



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ  
ЕЛЕКТРОНСКИ ФАКУЛТЕТ



**Милош Б. Марјановић**

**МОДЕЛИРАЊЕ ЕФИКАСНОСТИ  
МИНИЈАТУРНИХ  
ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ниш, 2023.



UNIVERSITY OF NIŠ  
FACULTY OF ELECTRONIC ENGINEERING



**Miloš B. Marjanović**

# **EFFICIENCY MODELING OF MINIATURE THERMOELECTRIC MODULES**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2023.

## Подаци о докторској дисертацији

- Ментор: др Анета Пријић, редовни професор,  
Универзитет у Нишу, Електронски факултет Ниш
- Наслов: Моделирање ефикасности минијатурних  
термоелектричних модула
- Резиме: Истраживање обухвата развој термо-електричног  
SPICE компатибилног модела WSN чвора са  
алуминијумским штампаним плочама за временски  
променљиви режим рада. Моделом се омогућава  
карактеризација комерцијалних минијатурних  
ТЕМ-ова унутар чвора са аспекта ефикасности  
прикупљања енергије, времена хладног старта,  
димензија и компактности система, као и  
минималне и максималне температуре примене.  
Постављен је критеријум за одабир геометрије  
и материјала хладњака оптималних за примену са  
различитим ТЕМ-овима као деловима  
термоелектричних уређаја. Пројектовано је коло  
за подизање напонског нивоа за примену у  
самонапајајућим системима. Анализа је базирана  
на резултатима симулације помоћу софтвера  
LTspice, нумеричким мултифизичким симулацијама  
и експерименталним мерењима.
- Научна област: Електротехничко и рачунарско инжењерство
- Научна дисциплина: Микроелектроника и микросистеми
- Кључне речи: Термоелектрични модул, еквивалентни модели,  
хладњак, чвор бежичне сензорске мреже
- UDK: ((621.91+681.586):621.391):621.313.52
- CERIF класификација: T171 Микроелектроника
- Тип лиценце Креативне заједнице:  
**CC BY-NC-ND**

## Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor: PhD Aneta Prijić, Full Professor,  
University of Niš, Faculty of Electronic Engineering

Title: Efficiency modeling of miniature  
thermoelectric modules

Abstract: The research includes the development of a transient thermo-electric SPICE compatible model of the Wireless Sensor Network (WSN) node with aluminum core printed circuit boards. The model enables the characterization of commercial miniature thermoelectric modules (TEMs) within the node in terms of efficiency, cold boot time, dimensions and compactness of the system, as well as the minimum and maximum temperatures of application. The criteria for selecting the geometry and material of the heatsinks optimal to use with different TEMs as parts of thermoelectric systems are set. The design and optimization of voltage booster circuits for use in energy harvesting systems are presented. The analysis is based on simulations using LTspice software, numerical multiphysics simulations, and experimental measurements.

Scientific Field: Electrical and Computer Engineering

Scientific Discipline: Microelectronics and Microsystems

Key Words: Thermoelectric module, equivalent models, heatsink, wireless sensor network node

UDC: ((621.91+681.586):621.391):621.313.52

CERIF Classification : T171 Microelectronics

Creative Commons License Type:  
**CC BY-NC-ND**

## Захвалница

Ова докторска дисертација је реализована у оквиру пројекта **Развој, оптимизација и примена технологија самонапајајућих сензора**, финансираног од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, TR32026, Ев. бр. 451-03-68/2022-14/200102.

Велику захвалност дугујем менторки, проф. др Анети Пријић, на професионалном приступу, изванредним идејама, импресивној сарадњи, несебичној мотивацији, подршци, разумевању и стрпљењу, без чијег знања и искуства, невероватне посвећености, великог труда и залагања у свим фазама истраживања и писања, ове докторске дисертације не би било. Захваљујем се проф. др Зорану Пријићу и проф. др Данијелу Данковићу на стручној, несебичној и свестраној помоћи током истраживања и експерименталног рада. Велико хвала и свим члановима Катедре за микроелектронику на професионалној сарадњи током израде дисертације, незаборавном дружењу и речима неизмерне подршке. Највише хвала мојим родитељима, Боривоју и Лели, и сестри Миљани на безусловној љубави, бескрајном разумевању и неизрецивој подршци.

