	ΔT	-4.45	-4.69	9.99	0	0	-0.32	-0.44
	E _{RP}	-8.47	-3.85	8.08	0	0	-0.52	-0.78
-10%	T _T	-7.2	-3.89	8.9	0	0	1.12	1.63
	ΔT	-8.99	-9.4	21.51	0	0	-0.63	-0.92
	E _{RP}	-16.69	-7.89	16.95	0	0	-1.11	-1.56
-20%	T _T	-14.59	-7.84	20.8	0	0	2.36	3.44
	ΔT	-18.31	-18.94	50.32	0	0	-1.36	-2
	E _{RP}	-32.53	-16.23	37.29	0	0	-2.28	-3.39

Referentne vrijednosti: T_T = 145.19°C (10. minuta), ΔT = 63.08°C (10. minuta), E_{RP} = 153.43mWh (tijekom 16-minutnog intervala)

Po uzoru na tablicu 2.3, ista analiza je provedena i korištenjem modela s konstantnim iznosima parametara, te su postotne promjene temperatura i energija prikazane u tablici 2.4.

Tablica 2.4 Ovisnost rezultata ostvarenih KP modelom o promjeni ulaznih parametara

Konstantni parametri		Postotna promjena						
		P _{DISIPIRANO}	Termoparovi		Raspršivač topline		Hladilo (rebra)	
			Visina	Presjek	Visina	Presjek	Visina	Dužina
+2%	T _T	1.47	0.79	-1.55	0	0	-0.23	-0.33
	ΔT	1.92	1.92	-3.73	0	0	0.09	0.13
	E _{RP}	3.97	1.75	-3.33	0	0	0.16	0.24
+5%	T _T	3.68	1.98	-3.72	0	0	-0.56	-0.8
	ΔT	4.79	4.79	-8.94	0	0	0.22	0.31
	E _{RP}	9.92	4.29	-8.02	0	0	0.4	0.56
+10%	T _T	7.36	3.96	-6.97	0	0	-1.08	-1.56
	ΔT	9.54	9.56	-16.77	0	0	0.42	0.58
	E _{RP}	20.24	8.49	-15.24	0	0	0.71	1.03
+20%	T _T	14.62	7.88	-12.34	0	0	-2.07	-2.98
	ΔT	18.99	19.02	-26.69	0	0	0.79	1.1
	E _{RP}	42.22	16.67	-27.38	0	0	1.35	1.98
-2%	T _T	-1.48	-0.8	1.63	0	0	0.23	0.33
	ΔT	-1.9	-1.92	3.95	0	0	-0.08	-0.13
	E _{RP}	-3.81	-1.67	3.57	0	0	-0.16	-0.16
-5%	T _T	-3.71	-2	4.27	0	0	0.58	0.84
	ΔT	-4.79	-4.8	10.31	0	0	-0.22	-0.31
	E _{RP}	-9.44	-4.29	9.13	0	0	-0.32	-0.56
-10%	T _T	-7.45	-4	9.22	0	0	1.18	1.72
	ΔT	-9.62	-9.62	22.26	0	0	-0.46	-0.66
	E _{RP}	-18.49	-8.65	19.44	0	0	-0.71	-1.11
-20%	T _T	-15	-8.04	21.75	0	0	2.48	3.62
	ΔT	-19.33	-19.33	52.6	0	0	-0.99	-1.45
	E _{RP}	-35.24	-17.62	44.29	0	0	-1.59	-2.38

Referentne vrijednosti: T_T = 145.71°C (10. minuta), ΔT = 63.52°C (10. minuta), E_{RP} = 126mWh (tijekom 16-minutnog intervala)

Na osnovu provedenih simulacija i postotnih promjena prikazanih u tablicama 2.3 i 2.4, moguće je ustanoviti u kojoj mjeri generirani rezultati (temperature i energije) ovise o iznosima parametara komponenti koje čine model. Radi lakšeg razumijevanja, u tablicama je sa svjetlijim i tamnijim nijansama zelene i plave boje označen trend rasta ili pada iznosa energije generirane na potrošaču. S povećanjem ulazne toplinske energije koja zagrijava cjelokupan sustav, raste i

iznos energije generirane na potrošaču. Na povećanje generirane energije moguće je utjecati i s povećanjem visine termoparova, smanjenjem njihovog poprečnog presjeka ili pak smanjenjem toplinskog otpora korištenog hladila. Navedeni trendovi rasta ili pada generirane energije su u skladu sa već poznatim spoznajama predstavljenima u dosadašnjem istraživanju. Zanimljivo je uočiti kako iz rezultata simulacije proizlazi da razmatrana promjena visine i poprečnog presjeka raspršivača topline nema znatnog utjecaja na konačne iznose temperatura i generirane energije. Dijelom je moguće razumjeti navedeno, s obzirom da 20-postotna promjena visine raspršivača topline uzrokuje promjenu njegove visine samo za 1 mm, što pak nema prevelikog utjecaja na ostvarene temperature i generiranu energiju na potrošaču. Kao jedna od prepreka zbog koje se odustalo od daljnjeg korištenja modela u ovoj disertaciji bilo je i ne poznavanje točnog iznosa disipirane snage na izlaznim tranzistorima pojačala. Iz provedene analize ustanovljeno je kako iznos snage koja zagrijava sustav gotovo u dvostrukoj mjeri utječe na iznos generirane energije na potrošaču termoelektričnog generatora.

2.3. Ograničenja modela

U nastavku će biti nabrojano nekoliko ograničenja predstavljenog modela uslijed kojih će vrlo vjerojatno doći do odstupanja između rezultata ostvarenih simulacijom i onih izmjerenih na eksperimentalno uspostavljenom sustavu. Pojedina ograničenja je moguće ukloniti ili bar svesti na manju mjeru, s dodatnim proširenjem modela, ali navedeno zahtijeva kompliciraniju izvedbu modela i napredno znanje iz područja termodinamike. Najvažnija ograničenja za koja smatramo da će ponajviše utjecati na odstupanja u rezultatima su sljedeća:

- Nije poznat točan iznos snage disipirane na izlaznim tranzistorima, već je pretpostavljeno kako je sva razlika između ulazne i izlazne snage pojačala disipirana u obliku topline na izlaznim tranzistorima, što nije u potpunosti točno. Ostale komponente pojačala snage se također zagrijavaju, ali u daleko manjoj mjeri od tranzistora. Iznosi temperature uvelike ovise o vrijednosti ulazne snage koja zagrijava cijeli sustav.
- Prijenos topline sa spoja poluvodiča unutar tranzistora na samo kućište (engl. *junction to case*), a zatim i na raspršivač topline, nije modelirano. Kod korištenog modela dolazi do ravnomjernog zagrijavanja cijele površine raspršivača topline iznosom ulazne snage, što dovodi do odstupanja u konačnim rezultatima. Modeliranje navedenog prijenosa topline

najčešće nije moguće, jer proizvođač tranzistora u tehničkim specifikacijama tranzistora ne navodi sve potrebne informacije za modeliranje takve vrste prijenosa topline.

- Toplinski otpori u sustavu ponekad nisu poznati, već je njihov iznos smješten u interval vrijednosti. Primjer tome je toplinski otpor termalne paste predstavljen izrazom $<1.451 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$ ili za otpor liskuna gdje proizvođač navodi da ovisi o mehaničkoj sili pritiska na liskun. Iako navedeni iznosi u manjoj mjeri utječu na ostvarene rezultate, za slučaj ne poznavanja većeg broja toplinskih otpora, odstupanje rezultata može biti značajno.
- Informacije o dimenzijama (visini i poprečnom presjeku) termoparova nam najčešće nisu poznate, što predstavlja problem prilikom modeliranja. Jedini način za odrediti dimenzije termoparova je uništenjem termoelektričnog generatora, a s obzirom na njegovu cijenu, to nije najidealniji scenarij. Čak i kada fizički otvorimo generator, mjerenje je izazovno jer je poluvodički materijal krhak i sklon habanju, a otegotna okolnost prilikom mjerenja je i metalna veza koja spaja poluvodiče u termopar. I najmanja pogreška u mjerenju može uzrokovati velika odstupanja rezultata, ostvarenih temperatura i generiranog napona.
- Za modeliranje hladila korištena je komponenta iz standardne biblioteke Simscape-a. S ovom komponentom je bilo moguće modelirati hladilo korišteno u mjerenjima, međutim, da se kojim slučajem koristilo hladilo nestandardnog oblika (s nesimetričnim razmakom između rebara i sl.), s komponentom iz biblioteke ne bi bilo moguće modelirati to hladilo. Ovo ograničenje je više povezano s ograničenjem komponente, a ne s vrijednosti ulaznog parametra, kao što je bilo riječ u poviše navedenim ograničenjima.
- Posljednje ograničenje je uslijed prijenosa topline konvekcijom i radijacijom, a koje nije uzeto u razmatranje kod predstavljenog modela. Pretpostavljeno je da se prijenos topline odvija vođenjem (kondukcijom). Teško je procijeniti utjecaj navedenog ograničenja na iznose ostvarenih rezultata, ali utjecaj zasigurno postoji.

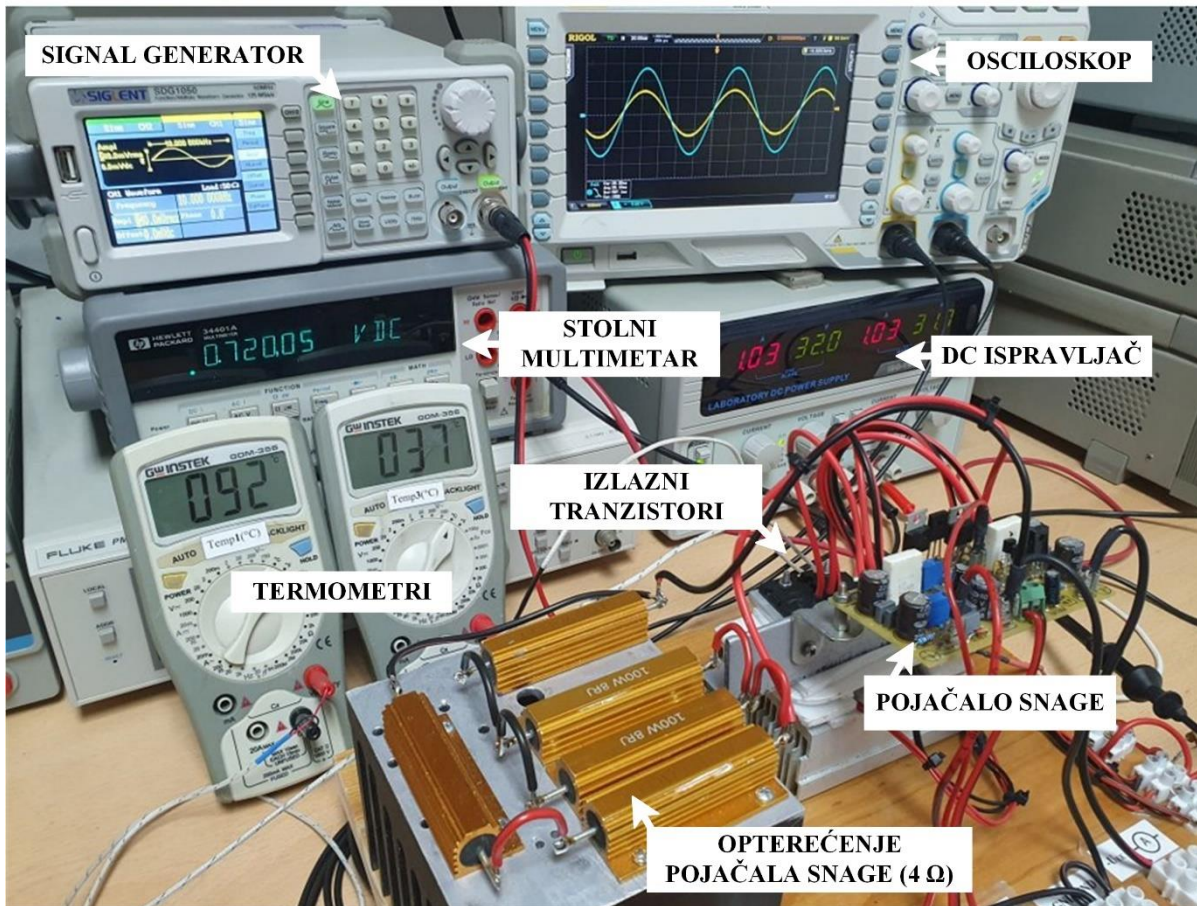
Iako će u nastavku teksta biti napravljena usporedba rezultata ostvarenih simulacijom modela i rezultata izmjerenih na eksperimentalnoj postavci, spomenuta ograničenja ukazuju da bi rezultati mogli poprilično odstupati. Iz tog razloga se u nastavku pristupilo mjerenjima na uspostavljenom prototipu, dok je model poslužio za definiranje izazova u dizajnu sustava, kao i za određivanje okvirnih vrijednosti temperatura i napona koja možemo očekivati prilikom mjerenja.

3. LABORATORIJSKI PROTOTIP TERMOELEKTRIČNOG SUSTAVA

Prikaz termoelektričnog sustava, zajedno sa osnovnim komponentama koje ga sačinjavaju, je već predstavljen u 2. poglavlju ovog rada. U ovom poglavlju biti će prikazana eksperimentalna postavka na kojoj će se vršiti mjerenja, a koja je uspostavljena na osnovu predstavljene montažne sheme (slika 2.5). Nakon uspostave eksperimentalne postavke (prototipa sustava), predstaviti će se metode i instrumenti korišteni kod mjerenja, kao i razmatrani parametri. Mjerenja će se izvršiti za različite toplinske spojeve (slika 2.6), s različitim modelima termoelektričnih generatora i pri različitim izlaznim snagama pojačala, što za posljedicu ima i različite iznose disipirane snage na tranzistorima. U potpoglavlju 3.1 napravljena je verifikacija modela, te je izračunata i prikazana postotna pogreška između rezultata ostvarenih modelom i rezultata izmjerenih na uspostavljenoj eksperimentalnoj postavci. Protutaktni način rada generatora, zajedno s ostvarenim rezultatima u teorijskoj analizi, je predstavljen u potpoglavlju 3.2. Osim prednosti i nedostataka protutaktnog načina rada generatora, razmotren je utjecaj različitih vremena prebacivanja između sustava, kao i utjecaj frekvencije ulaznog signala i primjene hladila različitih toplinskih otpora na ostvarene rezultate.

Eksperimentalna postavka termoelektričnog sustava, uključujući instrumente korištene pri mjerenju, je prikazana na slici 3.1. Sklop pojačala snage se nalazi na žutoj pločici, dok su izlazni tranzistori izvedeni van pločice i montirani na raspršivač topline (slika 3.2a). Korišteno pojačalo je nazivne snage 100 W uz potrošač iznosa 4 Ω . Navedeni iznos otpora je realiziran serijskom i paralelnom kombinacijom otpornika velike snage, fiksiranih na hladilo malog iznosa toplinskog otpora. Frekvencija ulaznog signala korištena tijekom mjerenja iznosila je 10 kHz, s obzirom da je riječ o frekvenciji koji se nalazi po sredini raspona čujnoga ljudskome uhu. Za rad pojačala su korišteni sljedeći uređaji:

- Laboratorijski izvor istosmjernog napona proizvođača ISO-TECH, model IPS2303. Izvor je korišten za napajanje pojačala snage simetričnim iznosom istosmjernog napona ± 35 V. Laboratorijski izvor raspolaže s dva regulirajuća naponska izlaza u rasponu od 0-30 V i rasponu struje 0-3 A.
- Funkcijski generator proizvođača SIGLENT, model SDG1050. Generator je korišten za generiranje ulaznog sinusnog signala, a čija promjena amplitude utječe na iznos izlazne snage pojačala.

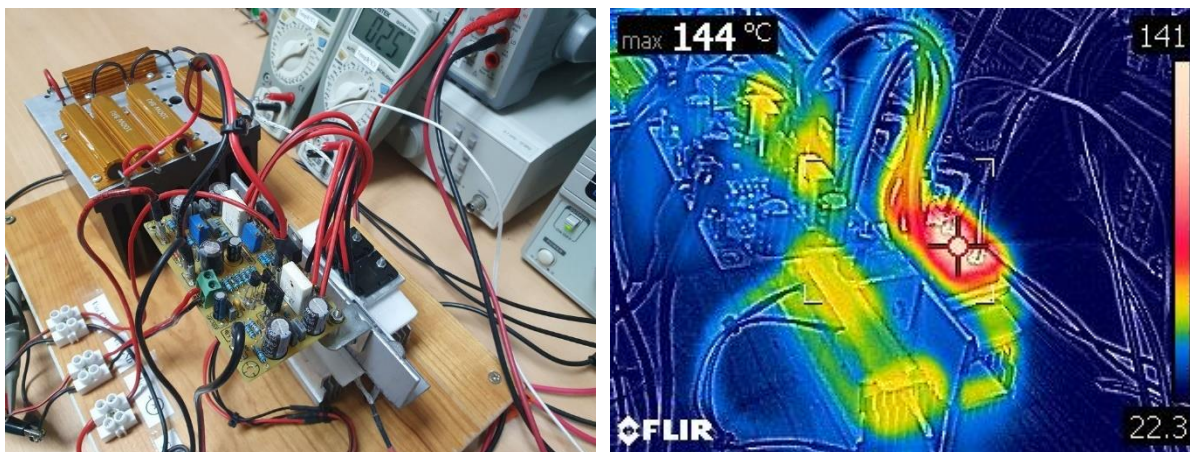


Slika 3.1 Laboratorijski prototip sustava za termoelektričnu pretvorbu energije [119]

Instrumenti korišteni kod mjerenja su:

- Za mjerenje temperatura korišten je digitalni multimeter proizvođača GW Instek, model GDM-356. Proizvođač navodi da je rezolucija očitavanja temperature 1°C , dok je točnost izmjerenog rezultata u intervalu od $\pm(1\% + 7 \text{ znamenki rezolucije instrumenta})$ za raspon temperature od $0\text{--}400^{\circ}\text{C}$. Multimeter je kalibriran za korištenje termopara K-tipa.
- Za mjerenje napona na potrošaču spojenog na izlaz termoelektričnog generatora i napona otvorenog kruga, korišteni su digitalni stolni multimeter HP (Hewlett Packard) 34401A s točnosti rezultata u intervalu $\pm(0.0015\%$ od očitavanja $+ 0.0004\%$ mjernog opsega) i UNIT (Uni Trend) digitalni multimeter rezolucije 0.001 V i deklarirane točnosti $\pm(0.5\% + 2 \text{ znamenke rezolucije instrumenta})$.

Termalna slika pojačala u radu je napravljena korištenjem termalne kamere FLIR C3-X Compact (slika 3.2b). Slika ima smisao da prikaže kako se izlazni tranzistori pojačala zagrijevaju u daleko većoj mjeri u odnosu na ostale komponente pojačala.



a)

b)

Slika 3.2 Termoelektrični sustav: a) eksperimentalna postavka; b) zagrijavanje izlaznih tranzistora [119]

3.1. Rezultati mjerenja i verifikacija modela

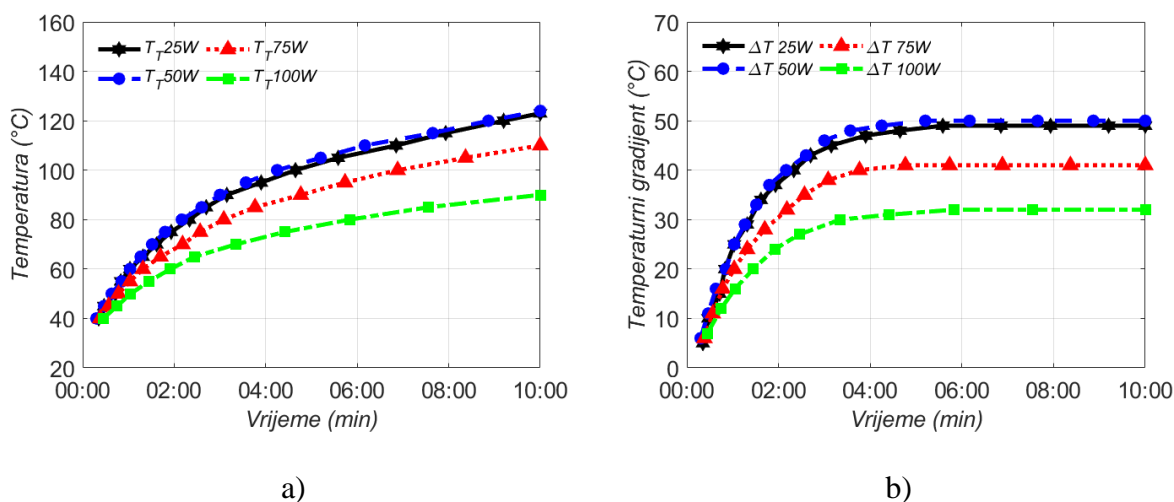
Kao što je navedeno u uvodu 3. poglavlja, mjerenja će se vršiti nad različitim toplinskim spojevima, pri različitim iznosima izlazne snage pojačala, te za različite modele termoelektričnih generatora. Korištenjem spomenutih instrumenata mjeriti će se temperatura tople i hladne strane termoelektričnih generatora, neposredno poviše i ispod samih keramičkih supstrata. Na osnovu izmjerenih temperatura, izračunat je i grafički prikazan temperaturni gradijent (slike 3.3b, 3.5b, 3.7b, 3.9b, 3.11b, 3.13b). Osim mjerenja u toplinskom dijelu, mjereni su i električni parametri. Tako je na grafovima slika 3.4a, 3.6a i 3.8a prikazan napon generiran na otporniku spojenom na izlaz termoelektričnog generatora (lijeva os na grafu), dok se napon otvorenog kruga generatora mjerio periodično, u jednakim vremenskim intervalima (desna os na grafu). Vrijednost otpornika spojenog na izlaz generatora se dobila empirijskom analizom i odabrana je u skladu ostvarenja električnog prilagođenja u krugu. Na osnovu generiranog napona i poznate vrijednosti otpora na izlazu, izračunata je razvijena snaga na potrošaču. Sva mjerenja u ovom dijelu su napravljena za vrijeme od 10 minuta. Izuzev temperaturnog gradijenta i napona na potrošaču, koji će ponekad možda i dosegnuti ustaljeno stanje, temperatura tople i hladne strane neće u niti jednom trenutku doseći ustaljeno stanje, već je njihov rast kontinuiran. Zbog navedenog, smatramo da vremenski interval mjerenja duži od 10 minuta neće rezultirati novim spoznajama u istraživanju, posebno pri analizi protutaktnog načina rada, okosnici ove disertacije. Korišteni modeli termoelektričnih generatora u mjerenjima, s osnovnim parametrima koji ih definiraju, prikazani su u tablici 3.1.

Tablica 3.1 Parametri različitih modela korištenih TEG-ova [119]

Proizvođač	Model	Dimenzije (mm)	Broj termoparova i materijal izrade	Prilagođeni iznos potrošača (Ω) ¹	Cijena (€)
European Thermodynamics	GM200-127-14-10	40x40x3.5	127 (Bi_2Te_3)	$2.28 \pm 15\%$	36.27
Kryotherm	199-1.4-0.8	40x40x3.2	199 (Bi_2Te_3)	$1.46 \pm 10\%$	20.96
Shenzhen Yuzens Technologies Co., Ltd.	SP1848-27145	40x40x3.4	127 (Bi_2Te_3)	2.68	1.97

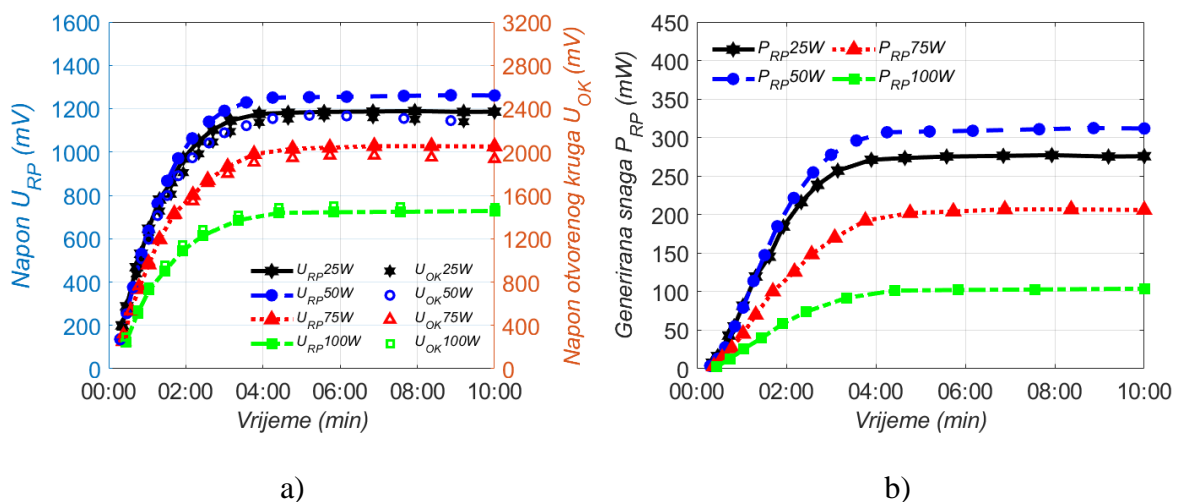
¹ iznosi navedeni od proizvođača za temperaturu tople strane 200°C i hladne strane 30°C

Izmjerena temperatura tople strane i izračunati temperaturni gradijent modela generatora SP1848-27145 u toplinsko pojedinačnom spoju prikazana je na slici 3.3. Ostvareni rezultati su u skladu s iznosima disipirane snage prikazanima u tablici 2.1, za veće iznose dispirane snage, veći su i iznosi ostvarenih temperatura. Najveći iznosi temperatura su ostvareni za izlazne snage pojačala od 25 i 50 W, kada se AB-klasa po pitanju efikasnosti približava pojačalima u A-klasi. Manji iznosi temperatura su ostvareni pri većim iznosima izlazne snage pojačala. Temperaturni gradijent nakon određenog vremena poprimi približno konstantnu vrijednost, dok temperature tople i hladne strane prvo rastu eksponencijalno, a zatim približno linearno. Na osnovu početnih mjerenja moguće je uočiti da za korišteno hladilo, temperature tople strane u relativno kratkom vremenu dosegnu visoke iznose, za koje su pak štetne po radni vijek poluvodičkih komponenti, a to su u ovom slučaju izlazni tranzistori pojačala i korišteni termoelektrični generatori.



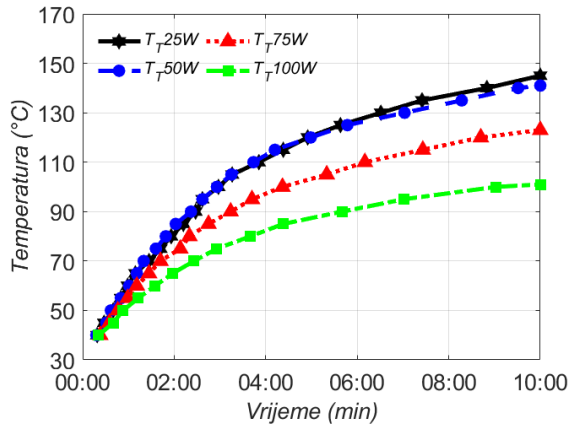
Slika 3.3 Pojedinačni spoj SP1848-27145: a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent [119]

Električni dio mjerenja se svodi na mjerenje napona generiranog na otporniku vrijednosti 5.1Ω i napona otvorenog kruga, pri svakoj promjeni od 5°C temperature tople strane. Na osnovu grafa prikazanog na slici 3.4a možemo zaključiti da su s korištenom vrijednosti otpornika ostvarena dobra poklapanja s iznosom unutarnjeg električnog otpora. S obzirom da su iznosi prikazani na desnoj skali dvostruko veći od iznosa na lijevoj skali, idealan slučaj bi bio preklapanje navedenih napona, jer bi u tom trenutku došlo do električnog prilagođenja. Također, zanimljivo je naglasiti kako je korišteni iznos otpornika daleko veći od iznosa kojeg preporuča proizvođač generatora (2.68Ω) u svrhu ostvarenja prilagođenja. Razlog ne slaganja navedenih vrijednosti je u tome što proizvođač deklarira vrijednost unutarnjeg električnog otpora samo za jednu kombinaciju iznosa temperature tople i hladne strane (200°C i 30°C), a koje u ovim mjerenjima nisu dosegnute. Na osnovu izmjerenih napona na potrošaču, izračunata je generirana snaga i prikazana na grafu slike 3.4b. Sa grafa je vidljivo da iznosi snage variraju u rasponu od 100-300 mW u ustaljenom stanju, ovisno o izlaznoj snazi pojačala.

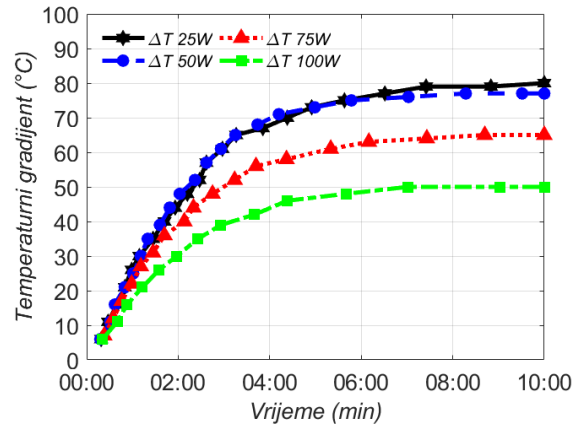


Slika 3.4 Pojedinačni spoj SP1848-27145: a) napon na potrošaču i napon otvorenog kruga; b) generirana snaga na potrošaču [119]

Grafovi ostvarenih temperatura za toplinsko serijski spoj generatora su prikazani na slici 3.5. Na osnovu grafova može se zaključiti da je temperatura tople strane većeg iznosa ($\sim 145^\circ\text{C}$) u odnosu na toplinsko pojedinačno spojeni generator ($\sim 120^\circ\text{C}$), pri nižim iznosima izlazne snage pojačala. Posljedično temperaturama tople strane, temperaturni gradijent je također većeg iznosa u toplinsko serijskom spoju.