# Садржај

|  |           |
|--|-----------|
| Списак слика   | vii       |
| Списак табела  | xi        |
| Списак ознака  | xii       |
| <b>1 Увод</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2 Термоелектрични модул - ТЕМ</b>   | <b>5</b>  |
| 2.1 Физички принципи рада и основни параметри . . . . .  | 5         |
| 2.2 Примена термоелектричних модула као извора напајања у чворовима<br>бежичних сензорских мрежа . . . . .                       | 11        |
| 2.3 Експериментална карактеризација комерцијалног термоелектричног мо-<br>дула са аспекта површина загревања и хлађења . . . . . | 17        |
| <b>3 SPICE компатибилни модели WSN чвора са TEG-ом</b>   | <b>23</b> |
| 3.1 Једнодимензионални SPICE компатибилни модел за временски променљиви<br>режим рада . . . . .                                  | 23        |
| 3.1.1 Формирање модела . . . . .   | 24        |
| 3.1.2 Експериментална поставка за потврду модела . . . . .   | 31        |
| 3.1.3 Резултати верификације модела . . . . .  | 31        |
| 3.2 Просторни SPICE компатибилни модел . . . . .   | 51        |
| 3.2.1 Формирање просторног SPICE модела неелектричних делова чво-<br>ра WSN-а . . . . .  | 52        |
| 3.2.2 Формирање просторног SPICE модела термоелектричног генера-<br>тора . . . . .   | 54        |
| 3.2.3 Формирање просторног SPICE модела комплетног чвора WSN-а   | 55        |
| 3.2.4 Експериментална поставка за потврду модела . . . . .   | 57        |
| 3.2.5 Резултати верификације за просторни модел . . . . .  | 58        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>4</b> | <b>Анализа ефикасности склопова термоелектрични модул - хладњак намењених самонапајајућим системима</b> | <b>70</b>  |
| 4.1      | Експериментална поставка . . . . .  | 71         |
| 4.2      | Поставка симулације . . . . .   | 75         |
| 4.3      | Карактеристике разматраних склопова . . . . .   | 76         |
| 4.4      | Резултати анализе ефикасности . . . . .   | 79         |
| <b>5</b> | <b>Моделирање кола за подизање напона</b>   | <b>93</b>  |
| 5.1      | Пројектовање кола за подизање напона . . . . .  | 94         |
| 5.2      | Модел за мале сигнале осцилатора у колу за подизање напона . . . . .                                    | 96         |
| 5.3      | Експериментална поставка за верификацију модела . . . . .   | 97         |
| 5.4      | Резултати верификације модела . . . . .   | 98         |
| <b>6</b> | <b>Закључак</b>   | <b>103</b> |
|          | <b>Литература</b>   | <b>107</b> |
|          | <b>Биографија аутора</b>  | <b>116</b> |
|          | <b>Списак објављених научних радова</b>   | <b>119</b> |

# Списак слика

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Најчешћи извори енергије у <i>energy harvesting</i> системима. . . . .   | 2  |
| 2.1  | Зонски дијаграм споја метала и полупроводника уз објашњење Пелтијевог ефекта, на основу [32]. . . . .                                  | 6  |
| 2.2  | Илустрација Пелтијевог ефекта, на основу [32]. . . . .   | 6  |
| 2.3  | ТЕМ у улози уређаја за хлађење: унутрашња структура термоелектричног пара и изглед компоненте. . . . .                                 | 7  |
| 2.4  | Илустрација уз објашњење Зибекског ефекта, на основу [32]: (а) <i>n</i> -тип полупроводника, (б) <i>p</i> -тип полупроводника. . . . . | 8  |
| 2.5  | Термоелектрични модул као генератор: унутрашња структура термоелектричног пара и изглед компоненте. . . . .                            | 10 |
| 2.6  | Еквивалентно термо-електрично коло ТЕГ-а са прикљученим оптерећењем. . . . .   | 11 |
| 2.7  | Систем за напајање чвора сензорске мреже помоћу ТЕГ-а, адаптација на основу [37]. . . . .  | 12 |
| 2.8  | Попречни пресек компактног термоелектрично напајаног чвора бежичне сензорске мреже, адаптација на основу [46,129,130]. . . . .         | 15 |
| 2.9  | Блок дијаграм компактног термоелектрично напајаног чвора бежичне сензорске мреже. . . . .  | 15 |
| 2.10 | Блок шема експерименталне поставке за карактеризацију комерцијалног ТЕМ-а у улози ТЕГ-а. . . . .                                       | 18 |
| 2.11 | Фотографија експерименталне поставке за карактеризацију комерцијалног ТЕМ-а у улози ТЕГ-а. . . . .                                     | 19 |
| 2.12 | Напон отвореног кола у функцији времена за ТЕГ са хладњаком HSA, загреваног из извора А. . . . .                                       | 21 |
| 2.13 | Напон отвореног кола у функцији времена за ТЕГ са хладњаком HSB, загреваног из извора А. . . . .                                       | 21 |
| 2.14 | Напон отвореног кола у функцији времена за ТЕГ са хладњаком HSB, загреваног из извора Б. . . . .                                       | 22 |
| 3.1  | Компоненте еквивалентног електро - термичког модела ТЕГ-а са хладњаком. . . . .  | 25 |
| 3.2  | SPICE модел чвора бежичне сензорске мреже са слике 2.8. . . . .  | 30 |