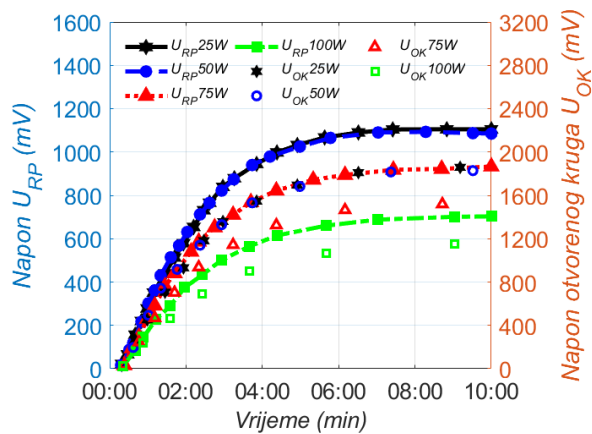
a)



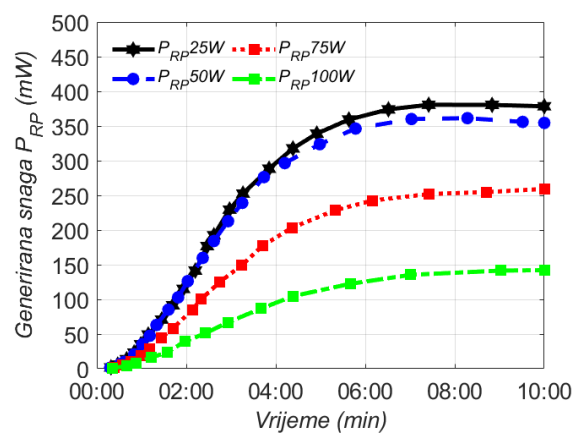
b)

Slika 3.5 Toplinsko serijski spoj SP1848-27145: a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent [119]

Kod mjerenja napona u toplinsko serijskom spoju, generatori nisu u međusobnom električnom spoju, već se razmatraju zasebno. Svaki od njih je spojen na vlastiti otpornik iznosa 5.1Ω , dok se generirana snaga (slika 3.6b) odnosi na zbroj snaga razvijenih na jednom i drugom potrošaču. Graf napona generiranog na potrošaču i napon otvorenog kruga gornjeg generatora u toplinskom spoju, prikazan je na slici 3.6a. Na osnovu grafa moguće je zaključiti kako je stvarna vrijednost unutarnjeg električnog otpora ipak nešto nižeg iznosa od korištenih 5.1Ω .



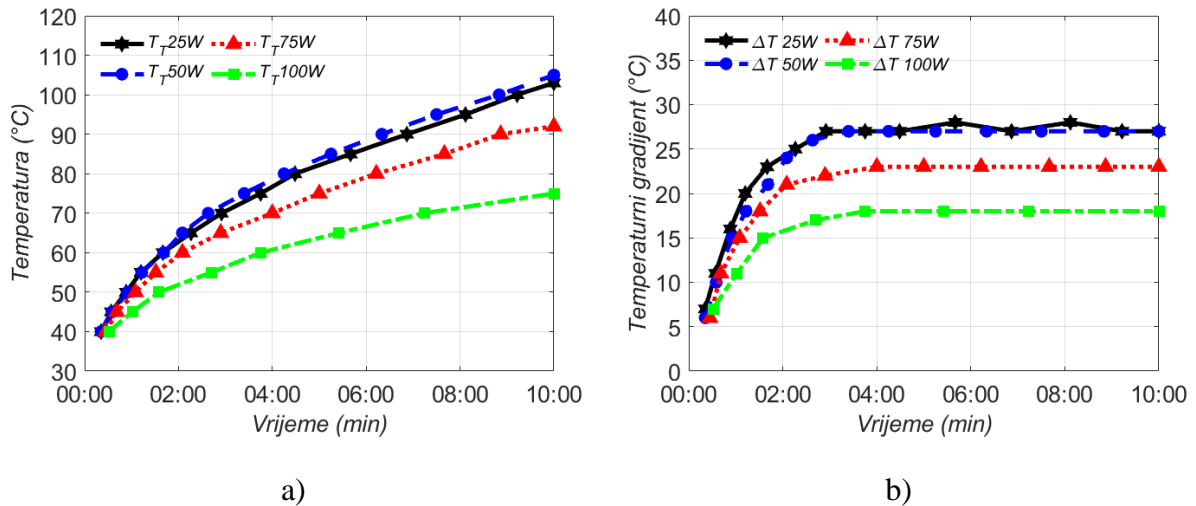
a)



b)

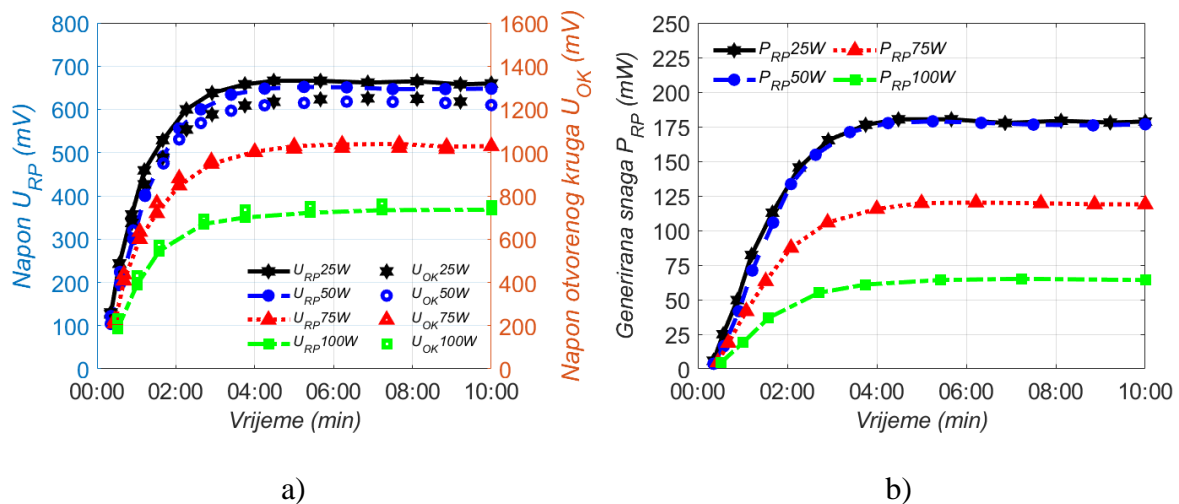
Slika 3.6 Toplinsko serijski spoj SP1848-27145: a) napon na potrošaču i napon otvorenog kruga za TEG #1; b) ukupno generirana snaga [119]

Zbog povećanja ukupne površine prekrivene termoelektričnim generatorima, u toplinsko paralelnom spoju dolazi do smanjenja ukupnog toplinskog otpora. Navedeno smanjenje rezultira manjim iznosima temperature tople strane i temperaturnog gradijenta. Iznosi temperatura tople strane i temperaturnog gradijenta za toplinsko paralelni spoj su prikazani na grafovima slike 3.7. Sa grafova je uočljivo da temperatura tople strane u razmatranom vremenskom intervalu doseže iznos od $\sim 105^{\circ}\text{C}$, kao i u prethodnim primjerima, sve vrijedi za niže izlazne snage pojačala.



Slika 3.7 Toplinsko paralelni spoj SP1848-27145: a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent [119]

Kao i kod toplinsko serijskog spoja, generatori su i u ovom spoju spojeni zasebno na potrošače. Napon generiran na jednom potrošaču, te graf ukupno generirane snage su prikazani na slici 3.8.



Slika 3.8 Toplinsko paralelni spoj SP1848-27145: a) napon na potrošaču i napon otvorenog kruga za TEG #1; b) ukupno generirana snaga [119]

Nakon provedene analize utjecaja različitih toplinskih spojeva i izlaznih snaga pojačala na iznose ostvarenih temperatura i napona u krugu za model generatora SP1848-27145, ista analiza je napravljena i za ostale modele generatora (tablica 3.1). Po uzoru na grafove na slikama 3.3-3.8, isti grafovi su napravljeni i za ostale modele generatora, te su prikazani u prilogu disertacije, slike A1-A6 i B1-B6. Iznosi generirane snage na potrošaču za pojedinačni spoj i iznos zbrojene snage na potrošačima u toplinsko serijskom i paralelnom spoju, kao i efikasnost pretvorene snage disipirane na izlaznim tranzistorima, za različite izlazne snage pojačala i različite generatore, su prikazani u tablici 3.2. Na osnovu iznosa u tablici, moguće je donijeti određene zaključke:

- Ukupan iznos generirane snage na potrošaču (potrošačima), kao i efikasnost pretvorbe, najveći su kod toplinsko serijskog spoja generatora, zatim pojedinačnog spoja i na kraju kod toplinsko paralelnog spoja generatora.
- Generirana snaga i efikasnost pretvorbe većeg su iznosa kod manjih iznosa izlazne snage pojačala, dok su isti ti iznosi usporedni pri izlaznoj snazi pojačala od 25 i 50 W.
- Primjenom višestruko skupljeg modela termoelektričnog generatora GM200-127-14-10 nisu ostvareni značajno bolji rezultati u odnosu na primjenu modela generatora SP1848-27145. Zbog toga, sva daljnja mjerenja su nastavljena primjenom jeftinijeg generatora.
- Model generatora 199-1.4-0.8, proizvođača Kryotherm, zbog manjeg toplinskog otpora uzrokovanog većim brojem termoparova, pokazuje najlošije rezultate s obzirom na snagu razvijenu na potrošaču i taj generator nije razmatran u nastavku ovog rada.

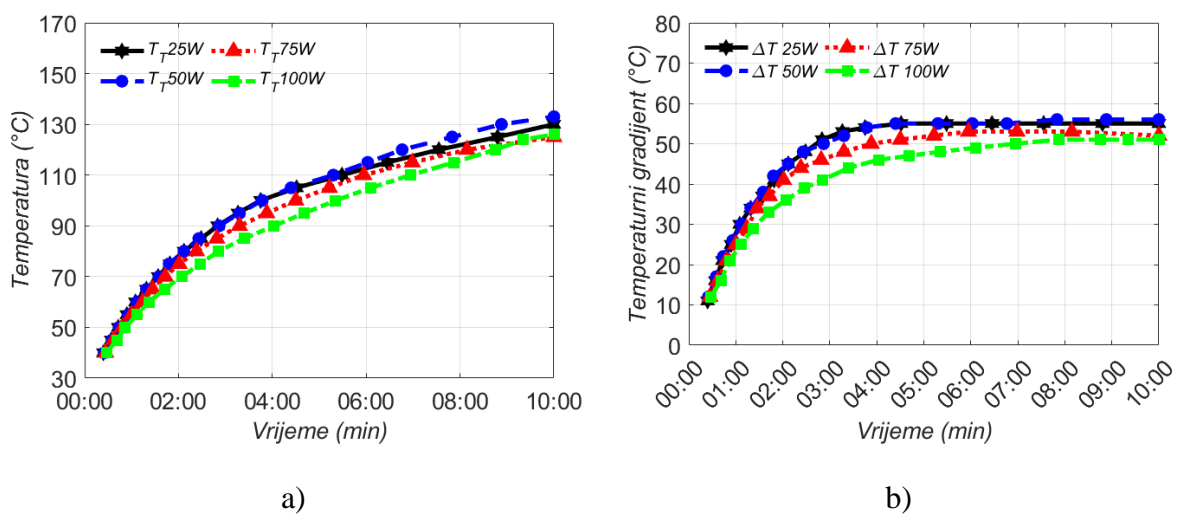
Tablica 3.2 Snaga na potrošaču i efikasnost pretvorbe različitih modela TEG-ova [119]

P _{IZL} (W)	Model TEG-a	Pojedinačno spojeni TEG		Toplinsko serijski spoj TEG-ova		Toplinsko paralelni spoj TEG-ova	
		P _{UK} (mW)	η (%)	P _{UK} (mW)	η (%)	P _{UK} (mW)	η (%)
25	GM200-127-14-10	280.85	0.636	379.28	0.858	134.12	0.304
	199-1.4-0.8	171.73	0.389	276.56	0.626	76	0.172
	SP1848-27145	275.8	0.624	378.43	0.857	178.76	0.405
50	GM200-127-14-10	295.4	0.626	383.83	0.813	131.76	0.279
	199-1.4-0.8	175.5	0.372	290.7	0.616	77.27	0.164
	SP1848-27145	311.79	0.661	354.44	0.751	176.77	0.374
75	GM200-127-14-10	216.6	0.497	275.68	0.632	87.24	0.2
	199-1.4-0.8	122.85	0.282	205.15	0.471	52.1	0.119
	SP1848-27145	206	0.473	259.23	0.595	118.88	0.273
100	GM200-127-14-10	123.76	0.33	161.1	0.429	51.5	0.137
	199-1.4-0.8	71.07	0.189	119.21	0.318	28.84	0.077
	SP1848-27145	103.92	0.277	142.08	0.379	64.17	0.171

Za modele GM200-127-14-10 i 199-1.4-0.8 u svrhu električnog prilagođenja korišten je otpornik od 2.4 Ω

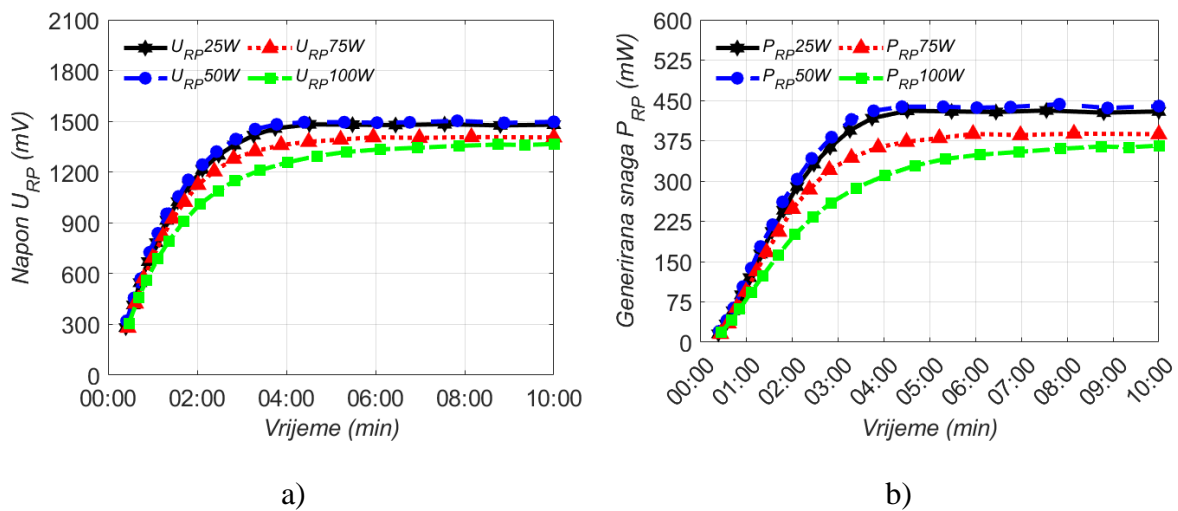
Nakon izvršenih početnih mjerenja i grafova prikazanih u dosadašnjem dijelu teksta, došlo je do pregaranja određenog dijela korištenog pojačala snage, zajedno sa izlaznim tranzistorima. Do pregaranja je vjerojatno došlo uslijed dugotrajnijeg vremenskog perioda izlaganja tranzistora visokim temperaturama. Nabavkom novih komponenti, oštećene komponente su zamijenjene i pojačalo je stavljeno u funkciju. Osim popravke pojačala, optimiziran je i njegov rad s obzirom iznose mirne struje među stupnjevima pojačala. Nastavkom mjerenja nakon optimizacije, iznosi temperaturnog gradijenta i generirane snage na potrošaču su se u određenoj mjeri razlikovali u odnosu na početna mjerenja. Izvedeni zaključci su i dalje ostali nepromijenjeni, generirana snaga na potrošaču i efikasnost pretvorbe disipirane snage (ili energije) su i dalje najvećeg iznosa kod toplinsko serijskog spoja, pa u pojedinačnom spoju i naposljetku u toplinsko paralelnom spoju generatora. Zaključak koji također vrijedi je da u radu pojačala pri nižim iznosima izlazne snage, generirana snaga na potrošaču i efikasnost pretvorbe su većeg iznosa, u odnosu na rad pri višim izlaznim snagama pojačala. Točan uzrok uslijed kojeg je došlo do odstupanja rezultata u odnosu na početna mjerenja nije moguće sa sigurnošću utvrditi, ali dio uzroka leži u činjenici kvalitetnije izrade novo ugrađenih komponenti. Fizički gledajući, najveća razlika u kvaliteti izrade se očituje u komplementarnom paru izlaznih tranzistora, gdje je kolektor izgorenih tranzistora napravljen od materijala nalik plastike, dok je kolektor novo ugrađenih izlaznih tranzistora metaliziran.

S obzirom da su u nastavku disertacije sva mjerenja izvršena primjenom modela SP1848-27145 i optimiziranog pojačala, ponovljena su dosadašnja mjerenja za navedeni generator u svim toplinskim spojevima. Iznosi temperature tople strane i temperaturnog gradijenta za pojedinačno spojeni termoelektrični generator, nakon optimizacije pojačala, prikazani su na slici 3.9.



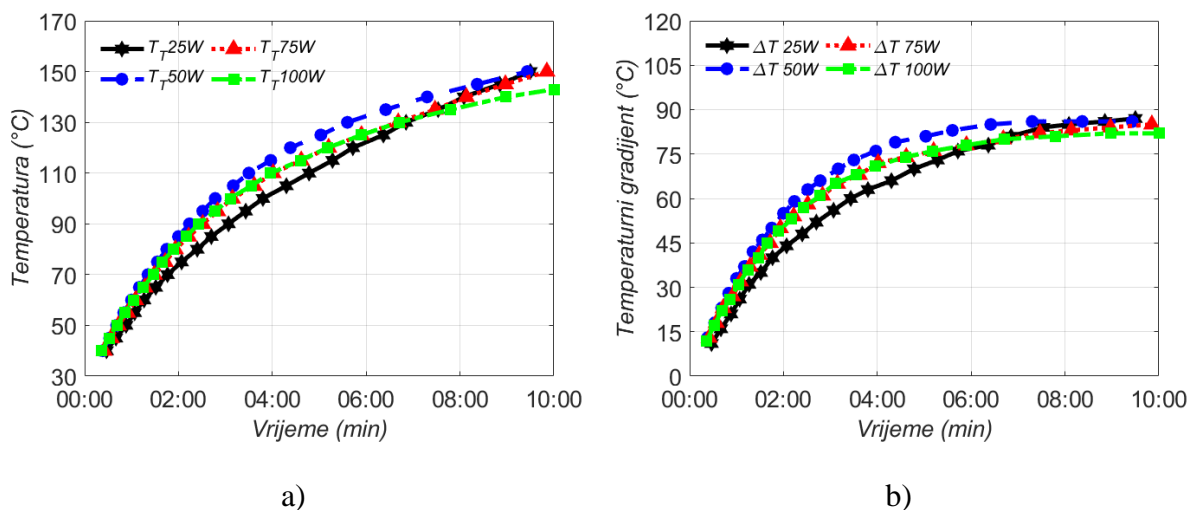
Slika 3.9 Pojedinačni spoj SP1848-27145 (optimizirano pojačalo): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent

Izmjereni napon na potrošaču generatora, te izračunata generirana snaga na istom tom otporniku, za pojedinačno spojeni generator, prikazani su na grafovima slike 3.10.



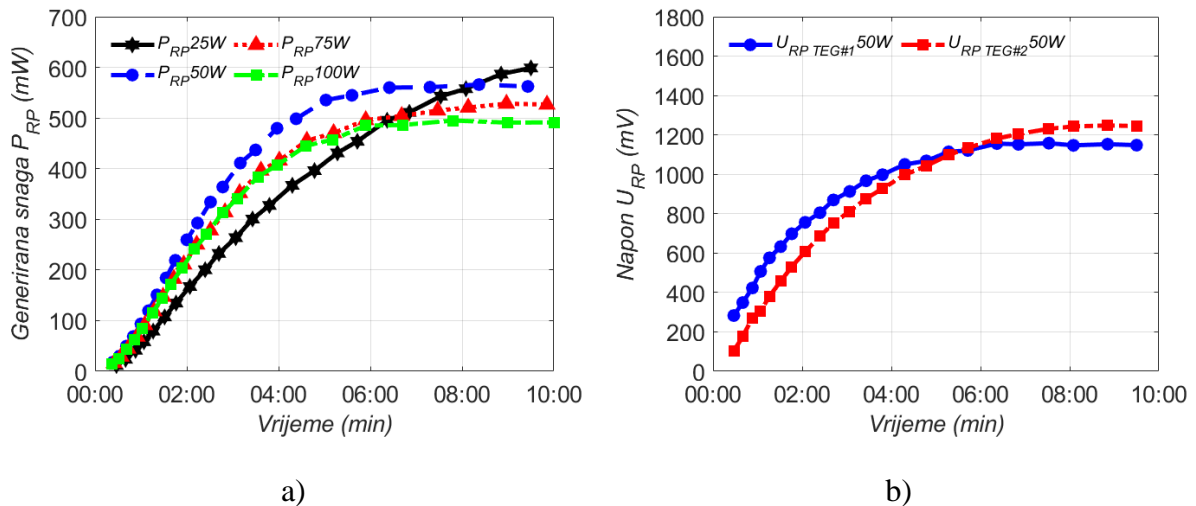
Slika 3.10 Pojedinačni spoj SP1848-27145 (optimizirano pojačalo): a) napon na potrošaču; b) generirana snaga na potrošaču

Iznosi temperature tople strane i temperaturnog gradijenta u toplinsko serijskom spoju su prikazani na grafovima slike 3.11. Kao napomena, ukupno razvijena snaga u toplinsko serijskom ili paralelnom spoju generatora, računa se kao zbroj generiranih snaga na pojedinom potrošaču. Na osnovu slike 3.10 i 3.11, primjetno je da su nakon optimizacije rada pojačala i ugradnje novih komponenti, odstupanja među karakteristikama dosta manja u odnosu na početna mjerenja.



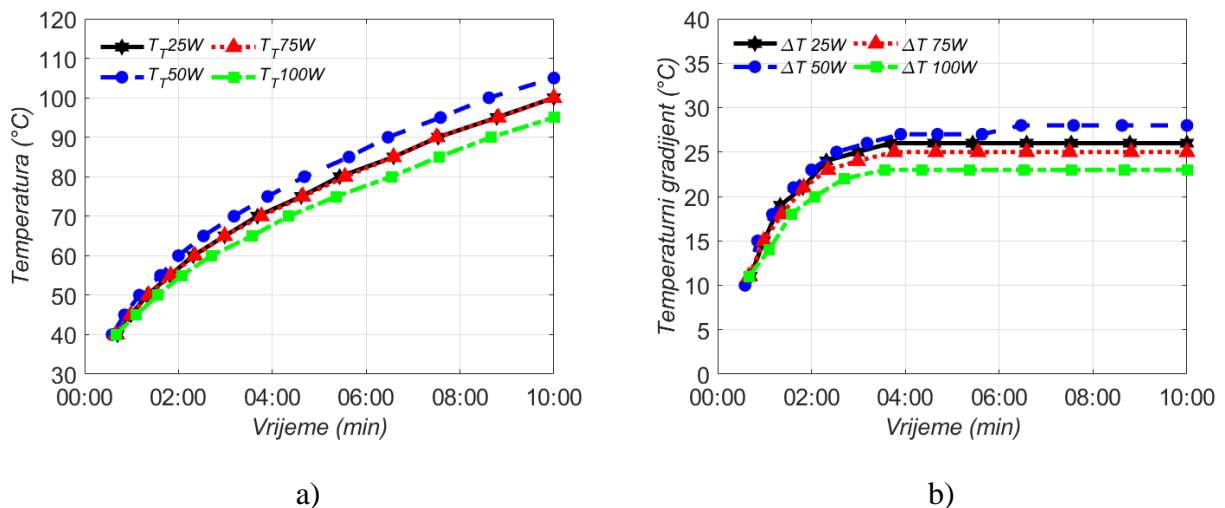
Slika 3.11 Toplinsko serijski spoj SP1848-27145 (optimizirano pojačalo): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent

Ukupno generirana snaga u toplinsko serijskom spoju generatora prikazana je na slici 3.12a, dok su na slici 3.12b prikazani iznosi napona na potrošačima TEG-a #1 i TEG-a #2 u takvom spoju, pri izlaznoj snazi pojačala od 50 W. Mjerenjem nije ustanovljen iznos temperaturnog gradijenta na krajevima pojedinog generatora u toplinsko serijskom spoju, već se na osnovu napona može zaključiti da se temperaturni gradijent podijeli u približno jednakom iznosu između generatora.



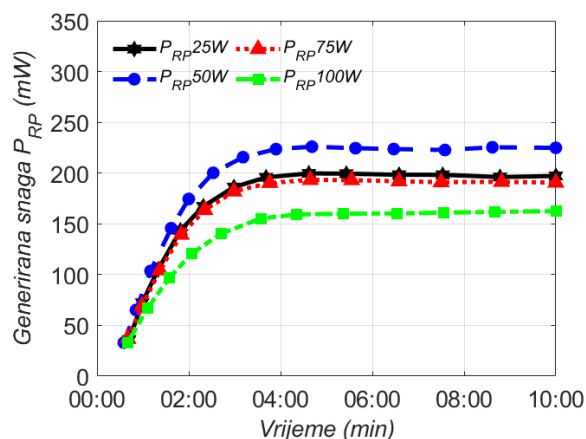
Slika 3.12 Toplinsko serijski spoj SP1848-27145 (optimizirano pojačalo): a) ukupno generirana snaga; b) naponi na potrošačima za TEG#1 i TEG#2 pri izlaznoj snazi od 50 W

U toplinsko paralelnom spoju, iznosi temperatura tople strane i temperaturnog gradijenta su prikazani na grafovima slike 3.13.



Slika 3.13 Toplinsko paralelni spoj SP1848-27145 (optimizirano pojačalo): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent

Ukupno generirana snaga u toplinsko paralelnom spoju generatora prikazana je na slici 3.14.



Slika 3.14 Ukupno generirana snaga u toplinsko paralelnom spoju (optimizirano pojačalo, SP1848-27145)

Iako odstupanja u rezultatima postoje i pri nižim iznosima izlazne snage pojačala, ona su ipak nešto značajnijeg iznosa pri većim iznosima izlazne snage. Usporedba ostvarenih rezultata na početno korištenom pojačalu snage i izmjenjenih vrijednosti nakon optimizacije rada pojačala, za model generatora SP1848-27145, prikazani su u tablici 3.3. Iznosi u tablici su iznosi dobiveni u konačnom trenutku mjerenja (10-minutni interval). Posljednja dva stupca tablice se odnose na postotnu promjenu temperaturnog gradijenta i generirane snage.

Tablica 3.3 Usporedba rezultata ostvarenih nakon optimizacije pojačala

P_{IZL} (W)	Toplinski spoj	Neoptimizirano pojačalo			Optimizirano pojačalo			ΔT_{GRAD} (%)	ΔP_{RP} (%)
		T_T (°C)	ΔT (°C)	P_{RP} (mW)	T_T (°C)	ΔT (°C)	P_{RP} (mW)		
25	Pojedinačni	123	49	275.8	130	55	429.49	12.24	55.73
	Serijski	145	80	378.43	150	87	598.87	8.75	58.25
	Paralelni	103	27	178.76	100	26	197.19	7.41	10.31
50	Pojedinačni	124	50	311.79	133	56	439.41	12	40.93
	Serijski	141	77	354.44	150	86	562.34	11.69	58.66
	Paralelni	105	27	176.77	105	28	224.85	3.7	27.2
75	Pojedinačni	110	41	206	125	53	387.06	29.27	87.9
	Serijski	123	65	259.23	150	85	526.6	30.77	103.14
	Paralelni	92	23	118.88	100	25	190.6	8.7	60.33
100	Pojedinačni	90	32	103.92	126	51	365.87	59.38	252.1
	Serijski	101	50	142.08	143	82	491.38	64	245.85
	Paralelni	75	18	64.17	95	23	162.52	27.78	153.26

Iznosi na osnovu grafova, u vremenskom trenutku 10. minute (stacionarno stanje)

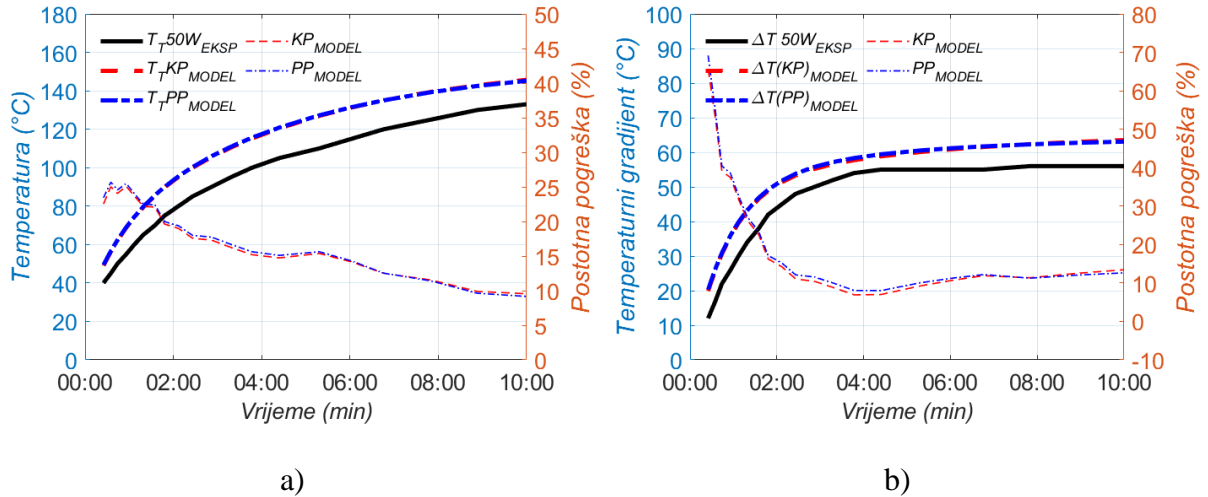
Kako bi se ispitao eventualni negativni utjecaj pojedinog termoelektričnog generatora u toplinsko serijskom ili paralelnom spoju, generatori su zasebno testirani u pojedinačnom spoju. Posljednja tri stupca u tablici se odnose na postotnu promjenu vrijednosti ostvarenih korištenjem TEG #2, u odnosu na rezultate ostvarene s TEG #1. Zaključak mjerenja je da ne postoje značajna odstupanja između rezultata ostvarenih bilo jednim ili drugim generatorom (tablica 3.4).