|      |   |    |
|------|---|----|
| 3.3  | Фотографија експерименталне поставке. . . . .   | 32 |
| 3.4  | Блок дијаграм корака у процесу верификације модела. . . . .   | 32 |
| 3.5  | Температурни одзив хладњака на примењену температурну разлику $\Delta T = T_{HEAT} - T_{AMB} = 20^{\circ}\text{C}$ . . . . .  | 34 |
| 3.6  | Температурни одзив TEG1 на примењену температурну разлику $\Delta T = T_{HEAT} - T_{AMB} = 15^{\circ}\text{C}$ . . . . .  | 35 |
| 3.7  | Генерисани напон у функцији времена за TEG1 са хладњаком HSA за три температурне разлике. . . . .   | 36 |
| 3.8  | Генерисани напон у функцији времена за разматрани чвор WSN-а са TEG1 и без електронских компонената. . . . .  | 37 |
| 3.9  | Напон и температуре у комплетном WSN чвору са TEG1 за $\Delta T = T_{HEAT} - T_{AMB} = 25^{\circ}\text{C}$ : (a) Напон на оптерећењу TEG-а; (b) Напон напајања електронских компонената чвора; (c) Температуре на карактеристичним спојевима. . . . . | 39 |
| 3.10 | Симулиране зависности напона ( $V_L$ ) и снаге ( $P_L$ ) на оптерећењу од времена за три TEG-а на $\Delta T$ : (a) $15^{\circ}\text{C}$ ; (b) $20^{\circ}\text{C}$ ; (c) $25^{\circ}\text{C}$ . . . . .   | 40 |
| 3.11 | Уз објашњење принципа одређивања времена хладног старта WSN чвора на основу резултата симулације. . . . .   | 42 |
| 3.12 | Симулиране временске зависности температуре $T_{hot}$ , ефективне температурне разлике на TEG-у ( $\Delta T_{TEG}$ ) и напона $V_L$ за $T_{HEAT} = T_{max}$ и чвора са: (a) TEG1; (b) TEG2; (c) TEG4. $T_{AMB} = 27^{\circ}\text{C}$ . . . . .        | 44 |
| 3.13 | Електрична шема чвора WSN-а као поткола. . . . .  | 46 |
| 3.14 | Зависност снаге предате потрошачу у функцији времена за различите комбинације TEG-ова и хладњака као делова чвора WSN-а. . . . .  | 47 |
| 3.15 | Зависност времена хладног старта WSN чвора у функцији примењене температурне разлике $\Delta T = T_{HEAT} - T_{AMB}$ за различите комбинације TEG-хладњак. . . . .  | 48 |
| 3.16 | Зависност ефикасности WSN чвора у функцији примењене температурне разлике $\Delta T = T_{HEAT} - T_{AMB}$ за различите комбинације TEG-хладњак. . . . .   | 49 |
| 3.17 | Зависност напона на потрошачу у функцији времена за TEG6 у оквиру WSN чвора при различитим температурама топлотног извора. . . . .  | 50 |
| 3.18 | Градивна ћелија SPICE компатибилног просторног еквивалентног модела неелектричних делова чвора WSN-а, на основу [77,79,82,85]. . . . .  | 53 |
| 3.19 | Градивна ћелија SPICE компатибилног просторног еквивалентног модела термоелемента, на основу [85]. . . . .  | 56 |
| 3.20 | Блок дијаграм методологије симулације. . . . .  | 57 |
| 3.21 | Шематски приказ експерименталне поставке за мерење температурног одзива хладњака. . . . .   | 57 |
| 3.22 | Фотографија експерименталне поставке за карактеризацију чвора WSN-а. . . . .  | 58 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 3.23 | Симулациона шема за алуминијумски хладњак. . . . .   | 59 |
| 3.24 | Временске зависности температуре хладњака HSA добијене SPICE симулацијама и експериментално. . . . .   | 61 |
| 3.25 | Расподела температуре на хладњаку HSA добијена стационарном FEM симулацијом. . . . .   | 62 |
| 3.26 | Временске зависности температуре разматраних хладњака добијене SPICE симулацијом. . . . .  | 63 |
| 3.27 | Симулациона шема за склоп TEG1 са хладњаком HSB. . . . .   | 66 |
| 3.28 | Генерисани напон у функцији времена за склоп TEG1 са хладњаком HSB при три температурне разлике. . . . .   | 67 |
| 3.29 | Симулациона шема за чвор бежичне сензорске мреже, на основу [46,129,130]. 67   |    |
| 3.30 | Напон на оптерећењу TEG-а у функцији времена при $\Delta T = T_{HEAT} - T_{AMB} = 25^\circ\text{C}$ . . . . .  | 68 |
| 3.31 | Генерисани напон $V_L$ у функцији температурне разлике за чворове бежичне сензорске мреже са различитим комбинацијама TEG-хладњак. . . . .                   | 68 |
| 3.32 | Генерисана снага предата потрошачу $P_L$ у функцији температурне разлике за чворове бежичне сензорске мреже са различитим комбинацијама TEG-хладњак. . . . . | 69 |