Tablica 3.4 Usporedba rezultata ostvarenih istim modelom TEG-a (pojedinačni spoj)

P_{IZL} (W)	TEG #1			TEG #2			ΔT_T (%)	ΔT_{GRAD} (%)	ΔP_{RP} (%)
	T_{TOPLO} (°C)	ΔT (°C)	P_{RP} (mW)	T_{TOPLO} (°C)	ΔT (°C)	P_{RP} (mW)			
25	130	55	429.49	130	56	443.53	0	1.82	3.27
50	133	56	439.41	132	56	445.3	-0.75	0	1.34
75	125	53	387.06	125	52	377.21	0	-1.89	-2.54
100	126	51	365.87	125	51	363.73	-0.79	0	-0.58

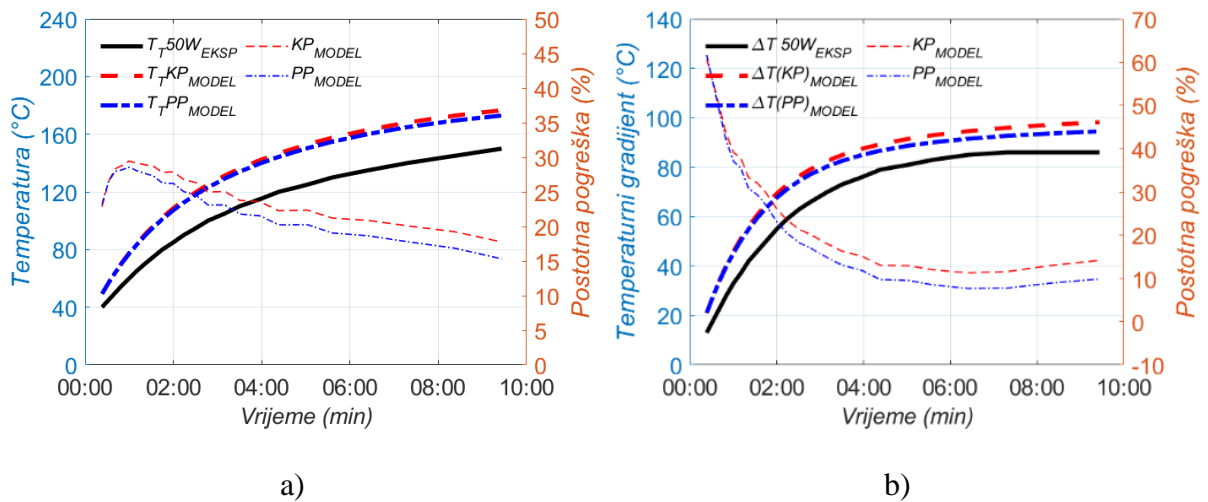
Nakon prikazanih grafova dobivenih simulacijom modela i na osnovu izmjerenih rezultata na uspostavljenoj eksperimentalnoj postavci, moguće je provesti analizu kojom bi se ustanovilo koliko dobro model aproksimira stvarni sustav. Analiza usporedbe i izračuna postotne pogreške je napravljena na osnovu rezultata ostvarenih simulacijom modela (slike 2.12 i 2.13a) i rezultata izmjerenih na eksperimentalnoj postavci nakon optimizacije rada pojačala (slike 3.9, 3.10a, 3.11 i 3.13), sve pri izlaznoj snazi pojačala od 50 W. Na (ne)podudaranje rezultata u simulaciji, veliki utjecaj je imao nepoznat iznos disipirane snage na izlaznim tranzistorima i izostanak modeliranja prijenosa topline unutar tranzistora, dok je u eksperimentalnim mjerenjima najveći utjecaj imala upotreba ne pretjerano točnih instrumenata za mjerenje.

Grafovi izmjerene temperature tople strane i izračunatog temperaturnog gradijenta, oba su prikazana crnom linijom, te rezultata ostvarenih simulacijom za pojedinačno spojeni generator, prikazani su na slici 3.15. Na lijevoj osi grafova prikazana je temperatura tople strane, odnosno temperaturni gradijent, a na desnoj osi je prikazana postotna pogreška rezultata. Iako je razlika u ostvarenim rezultatima, dobivenih mjerenjima ili simulacijom, uglavnom konstantnog iznosa duž cijelog vremenskog intervala, zbog općenito nižih vrijednosti na grafovima u početku, ona rezultira većim iznosima postotne pogreške. Kako se nagib grafova smanjuje, tj. rezultati dosežu stacionarne vrijednosti, tako se iznos postotne pogreške smanjuje.



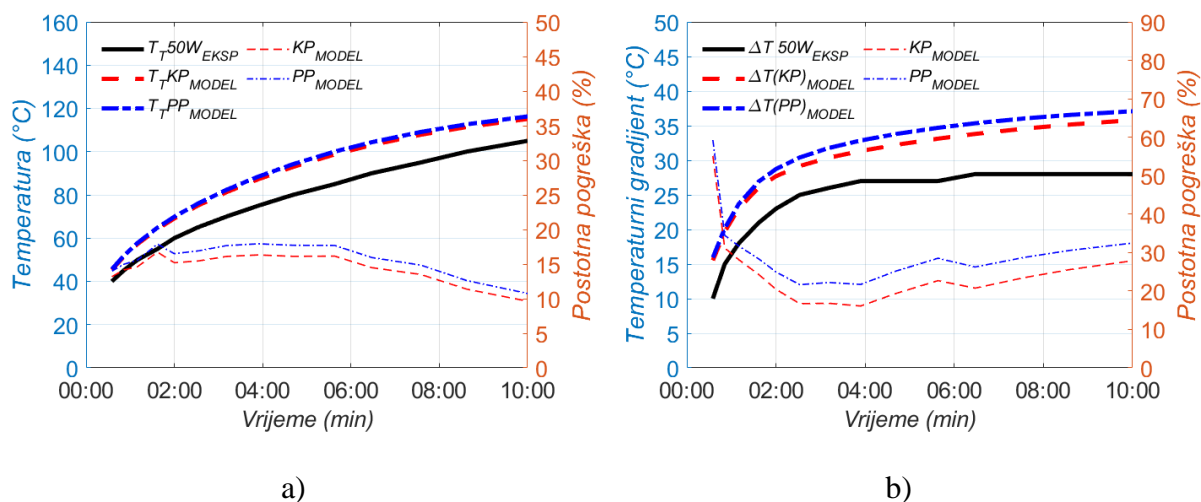
Slika 3.15 Pojedinačni spoj (verifikacija): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent

Po uzoru na pojedinačno spojeni generator, ista analiza je napravljena i kod toplinsko serijskog spoja, te je prikazana na slici 3.16. Kao i u prethodnom slučaju, odstupanja su veća na početku grafa, te se postotna pogreška smanjuje kako vrijednosti na grafu dosežu stacionarno stanje.



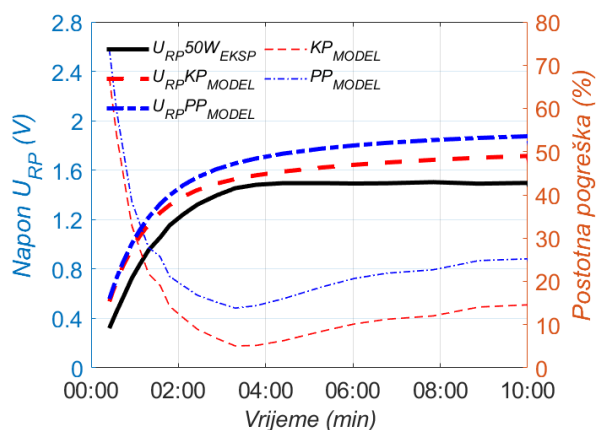
Slika 3.16 Toplinsko serijski spoj (verifikacija): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent

Usporedba ostvarenih rezultata za toplinsko paralelni spoj je prikazana na slici 3.17.



Slika 3.17 Toplinsko paralelni spoj (verifikacija): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent

Posljednja usporedba rezultata napravljena je za napon generiran na potrošaču. U mjerenjima je riječ o otporniku približne vrijednosti iznosu unutarnjeg električnog otpora, a u modelu je riječ o prilagođenom iznosu otpora. Graf usporedbe za pojedinačno spojeni generator je prikazan na slici 3.18. Sa grafa je vidljivo kako je odstupanje rezultata ostvarenih simulacijom modela i onih izmjerenih na eksperimentalnoj postavi u početnom trenutku značajno (čak i do 70 %), a uzrok navedenome su mali iznosi početnih vrijednosti na grafovima. Iako je razlika između napona u početnom i završnom trenutku gotovo jednaka, u konačnici to rezultira pogreškom od 15-ak % za konstantne parametre, dok je postotna pogreška u početnom trenutku ~70-ak %.



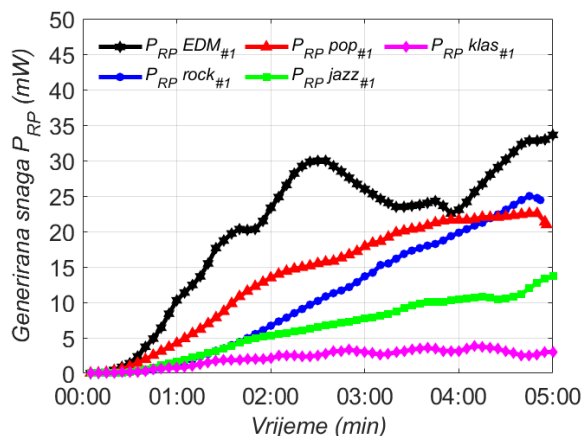
Slika 3.18 Napon na potrošaču za pojedinačno spojeni TEG (verifikacija)

Značajnija odstupanja u grafu generirane snage (ili energije), prikazanih na slikama 2.13b i 3.10b, za pojedinačno spojeni generator, posljedica su korištenja različitih vrijednosti otpornika u svrhu električnog prilagođenja. Kod mjerenja je korišten otpornik vrijednosti 5.1Ω . Model s konstantnim koeficijentima je izračunao vrijednost unutarnjeg električnog otpora kao 3.28Ω , pa je upravo ta vrijednost korištena kao otpor potrošača, dok se unutarnji električni otpor u modelu s promjenjivim koeficijentima kretao u rasponu od 2.34 do 3.43Ω . Iako su ostvarena dosta dobra poklapanja izmjerenog napona na potrošaču (i napona otvorenog kruga), te rezultata ostvarenih simulacijom modela, uslijed velikih razlika u iznosima unutarnjeg električnog otpora, generirana snaga znatno odstupa, bilo da je riječ o mjerenjima ili simulacijom modela. Uzrok odstupanja u iznosu unutarnjeg električnog otpora nije u potpunosti jasan. U modelima se taj iznos računa na osnovu koeficijenata najčešće korištenih u literaturi ili preuzetih od proizvođača generatora, dok je u mjerenjima iznos određen empirijskom analizom.

Zaključak na osnovu verifikacije modela je da rezultati ostvareni simulacijom i mjerenjima značajnije odstupanju, a najveći uzrok tome su ograničenja modela prikazana u potpoglavlju 2.3. Na osnovu verifikacije nije moguće generalno odrediti da li su bolja poklapanja ostvarena uslijed primjene modela s konstantnim ili promjenjivim parametrima. Čak i mala odstupanja u izračunu unutarnjeg električnog otpora generatora značajno utječu na izračunate iznose razvijene snage na potrošaču, što ujedno predstavlja i najveću prepreku pri daljnjem korištenju modela.

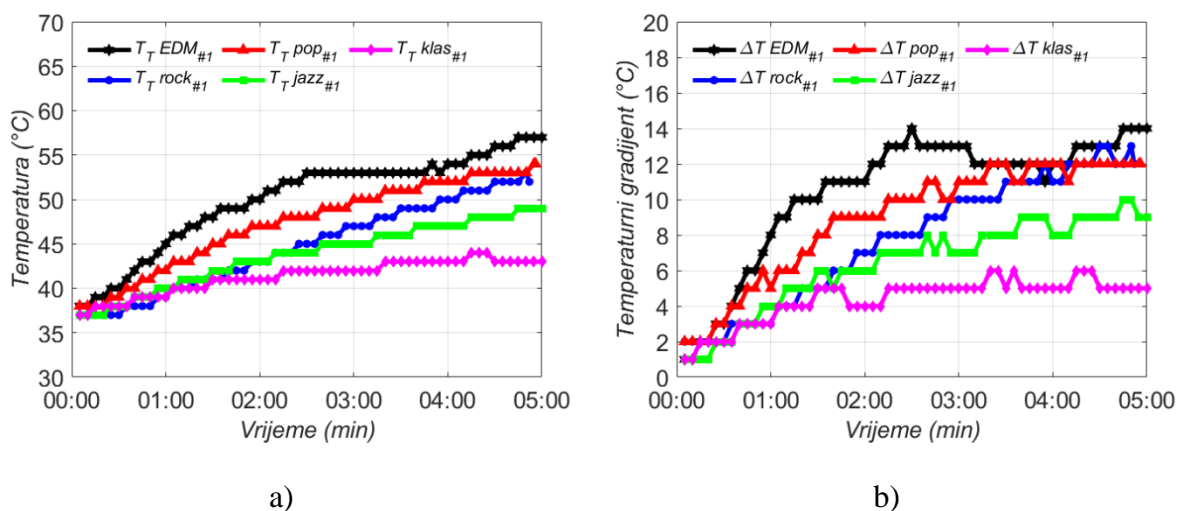
Sva dosadašnja mjerenja, a i ona u nastavku disertacije, su izvedena primjenom sinusnog ulaznog signala na pojačalu snage. Na grafovima slika 3.19-21 prikazana je generirana snaga na potrošaču i ostvarene temperature tople strane i temperaturnog gradijenta, u pojedinačnom spoju termoelektričnog generatora SP1848-27145, pri korištenju stvarnih audio signala. S obzirom na male iznose amplituda ulaznih audio signala i izostanak korištenja pretpojačala, ostvareni iznosi snaga i temperatura nisu usporedivi s iznosima ostvarenima primjenom sinusnog ulaznog signala iz signal generatora. Međutim, na osnovu izmjerenih vrijednosti moguće je donijeti zaključke na koji način audio signali proizašli iz različitih glazbenih žanrova utječu na ostvarene temperature u sustavu i na generiranu snagu na potrošaču. Mjerenjem je obuhvaćena primjena audio signala iz pet različitih glazbenih žanrova, redom su to EDM (engl. *Electronic Dance Music*), rock, pop, jazz i audio signali klasične glazbe. Mjerenja su izvedena u 5-minutnom vremenskom intervalu, s tim što su određeni audio signali trajali nešto kraće vrijeme od predviđenog, dok su oni s dužim vremenom trajanja ograničeni na razmatrani vremenski interval. Za izvođenje općih zaključaka iz ovog dijela istraživanja, vrijeme trajanja ulaznog audio signala nije od presudnog značaja.

Na grafovima slike 3.19 prikazana je generirana snaga na potrošaču u ovisnosti o vremenu za ulazne audio signale iz različitih glazbenih žanrova. Zbog kasnije usporedbe s drugim audio signalima iz istih žanrova, svi signali prikazani na grafu nose oznaku #1. Sa grafa je vidljivo da su najveći iznosi generiranog napona na potrošaču ostvareni primjenom audio signala iz žanra elektronske glazbe, zatim rock glazbe, pa uz primjenu audio signala iz pop, jazz i klasične glazbe.



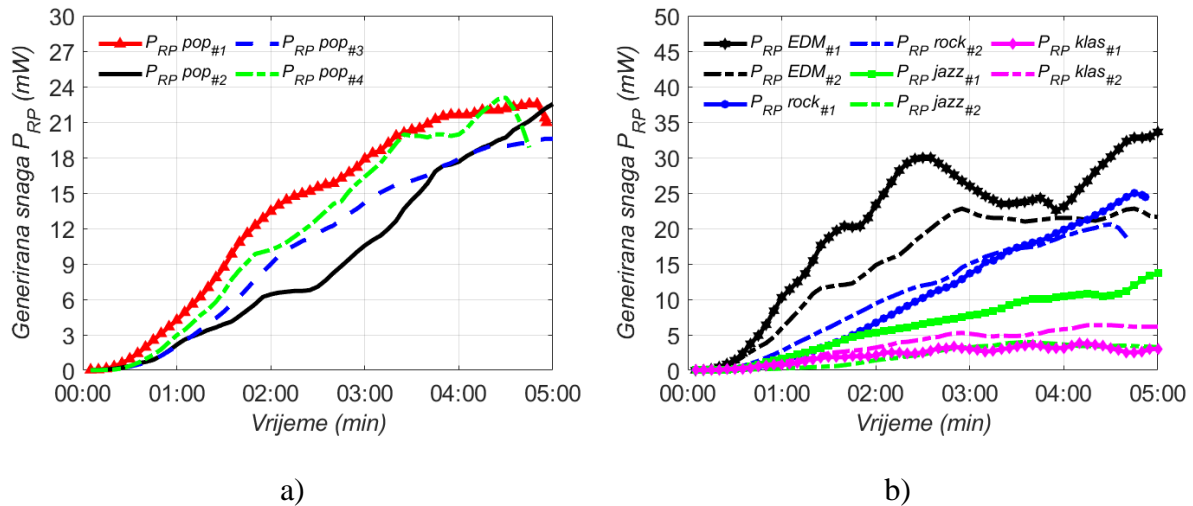
Slika 3.19 Generirana snaga na potrošaču u pojedinačnom spoju SP1848-27145 za različite žanrove glazbe

Temperature tople strane i iznosi temperaturnih gradijenata uslijed primjene audio signala iz različitih glazbenih žanrova (oznake #1), su prikazani na grafovima slike 3.20.



Slika 3.20 Ostvarene temperature u pojedinačnom spoju SP1848-27145 za različite žanrove glazbe: a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent

Na grafovima slike 3.21 prikazana je usporedba iznosa generiranih snaga uslijed primjene različitih audio signala iz istog žanra glazbe. Na slici 3.21a prikazani su iznosi generirane snage za četiri različita audio signala iz pop kategorije glazbe, a slika 3.21b prikazuje usporedbu iznosa generirane snage za po dva različita audio signala iz EDM, rock, jazz i klasične kategorije glazbe.



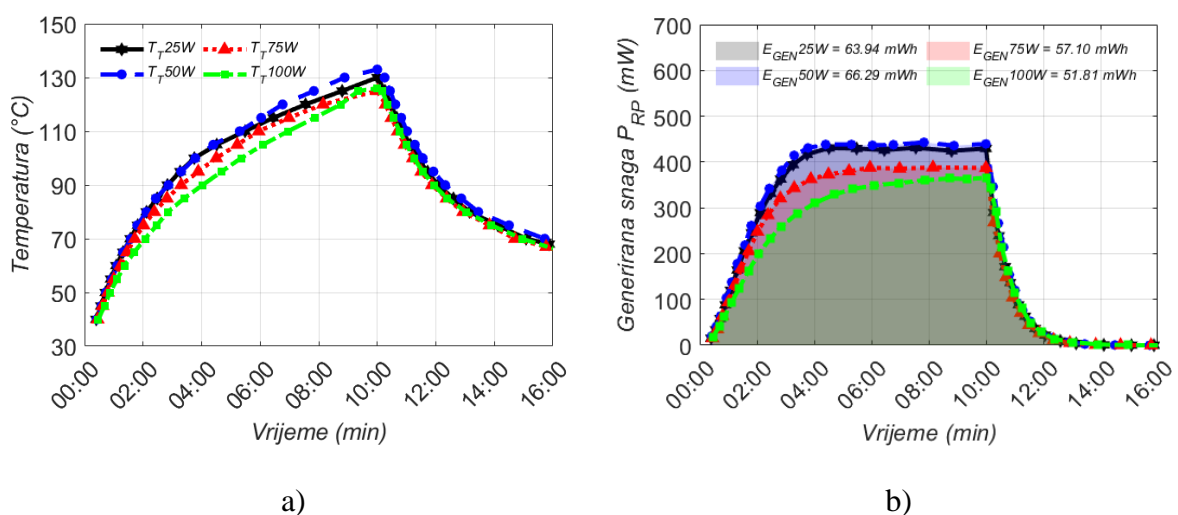
Slika 3.21 Generirana snaga na potrošaču u pojedinačnom spoju SP1848-27145 različitih audio signala iz: a) pop kategorije; b) elektronske, rock, jazz i klasične kategorije glazbe

Na osnovu provedenog istraživanja iz primjene stvarnih audio signala na pojačalu snage, moguće je donijeti određene generalne zaključke. U većini slučajeva, audio signali iz žanra EDM glazbe će prouzrokovati najveće iznose temperaturnog gradijenta i razvijene snage na potrošaču, a zatim usporedno slijede audio signali iz rock i pop žanra glazbe, te naposljetku signali iz jazz i klasične kategorije glazbe. Međutim, sa grafova prikazanih na slici 3.21 može se zaključiti kako postoje velike oscilacije u ostvarenim rezultatima između audio signala iz istog glazbenog žanra. Tako je npr. na slici 3.21b vidljivo da audio signal klasične glazbe (klas #2) može generirati veće snage na potrošaču od audio signala jazz glazbe (jazz #2). Zbog velikog broja glazbenih žanrova i njihovih podskupina, te samim tim i oscilacija u amplitudama audio signala, primjena sinusnog ulaznog signala konstantne amplitude se pokazala kao jedino rješenje za provođenje kvalitetnog istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji.

3.2. Protutaktni način rada TEG-ova

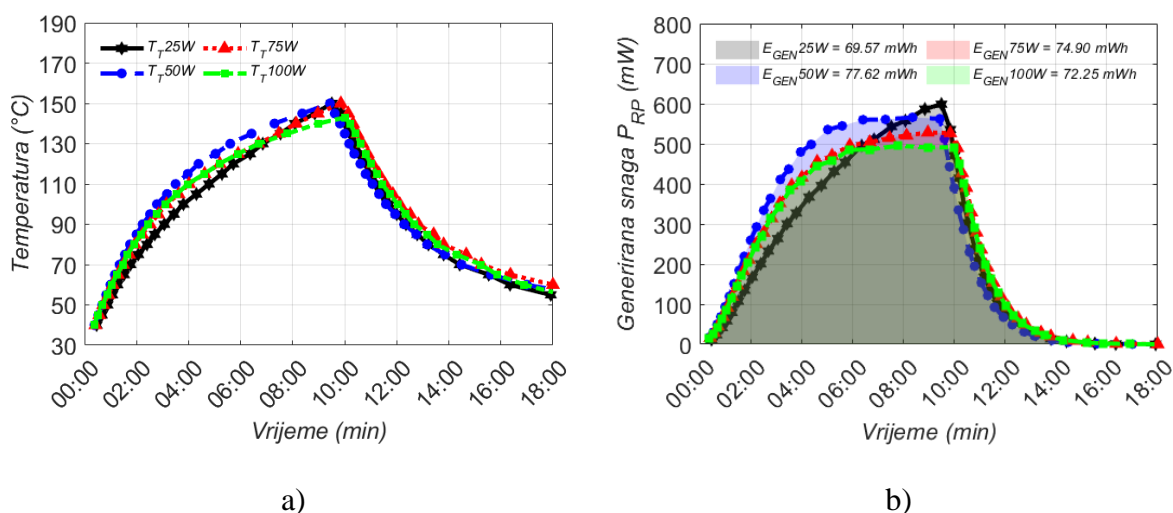
Temperatura raspršivača topline, a samim tim i temperatura na izlaznim tranzistorima, će u korištenom sustavu s pojačalom snage nakon određenog vremenskog perioda dosegnuti iznos opasan po njihov radni vijek ($\sim 150^{\circ}\text{C}$). Kada izlazni tranzistori dosegnu navedenu temperaturu, potrebno je ugasiti pojačalo i pričekati da se sustav ohladi. S ciljem besprekidnog rada pojačala, predložen je protutaktni način rada termoelektričnih generatora. Za realizaciju navedenog načina rada, potrebno je oformiti dva sustava prikazana na slici 2.5, a koja bi radila izmjenično. Dok bi se jedan sustav zagrijavao i pritom proizvodio energiju, drugi sustav bi se za to vrijeme hladio i proizvodio energiju tijekom hlađenja (tablica 2.2). Prikazani način rada sugerira da je potrebno oformiti dva sustava za pretvorbu energije, što je negativna posljedica primjene ovakvog načina rada. Istovremeno, osim prikupljanja energije iz oba sustava, različitim vremenima prebacivanja rada između sustava omogućila bi se regulacija temperature na izlaznim tranzistorima. Prednost protutaktnog načina rada je i u mogućnosti korištenja hladila manjih dimenzija, uzimajući u obzir da je upravo cijena hladila najčešće među dominantnijim stavkama pri izradi sustava s pojačalom snage. Sustav u protutaktnom načinu rada nije praktično realiziran, već je napravljena teorijska analiza na osnovu ostvarenih rezultata s jednim takvim sustavom u taktom načinu rada. Sama realizacije ovakvog sustava sigurno unosi neke nove izazove, posebno u dizajn samog sustava.

Prikaz temperature tople strane, generirane snage i energije na potrošaču za pojedinačno spojeni termoelektrični generator, za period zagrijavanja i hlađenja, prikazan je na slici 3.22.



Slika 3.22 Pojedinačni spoj SP1848-27145 (10-minutni režim rada pojačala): a) temperatura tople strane; b) generirana energija na potrošaču

Prikaz istih vrijednosti, također u 10-minutnom režimu rada pojačala, za toplinsko serijski spoj generatora predstavljen je na slici 3.23. Na osnovu predstavljenih grafova, moguće je potvrditi ranije doneseni zaključak, kako su temperature tople strane, temperaturni gradijenti i generirana snaga (energija) na potrošaču većeg iznosa kod toplinsko serijskog spoja generatora. Toplinsko paralelni spoj nije uzet u razmatranje u nastavku rada, s obzirom da je generirana snaga u takvom spoju manja (slika 3.14) u odnosu na pojedinačno spojeni generator i toplinsko serijski spoj.



Slika 3.23 Toplinsko serijski spoj SP1848-27145 (10-minutni režim rada pojačala): a) temperatura tople strane; b) ukupno generirana energija

Na osnovu grafova prikazanih na slikama 3.22 i 3.23, moguće je tablično prikazati iznose generirane energije u periodu zagrijavanja i hlađenja u 10-minutnom režimu rada pojačala, kao i postotak razvijene energije u periodu hlađenja u odnosu na energiju razvijenu kod zagrijavanja (tablica 3.5). Iz tablice je vidljivo kako se u razmatranom vremenu, u toplinsko serijskom spoju generirao znatno veći iznos energije u usporedbi s pojedinačno spojenim generatorom.

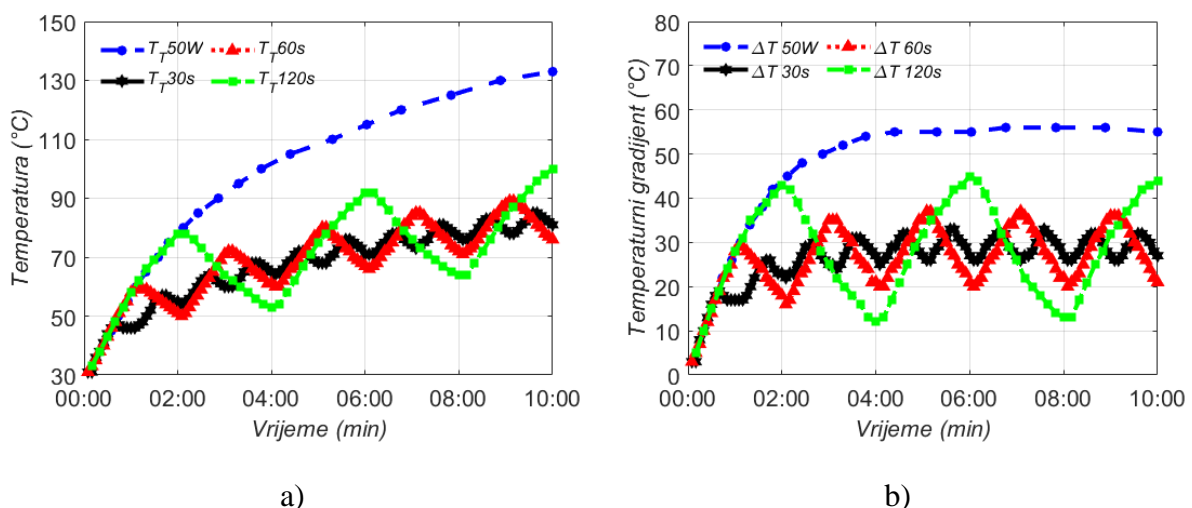
Tablica 3.5 Generirana energija u 10-minutnom vremenskom intervalu rada pojačala

P_{IZL} (W)	Pojedinačno spojeni TEG			Toplinsko serijski spoj TEG-ova		
	$E_{GRIJANJE}$ (mWh)	$E_{HLAĐENJE}$ (mWh)	$\Delta E_{DODATNO}$ (%)	$E_{GRIJANJE}$ (mWh)	$E_{HLAĐENJE}$ (mWh)	$\Delta E_{DODATNO}$ (%)
25	58.79	5.15	8.76	56.06	13.5	24.08
50	60.61	5.67	9.35	65.89	11.73	17.8
75	52.44	4.65	8.87	62.53	12.37	19.78
100	46.46	5.35	11.5	61.66	10.59	17.17

3.2.1. Utjecaj različitih vremena prebacivanja

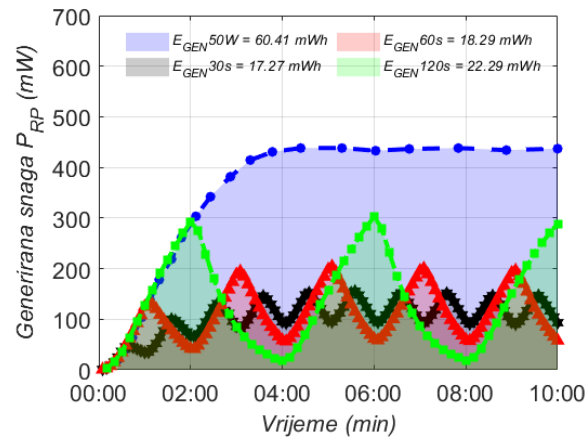
Nakon predstavljanja protutaktnog načina rada i odabira izlazne snage pojačala i toplinskih spojeva s kojima će se nastaviti mjerenja, u nastavku teksta je razmatran takti način rada jednog sustava. Na već predstavljenoj eksperimentalnoj postavci analiziran je utjecaj različitih vremena prebacivanja na ostvarene rezultate. Promatrani su iznosi temperature tople strane, temperaturni gradijent, te generirana snaga i energija na potrošaču za vremena prebacivanja od 30, 60 i 120 s, te pri neprekidnom radu pojačala (10-minutni vremenski interval). Mjerenja su napravljena pri izlaznoj snazi pojačala od 50 W, za pojedinačno spojeni i toplinsko serijski spoj termoelektričnih generatora. Grafovi u nastavku se nastavljaju na grafove prikazane na slikama 3.10b i 3.12a.

Graf temperature tople strane i ostvarene temperaturne razlike kod pojedinačno spojenog generatora je prikazan na slici 3.24. Osim rezultata ostvarenih za neprekidni rad pojačala u 10-minutnom režimu, prikazani su rezultati ostvareni uslijed različitih iznosa vremena prebacivanja. Povećanjem vremena prebacivanja, postižu se veći iznosi temperature tople strane i gradijenta, što je ujedno negativna i pozitivna posljedica korištenog vremena prebacivanja. Za dano hladilo, s različitim vremenima prebacivanja moguće je regulirati temperaturu tople strane. S vremenom prebacivanja od 30 s u 10-minutnom intervalu rada pojačala, temperatura tople strane ne prelazi 90°C, dok u neprekidnom radu ta ista temperatura postiže iznos veći od 130°C. Iako temperatura tople strane, neovisno o vremenu prebacivanja, generalno ima tendenciju rasta u promatranom vremenskom intervalu, temperaturni gradijent se kreće u gotovo jednakom rasponu vrijednosti.



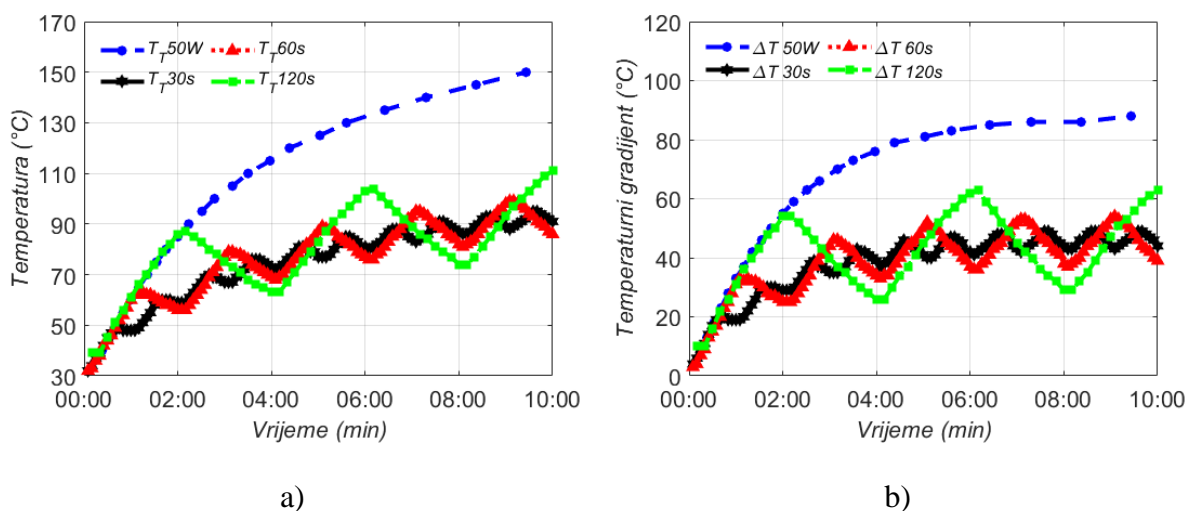
Slika 3.24 Pojedinačni spoj u taktom načinu rada (10 kHz, 'hladilo #2'): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent

Graf generirane energije na potrošaču za pojedinačno spojeni generator pri različitim vremenima prebacivanja, prikazan je na slici 3.25. Na osnovu grafa može se zaključiti da je energija manjeg iznosa za kraće periode prebacivanja.



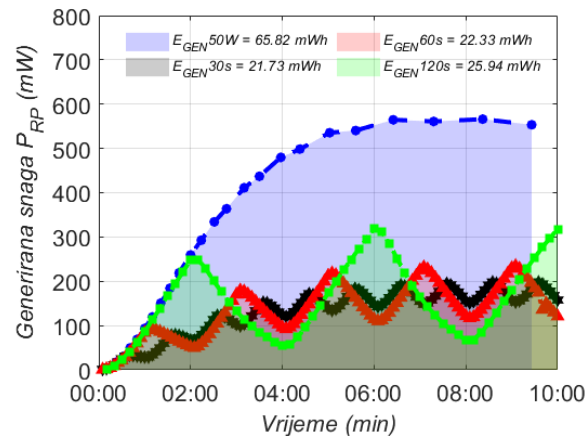
Slika 3.25 Energija u taktom načinu rada pojedinačnog spoja (10 kHz, 'hladilo #2')

Graf temperature tople strane i ostvarenog temperaturnog gradijenta za toplinsko serijski spoj generatora, prikazan je na slici 3.26. Mjerenja su izvođena u 10-minutnom intervalu ili do trenutka kada temperatura tople strane dosegne iznos 150°C, ovisno što prije nastupi. Zaključci izvedeni za pojedinačno spojeni generator vrijede i kod toplinsko serijskog spoja, uz napomenu da je riječ o većim iznosima temperatura tople strane i ostvarenim temperaturnim gradijentima.



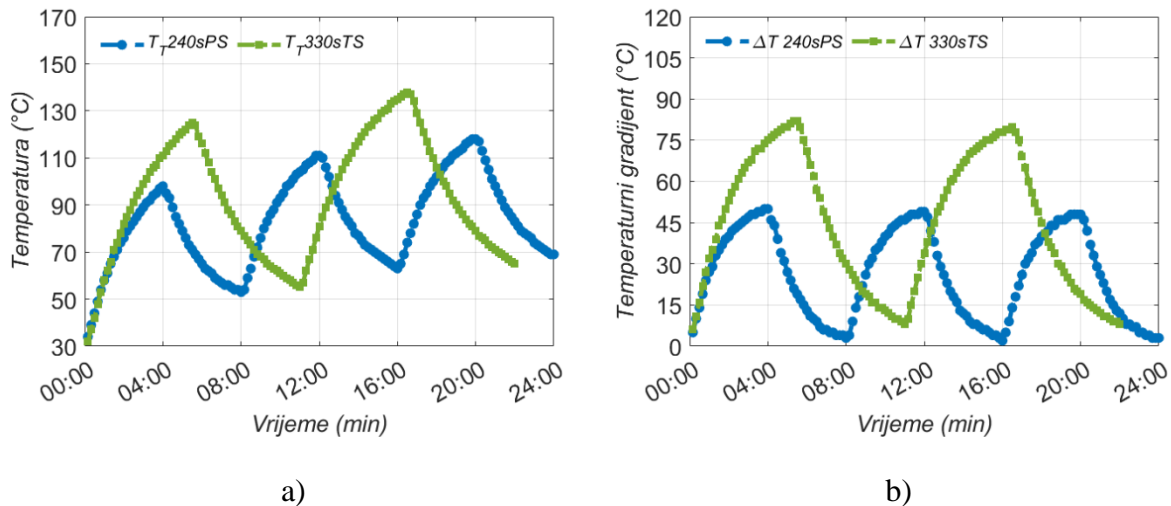
Slika 3.26 Toplinsko serijski spoj u taktom načinu rada (10 kHz, 'hladilo #2'): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent

Graf ukupno generirane energije na potrošaču, uslijed različitih perioda prebacivanja u toplinsko serijskom spoju generatora, prikazan je na slici 3.27. Generirana energija na potrošaču je većeg iznosa u odnosu na pojedinačno spojeni generator. Temperatura tople strane prije dosegne iznos od 150°C, nego li prođe vremenski interval od 10 minuta, te je pojačalo potrebno isključiti kako ne bi došlo do oštećenja izlaznih tranzistora. Zbog navedenog, površina označena plavom bojom (energija) nije osjenčana za cijeli vremenski interval mjerenja.



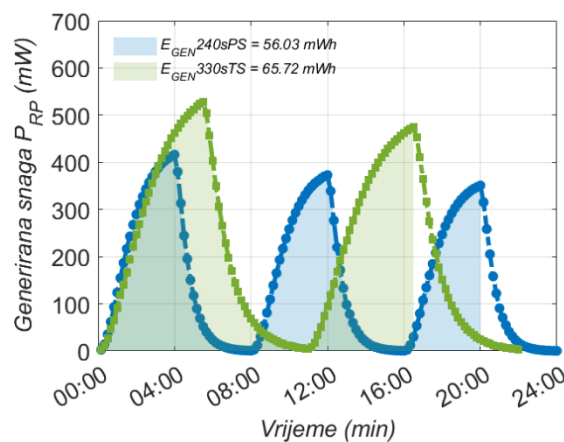
Slika 3.27 Energija u taktom načinu rada toplinsko serijskog spoja (10 kHz, 'hladilo #2')

Napravljena je i analiza za iznos vremena prebacivanja koje odgovara trenutku dosezanja maksimalnog temperaturnog gradijenta prikazanog na slikama 3.9b i 3.11b. Za pojedinačni spoj generatora ovo vrijeme iznosi približno 330 s (5:30 minuta), a u toplinsko serijskom spoju iznosi približno 240 s (4 minute). Graf temperature tople strane u razmatranim vremenima prebacivanja je prikazan na slici 3.28a, a temperaturni gradijent na slici 3.28b. Na grafovima su plavom bojom predstavljeni rezultati ostvareni za pojedinačni spoj generatora, dok su zelenom bojom označeni rezultati ostvareni u toplinsko serijskom spoju. Treba naglasiti kako su mjerenja, samo u ovom slučaju, izvođena u intervalu dužem od 10 minuta, kako bi s rezultatima obuhvatili barem četiri potpuna vremena prebacivanja. Temperature tople strane, kao i ostvareni temperaturni gradijent, su većeg iznosa kod toplinsko serijskog spoja generatora, nego u pojedinačnom spoju. Kao što je već navedeno, temperatura tople strane ima tendenciju rasta s vremenom, dok je temperaturni gradijent promjenjiv u gotovo jednakom rasponu vrijednosti za vrijeme mjerenja.



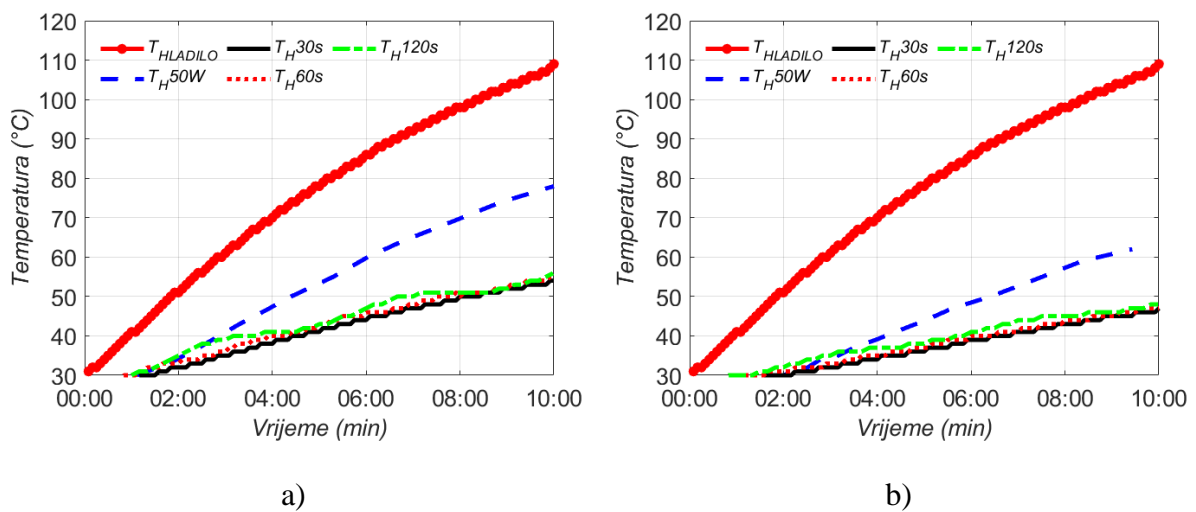
Slika 3.28 Pojedinačno spojeni i toplinsko serijski spoj u taktnom načinu rada (10 kHz, 'hladilo #2', maksimalni gradijent): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent

Graf generirane energije na potrošaču za vrijeme prebacivanja od 240 s kod pojedinačno spojenog, te vremena prebacivanja od 330 s za toplinsko serijski spoj generatora, prikazan je na slici 3.29. Na grafu je uočljivo kako površina ispod krivulje nije u potpunosti osjenčana, već da je izostavljena posljednja 'poluperioda' izračuna generirane energije. Detaljnije objašnjenje će biti prikazano u nastavku potpoglavlja, kada se bude teorijski analizirao protutaktni način rada dva sustava. Čak i kada se izostavi navedena površina, generirana energija u pojedinačnom spoju je manjeg iznosa u odnosu na generiranu energiju u toplinsko serijskom spoju generatora. S ovim primjerom je završena analiza utjecaja različitih vremena prebacivanja na temperature u sustavu i generiranu energiju na potrošaču.



Slika 3.29 Generirana energija u taktnom načinu rada kod pojedinačno spojenog i toplinsko serijskog spoja (10kHz, 'hladilo #2', maksimalni gradijent)

Kao jedna od prednosti korištenja (protu)taktnog načina rada termoelektričnih generatora navedena je mogućnost korištenja hladila manjih dimenzija. Navedena prednost je vrlo značajna, iz razloga što je cijena hladila najčešće među cjenovno dominantnijim stavkama izrade sustava s audio pojačalom. Mjerenjem se pokazalo kako je temperatura hladila u 10-minutnom intervalu višestruko manja u dizajniranom sustavu s termoelektričnim generatorima, u odnosu na sustav kod kojega su izlazni tranzistori pojačala montirani direktno na hladilo, bez raspršivača topline i generatora. Grafovi temperature hladila uslijed direktne montaže tranzistora, te u neprekidnom radu pojačala i taktnom načinu rada (30, 60 i 120s), za pojedinačno spojeni generator i toplinsko serijski spoj generatora, prikazani su na slici 3.30.

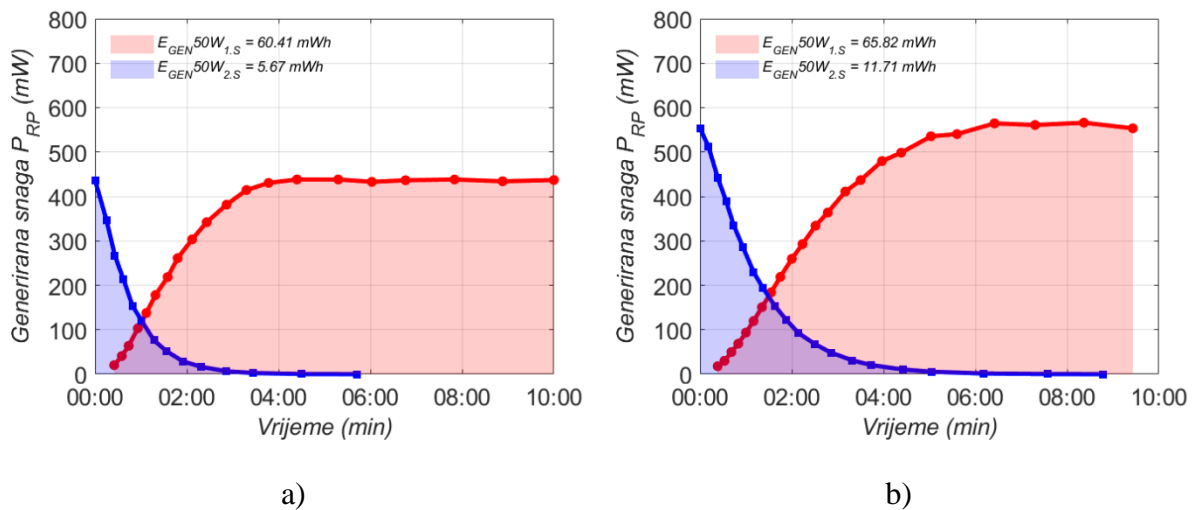


Slika 3.30 Temperature hladila: a) u pojedinačnom spoju generatora; b) toplinsko serijskom spoju generatora

Sa slike je vidljivo kako pri direktnoj montaži izlaznih tranzistora na hladilo, temperatura hladila pri kraju vremenskog intervala dosegne iznos od 110°C. Zatim po iznosu slijedi temperatura kad pojačalo radi neprekidno, te su u konačnici najmanji iznosi temperatura hladila ostvareni uslijed taktnog načina rada generatora. S povećanjem vremena prebacivanja između sustava, dolazi i do povećanja temperature hladila, međutim, za razmatrana vremena u našem primjeru, u konačnici uglavnom dolazi do poklapanja temperatura hladila na kraju razmatranog vremenskog intervala.

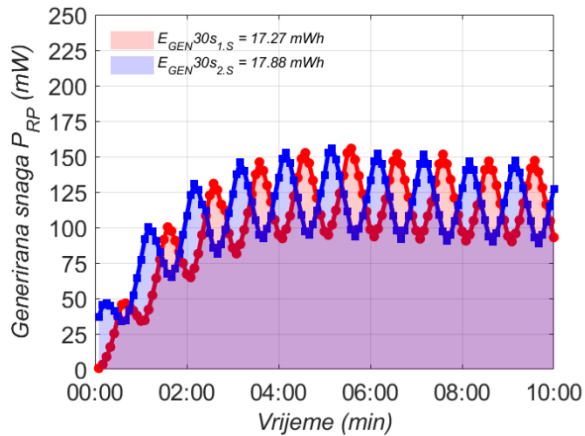
Na osnovu grafova generirane energije prikazanih na slikama 3.25, 3.27 i 3.29, napravljeni su grafovi generirane energije uslijed zamišljenog protutaktnog načina rada dva takva identična sustava. Nakon grafičkog prikaza rezultata ostvarenih za različite toplinske spojeve i za različita vremena prebacivanja u protutaktnom načinu rada, rezultati su prikazani i tablično.

Iznos generirane energije na potrošaču prilikom protutaktnog načina rada, u pojedinačnom i toplinsko serijskom spoju generatora u neprekidnom (10-minutnom) radu pojačala, prikazan je na slici 3.31. Mjerenja su također napravljena ili za 10-minutni vremenski interval ili do trenutka kada temperatura tople strane dosegne iznos od 150°C, ovisno što prije nastupi. Za pojedinačni spoj (slika 3.31a) mjerenje je izvršeno u 10-minutnom vremenskom intervalu, dok je u toplinsko serijskom spoju generatora (slika 3.31b) došlo do ranijeg prekida mjerenja. Unatoč nešto kraćem vremenu mjerenja, generirana energija u toplinsko serijskom spoju je većeg iznosa nego li kod pojedinačno spojenog generatora.

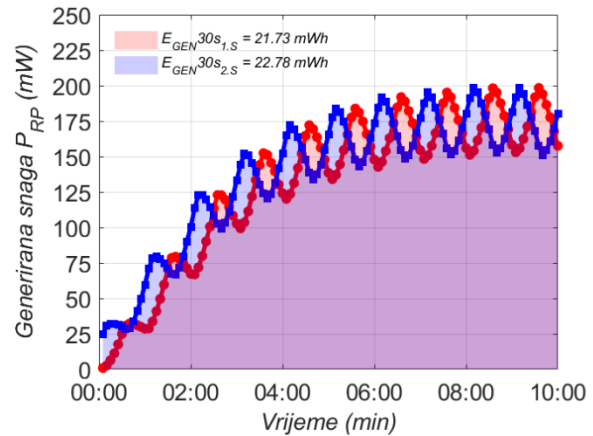


Slika 3.31 Generirana energija u protutaktnom načinu rada (10 kHz, 'hladilo #2', neprekidno): a) pojedinačni spoj; b) toplinsko serijski spoj

Grafovi u nastavku su realizirani na osnovu rezultata izmjerenih na jednom sustavu, drugi sustav s kojim bi se oponašao protutaktni način rada eksperimentalno nije realiziran. Krivulja i osjenčana površina označena crvenom bojom se odnosi na izmjerene rezultate, dok su krivulja i površina osjenčana plavom bojom zapravo fazno pomaknuti rezultati za iznos jednog vremena prebacivanja. Rezultati na grafovima, za slučaj korištenja identičnih sustava, predstavljaju dosta dobru aproksimaciju rezultata ostvarenih u protutaktnom načinu rada. Graf generirane energije na potrošaču u protutaktnom načinu rada, za pojedinačni i toplinsko serijski spoj generatora, pri vremenu prebacivanja iznosa 30 s, prikazan je na slici 3.32. Također i u ovom slučaju, toplinsko serijski spoj generatora ostvaruje bolje rezultate s obzirom na generiranu energiju u odnosu na pojedinačno spojeni generator. Isti zaključak po pitanju generirane energije vrijedi i kod ostalih razmatranih vremena prebacivanja.



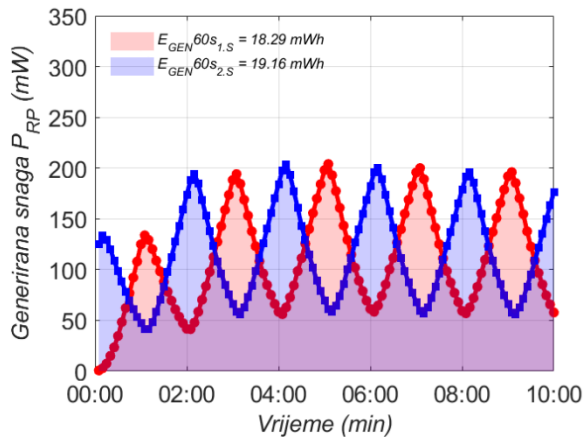
a)



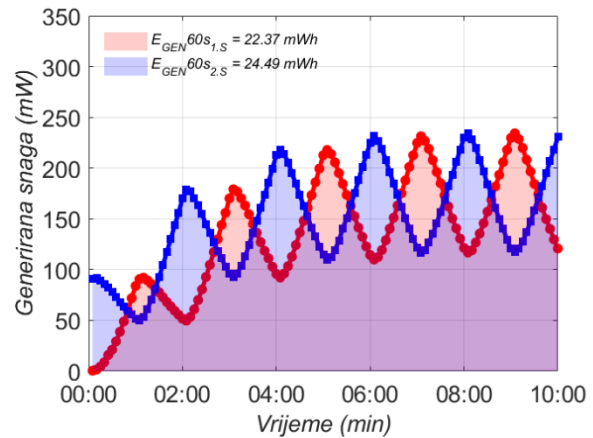
b)

Slika 3.32 Generirana energija u protutaktnom načinu rada (10 kHz, 'hladilo #2', 30s): a) pojedinačni spoj; b) toplinsko serijski spoj

Iznosi generirane energije u protutaktnom načinu rada, za pojedinačni i toplinsko serijski spoj generatora, uslijed vremena prebacivanja između sustava u iznosu 60 s, je prikazan na slici 3.33.



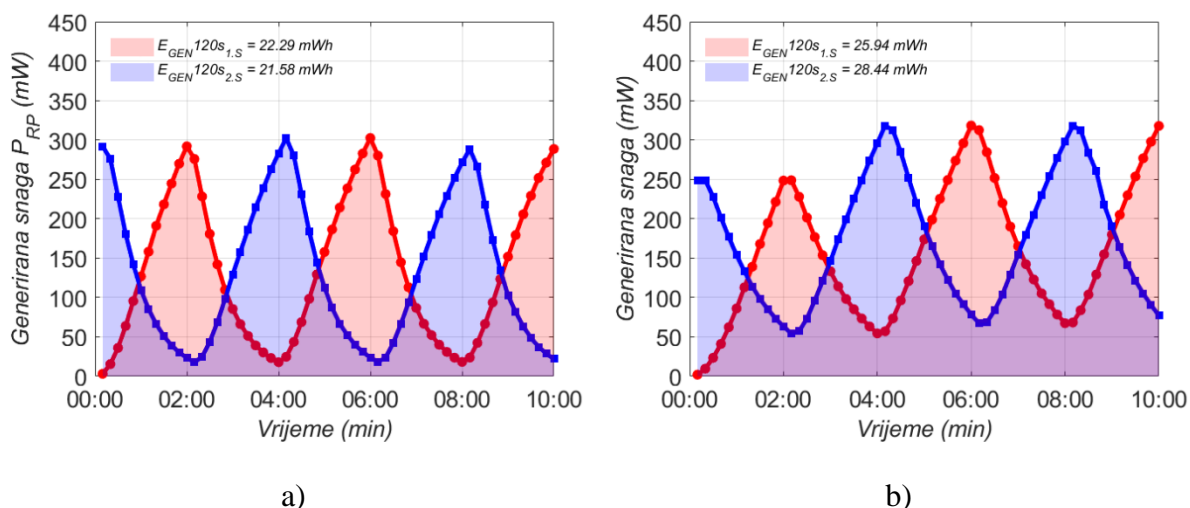
a)



b)

Slika 3.33 Generirana energija u protutaktnom načinu rada (10 kHz, 'hladilo #2', 60s): a) pojedinačni spoj; b) toplinsko serijski spoj

Generirana energija u protutaktnom načinu rada uslijed vremena prebacivanja iznosa 120 s, za pojedinačni i toplinsko serijski spoj generatora, prikazana je na slici 3.34. Iznosi generirane energije u ovom slučaju su većeg iznosa u odnosu na prethodno navedena vremena prebacivanja.



Slika 3.34 Generirana energija u protutaktnom načinu rada (10 kHz, 'hladilo #2', 120s): a) pojedinačni spoj; b) toplinsko serijski spoj

Tablični prikaz rezultata ostvarenih uslijed različitih vremena prebacivanja u protutaktnom načinu rada, za pojedinačno spojeni i toplinsko serijski spoj generatora, predstavljen je u tablici 3.6. Tablica sadrži maksimalan iznos temperature tople strane, energiju generiranu u taktom načinu rada jednog sustava (slika 3.25 i 3.27), te generiranu energiju u protutaktnom načinu rada dva sustava. Oznake 'PS' i 'TS' označavaju pojedinačni spoj i toplinsko serijski spoj generatora, dok oznake 'E_{T_1S}' i 'E_{PT_2S}' označavaju generiranu energiju uslijed taktog načina rada jednog sustava, odnosno protutaktnog načina rada dva sustava. Kako je protutaktni način rada realiziran faznim pomakom grafova dobivenih u taktom načinu rada tj. približno njihovim dupliciranjem, iznosi energije generirane u protutaktnom načinu rada će očekivano biti većeg iznosa.

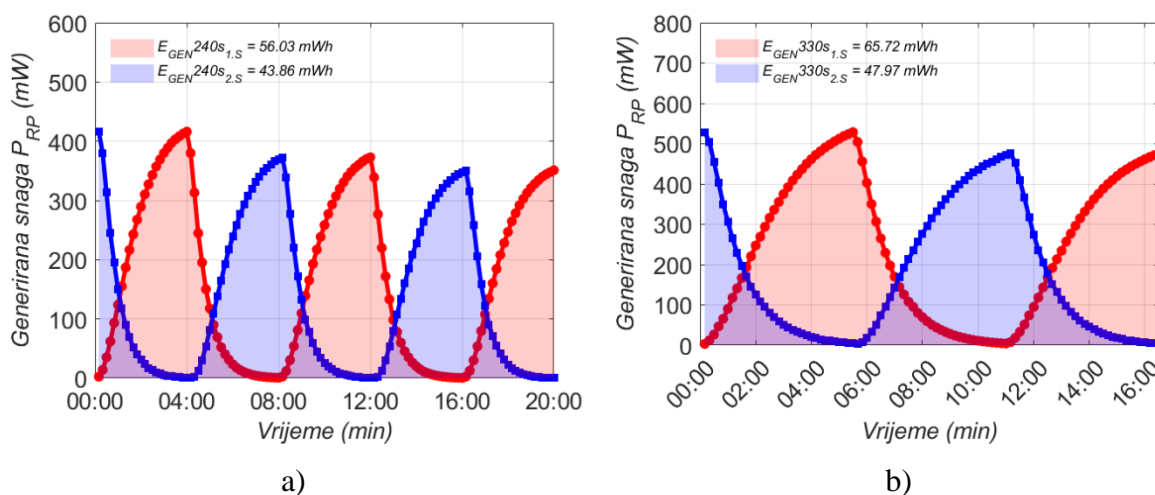
Tablica 3.6 Rezultati u taktom i protutaktnom načinu rada ('hladilo #2')

50W	Model hladila	'hladilo #2'		
Spoj	Vrijeme prebacivanja (s)	T _{TOPLO} (°C)	E _{T_1S} (mWh)	E _{PT_2S} (mWh)
PS	30	85	17.27	35.15
	60	89	18.29	37.45
	120	100	22.29	43.87
	Neprekidno	133	60.41	66.08
TS	30	95	21.73	44.51
	60	99	22.33	46.86
	120	111	25.94	54.39
	Neprekidno	150	65.82	77.53

Iznosi ostvareni za vremenski period od 10 minuta ili dok temperatura tople strane ne dosegne iznos 150°C

Sva mjerenja do sada su napravljena korištenjem jednog tipa hladila, a koje je ujedno korišteno i kod simulacije integriranog toplinsko-električnog modela. S obzirom da će se u potpoglavlju 3.2.3 razmatrati utjecaj hladila različitih toplinskih otpora na ostvarene temperature i na iznose generirane energije, do sada korišteno hladilo će u nastavku nositi oznaku 'hladilo #2'.