| 3.33 | Укупна ефикасност система за чворове бежичне сензорске мреже са различитим комбинацијама TEG-хладњак. . . . .  | 69 |
| 4.1  | Илустрација експерименталне поставке (димензије нису пропорционалне). 72   |    |
| 4.2  | Шема мерења за поставку приказану на слици 4.1. . . . .  | 73 |
| 4.3  | Фотографија експерименталне поставке (картонска кутија уклоњена ради прегледности). . . . .  | 73 |
| 4.4  | Дијаграм тока експерименталне процедуре. . . . .   | 74 |
| 4.5  | Илустрација геометрије за симулацију са граничним условима. . . . .  | 75 |
| 4.6  | Измерене температуре и напон на оптерећењу за склоп A31. . . . .   | 82 |
| 4.7  | Експериментално добијена зависност напона отвореног кола од температурне разлике $\Delta T = T_{hot} - T_{AMB}$ за склопове A1 - A7. . . . .                 | 83 |
| 4.8  | Експериментално добијена зависност напона отвореног кола од температурне разлике $\Delta T = T_{hot} - T_{AMB}$ за склопове A8 - A12. . . . .                | 84 |
| 4.9  | Експериментално добијена зависност напона отвореног кола од температурне разлике $\Delta T = T_{hot} - T_{AMB}$ за склопове A13 - A20. . . . .               | 85 |
| 4.10 | Експериментално добијена зависност напона отвореног кола од температурне разлике $\Delta T = T_{hot} - T_{AMB}$ за склопове A21 - A30. . . . .               | 86 |
| 4.11 | Експериментално добијена зависност напона отвореног кола од температурне разлике $\Delta T = T_{hot} - T_{AMB}$ за склопове A31 - A37. . . . .               | 87 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 4.12 | Зависност напона отвореног кола од температурне разлике $\Delta T = T_{hot} - T_{AMB}$ за склопове са TEG6 и хладњацама од алуминијума и бакарне пене. Симболи и пуне линије - експеримент; звездице и испрекидане линије - симулације. . . . .                         | 88  |
| 4.13 | Зависност напона отвореног кола од температурне разлике $\Delta T = T_{hot} - T_{AMB}$ за склопове са TEG6 и хладњацама од алумине и микропорозне керамике. Симболи и пуне линије - експеримент; звездице и испрекидане линије - симулације. . . . .                    | 89  |
| 4.14 | Расподела температуре на склопу А34 и околном флуиду добијена симулацијом при $\Delta T = T_{hot} - T_{AMB} = 40^\circ\text{C}$ и при отвореном колу. . . . .   | 90  |
| 4.15 | Зависност напона на потрошачу од температурне разлике $\Delta T = T_{hot} - T_{AMB}$ за склоп А34. Симболи и пуне линије – експеримент; звездице и испрекидане линије - симулације. . . . .   | 90  |
| 4.16 | Вредност генерисаног напона $V_{L(oc)}$ за све разматране склопове TEG-хладњак при $\Delta T = 25^\circ\text{C}$ . . . . .  | 91  |
| 4.17 | Вредности температурне разлике $\Delta T$ за све разматране склопове TEG-хладњак при $V_{L(oc)} = 60\text{ mV}$ . . . . .   | 92  |
| 5.1  | Електрична шема кола за подизање напона заснованог на Мајснеровом осцилатору и множачу напона. . . . .  | 94  |
| 5.2  | Хистерезисна петља магнетних материјала. . . . .  | 95  |
| 5.3  | Шема еквивалентног модела за мале сигнале осцилаторног кола. . . . .  | 97  |
| 5.4  | Илустрација експерименталне поставке. . . . .   | 98  |
| 5.5  | Фотографија експерименталне поставке без заклона. . . . .   | 98  |
| 5.6  | Зависност напона отвореног кола TEG-а и напона оптерећеног TEG-а у функцији температурне разлике за алуминијумски и хладњак од бакарне пене. . . . .  | 99  |
| 5.7  | Напон генерисан TEG-ом са алуминијумским хладњаком, напон осцилаторног кола и напон на излазном кондензатору у функцији времена. x- оса: 40 s/div, y- оса: 2 V/div (за $V_{osc}$ и $V_{OUT}$ ); 100 mV/div (за $V_{TEG}$ ). . . . .                                     | 100 |
| 5.8  | Увећани приказ - напон генерисан TEG-ом са алуминијумским хладњаком, напон осцилаторног кола и напон на излазном кондензатору у функцији времена. x- оса: 4 $\mu\text{s}/\text{div}$ , y- оса: 2 V/div (за $V_{osc}$ и $V_{OUT}$ ); 100 mV/div (за $V_{TEG}$ ). . . . . | 101 |
| 5.9  | Илустрација ефекта пригушења осцилација. . . . .  | 102 |

# Списак табела

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1  | Упоредни преглед карактеристика чворова WSN који користе TEG као извор напајања. . . . .                 | 16 |
| 2.2  | Електрични, термички и геометријски параметри разматраног TEG-а ET-031-10-20. . . . .                    | 20 |
| 2.3  | Упоредни преглед максималних вредности измереног напона у mV. . .  | 22 |
| 3.1  | Аналогија између електричних и термичких величина [24,52,66]. . . . .                                    | 25 |
| 3.2  | Термичке отпорности елемената чвора бежичне сензорске мреже. . . .                                       | 29 |
| 3.3  | Термичке капацитивности елемената чвора бежичне сензорске мреже. .                                       | 29 |
| 3.4  | Зависност отпорности оптерећења TEG-а унутар чвора бежичне сензорске мреже од струје оптерећења. . . . . | 31 |
| 3.5  | Карактеристични параметри разматраних TEG-ова. . . . .   | 33 |
| 3.6  | Време хладног старта чвора WSN-а са разматраним TEG-овима за различите $\Delta T$ . . . . .              | 42 |
| 3.7  | Карактеристични параметри разматраних TEG-ова (II део). . . . .  | 45 |
| 3.8  | Својства разматраних хладњака. . . . .   | 46 |
| 3.9  | Својства хладњака коришћених у анализи просторног модела. . . . .  | 60 |
| 3.10 | Својства разматраних хладњака у просторном моделу. . . . .   | 64 |
| 3.11 | Својства неелектричних делова чвора WSN-а. . . . .   | 65 |
| 4.1  | Карактеристични параметри разматраних TEG-ова. . . . .   | 78 |
| 4.2  | Димензије $L \times W \times H$ (mm), геометрија и материјали разматраних хладњака. . . . .              | 79 |
| 4.3  | Својства материјала хладњака коришћена за симулације. . . . .  | 80 |
| 4.4  | Склопови TEG-хладњак – експериментална дизајн матрица. . . . .   | 80 |
| 5.1  | Измерене вредности параметара трансформатора на 1 kHz . . . . .  | 99 |