Iznosi generirane energije u protutaktnom načinu rada za vrijeme prebacivanja od 240 s u pojedinačnom spoju i 330 s u toplinsko serijskom spoju generatora, prikazani su na slici 3.35.



Slika 3.35 Generirana energija u protutaktnom načinu rada (10 kHz, 'hladilo #2', maksimalni gradijent): a) pojedinačni spoj; b) toplinsko serijski spoj

Tablični prikaz iznosa generirane energije uslijed taktnog načina rada jednog sustava (slika 3.29), a zatim i protutaktnog načina rada dva sustava (slika 3.35), predstavljeni su u tablici 3.7. S obzirom da graf generirane energije zamišljenog drugog sustava u protutaktnom načinu rada nastaje faznim pomakom za jedno vrijeme prebacivanja grafa izmjerene u taktom načinu rada, tako se u taktom načinu rada treba izvršiti mjerenje za jedno vrijeme prebacivanja više u odnosu na predviđeno vrijeme trajanja grafa u protutaktnom načinu rada. Na osnovu objašnjenja, može se shvatiti zašto površina ispod krivulje na slici 3.29 ide samo do 20 minuta za pojedinačni spoj i 16:30 minuta za toplinsko serijski spoj generatora.

Tablica 3.7 Rezultati u taktom i protutaktnom načinu rada (maksimalni gradijent)

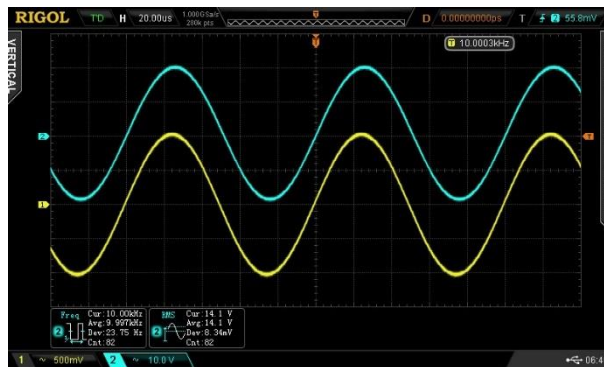
50W	Model hladila	'hladilo #2'	
Spoj	Vrijeme prebacivanja (s)	E_{T_1S} (mWh)	E_{PT_2S} (mWh)
PS	240	56.03	99.89
TS	330	65.72	113.69

Interval mjerenja: 20 minuta za pojedinačni spoj i 16:30 minuta za toplinsko serijski spoj generatora

3.2.2. Utjecaj frekvencije ulaznog signala

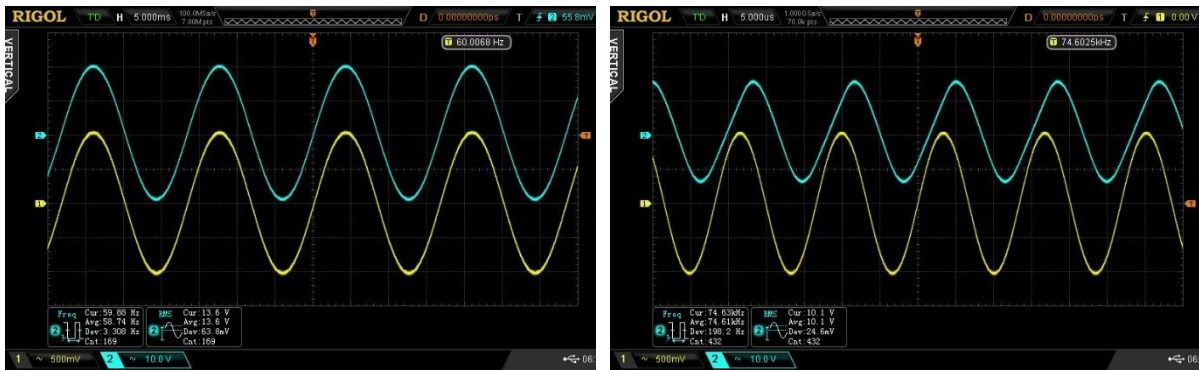
Sva dosadašnja mjerenja su realizirana primjenom ulaznog signala sinusnog valnog oblika frekvencije 10kHz. Ovo potpoglavlje razmatra utjecaj različitih frekvencija ulaznog signala na iznos generirane energije termoelektričnog generatora. S obzirom da je korišteno audio pojačalo snage, pretpostavka je da će ono jednako pojačavati signal u frekvencijskom rasponu od 20 Hz do 20 kHz tj. rasponu u kojem ga ljudsko uho čuje. Izmjereni rezultati u ovom potpoglavlju su napravljeni za pet različitih frekvencija ulaznog signala, 500 Hz, 1 kHz, 5 kHz, 10 kHz i 20 kHz, pri čemu je razmatran pojedinačno spojeni generator u taktom načinu rada.

Početna mjerenja su napravljena s ciljem određivanja donje i gornje granične frekvencije korištenog pojačala. Na slici 3.36 prikazani su ulazni i izlazni signal pojačala, redom žute i plave boje, pri frekvenciji ulaznog signala od 10 kHz. Pri izlaznoj snazi pojačala od 50 W, efektivna vrijednost napona na potrošaču pojačala iznosi 14.1 V.



Slika 3.36 Valni oblici ulaznog i izlaznog signala pojačala pri frekvenciji od 10 kHz

Iznosi donje i gornje granične frekvencije su određeni na način da se frekvencija ulaznog signala smanjuje, odnosno povećava, do trenutka kada efektivna vrijednost napona na potrošaču padne za korijen iz 2, u odnosu na vrijednost napona pri srednjim frekvencijama. Iznos donje granične frekvencije zbog ograničenja mjerne opreme nije izmjeren, najniža frekvencija ulaznog signala koju je bilo moguće koristiti iznosila je 60 Hz, pri čemu je efektivna vrijednost napona iznosila 13.6 V (slika 3.37a). Gornja granična frekvencija za korišteno pojačalo iznosila je 74.6 kHz, pri čemu je vrijednost efektivnog napona na potrošaču iznosila 10 V (slika 3.37b). Na osnovu iznosa graničnih frekvencija, možemo zaključiti da korišteno pojačalo gotovo jednako pojačava ulazni signal u frekvencijskom rasponu od 20 Hz do 20 kHz.

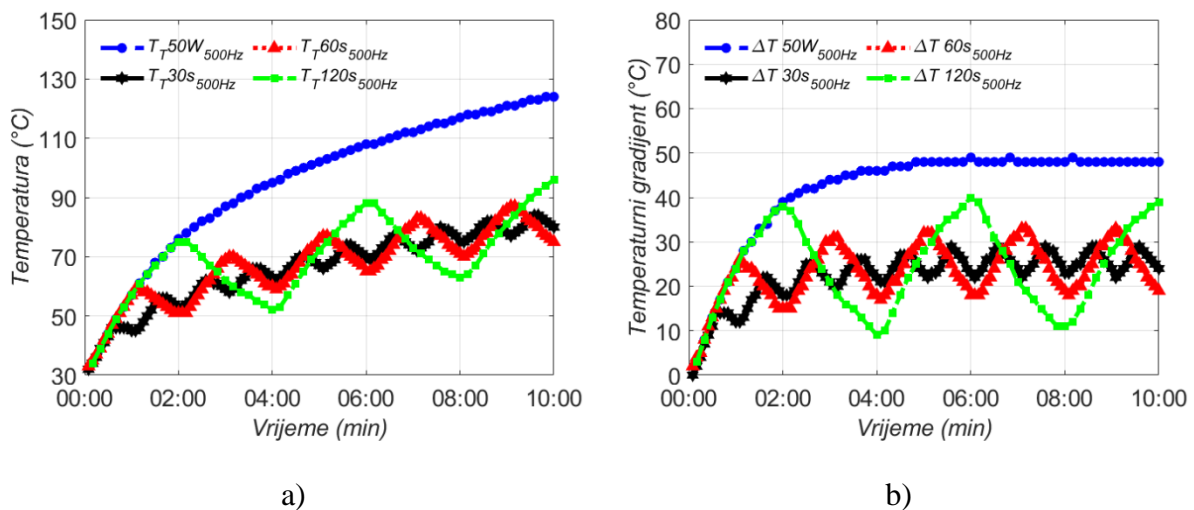


a)

b)

Slika 3.37 Valni oblici ulaznog i izlaznog signala pojačala: a) pri 60 Hz; b) pri 74.6 kHz

Zatim je razmatran utjecaj različitih frekvencija ulaznog signala pojačala na iznos energije generirane termoelektričnim generatorom. Rezultati su nastali na temelju pojedinačno spojenog generatora u taktom načinu rada, odnosno u istim uvjetima kao i u prethodnom potpoglavlju, s tom razlikom što su korištene različite frekvencije ulaznog signala pojačala. Zaključci izvedeni za primjenu pojedinačno spojenog generatora vrijede i za ostale toplinske spojeve, stoga oni nisu uzeti u razmatranje. Iznosi temperature tople strane i temperaturnog gradijenta u 10-minutnom vremenskom intervalu pri frekvenciji ulaznog signala od 500 Hz, su prikazani na slici 3.38.

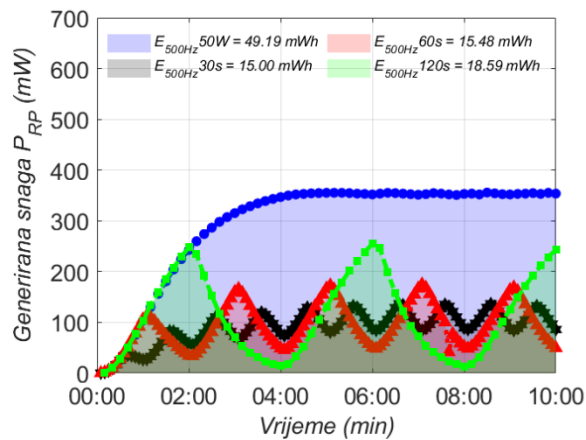


a)

b)

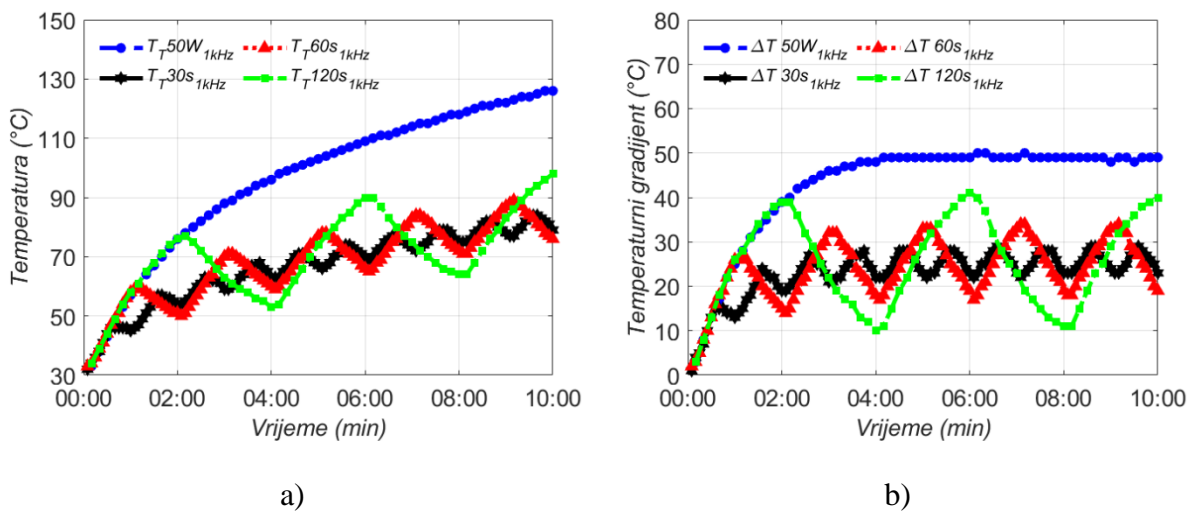
Slika 3.38 Pojedinačni spoj u taktom načinu rada (500 Hz, 'hladilo #2'): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent

Generirana energija termoelektričnog generatora pri navedenoj frekvenciji signala prikazana je na slici 3.39.



Slika 3.39 Generirana energija u taktnom načinu rada pojedinačnog spoja (500 Hz, 'hladilo #2')

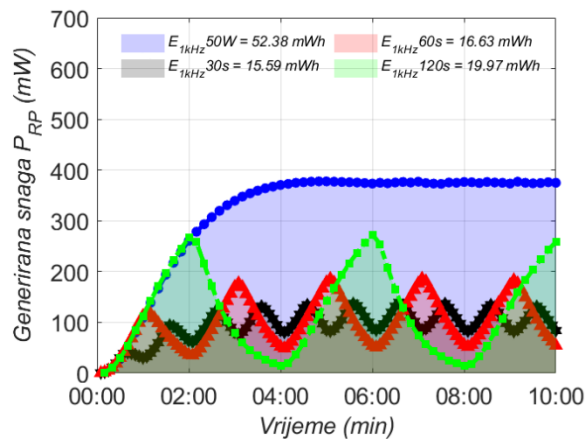
Temperature tople strane i ostvareni temperaturni gradijent za pojedinačno spojeni generator u taktnom načinu rada, pri frekvenciji ulaznog signala od 1 kHz, prikazani su na slici 3.40.



Slika 3.40 Pojedinačni spoj u taktnom načinu rada (1 kHz, 'hladilo #2'): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent

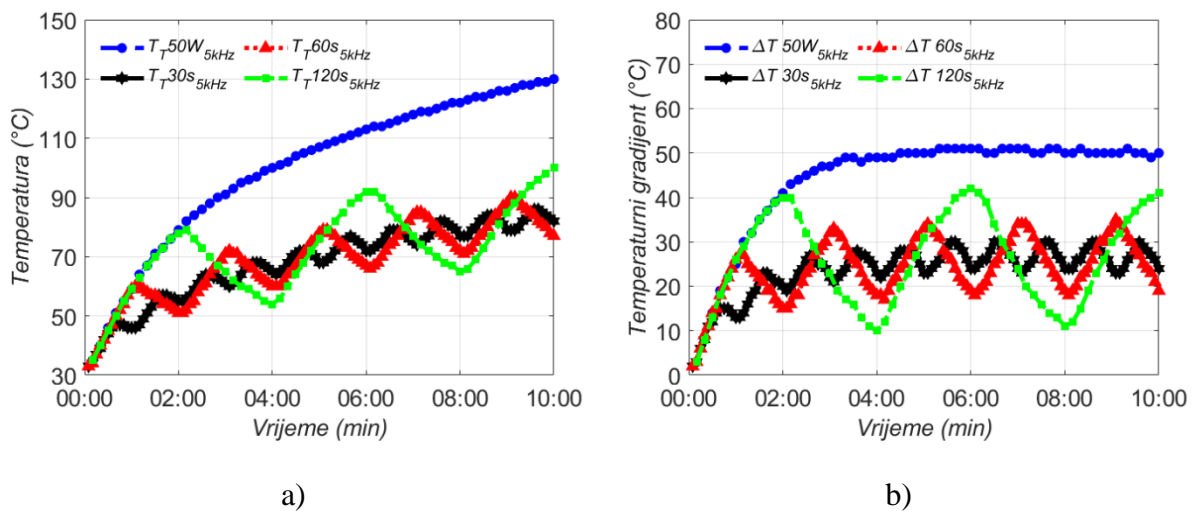
Generirana energija termoelektričnog generatora pri navedenoj frekvenciji signala prikazana je na slici 3.41. Na osnovu početnih mjerenja vidljivo je kako nema značajne razlike u ostvarenim iznosima temperature (tople strane ili gradijenta) ili generirane energije, iako odstupanje postoji.

Usporedba izmjerenih temperatura tople strane, temperaturnog gradijenta i generirane energije za različite frekvencije ulaznog signala, biti će prikazani tablično na kraju ovog potpoglavlja.



Slika 3.41 Generirana energija u taktom načinu rada pojedinačnog spoja (1 kHz, 'hladilo #2')

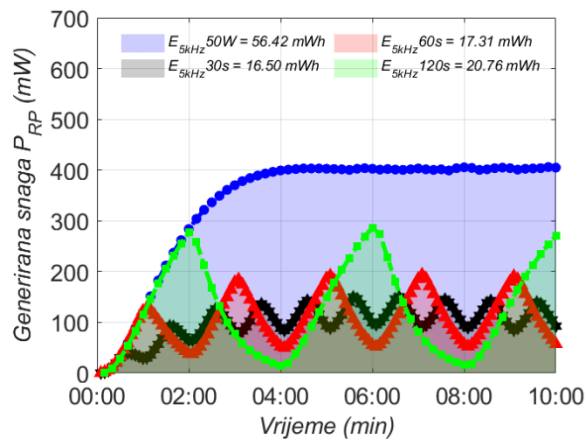
Temperature tople strane i ostvareni temperaturni gradijent za pojedinačno spojeni generator u taktom načinu rada, pri frekvenciji ulaznog signala od 5 kHz, prikazani su na slici 3.42.



Slika 3.42 Pojedinačni spoj u taktom načinu rada (5 kHz, 'hladilo #2'): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent

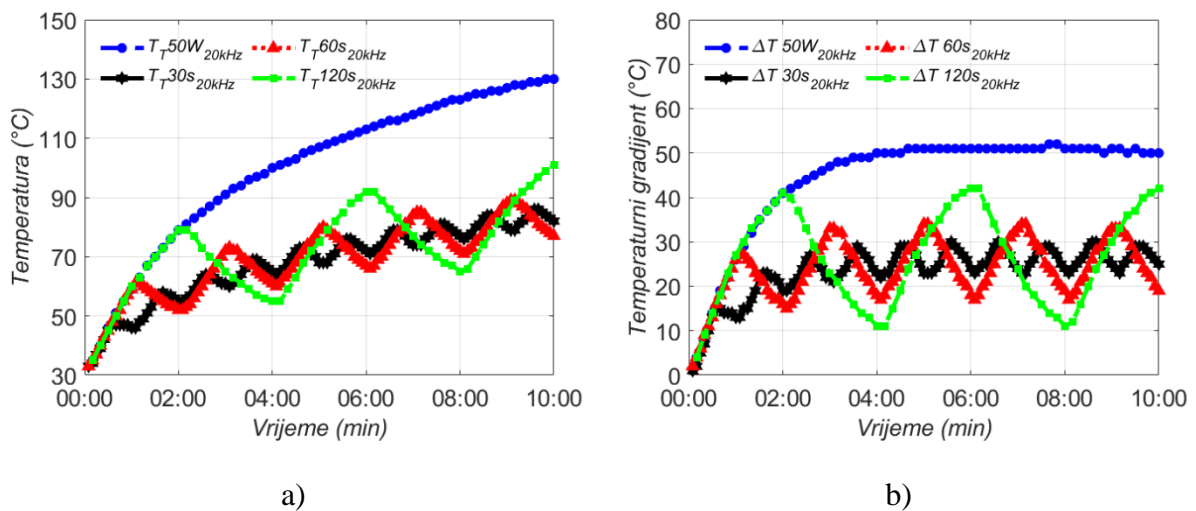
Generirana energija termoelektričnog generatora pri navedenoj frekvenciji signala prikazana je na slici 3.43. S povećanjem frekvencije ulaznog signala primjetni su nešto veći iznosi generirane energije generatora, iako su iznosi temperaturnog gradijenta podjednakog iznosa u dosadašnjim mjerenjima. Zbog navedenog, nije moguće sa sigurnošću tvrditi da veći iznos frekvencije signala

ima pozitivan utjecaj na iznos generirane energije generatora, već se navedeno odstupanje može prepisati mjernoj nesigurnosti i nesavršenosti mjernih instrumenata.



Slika 3.43 Generirana energija u taktom načinu rada pojedinačnog spoja (5 kHz, 'hladilo #2')

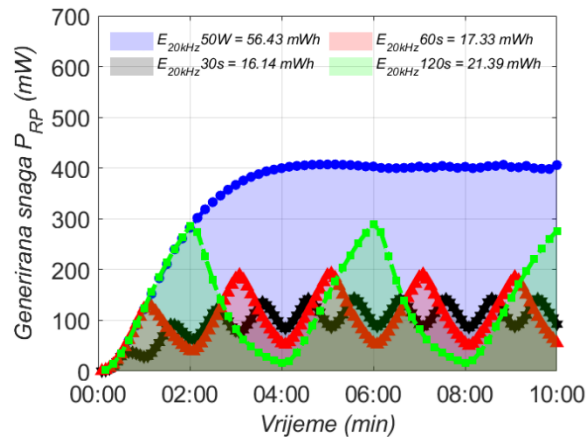
Temperature tople strane i ostvareni temperaturni gradijent za pojedinačno spojeni generator u taktom načinu rada, pri frekvenciji ulaznog signala od 20 kHz, prikazani su na slici 3.44.



Slika 3.44 Pojedinačni spoj u taktom načinu rada (20 kHz, 'hladilo #2'): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent

Generirana energija termoelektričnog generatora pri navedenoj frekvenciji signala prikazana je na slici 3.45. Usporedba izmjerenih rezultata temperature tople strane i temperaturnog gradijenta u diskretnim vremenskim trenucima (2., 4., 6. i 8. minuti), kao i ukupno generirana energija za 10-minutni vremenski interval pri različitim frekvencijama ulaznog signala pojačala, prikazana

je u tablici 3.8. Iznosi izmjereni pri frekvenciji od 10 kHz su nešto većeg iznosa iz razloga što su oni preuzeti iz početnih mjerenja s generatorom. Nakon niza izvedenih mjerenja očito je došlo do degradacije performansi poluvodiča unutar generatora.



Slika 3.45 Generirana energija u taktom načinu rada pojedinačnog spoja (20 kHz, 'hladilo #2')

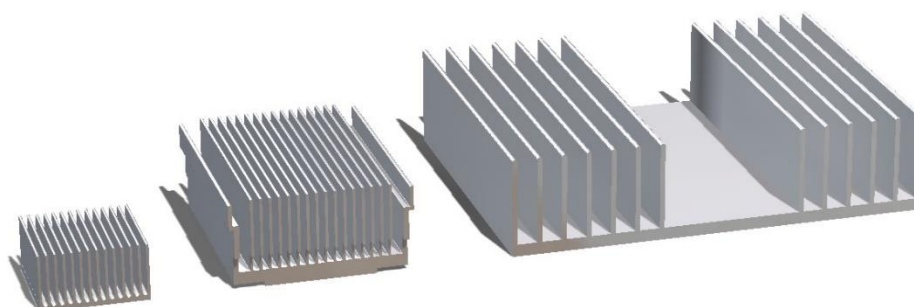
Tablica 3.8 Usporedba izmjerenih rezultata pri različitim frekvencijama ulaznog signala

f (Hz)	Vrijeme (min)	T_T (°C)				ΔT (°C)				E_{GEN} (mWh)
		2	4	6	8	2	4	6	8	
500	30s	53	63	70	75	18	22	23	23	15
	60s	51	60	65	71	15	18	18	19	15.48
	120s	75	52	88	63	38	9	40	11	18.59
	Nep ¹	76	95	108	117	39	46	49	48	49.19
1k	30s	54	63	70	75	19	22	23	23	15.59
	60s	51	60	66	72	15	18	19	19	16.63
	120s	76	53	90	64	39	10	41	11	19.97
	Nep ¹	76	96	109	118	39	48	49	49	52.38
10k	30s	55	65	71	77	23	27	27	27	17.27
	60s	51	61	67	72	18	21	21	22	18.29
	120s	78	53	92	64	43	12	45	13	22.29
	Nep ¹	78	101	115	126	44	54	55	56	60.41
5k	30s	55	65	72	77	20	23	24	24	16.5
	60s	51	60	67	72	15	18	19	19	17.31
	120s	78	54	92	65	40	10	42	11	20.76
	Nep ¹	79	100	113	122	41	49	51	50	56.42
20k	30s	55	65	72	77	19	23	24	24	16.14
	60s	52	61	67	72	16	18	18	19	17.33
	120s	79	55	92	65	41	11	42	11	21.39
	Nep ¹	79	100	113	123	41	50	51	51	56.43

¹ Neprekidno

3.2.3. Utjecaj hladila različitih toplinskih otpora

Ovo potpoglavlje istražuje utjecaj hladila različitih toplinskih otpora na iznose ostvarenih temperatura i generirane energije. Dosadašnja mjerenja su izvođena korištenjem hladila oznake 'hladilo #2', a sada su ponovljena mjerenja iz prethodnog poglavlja korištenjem hladila većeg i manjeg iznosa toplinskog otpora. Izgled do sada korištenog hladila, kao i onih upotrijebljenih u sljedećim mjerenjima, prikazani su na slici 3.46. Pri čemu hladilo većeg toplinskog otpora nosi oznaku 'hladilo #1', dok ono manjeg toplinskog otpora nosi oznaku 'hladilo #3'.



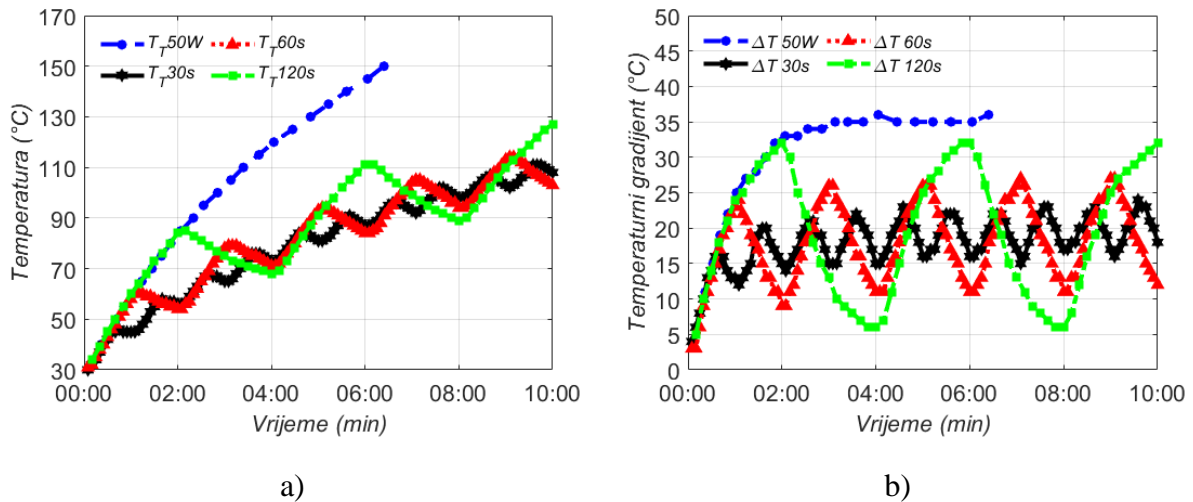
Slika 3.46 Hladila različitih toplinskih otpora: 'hladilo #1', 'hladilo #2' i 'hladilo #3'

Dimenzije poviše spomenutih hladila, njihova širina, dužina i debljina gornje plohe, kao i broj, visina i debljina rebara, sadržani su u tablici 3.9. Orijentacija rebara je u smjeru širine korištenog hladila, dok je materijal izrade hladila aluminij. Točan iznos toplinskog otpora pojedinog hladila nije izračunat, ali ih je moguće razvrstati od najvećeg prema najmanjem s obzirom na dimenzije i težinu. Na osnovu predstavljenih dimenzija u tablici, hladila je moguće modelirati u Simulinku.

Tablica 3.9 Dimenzije korištenih hladila

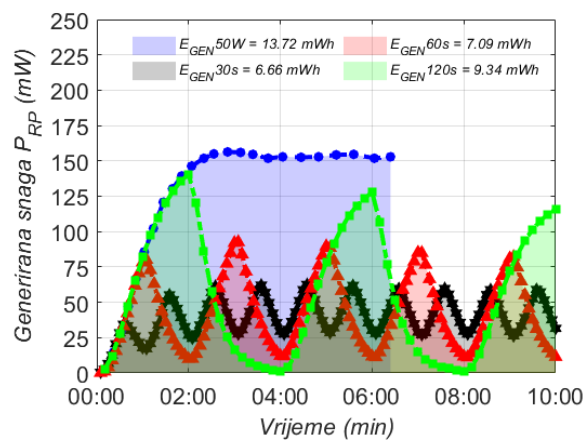
Modeli hladila	Gornja ploha			Rebra		
	Širina (mm)	Dužina (mm)	Debljina (mm)	Broj	Visina (mm)	Debljina (mm)
'hladilo #1'	42.15	42.15	3.9	14	15.7	1.2
'hladilo #2'	90.5	68	5	17	30	1
'hladilo #3'	180	132	5.7	13	36	3

Graf temperature tople strane i ostvarenog temperaturnog gradijenta za pojedinačni spoj, uz primjenu hladila oznake 'hladilo #1', prikazan je na slici 3.47. Kod neprekidnog rada pojačala, mjerenje je prekinuto prije isteka predviđenog 10-minutnog vremenskog intervala zbog visokih iznosa temperatura na izlaznim tranzistorima. U slučaju ostalih vremena prebacivanja, mjerenja su izvršena u predviđenom vremenskom intervalu.



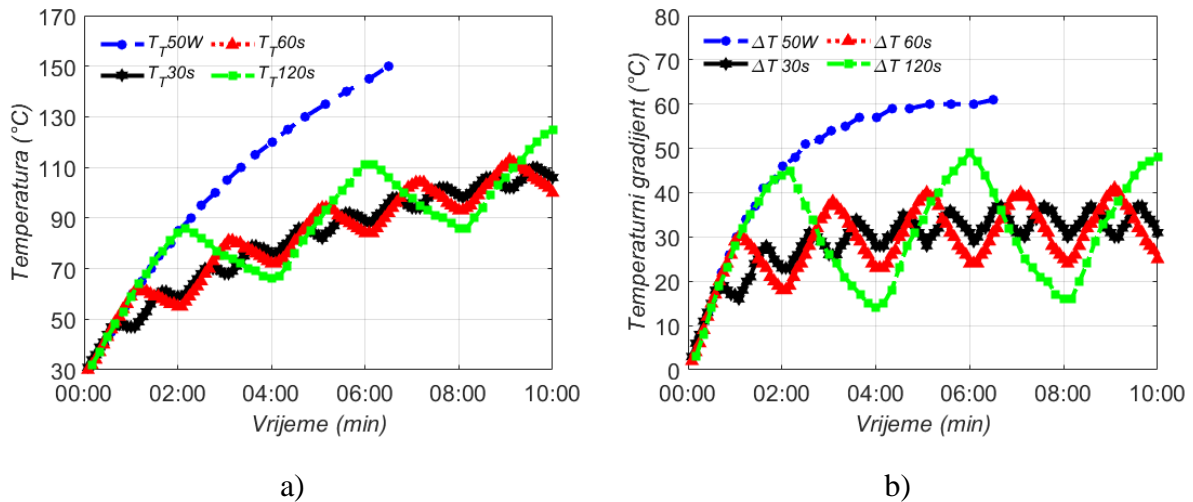
Slika 3.47 Pojedinačni spoj u taktom načinu rada ('hladilo #1'): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent

Graf generirane energije na potrošaču uslijed primjene hladila oznake 'hladilo #1', za pojedinačni spoj generatora, prikazan je na slici 3.48. Unatoč ranijem prekidu mjerenja kod neprekidnog rada pojačala, ostvareni iznos generirane energije u tom slučaju je svejedno većeg iznosa u usporedbi sa rezultatima ostvarenima uslijed prekidanja rada pojačala.



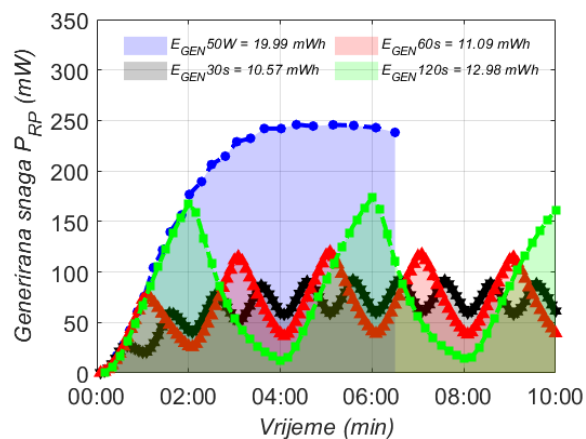
Slika 3.48 Generirana energija u taktom načinu rada pojedinačnog spoja ('hladilo #1')

Graf temperature tople strane i ostvarene temperaturne razlike u toplinsko serijskom spoju generatora, uslijed primjene hladila oznake 'hladilo #1', prikazan je na slici 3.49. Prekid mjerenja kod neprekidnog rada pojačala se, kao i u pojedinačnom spoju, događa prije isteka predviđenog vremenskog intervala mjerenja, dok su mjerenja za sva ostala vremena prebacivanja izvršena u predviđenom vremenskom intervalu.



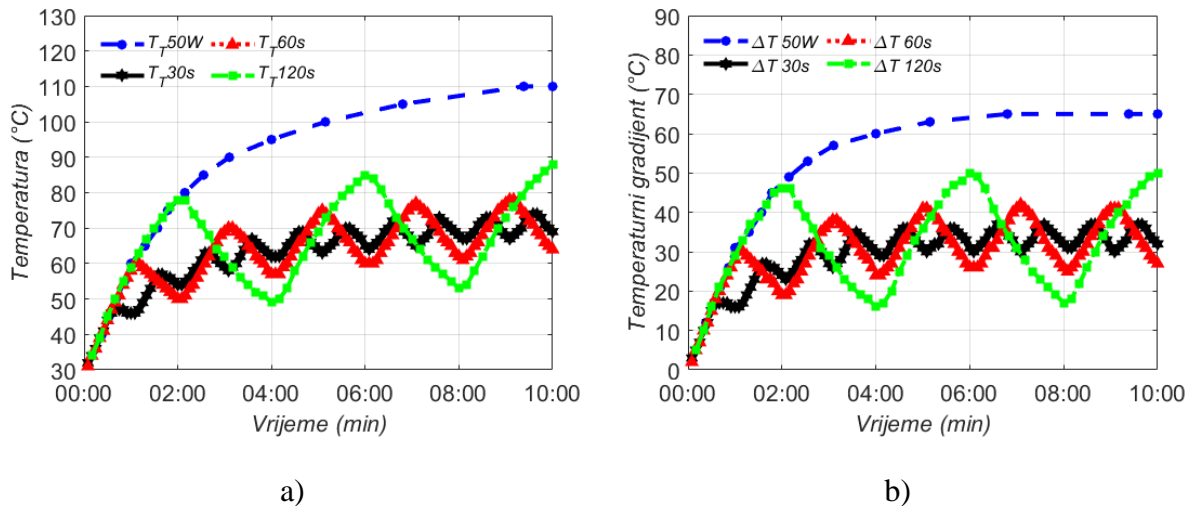
Slika 3.49 Toplinski serijski spoj u taktom načinu rada ('hladilo #1'): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent

Graf generirane energije na potrošaču u toplinsko serijskom spoju generatora, uslijed primjene hladila oznake 'hladilo #1', prikazan je na slici 3.50. Na osnovu grafa moguće je zaključiti kako je najveći iznos energije generiran uslijed neprekidnog rada pojačala, baš kao i kod pojedinačno spojenog generatora. Međutim, neprekidni način rada pojačala u protutaktnom radu nije poželjan iz razloga što se sustavi ne mogu adekvatno ohladiti dok dođe vrijeme za ponovnim korištenjem.



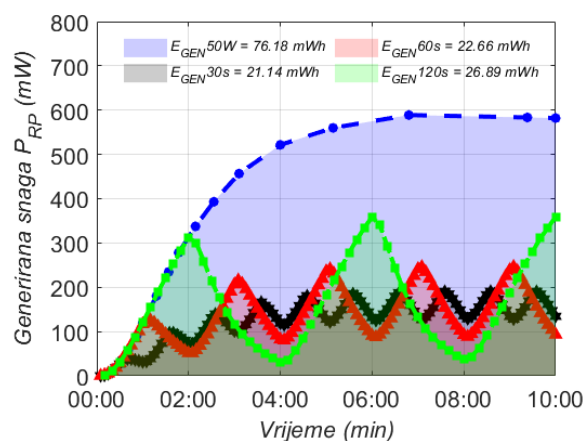
Slika 3.50 Energija u taktom načinu rada toplinsko serijskog spoja ('hladilo #1')

Graf temperature tople strane i ostvarene temperaturne razlike u pojedinačnom spoju, uz primjenu hladila oznake 'hladilo #3', prikazan je na slici 3.51. Uspoređujući dobivene rezultate sa onima prikazanim na slici 3.47, vidljivo je da su primjenom hladila manjeg iznosa toplinskog otpora ostvareni veći iznosi temperaturnog gradijenta i manji iznosi temperature tople strane, što je svakako pozitivan utjecaj primjene ovog tipa hladila.



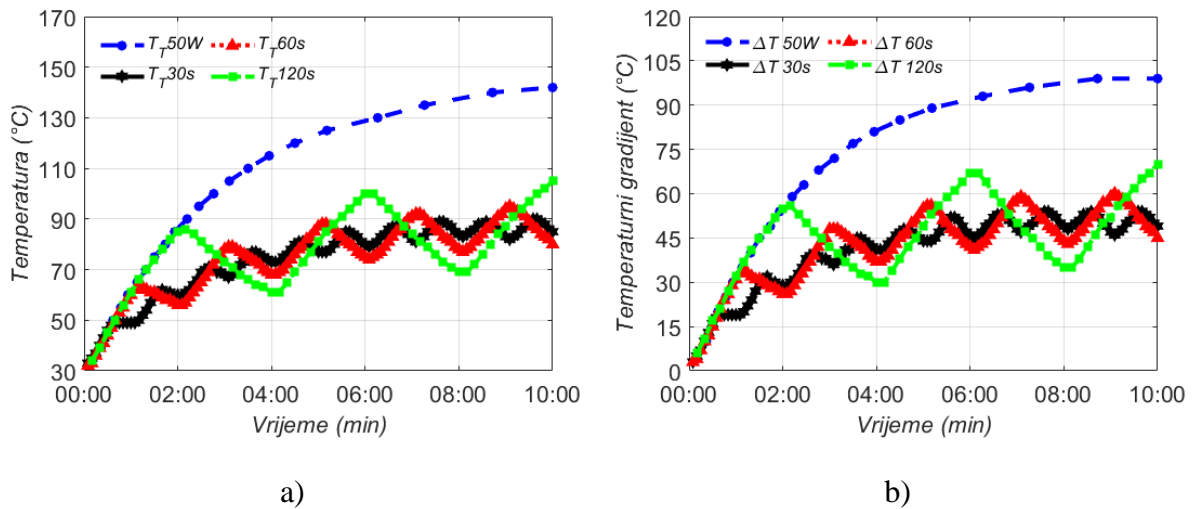
Slika 3.51 Pojedinačni spoj u taktom načinu rada ('hladilo #3'): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent

Graf generirane energije na potrošaču uslijed primjene hladila oznake 'hladilo #3', za pojedinačni spoj generatora, prikazan je na slici 3.52. S obzirom da su primjenom ovog hladila ostvareni veći iznosi temperaturnog gradijenta, tako je i generirana energija u ovom slučaju većeg iznosa.



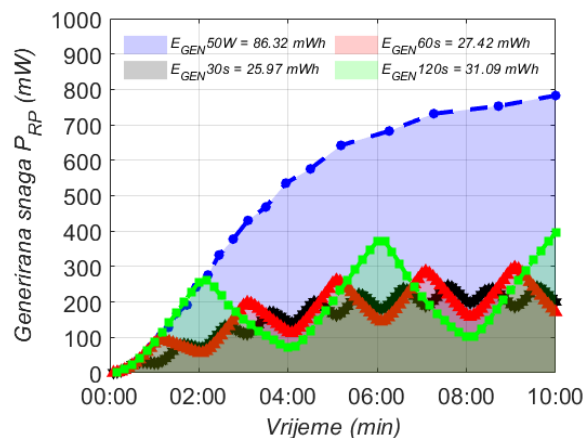
Slika 3.52 Generirana energija u taktom načinu rada pojedinačnog spoja ('hladilo #3')

Graf temperature tople strane i ostvarene temperaturne razlike u toplinsko serijskom spoju generatora, uslijed primjene hladila oznake 'hladilo #3', prikazan je na slici 3.53. Pritom je iznos ostvarenih temperatura tople strane i temperaturnog gradijenta veći nego u pojedinačnom spoju generatora.



Slika 3.53 Toplinsko serijski spoj u taktom načinu rada ('hladilo #3'): a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent

Graf generirane energije na potrošaču u toplinsko serijskom spoju generatora, uslijed primjene hladila oznake 'hladilo #3', prikazan je na slici 3.54. U usporedbi sa iznosima energije ostvarenih u pojedinačnom spoju (pri korištenju istog hladila), ukupan iznos generirane energije u toplinsko serijskom spoju generatora je većeg iznosa.



Slika 3.54 Energija u taktom načinu rada toplinsko serijskog spoja ('hladilo #3')

Izmjereni rezultati prikazani grafički u ovom potpoglavlju su brojčano sadržani u tablici 3.10. Navedena tablica sadrži maksimalne iznose temperatura tople strane i generiranu energiju na potrošaču u taktom i protutaktnom načinu rada. Grafovi generirane energije u protutaktnom načinu rada i primjenu hladila oznake 'hladilo #1' i 'hladilo #3' napravljeni su po uzoru na grafove prikazane na slikama 3.31-3.34 i nalaze se u prilogu ove disertacije, slike C1-C4 i D1-D4.

Tablica 3.10 Rezultati u taktom i protutaktnom načinu rada ('hladilo #1' i 'hladilo #3')

50W	Modeli hladila	'hladilo #1'			'hladilo #3'		
Spoj	Vrijeme prebacivanja (s)	T _{TOPLO} (°C)	E _{T_1S} (mWh)	E _{PT_2S} (mWh)	T _{TOPLO} (°C)	E _{T_1S} (mWh)	E _{PT_2S} (mWh)
PS	30	111	6.66	13.48	74	21.14	43.2
	60	114	7.09	14.26	78	22.66	46.87
	120	127	9.34	17.18	88	26.89	54.71
	Neprekidno	150	13.72	15.02	110	76.18	85.53
TS	30	110	10.57	21.53	90	25.97	53.31
	60	113	11.09	22.72	95	27.42	57.59
	120	125	12.98	25.73	105	31.09	66.45
	Neprekidno	150	19.99	23.59	142	86.32	106.74

Iznosi ostvareni za vremenski period od 10 minuta ili dok temperature tople strane ne dosegne iznos 150°C

Generalni zaključci koji se mogu izvesti nakon primjene hladila različitih toplinskih otpora je da se primjenom hladila manjeg toplinskog otpora ostvaruju veći iznosi temperaturnog gradijenta, a posljedično tome i generirane energije. Ostvareni rezultati su u skladu s zaključcima izvedenim u pregledu dosadašnje literatura. Mana korištenja hladila s malim iznosima toplinskog otpora je njihova veličina i cijena, koja ga najčešće svrstava među cjenovno dominantnije stavke sustava s pojačalom snage. Neovisno o korištenom hladilu, toplinsko serijski spoj generatora će uvijek generirati veće iznose energije u odnosu na pojedinačno spojeni generator, što je prednost takvog spoja, a nedostatak mu je generiranje većih iznosa temperature tople strane. Procjena povećanja stupnja efikasnosti sustava s pojačalom snage uslijed protutaktnog načina rada generatora biti će napravljena u 4. poglavlju disertacije. Osim navedenog, biti će predstavljena analiza isplativosti primjene termoelektričnih generatora na pojačalu snage u AB-klasi.

4. PROCJENA POVEĆANJA STUPNJA EFIKASNOSTI SUSTAVA

Nakon razmotrenog utjecaja različitih vremena prebacivanja i hladila različitih toplinskih otpora na iznos generirane energije, u ovom poglavlju je tablično prikazana procjena povećanja stupnja efikasnosti (u postotnim poenima) korištenog sustava i napravljena je analiza isplativosti primjene termoelektričnih generatora u ove svrhe. S obzirom da je cijena utrošena za generiranje energije mnogo važniji faktor od same efikasnosti pretvorbe, analiza isplativosti je napravljena s obzirom na broj godina rada u kojima se očekuje povrat početne investicije izrade cjelokupnog sustava. Kao cijena izrade sustava za termoelektričnu pretvorbu uzeta je samo cijena generatora, dok cijena hladila i popratnog sklopovlja za realizaciju protutaktnog načina rada generatora nije uzeta u razmatranje. Cijena hladila iz razloga što je ono prisutno kod pojačala i kad se ne koriste termoelektrični generatori, dok cijena popratnog sklopovlja nije uzeta u obzir jer je nepoznata, s obzirom da protutaktni način rada nije realiziran praktično, već samo teorijski.

Procjena povećanja efikasnosti sustava izraženog u postotnim poenima ($\Delta\eta_{AB}$), te postotak pretvorene disipirane energije ($\eta_{OTPADNA}$) su izračunate prema jednadžbama:

$$\eta_{OTPADNA} = \frac{E_{TRP}}{E_{DISIP}} \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

$$\Delta\eta_{AB} = \eta_{NOVO} - \eta_{STARO} = \left(\frac{E_{PRP}}{E_{UL} - E_{TRP}} \cdot 100\% \right) - \eta_{STARO}, \quad (4.2)$$

gdje je:

E_{TRP} – energija generirana na potrošaču termoelektričnog generatora,

E_{DISIP} – disipirana energija korištenog pojačala snage (tablica 2.1),

E_{PRP} – energija generirana na potrošaču (4 Ω) pojačala snage,

E_{UL} – ulazna energija iz laboratorijskog ispravljača koje napaja pojačalo,

η_{STARO} – efikasnost pojačala snage bez primjene termoelektričnih generatora (tablica 2.1).

Iznosi energije u izrazima (4.1) i (4.2) su razmatrani za 10-minutni vremenski interval ili dok temperatura tople strane ne dosegne 150°C, ovisno što prije nastupi.

Povećanje efikasnosti sustava u postotnim poenima, kao i postotak pretvorene disipirane energije su predstavljeni u tablici 4.1. Iznosi su razmatrani pri izlaznoj snazi pojačala od 50 W, za korištenje pojedinačnog i toplinsko serijskog spoja generatora. Analiza je napravljena uslijed primjene hladila različitih toplinskih otpora i za različita vremena prebacivanja između sustava.

Na osnovu iznosa u tablici 4.1 može se zaključiti da postotak pretvorene energije ($\eta_{OTPADNO}$), te procjena povećanja efikasnosti sustava s pojačalom snage ($\Delta\eta_{AB}$) raste s povećanjem vremena prebacivanja između sustava i smanjenjem toplinskog otpora korištenog hladila. Najveći iznosi su ostvareni za toplinsko serijski spoj generatora u neprekidnom radu pojačala, uslijed primjene hladila oznake 'hladilo #3'. Za navedeni slučaj vrijedi da je iznos pretvorene disipirane energije 1.0968%, a procijenjeno povećanje efikasnosti sustava s pojačalom snage, izraženo u postotnim poenima, iznosi 0.2752% (podebljano u tablici).

Tablica 4.1 Efikasnost pretvorbe energije i procjena povećanja efikasnosti sustava (u postotnim poenima)

50W	Modeli hladila	'hladilo #1'		'hladilo #2'		'hladilo #3'	
		$\Delta\eta_{AB}$ (%)	$\eta_{OTPADNA}$ (%)	$\Delta\eta_{AB}$ (%)	$\eta_{OTPADNA}$ (%)	$\Delta\eta_{AB}$ (%)	$\eta_{OTPADNA}$ (%)
PS	30	0.0426	0.1713	0.1116	0.4466	0.1372	0.5489
	60	0.045	0.1812	0.1189	0.4759	0.1489	0.5956
	120	0.0543	0.2183	0.1394	0.5574	0.174	0.6952
	240			0.1588	0.6346		
	Neprekidno	0.0679	0.2725	0.1922	0.7677	0.2427	0.9679
TS	30	0.0682	0.2736	0.1414	0.5656	0.1695	0.6774
	60	0.072	0.2887	0.1481	0.592	0.1832	0.7318
	120	0.0815	0.3269	0.173	0.6911	0.2115	0.8443
	330			0.2249	0.8973		
	Neprekidno	0.0976	0.3908	0.2222	0.8866	0.2752	1.0968

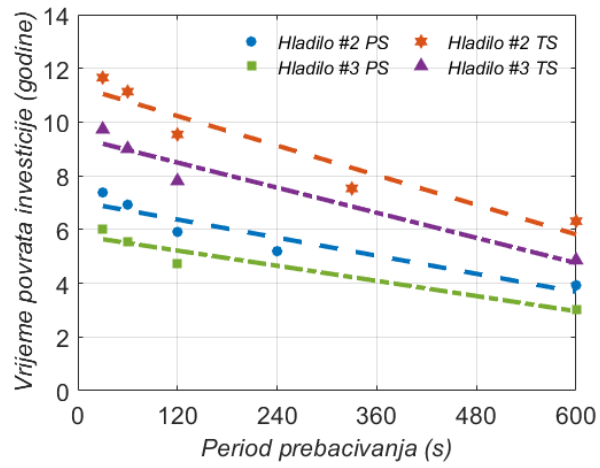
Iz pregleda dosadašnje literature uočljivo je da autori najčešće analizu isplativosti temelje na omjeru cijene početne investicije i nazivno generirane snage koju taj sustav isporučuje (\$/W) ili pak na procjeni vremena rada generatora u kojemu će on s proizvedenom energijom isplatiti početnu investiciju u sustav. S obzirom da je protutaktni način rada termoelektričnih generatora utemeljen na različitim vremenima prebacivanja između sustava, a u kojima je iznos generirane snage promjenjivog iznosa, jedina smisljena analiza isplativosti je s obzirom na procjenu sati rada u kojemu će se primjena generatora s obzirom na proizvedenu energiju isplatiti. Cijena modela termoelektričnog generatora korištenog u ovom istraživanju (SP1848-27145) iznosi 1.97 €, dok je za cijenu električne energije korišten posljednje dostupni službeni podatak o prosječnoj cijeni energije na području Europske Unije, 0.289 €/kWh. Navedeni podatak je pronađen na stranicama Eurostata za 1. polovicu 2023. godine i cijena uključuje sve prireze i pristojbe [121].

Na osnovu iznosa generirane energije u protutaktnom načinu rada dva sustava prikazanih u tablicama 3.6, 3.7 i 3.10, te na osnovu cijene termoelektričnog generatora i električne energije, izračunat je iznos radnih sati generatora u kojima će se početna investicija isplatiti (tablica 4.2). Važno je napomenuti kako u protutaktnom načinu rada, pri korištenju toplinsko serijskog spoja generatora, ukupno u pretvorbi sudjeluju četiri termoelektrična generatora, dok u pojedinačnom spoju sudjeluju dva generatora.

Tablica 4.2 Vrijeme povrata investicije u protutaktnom načinu rada

Spoj	Vrijeme prebacivanja (s)	'hladilo #1' (10 ⁴ h)	'hladilo #2' (10 ⁴ h)	'hladilo #3' (10 ⁴ h)
PS	30	16.856	6.4643	5.2597
	60	15.934	6.0673	4.8479
	120	13.226	5.1794	4.1532
	240		4.5494	
	Neprekidno	9.6818	3.4386	2.6566
TS	30	21.107	10.21	8.5245
	60	20.002	9.754	7.891
	120	17.662	8.355	6.8388
	330		6.5954	
	Neprekidno	12.522	5.5293	4.2575

Radni vijek termoelektričnih generatora ovisi o nizu čimbenika. Postoji utjecaj zbog komponenti koje ga sačinjavaju, ali na radni vijek generatora utječu i radni uvjeti u kojima se on primjenjuje. Zbog tog razloga u literaturi ne postoji opće prihvaćeni broj radnih sati ili pak model na osnovu kojeg je moguće odrediti točan iznos radnih sati termoelektričnog generatora. Međutim, najčešće spominjani raspon radnih sati u literaturi je između 100 000 i 200 000, unutar kojih većina autora tvrde da neće doći do značajnijeg pada performansi samog generatora. Na osnovu predstavljenih rezultata u tablici 4.2, vidljivo je da isplativost primjene ovisi i o toplinskom spoju generatora, kao i o iznosu vremena prebacivanja između sustava i korištenom hladilu. Pojedinačno spojeni generator u protutaktnom načinu rada dva sustava će se isplatiti za kraće vremensko razdoblje, u odnosu na toplinsko serijski spoj generatora u istom načinu rada. Povećanjem iznosa vremena prebacivanja i primjenom hladila manjeg iznosa toplinskog otpora, isplativost će ranije nastupiti. Grafički prikaz rezultata iz tablice 4.2 ostvarene linearnom regresijom predstavljen je na slici 4.1. Graf sadrži ovisnost vremena povrata investicije s obzirom na primijenjeno hladilo, toplinski spoj i na različita vremena prebacivanja između sustava. Najbolji rezultat u pogledu isplativosti je ostvaren u neprekidnom radu pojačala i pojedinačno spojenom generatoru, te uz primjenu hladila oznake 'hladilo #3'. Povrat investicije u navedenom slučaju iznosi 3.1 godine.



Slika 4.1 Vrijeme povrata investicije

5. ZAKLJUČAK

Istraživanje u doktorskoj disertaciji započinje uspostavom toplinsko-električnog modela u Simscape-u. Kao izvor topline koji će zagrijavati cijeli sustav korišten je iznos disipirane snage dobivene eksperimentalnim mjerenjem na stvarnom sklopu. Osim izvora topline s jedne strane i hladila sa druge, termoelektrični generator je modeliran na osnovu jednadžbi za ulaznu i izlaznu toplinsku energiju na krajevima samog generatora. Simulacijom modela su obuhvaćeni različiti toplinski spojevi, pojedinačno spojeni generator, toplinsko serijski spoj i toplinsko paralelni spoj generatora. Iznosi ostvarenih temperatura i napona, proizašlih iz simulacije oformljenog modela uz primjenu konstantnih i promjenjivih temperaturno ovisnih koeficijenata su zatim uspoređeni. Iako se primjenom različite vrste koeficijenata iznosi temperatura i napona razlikuju, odstupanja nisu značajna. Iznos koji najviše odstupa u simulaciji je vrijednost unutarnjeg električnog otpora termoelektričnog generatora, koji uz primjenu konstantnih koeficijenata iznosi 3.28Ω , a uslijed korištenja promjenjivih koeficijenata njegova vrijednost se nalazi u rasponu od 2.34 do 3.43Ω . Navedeni iznosi uzrokuju i značajno odstupanje pri izračunu razvijene snage na prilagođenom potrošaču. Zbog navedenog, ali i niza drugih ograničenja modela, poput ne poznavanja točnog iznosa snage disipirane na izlaznim tranzistorima, neodređenih iznosa toplinskih otpora u krugu, ne poznavanja točnih dimenzija poluvodiča termoparova i slično, u nastavku rada se pristupilo mjerenjima na eksperimentalno uspostavljenoj postavci.

Početna mjerenja su izvršena s ciljem usporedbe ostvarenih rezultata za različite modele termoelektričnih generatora, koji se osim geometrije termoparova, razlikuju i prema cjenovnom rangu kojem pripadaju. Osim pojedinačno spojenog generatora, razmatrani su i toplinsko serijski i toplinsko paralelni spoj generatora. Na osnovu izračunate generirane snage generatora, moguće je zaključiti da nema značajne razlike između cjenovno višestruko skupljih i jeftinijih generatora, pa su se mjerenja nastavila korištenjem jeftinijeg modela generatora SP1848-27145. Toplinsko serijski spoj generatora je u odnosu na ostale spojeve generirao najveće iznose snage, dok mu je nedostatak najbrže dosezanje visokih iznosa temperatura tople strane. Kada temperatura izlaznih tranzistora dosegne iznos od 150°C , pojačalo je potrebno ugasiti, kako ne bi došlo do oštećenja izlaznih tranzistora, ali i termoelektričnih generatora. Nastavak istraživanja se temeljio na analizi taktnog načina rada generatora, te je na osnovu ostvarenih rezultata teorijski obrađen protutaktni način rada dva sustava za pretvorbu toplinske energije u električnu. Protutaktnim načinom rada bi se omogućila regulacija temperature izlaznih tranzistora, a istovremeno bi rezultirao s većim iznosom efikasnosti termoelektrične pretvorbe.

Na osnovu izmjerenih rezultata u taktom načinu rada, napravljeni su grafovi koji ukazuju na procjenu generirane energije u protutaktnom načinu rada dva sustava. Razmotren je utjecaj različitih vremena prebacivanja između sustava, te primjena hladila različitih iznosa toplinskih otpora, na iznose ostvarenih temperatura i generirane energije. Primjenom učestalijeg vremena prebacivanja između sustava, generirani su manji iznosi energije i niže temperature tople strane, kao i manji iznosi temperaturnog gradijenta. Razvijena energija na potrošaču je većeg iznosa, a temperatura tople strane manjeg iznosa, uz primjenu hladila manjeg toplinskog otpora.

Posljednje istraživanje u radu je napravljeno u cilju procjene povećanja stupnja efikasnosti sustava uslijed primjene protutaktnog načina rada, kada bi se pretvorena energija vratila u krug napajanja pojačala. Mjerenja su pokazala kako bi se u najboljem slučaju, pri neprekidnom radu pojačala (u 10-minutnom vremenskom intervalu) u toplinsko serijskom spoju generatora, te uz korištenje hladila najmanjeg iznosa toplinskog otpora ('hladilo #3'), efikasnost sustava povećala za 0.2752% (postotna poena). Iznos pretvorene energije u istom tom slučaju bi iznosila 1.0968%. Osim navedenog, napravljena je i analiza isplativosti primjene generatora u ove svrhe. Isplativost primjene je promatrana s obzirom na predviđeno vrijeme povrata početne investicije uložene u sustav, na osnovu generirane energije termoelektričnih generatora. Najbolji rezultati su ostvareni uz primjenu neprekidnog načina rada pojačala, pojedinačnog spoja generatora, te uz korištenje hladila najmanjeg iznosa toplinskog otpora. Isplativost primjene u tom slučaju bi bila osigurana nakon 26 566 radnih sati, što čini primjenu isplativom, uzimajući u obzir radni vijek generatora između 100 000 i 200 000 radnih sati.

Iako se na osnovu procijenjenog radnog vijeka termoelektričnih generatora može zaključiti da je njihova upotreba kod audio pojačala snage u AB-klasi isplativa, zbog niza drugih okolnosti postavlja se pitanje da li je primjena opravdana. Prvenstveno se to odnosi na složeniju izvedbu izlaznog stupnja pojačala, koji bi zahtijevao dodatne komponente (komplementarni par izlaznih tranzistora, sonde temperature i sl.) i logiku upravljanja prebacivanja između sustava. Navedena prebacivanja bi zasigurno prouzrokovala nelinearna izobličenja u audio signalu. Međutim, zbog trenutno malog iznosa efikasnosti termoelektrične pretvorbe, ponajviše uzrokovane tehnološkim ograničenjima, te posljedično dužem vremenskom periodu potrebnom za isplatu ove investicije, aktualizacija nelinearnih izobličenja signala prilikom prebacivanja u protutaktnom načinu rada trenutno nema puno smisla. Jednom kada dođe do značajnijeg napretka u razvoju poluvodiča, a što će za posljedicu imati veću efikasnost termoelektrične pretvorbe, analiza izobličenja signala uslijed prebacivanja između sustava će postati relevantna.