# Списак ознака

- $A$  Површина попречног пресека термоелемента TEG-а. 10, 26
- $A_\mu$  Температурно независан параметар покретљивости. 9
- $A_{TEG}$  Спољашња површина TEG-а. 10, 27
- $B$  Температурно независан параметар концентрације. 9, 95
- $B_R$  Заостала магнетна индукција. 95
- $C_{gs}$  Капацитивност између гејта и сорса MOS транзистора. 96, 98
- $C_{th}$  Термичка капацитивност објекта направљеног од одређеног материјала. 28, 53
- $D_n$  Дифузиони коефицијент електрона. 8
- $E_F$  Фермијева енергија. 9
- $E_c$  Енергија дна проводне зоне код полупроводника. 5
- $E_k$  Средња кинетичка енергија електрона. 5
- $E_v$  Енергија врха валентне зоне код полупроводника. 9
- $E_x$  Јачина електричног поља дуж  $x$  осе. 8
- $E_{Fm}$  Фермијева енергија код метала. 5
- $H$  Јачина магнетног поља - магнетна сила. 95
- $H_c$  Коерцитивна магнетна сила. 95
- $I$  Струја. 5
- $I_L$  Струја кроз оптерећење. 10, 28, 55, 63, 72, 81
- $J_n$  Густина струје електрона. 8
- $J_{diff}$  Дифузиона густина струје. 8
- $J_{drift}$  Дрифтowska густина струје. 8
- $L_1$  Индуктивност примара трансформатора. 95, 96
- $L_2$  Индуктивност секундарa трансформатора. 95, 96

$M$  Међусобна индуктивност трансформатора. 96  
 $N$  Број термоелектричних парова TEG-а. 9, 26, 55  
 $N_a$  Концентрације акцепторских примеса у полупроводнику. 9  
 $N_d$  Концентрације донорских примеса у полупроводнику. 9  
 $P_L$  Снага на оптерећењу. 10, 38  
 $Q$  Топлота која се доводи систему. 76  
 $Q_c$  Укупна количина топлоте ослобођена на хладној страни ножица TEG-а. 27  
 $Q_h$  Укупна количина топлоте апсорбована на топлој страни ножица TEG-а. 27  
 $Q_p$  Количина топлоте која се преноси провођењем. 17  
 $Q_s$  Количина топлоте која се преноси струјањем. 17  
 $Q_z$  Количина топлоте која се преноси зрачењем. 17  
 $Q_{HEAT}$  Топлотни флукс грејача. 65  
 $Q_{Joul}$  Количина топлоте коју дисипира материјал услед протицања струје. 26  
 $Q_{cPelt}$  Количина топлоте апсорбована на хладној страни термоелектричних парова. 26  
 $Q_{hPelt}$  Количина топлоте која се дисипира на топлој страни термоелектричних парова. 26  
 $R$  Отпорност. 5  
 $R_L$  Отпорност оптерећења. 10, 26, 28, 55, 63, 72, 81, 89  
 $R_{S1}$  Редна унутрашња отпорност примарног намотаја трансформатора. 96  
 $R_{S2}$  Редна унутрашња отпорност секундарног намотаја трансформатора. 96  
 $R_{TEG}$  Унутрашња отпорност TEG-а. 10, 26, 54, 72, 89  
 $R_{thP}$  Термичка отпорност керамичких плоча TEG-а. 10, 27  
 $R_{thTEG}$  Термичка отпорност свих термоелектричних парова TEG-а. 10, 27  
 $S$  Површина. 17  
 $T$  Апсолутна температура. 5  
 $T_f$  Температура флуида. 17  
 $T_{AMB}$  Температура околине. 17, 31, 34, 57–59, 62, 72, 75, 81, 97  
 $T_{HEAT}$  Температура грејача. 31, 58, 62, 65  
 $T_{HS}$  Температура хладњака. 31, 34, 57, 72, 81