LITERATURA

- [1] Rowe, D. M.: "CRC Handbook of Thermoelectrics", knjiga, CRC Press, 1995.
- [2] Su, Z.: "Improved Thermoelectric Performance of P-type Polycrystalline Bi₂Te₃ via Hydrothermal Treatment with Alkali Metal Salts", doktorska disertacija, Clemson University, 2009.
- [3] Karri, M. A.: "Modeling of an Automotive Exhaust Thermoelectric Generator", doktorska disertacija, Clarkson University, 2005.
- [4] Mortazavinatanzi, S.: "On the Manufacturing Processes of Flexible Thermoelectric Generators", doktorska disertacija, Aalborg Universitetsforlag, 2021.
- [5] Lee, H.: "Thermoelectric Generators", poglavlje u knjizi: *Thermoelectrics: Design and Materials*, Wiley, Western Michigan University, p. 8-22, 2016.
- [6] Noudem, J. G. i dr.: "Thermoelectric ceramics for generators", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 28, No. 1, pp. 41-48, 2008.
- [7] 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.
- [8] Hamil, A.: "Modeling, Optimizing and Testing Thermoelectric Generators for Liquid-to-Liquid Low Grade Waste Heat Recovery", diplomski rad, Western Michigan University, 2016.
- [9] Attar, A.: "Studying the Optimum Design of Automotive Thermoelectric Air Conditioning", doktorska disertacija, Western Michigan University, 2015.
- [10] Xiao, H.; Gou, X.; Yang, S.: "Detailed Modeling and Irreversible Transfer Process Analysis of a Multi-Element Thermoelectric Generator System", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 40, No. 5, pp. 1195-1201, 2011.
- [11] Snyder, G. J.; Snyder, A. H.: "Figure of merit ZT of a thermoelectric device defined from materials properties", *Energy & Environmental Science*, Vol. 10, No. 11, pp. 2280-2283, 2017.
- [12] Cao, J. i dr.: "Thermoelectric device performance beyond average ZT: Holistic consideration of materials and design", *Materials Today Physics*, Vol. 34, pp. 101071, 2023.
- [13] Cao, Z.: "Printable thermoelectric devices for energy harvesting", doktorska disertacija, University of Southampton, 2014.
- [14] Saleemi, M.: "Nano-Engineered Thermoelectric Materials for Waste Heat Recovery", doktorska disertacija, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2014.
- [15] Sesselmann, A.: "Investigation on the Thermoelectric and Structural Properties of Cobalt-Antimony based Skutterudites and Modifications with Indium and Rare-Earth Elements", doktorska disertacija, University of Augsburg, 2012.
- [16] Yan, J. i dr.: "Review of Micro Thermoelectric Generator", *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 27, No. 1, pp. 1-18, 2018.

- [17] Shakouri, A.: "Recent Developments in Semiconductor Thermoelectric Physics and Materials", Annual Review of Materials Research, Vol. 41, pp. 399-431, 2011.
- [18] Madan, D.: "High Performance Dispenser Printed Thermoelectric Generators", doktorska disertacija, University of California, Berkeley, USA, 2013.
- [19] Dongxu, J.: "Modeling and optimization of thermoelectric generator for waste heat recovery", doktorska disertacija, Nanyang Technological University, Singapore, 2018.
- [20] Levinský, P.: "Synthesis, Characterization and Optimization of New Thermoelectric Materials", doktorska disertacija, Czech Technical University in Prague, 2018.
- [21] Champier, D.: "Thermoelectric generators: A review of applications", Energy Conversion and Management, Vol. 140, pp. 167-181, 2017.
- [22] Jaziri, N. i dr.: "A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications", Energy Reports, Vol. 6, pp. 264-287, 2020.
- [23] Jouhara, H. i dr.: "Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications", International Journal of Thermofluids, Vol. 9, pp. 100063, 2021.
- [24] Meng, F.; Chen, L.; Sun, F.: "A numerical model and comparative investigation of a thermoelectric generator with multi-irreversibilities", Energy, Vol. 36, No. 5, pp. 3513-3522, 2011.
- [25] Chen, L.; Meng, F.; Sun, F.: "Maximum power and efficiency of an irreversible thermoelectric generator with a generalized heat transfer law", Scientia Iranica, Vol. 19, No. 5, pp. 1337-1345, 2012.
- [26] Ju, C. i dr.: "Revisiting the temperature dependence in material properties and performance of thermoelectric materials", Energy, Vol. 124, pp. 249-257, 2017.
- [27] Wu, C.: "Analysis of waste-heat thermoelectric power generators", Applied Thermal Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 63-69, 1996.
- [28] Verma, V.; Kane, A.; Singh, B.: "Complementary performance enhancement of PV energy system through thermoelectric generation", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 58, pp. 1017-1026, 2016.
- [29] Kane, A.; Verma, V.; Singh, B.: "Temperature dependent analysis of thermoelectric module using Matlab/SIMULINK", 2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), pp. 632-637, 2012.
- [30] Laird Thermal Systems: s interneta, <https://lairdthermal.com/>, pristupljeno: 1. ožujka 2024.
- [31] Feng, Y. i dr.: "Thermodynamic Analysis of TEG-TEC Device Including Influence of Thomson Effect", Journal of Non Equilibrium Thermodynamics, Vol. 43, pp. 75-86, 2018.
- [32] Ahiska, R.; Ahiska, G.; Ahiska, K.: "Analysis of a New Method for Measurement of Parameters of Real Thermoelectric Module Employed in Medical Cooler for Renal Hypothermia", Instrumentation Science & Technology - INSTRUM SCI TECHNOL, Vol. 37, pp. 102-123, 2009.

- [33] Ahiska, R.; Ahiska, K.: "New method for investigation of parameters of real thermoelectric modules", *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, No. 2, pp. 338-345, 2010.
- [34] Fraisse, G. i dr.: "Study of a thermoelement's behaviour through a modelling based on electrical analogy", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No. 17, pp. 3503-3512, 2010.
- [35] Xuan, X. C. i dr.: "The maximum temperature difference and polar characteristic of two-stage thermoelectric coolers", *Cryogenics*, Vol. 42, No. 5, pp. 273-278, 2002.
- [36] Ferrotec Thermal Solutions: "Mathematical Modeling of Thermoelectric Cooling Modules", s interneta, <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref11/>, pristupljeno: 1. ožujka 2024.
- [37] European Thermodynamics Ltd.: "GM200-127-14-10 Thermoelectric generator module", s interneta, [https://www.europanthermodynamics.com/products/datasheets/7-GM200-127-14-10%20\(2\).pdf](https://www.europanthermodynamics.com/products/datasheets/7-GM200-127-14-10%20(2).pdf), pristupljeno: 1. ožujka 2024.
- [38] Hu, X. i dr.: "Three-Dimensional Finite-Element Simulation for a Thermoelectric Generator Module", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 44, pp. 3637-3645, 2015.
- [39] Zhang, T.: "Effects of Temperature-Dependent Material Properties on Temperature Variation in a Thermoelement", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 44, pp. 3612–3620, 2015.
- [40] Zhang, T.: "New thinking on modeling of thermoelectric devices", *Applied Energy*, Vol. 168, pp. 65-74, 2016.
- [41] He, H. i dr.: "An approximate and efficient characterization method for temperature-dependent parameters of thermoelectric modules", *Energy Conversion and Management*, Vol. 180, pp. 584-597, 2019.
- [42] Pérez-Aparicio, J. L.; Taylor, R. L.; Gavela, D.: "Finite Element Analysis of Nonlinear Fully Coupled Thermoelectric Materials", *Computational Mechanics*, Vol. 40, No. 1, pp. 35-45, 2007.
- [43] Shen, Z.-G. i dr.: "Theoretical modeling of thermoelectric generator with particular emphasis on the effect of side surface heat transfer", *Energy*, Vol. 95, pp. 367-379, 2016.
- [44] Kanagaraj, N.: "An Enhanced Maximum Power Point Tracking Method for Thermoelectric Generator Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 16, No. 3, pp. 1207-1218, 2021.
- [45] Marchenko, O. V.: "Performance modeling of thermoelectric devices by perturbation method", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 129, pp. 334-342, 2018.
- [46] Fraisse, G. i dr.: "Comparison of different modeling approaches for thermoelectric elements", *Energy Conversion and Management*, Vol. 65, pp. 351-356, 2013.
- [47] Martinez, A. i dr.: "Simulation of thermoelectric heat pumps in nearly zero energy buildings: Why do all models seem to be right?", *Energy Conversion and Management*, Vol. 235, pp. 113992, 2021.

- [48] Üstüner, M.; Mamur, H.; Taskin, S.: "Modeling and validation of the thermoelectric generator with considering the change of the Seebeck effect and internal resistance", *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, Vol. 30, pp. 2688-2706, 2022.
- [49] Yilmaz, U.; Çavuş, T. F.; İslamoğlu, Y.: "Bidirectional Modeling of Thermoelectric Module Using MATLAB/Simulink for Circuit Simulations", *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 82680-82696, 2022.
- [50] Siouane, S.; Jovanović, S.; Poure, P.: "Fully Electrical Modeling of Thermoelectric Generators with Contact Thermal Resistance Under Different Operating Conditions", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 46, No. 1, pp. 40-50, 2017.
- [51] Karami, N.; Moubayed, N.: "New modeling approach and validation of a thermoelectric generator", *2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 586-591, 2014.
- [52] Tsai, H.-L.; Lin, J.-M.: "Model Building and Simulation of Thermoelectric Module Using Matlab/Simulink", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 39, No. 9, pp. 2105-2111, 2010.
- [53] Ferrario, A. i dr.: "Temperature dependent iterative model of thermoelectric generator including thermal losses in passive elements", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 150, pp. 620-627, 2019.
- [54] Ferrario, A.: "TeGDS_v2_7", s interneta, https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/70415-tegds_v2_7, pristupljeno: 1. ožujka 2024.
- [55] Ivanov, K.; Belovski, I.; Aleksandrov, A.: "Simulation of Initial Characteristics of Thermoelectric Modules in Generation Mode Realized in MATLAB Environment", *2022 8th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE)*, pp. 1-6, 2022.
- [56] Varga, Z.; Racz, E.: "COMSOL 3D Simulation of Optimization of Waste Heat Recovery Using Thermoelectric Generator by Modifying the Design", *2022 IEEE 5th International Conference and Workshop Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE)*, pp. 101-106, 2022.
- [57] Dhoopagunta, S.: "Analytical Modeling and Numerical Simulation of a Thermoelectric Generator Including Contact Resistances", diplomski rad, Western Michigan University, 2016.
- [58] Omar, S. F. N. S. i dr.: "Electrical Performance of Single Thermocouple with Different Types of Materials Using Multiphysics Simulations", *2022 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE)*, pp. 33-36, 2022.
- [59] Bhuiyan, M. S. R.; El-Shahat, A.; Soloiu, V.: "Thermoelectric Generator Analysis Through ANSYS and Matlab/Simulink", *2019 SoutheastCon*, pp. 1-5, 2019.
- [60] Ngendahayo, A.: "Design, modeling, and fabrication of thermoelectric generator for waste heat recovery in local process industry", doktorska disertacija, University of Agder, 2017.
- [61] 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.

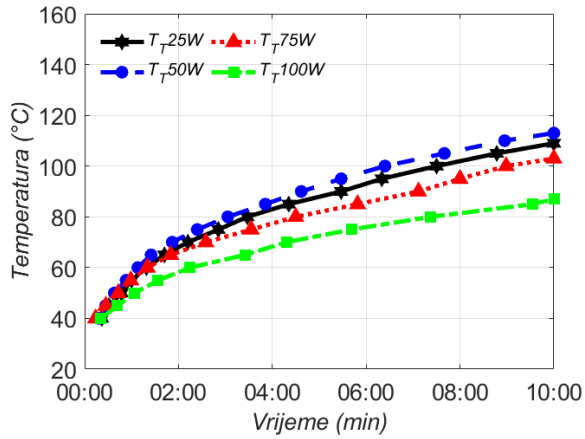
- [62] Moumouni, Y.; Baker, R. J.: "Concise thermal to electrical parameters extraction of thermoelectric generator for spice modeling", *2015 IEEE 58th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, pp. 1-4, 2015.
- [63] Chen, M. i dr.: "Transient Behavior Study of Thermoelectric Generators through an Electro-thermal Model Using SPICE", *2006 25th International Conference on Thermoelectrics*, pp. 214-219, 2006.
- [64] 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.
- [65] Bond, M.; Park, J. D.: "Current-Sensorless Power Estimation and MPPT Implementation for Thermoelectric Generators", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 9, pp. 5539-5548, 2015.
- [66] Manikandan, S.; Kaushik, S. C.: "Thermodynamic studies and maximum power point tracking in thermoelectric generator–thermoelectric cooler combined system", *Cryogenics*, Vol. 67, pp. 52-62, 2015.
- [67] 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.
- [68] Hohm, D. P.; Ropp, M. E.: "Comparative study of maximum power point tracking algorithms using an experimental, programmable, maximum power point tracking test bed", *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 2000 (Cat. No.00CH37036)*, pp. 1699-1702, 2000.
- [69] Paraskevas, A.; Koutroulis, E.: "A simple maximum power point tracker for thermoelectric generators", *Energy Conversion and Management*, Vol. 108, pp. 355-365, 2016.
- [70] Villegas-Mier, C. G. i dr.: "Artificial Neural Networks in MPPT Algorithms for Optimization of Photovoltaic Power Systems: A Review", *Micromachines*, Vol. 12, No. 10, 2021.
- [71] Elobaid, L.; Abdelsalam, A.; Zakzouk, E.: "Artificial neural network-based photovoltaic maximum power point tracking techniques: A survey", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 9, 2015.
- [72] Saraireh, M. i dr.: "A Novel Method for Thermoelectric Generator Based on Neural Network", *Computers, Materials and Continua*, Vol. 73, pp. 2116-2133, 2022.
- [73] Li, F. i dr.: "Adaptive rapid neural optimization: A data-driven approach to MPPT for centralized TEG systems", *Electric Power Systems Research*, Vol. 199, pp. 107426, 2021.
- [74] Zafar, M. H. i dr.: "Towards green energy for sustainable development: Machine learning based MPPT approach for thermoelectric generator", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 351, pp. 131591, 2022.
- [75] Thankakan, R.; Samuel Nadar, E. R.: "Application of fuzzy logic-based MPPT technique for harvesting the heat energy dissipated by the wind generator stator windings to power single-phase AC grid systems", *Neural Computing and Applications*, Vol. 32, No. 18, pp. 15155-15170, 2020.

- [76] Camboim, M. M.; Villanueva, J. M.; de Souza, C. P.: "Fuzzy Controller Applied to a Remote Energy Harvesting Emulation Platform", u *Sensors*. 2020.
- [77] Wu, S.-j. i dr.: "Energy management for thermoelectric generators based on maximum power point and load power tracking", *Energy Conversion and Management*, Vol. 177, pp. 55-63, 2018.
- [78] Kanagaraj, N.; Rezk, H.; Gomaa, M. R.: "A Variable Fractional Order Fuzzy Logic Control Based MPPT Technique for Improving Energy Conversion Efficiency of Thermoelectric Power Generator", *Energies*, Vol. 13, No. 17, 2020.
- [79] A. Qasim, M. i dr.: "A New Maximum Power Point Tracking Technique for Thermoelectric Generator Modules", *Inventions*, Vol. 6, No. 4, 2021.
- [80] 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.
- [81] 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.
- [82] 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.
- [83] 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.
- [84] Hsu, C.-T. i dr.: "Renewable energy of waste heat recovery system for automobiles", *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 2, 2010.
- [85] Zhou, Z. G. i dr.: "Heat Sink Matching for Thermoelectric Generator", *Advanced Materials Research*, Vol. 383-390, pp. 6122-6127, 2012.
- [86] Leonov, V.; Fiorini, P.: "Thermal Matching of a Thermoelectric Energy Scavenger with the Ambience", *Proceedings - 5th European Conference on Thermoelectrics*, pp. 129, 2007.
- [87] Suarez, F. i dr.: "Designing thermoelectric generators for self-powered wearable electronics", *Energy & Environmental Science*, Vol. 9, No. 6, pp. 2099-2113, 2016.
- [88] Lee, Y. i dr.: "Design and Experimental Investigation of Thermoelectric Generators for Wearable Applications", *Advanced Materials Technologies*, Vol. 2, pp. 1600292, 2017.
- [89] Leonov, V.: "Thermoelectric Energy Harvesting of Human Body Heat for Wearable Sensors", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 13, No. 6, pp. 2284-2291, 2013.
- [90] 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.
- [91] Astrain, D. i dr.: "Study of the influence of heat exchangers' thermal resistances on a thermoelectric generation system", *Energy*, Vol. 35, No. 2, pp. 602-610, 2010.
- [92] Astrain, D.; Martinez, A.: "Heat Exchangers for Thermoelectric Devices", poglavlje u knjizi: *Heat Exchangers - Basics Design Applications*, Public University of Navarre, Spain, 2012.

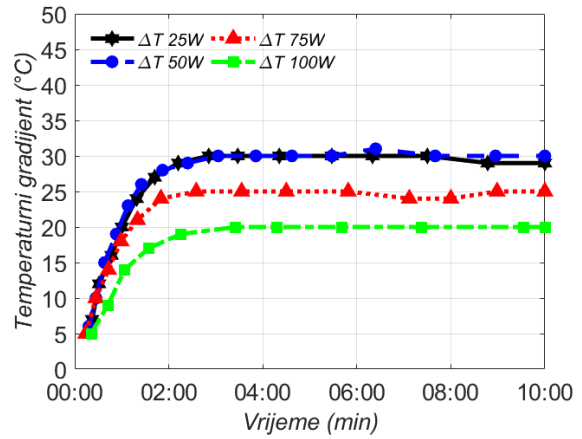
- [93] Martínez, A. i dr.: "Optimization of the Heat Exchangers of a Thermoelectric Generation System", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 39, No. 9, pp. 1463-1468, 2010.
- [94] Brownell, E.; Hodes, M.: "Optimal Design of Thermoelectric Generators Embedded in a Thermal Resistance Network", *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, Vol. 4, No. 4, pp. 612-621, 2014.
- [95] Zhang, L.; Leung, C.: "Thermal power reuse in power amplifier design", *IEEE MIT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2014.
- [96] Niotaki, K.; Georgiadis, A.; Collado, A.: "Thermal energy harvesting for power amplifiers", *2013 IEEE Radio and Wireless Symposium*, pp. 196-198, 2013.
- [97] Kim, K. J. i dr.: "Energy scavenging for energy efficiency in networks and applications", *Bell Labs Technical Journal*, Vol. 15, No. 2, pp. 7-29, 2010.
- [98] 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.
- [99] Geffroy, C. i dr.: "Techno-economic analysis of waste-heat conversion", *Joule*, Vol. 5, No. 12, pp. 3080-3096, 2021.
- [100] Yazawa, K.; Shakouri, A.: "Cost-Efficiency Trade-off and the Design of Thermoelectric Power Generators", *Environmental science & technology*, Vol. 45, pp. 7548-53, 2011.
- [101] Kristiansen, N. R. i dr.: "Waste Heat Recovery from a Marine Waste Incinerator Using a Thermoelectric Generator", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 41, No. 6, pp. 1024-1029, 2012.
- [102] Li, K. i dr.: "Cost Estimation of Thermoelectric Generators", *46th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering* 2021.
- [103] Omer, G. i dr.: "Smart thermoelectric waste heat generator: Design, simulation and cost analysis", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 37, pp. 100623, 2020.
- [104] Bellos, E.; Tzivanidis, C.: "Energy and financial analysis of a solar driven thermoelectric generator", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 264, pp. 121534, 2020.
- [105] Yazawa, K.; Shakouri, A.: "Cost-Performance Analysis and Optimization of Fuel-Burning Thermoelectric Power Generators", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 42, No. 7, pp. 1946-1950, 2013.
- [106] Hendricks, T. J.; Yee, S.; LeBlanc, S.: "Cost Scaling of a Real-World Exhaust Waste Heat Recovery Thermoelectric Generator: A Deeper Dive", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 45, No. 3, pp. 1751-1761, 2016.
- [107] Shakeel, M. i dr.: "A low-cost printed organic thermoelectric generator for low-temperature energy harvesting", *Renewable Energy*, Vol. 167, pp. 853-860, 2021.
- [108] Kishita, Y. i dr.: "Evaluating the life cycle CO₂ emissions and costs of thermoelectric generators for passenger automobiles: a scenario analysis", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 126, pp. 607-619, 2016.
- [109] Yee, S. K. i dr.: "\$ per W metrics for thermoelectric power generation: beyond ZT", *Energy & Environmental Science*, Vol. 6, No. 9, pp. 2561-2571, 2013.

- [110] LeBlanc, S. i dr.: "Material and manufacturing cost considerations for thermoelectrics", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 32, pp. 313-327, 2014.
- [111] Merienne, R. i dr.: "Thermal cycling of thermoelectric generators: The effect of heating rate", *Applied Energy*, Vol. 237, pp. 671-681, 2019.
- [112] Woosung, P. i dr.: "Effect of thermal cycling on commercial thermoelectric modules", *13th InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, pp. 107-112, 2012.
- [113] Hatzikraniotis, E. i dr.: "Efficiency Study of a Commercial Thermoelectric Power Generator (TEG) Under Thermal Cycling", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 39, No. 9, pp. 2112-2116, 2010.
- [114] Barako, M. T. i dr.: "Thermal Cycling, Mechanical Degradation, and the Effective Figure of Merit of a Thermoelectric Module", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 42, No. 3, pp. 372-381, 2013.
- [115] Fergus, J. W.; Yerkes, K.; Yost, K.: "Numerical Modeling of Multimaterial Thermoelectric Devices Under Static and Cyclic Thermal Loading", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 43, No. 2, pp. 393-403, 2014.
- [116] Ming, T. i dr.: "The Influence of Non-Uniform High Heat Flux on Thermal Stress of Thermoelectric Power Generator", *Energies*, Vol. 8, No. 11, pp. 12584-12602, 2015.
- [117] Sun, W. i dr.: "Thermoelectric module design to improve lifetime and output power density", *Materials Today Physics*, Vol. 18, pp. 100391, 2021.
- [118] Wang, P. i dr.: "Lifetime prediction of thermoelectric devices under thermal cycling", *Journal of Power Sources*, Vol. 437, pp. 226861, 2019.
- [119] Škalic, I.; Marinović, I.; Modrić, T.: "Energy Harvesting on AB-Class Power Amplifier Applying Thermoelectric Generators in Push–Pull Mode", *Machines*, Vol. 11, No. 6, 2023.
- [120] Texas Instruments: "Mounting Considerations for TO-3 Packages", s interneta, <https://www.ti.com/lit/pdf/sboa020>, pristupljeno: 1. ožujka 2024.
- [121] Eurostat: "Electricity price statistics", s interneta, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics, pristupljeno: 1. ožujka 2024.

PRILOG

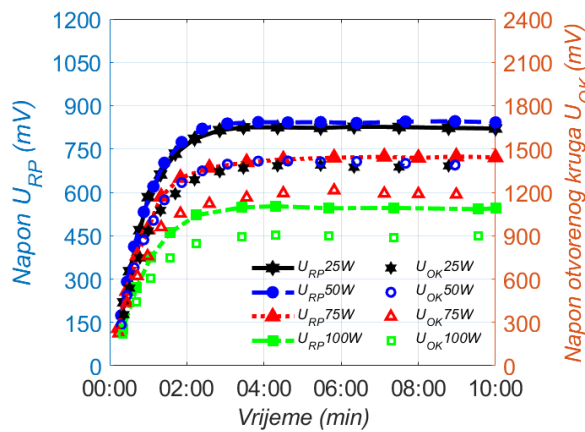


a)

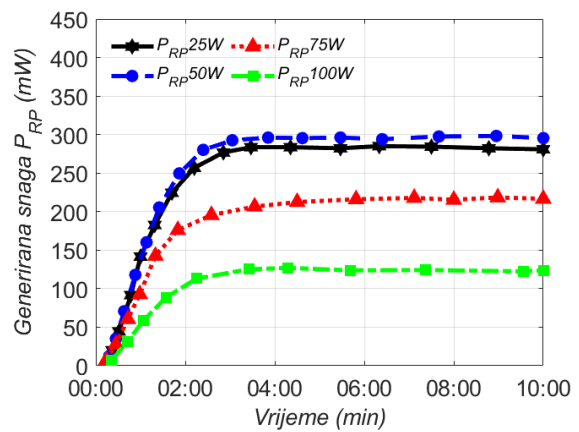


b)

Slika A1 Pojedinačni spoj GM200-127-14-10: a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent

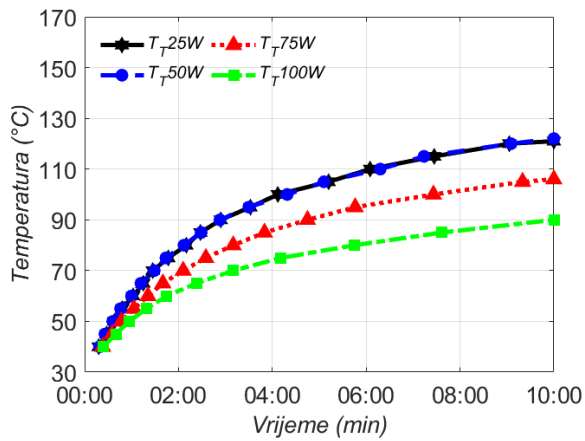


a)

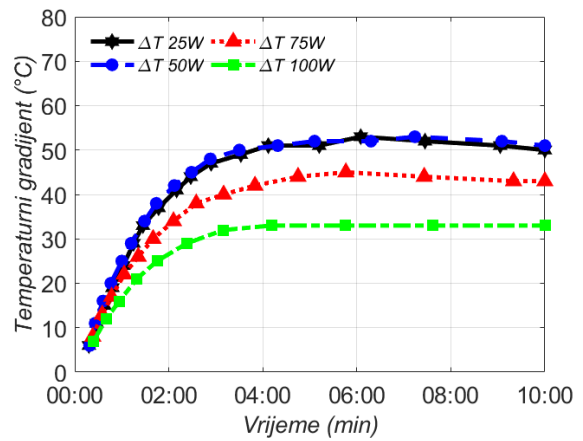


b)

Slika A2 Pojedinačni spoj GM200-127-14-10: a) napon na potrošaču i napon otvorenog kruga; b) generirana snaga na potrošaču

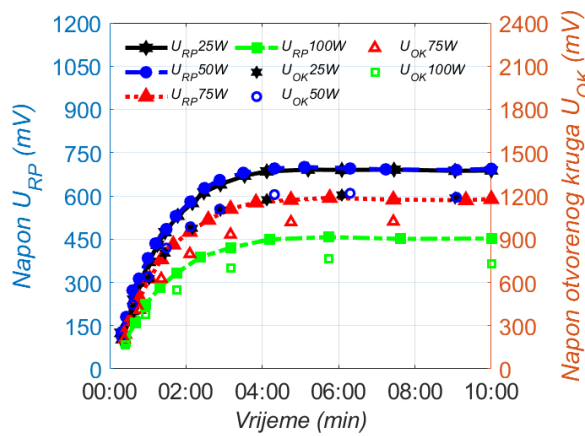


a)

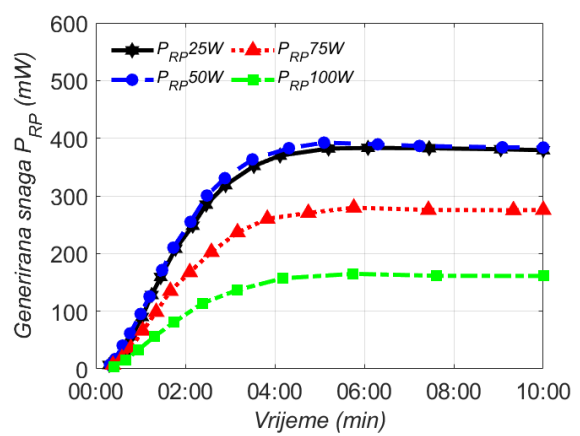


b)

Slika A3 Toplinski serijski spoj GM200-127-14-10: a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent

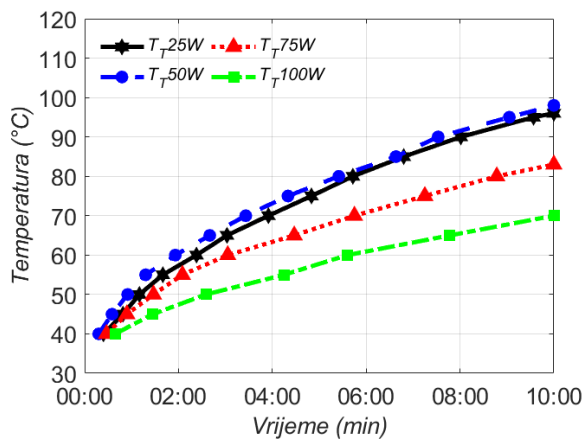


a)

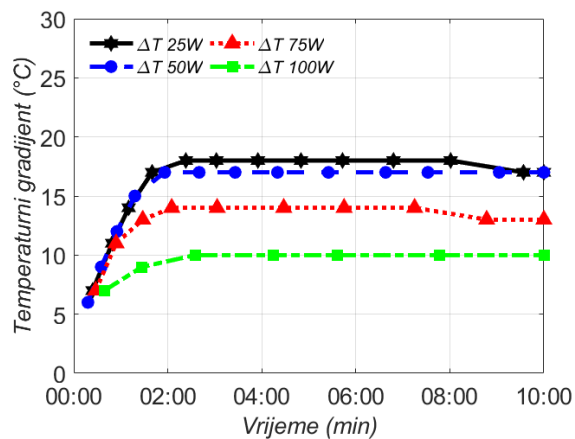


b)

Slika A4 Toplinski serijski spoj GM200-127-14-10: a) napon na potrošaču i napon otvorenog kruga za TEG #1; b) generirana snaga na potrošaču

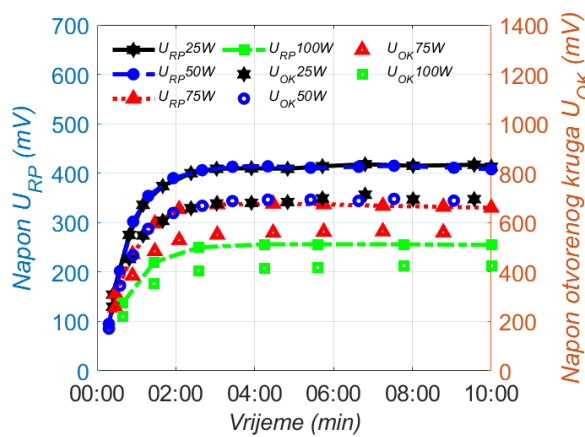


a)

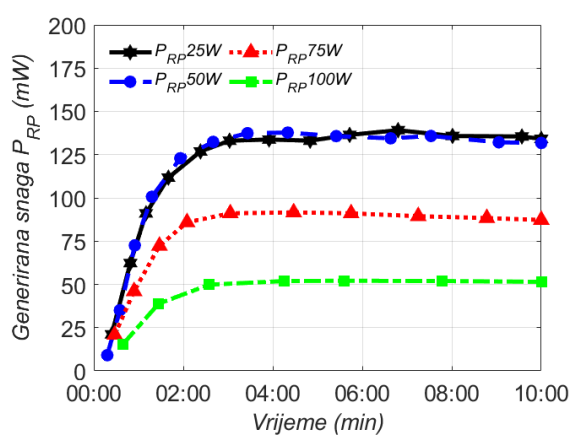


b)

Slika A5 Toplinsko paralelni spoj GM200-127-14-10: a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent

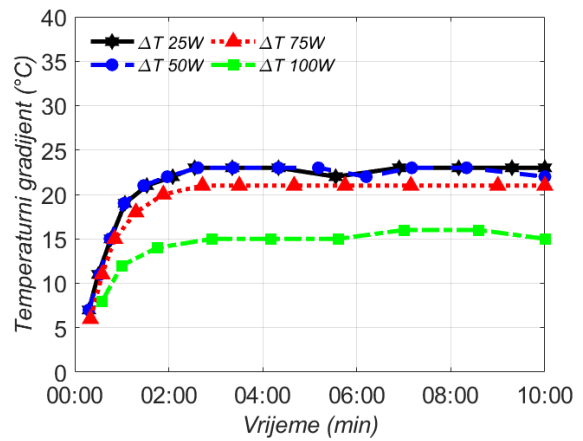
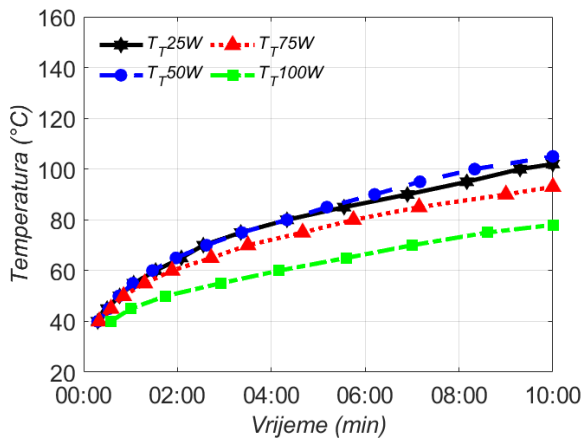


a)



b)

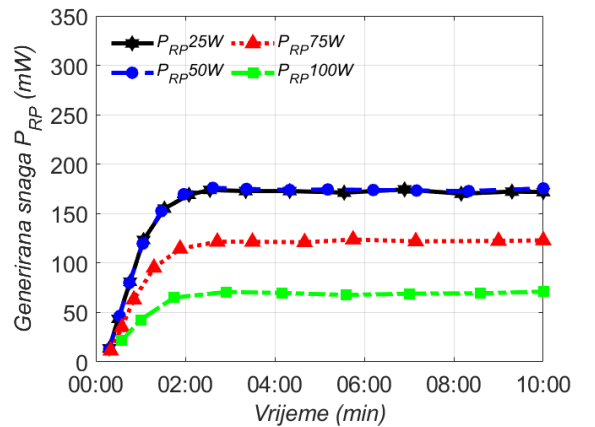
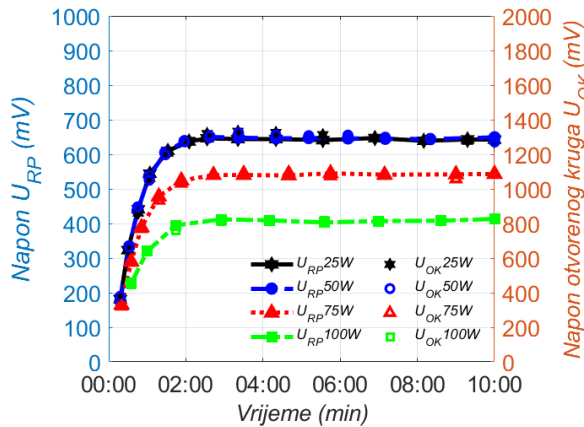
Slika A6 Toplinsko paralelni spoj GM200-127-14-10: a) napon na potrošaču i napon otvorenog kruga; b) generirana snaga na potrošaču



a)

b)

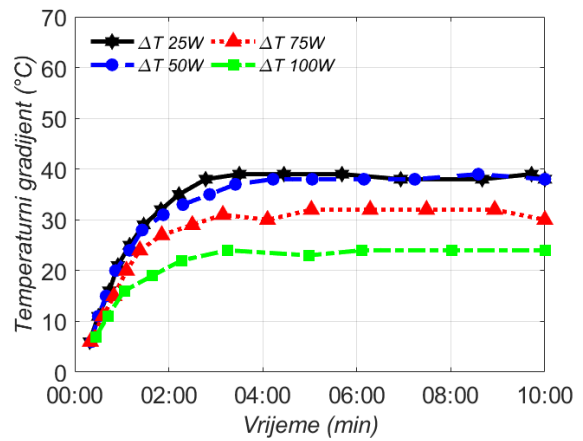
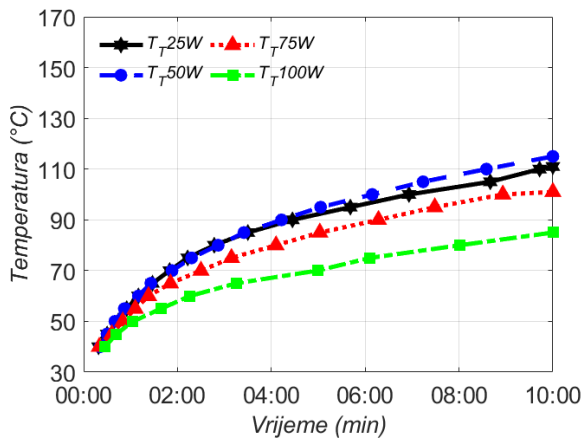
Slika B1 Pojedinačni spoj Kryotherm 199-1.4-0.8: a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent



a)

b)

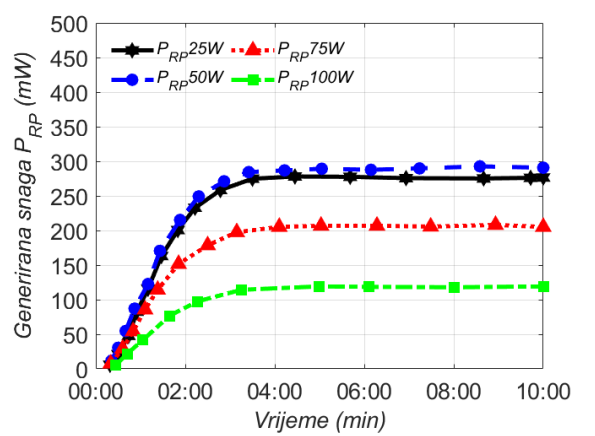
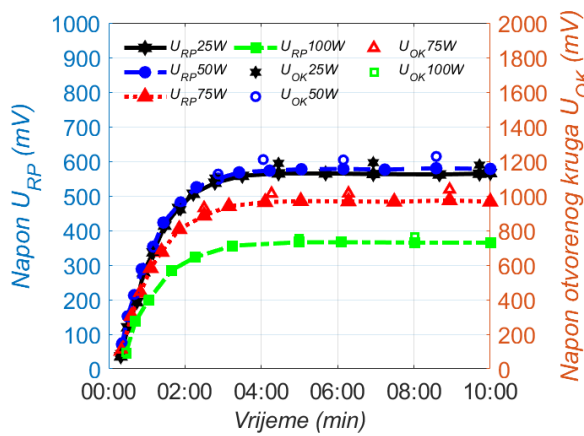
Slika B2 Pojedinačni spoj Kryotherm 199-1.4-0.8: a) napon na potrošaču i napon otvorenog kruga za TEG #1; b) generirana snaga na potrošaču



a)

b)

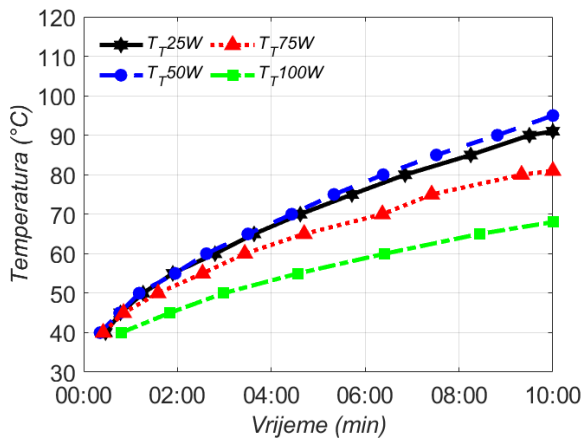
Slika B3 Toplinski serijski spoj Kryotherm 199-1.4-0.8: a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent



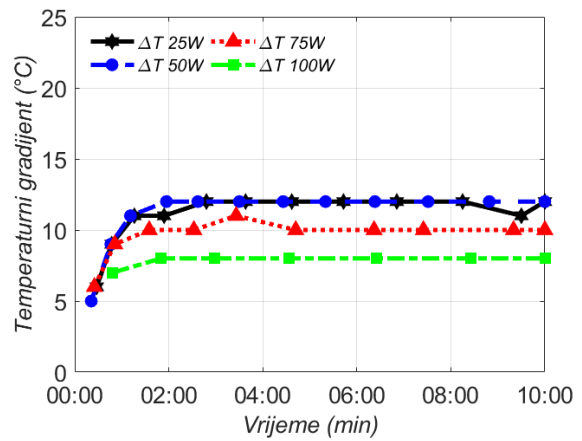
a)

b)

Slika B4 Toplinski serijski spoj Kryotherm 199-1.4-0.8: a) napon na potrošaču i napon otvorenog kruga za TEG #1; b) generirana snaga na potrošaču

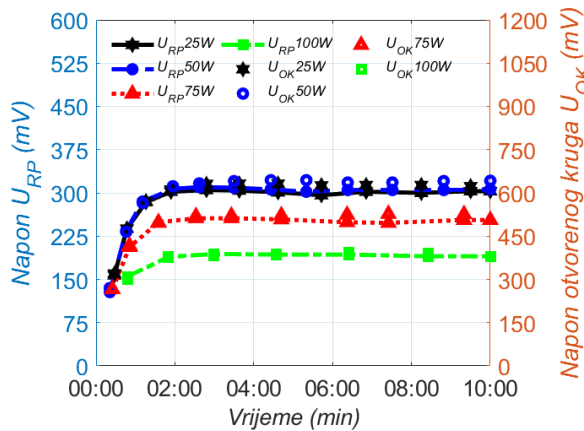


a)

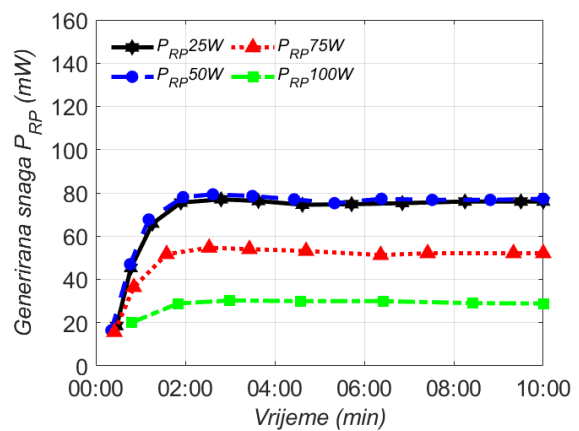


b)

Slika B5 Toplinski serijski spoj Kryotherm 199-1.4-0.8: a) temperatura tople strane; b) temperaturni gradijent

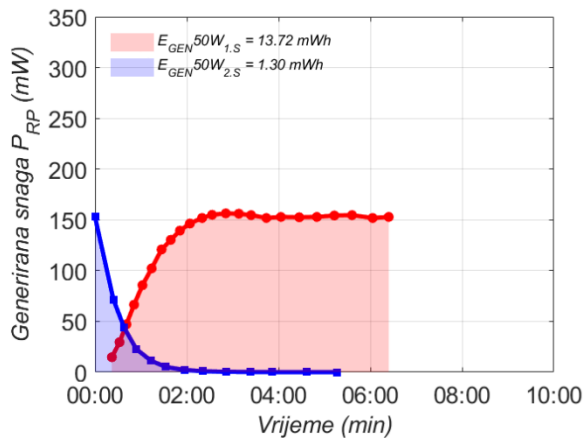


a)

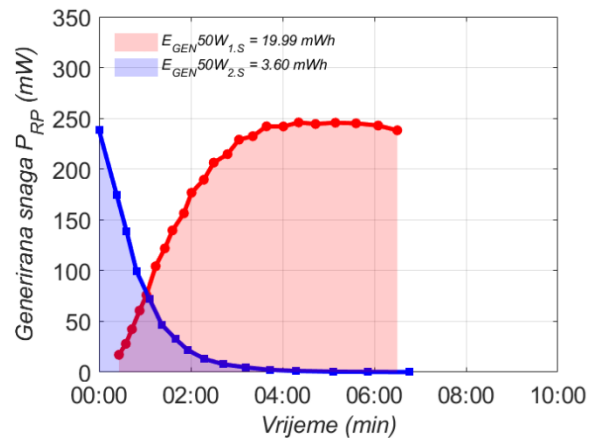


b)

Slika B6 Toplinski paralelni spoj Kryotherm 199-1.4-0.8: a) napon na potrošaču i napon otvorenog kruga za TEG #1; b) generirana snaga na potrošaču

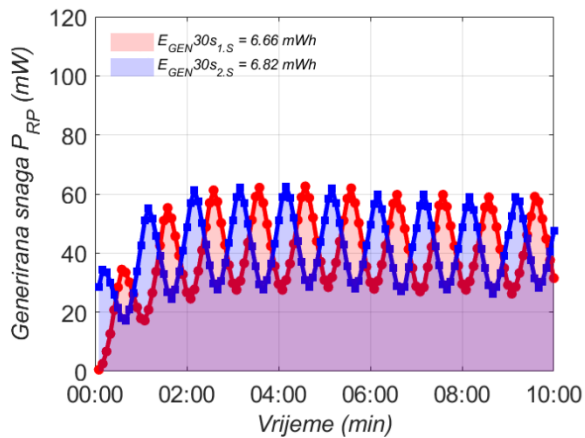


a)

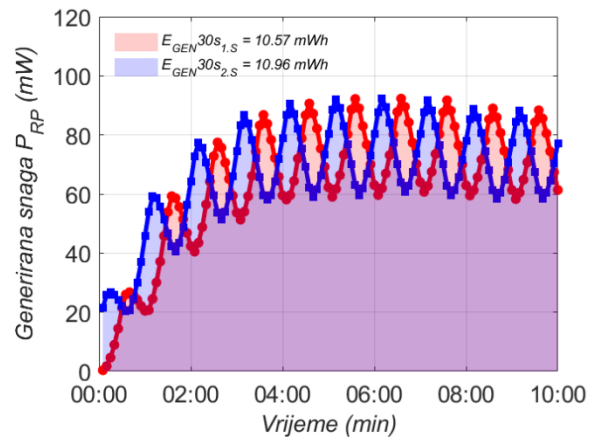


b)

Slika C1 Generirana energija u protutaktnom načinu rada (10kHz, 'hladilo #1', neprekidno):
a) pojedinačni spoj; b) toplinsko serijski spoj

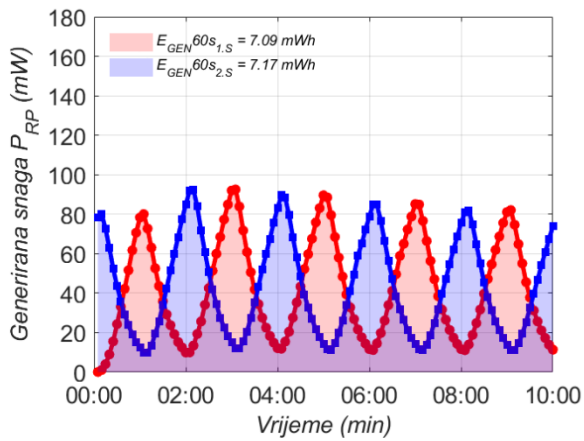


a)

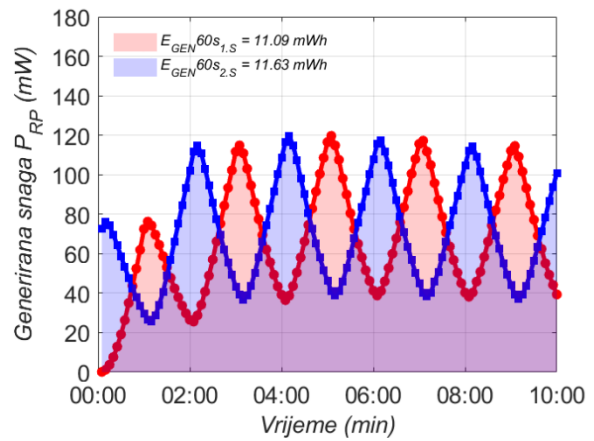


b)

Slika C2 Generirana energija u protutaktnom načinu rada (10kHz, 'hladilo #1', 30s): a)
pojedinačni spoj; b) toplinsko serijski spoj

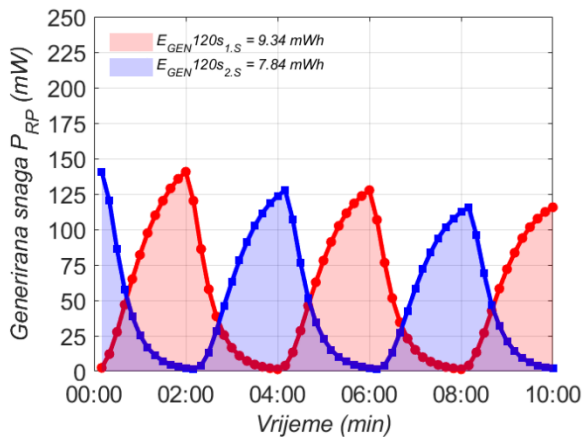


a)

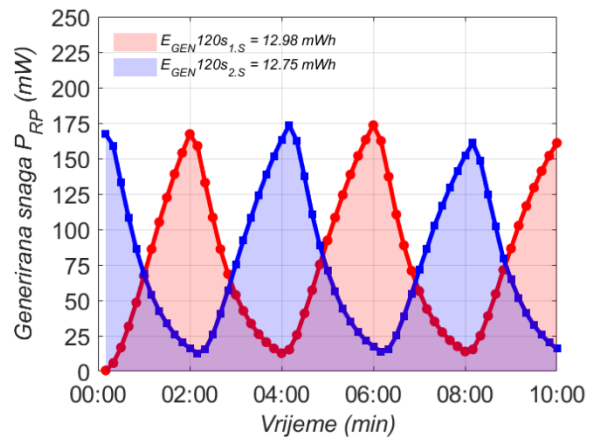


b)

Slika C3 Generirana energija u protutaktnom načinu rada (10kHz, 'hladilo #1', 60s): a) pojedinačni spoj; b) toplinsko serijski spoj

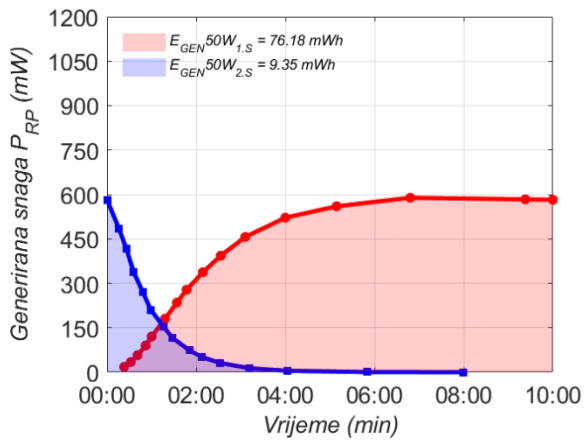


a)

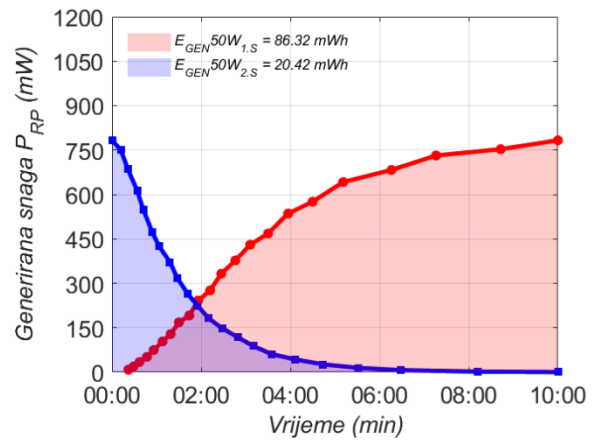


b)

Slika C4 Generirana energija u protutaktnom načinu rada (10kHz, 'hladilo #1', 120s): a) pojedinačni spoj; b) toplinsko serijski spoj

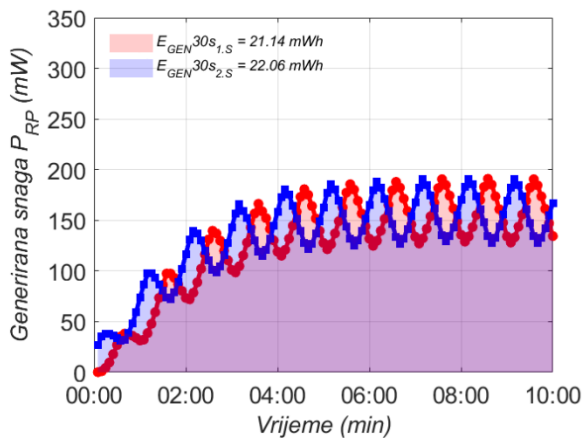


a)

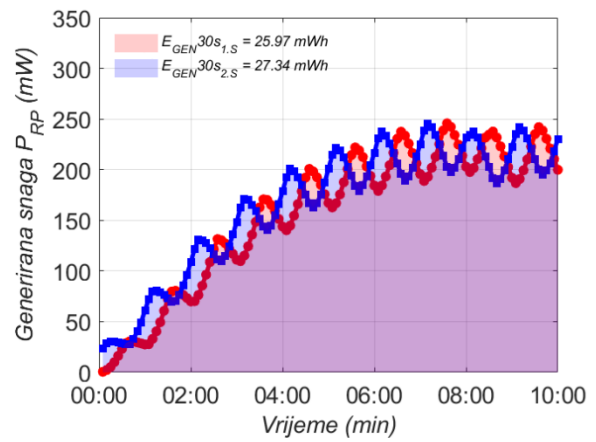


b)

Slika D1 Generirana energija u protutaktnom načinu rada (10kHz, 'hladilo #3', neprekidno): a) pojedinačni spoj; b) toplinsko serijski spoj

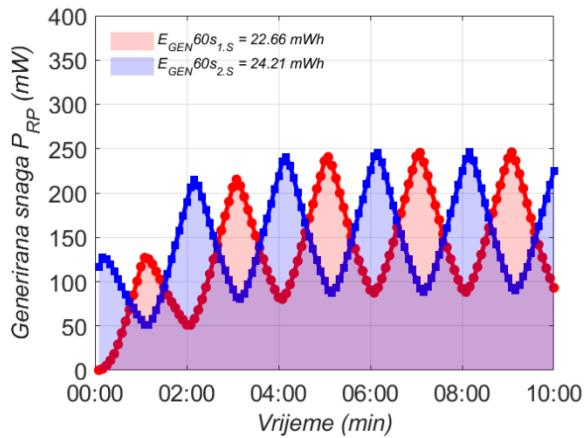


a)

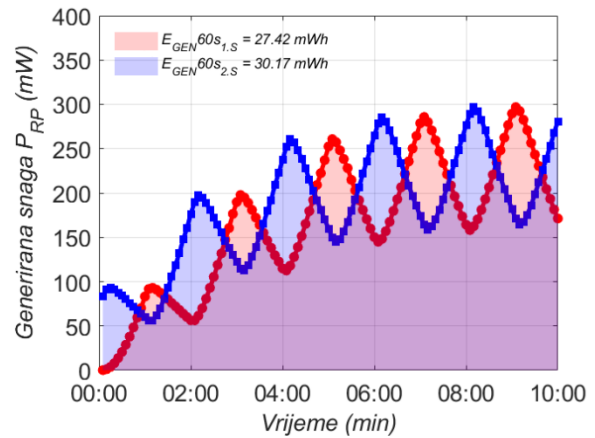


b)

Slika D2 Generirana energija u protutaktnom načinu rada (10kHz, 'hladilo #3', 30s): a) pojedinačni spoj; b) toplinsko serijski spoj

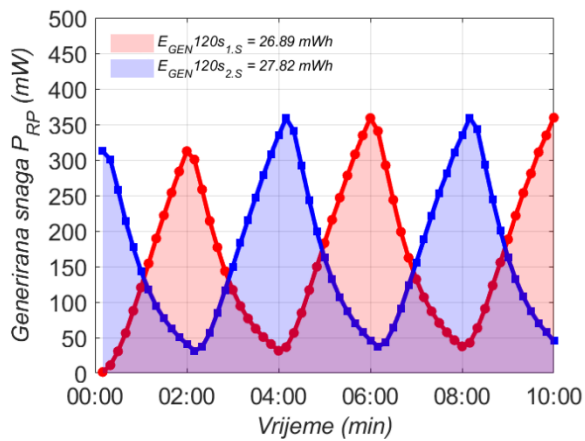


a)

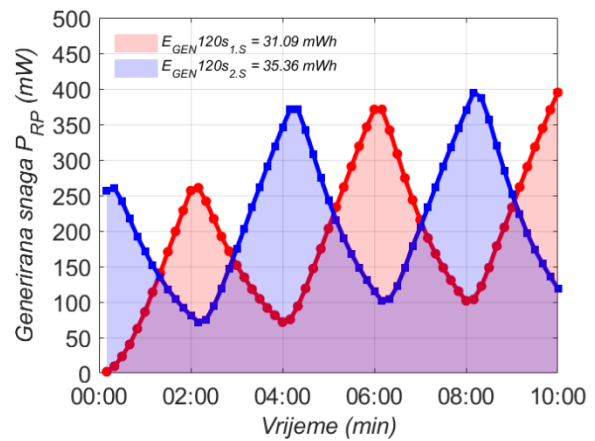


b)

Slika D3 Generirana energija u protutaktnom načinu rada (10kHz, 'hladilo #3', 60s): a) pojedinačni spoj; b) toplinsko serijski spoj



a)



b)

Slika D4 Generirana energija u protutaktnom načinu rada (10kHz, 'hladilo #3', 120s): a) pojedinačni spoj; b) toplinsko serijski spoj

Životopis

Ivan Škalic je rođen 7. veljače 1993. godine u Splitu. Nakon završene osnovne škole, upisuje srednju Elektrotehničku školu u Splitu, a koju uspješno završava 2011. godine.

Sveučilišni preddiplomski studij Elektrotehnike i informacijske tehnologije na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu upisuje 2011. godine, a završava 2014. godine. Školovanje nastavlja na sveučilišnom diplomskom studiju Elektronike i računalnog inženjerstva s opredjeljenjem smjera Elektronika, na već spomenutom fakultetu. Diplomski studij završava 2016. godine obranom diplomskog rada i stječe naziv magistar inženjer elektronike i računalnog inženjerstva.

U vremenskom periodu od prosinca 2017. godine, do istog mjeseca 2023. godine, bio je zaposlen na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu, kao asistent na Katedri za radiokomunikacijske sustave i sklopove. U nastavi je bio angažiran na izvođenju auditornih i laboratorijskih vježbi iz sljedećih kolegija: Elektronički sklopovi, Elektrotehnika i elektronika, Impulsni i digitalni sklopovi, Teorija sustava, Programiranje, Digitalna elektronika, Osnove elektronike, Elektronički elementi i sklopovi, Elektronika, Diskretni sustavi i strukture te Digitalna instrumentacija.

Poslijediplomski doktorski studij Elektrotehnike i informacijske tehnologije na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu upisuje u prosincu 2017. godine. Tijekom poslijediplomskog studija, kao glavni autor izradio je i objavio jedan znanstveni rad u časopisu kategorije A, indeksiranog u WoSCC bazi. Također, sudjelovao je kao glavni autor na izradi dva znanstvena rada objavljena u zborniku radova s međunarodnog znanstvenog skupa iz područja teme doktorske disertacije.

Curriculum Vitae

Ivan Škalic was born on February 7, 1993, in Split. After completing primary education, he pursued secondary education at the Electrical Engineering School in Split, graduating successfully in 2011.

In 2011, he enrolled in the undergraduate study program of Electrical Engineering and Information Technology at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture in Split, completing it in 2014. In the same year he enrolled in the graduate study program of Electronics and Computer Engineering, specializing in Electronics, at the same faculty. He completed his graduate studies in 2016 by defending his master's thesis and obtained the title of Master of Engineering in Electronics and Computer Engineering.

From December 2017 to December 2023, he worked as an assistant at the Chair of Radio Communication Systems and Circuits at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering, and Naval Architecture, University of Split. In his teaching role, he was involved in conducting both lecture-based and laboratory exercises in the following courses: Electronic Circuits, Electrical Engineering and Electronics, Pulse and Digital Circuits, System Theory, Programming, Digital Electronics, Basics of Electronics, Electronic Components and Circuits, Electronics, Discrete Systems and Structures, and Digital Instrumentation.

He enrolled in the postgraduate doctoral study program in Electrical Engineering and Information Technology at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture of the University of Split in December 2017. During his doctoral studies, he authored and published one scientific paper in a journal indexed in the WoSCC database as the main author. Additionally, he participated as the main author in the preparation of two scientific papers published in the proceedings of an international scientific conference related to the topic of his doctoral dissertation.