$T_{avg}$  Средња температура TEG-а. 11  
 $T_{cold}$  Температура хладне стране TEG-а. 9, 26, 31, 35, 42, 55  
 $T_{hot}$  Температура топле стране TEG-а. 9, 26, 31, 42, 55, 57, 59, 72, 81, 97  
 $T_{max}$  Максимална радна температура TEG-а. 42  
 $V$  Запремина објекта. 28  
 $V_L$  Напон на оптерећењу. 10, 38, 42, 63, 64, 72, 79, 81, 88, 89  
 $V_{L(oc)}$  Напон отвореног кола TEG-а. 72, 81, 82, 84, 85, 89  
 $V_{SUP}$  Напон напајања чвора WSN-а. 31  
 $V_{TEG}$  Напон генерисан TEG-ом. 9, 26, 31  
 $V_{osc}$  Напон осцилаторног кола. 95, 96  
 $V_{th}$  Напон прага. 94  
 $Z$  Фактор ефикасности. 10  
 $\Delta T$  Температурна разлика. 9, 17, 64, 81, 89  
 $\Phi$  Магнетни флуks. 95  
 $\vec{q}$  Вектор топлотног флуksа. 76  
 $\vec{u}$  Вектор брзине флуида. 76  
 $\alpha$  Еквивалентни Зибекoв коефицијент. 9, 26, 54  
 $\alpha_x$  Зибекoв коефицијент. 7  
 $\alpha_{pn0}$  Зибекoв коефицијент на референтној температури  $T_0 = 298$  K. 26  
 $\eta$  Укупна ефикасност WSN чвора. 38, 48  
 $\eta_f$  Динамички вискозитет флуида. 76  
 $\eta_{max}$  Максимална ефикасност TEG-а. 11  
 $\kappa$  Пермеабилност протока флуида порозног медијума. 76  
 $\lambda$  Специфична термичка проводност термоелектричног материјала. 10, 17, 27, 52, 76  
 $\lambda_P$  Специфична термичка проводност керамичког материјала. 10, 27  
 $\mu_n$  Покретљивост електрона. 8  
 $\nabla p$  Градијент притиска. 76  
 $\rho$  Специфична електрична отпорност термоелектричног материјала. 10, 26, 54  
 $\sigma$  Stefan-Boltzmann-ова константа. 17

- $\theta_p$  Порозност средине. 76
- $a_\alpha$  Параметар температурне зависности Зибековог коефицијента. 26, 54
- $a_\rho$  Температурни коефицијент специфичне електричне отпорности. 26, 54
- $a_\lambda$  Температурни коефицијент термичке проводности материјала. 52
- $c$  Специфични топлотни капацитет материјала. 28, 53, 76
- $d$  Густина материјала. 28, 53, 76
- $e$  Елементарно наелектрисање. 8
- $e_m$  Емисивност материјала. 17
- $f$  Фреквенција осциловања. 97
- $g_m$  Транскондуктанса MOS транзистора. 96
- $h$  Коефицијент преноса топлоте. 17
- $k$  Болцманова константа. 5
- $k_L$  Коефицијент спреге између примара и секундара трансформатора. 96
- $l$  Дужина термоелемента TEG-а. 10, 26
- $l_p$  Дебљина керамичке плоче TEG-а. 10, 27
- $m$  Маса објекта. 28
- $m_e^*$  Ефективна маса електрона. 7
- $n$  Концентрација електрона. 8
- $q$  Количина наелектрисања потребна да дође до хладног старта. 41
- $r$  Индекс температурне зависности дифузионог коефицијента. 9
- $t_{on}$  Време хладног старта. 41
- $v$  Средња брзина електрона. 7
- $\Delta T_0$  Максимална промена у температури објекта. 34
- $\Delta T_{TEGmax}$  Максимална температурна разлика TEG-а. 42
- $\tau_{th}$  Термичка временска константа објекта. 34
- HS1** Алуминијумски хладњак са стубићима димензија  $(40 \times 40 \times 10)mm$ . 79, 84, 85
- HS10** Хладњак од микропорозне керамике са ребрима димензија  $(40 \times 40 \times 5, 25)mm$ . 79, 84–86
- HS11** Хладњак од микропорозне керамике са ребрима димензија  $(30 \times 30 \times 5, 25)mm$ . 79, 81–83, 85



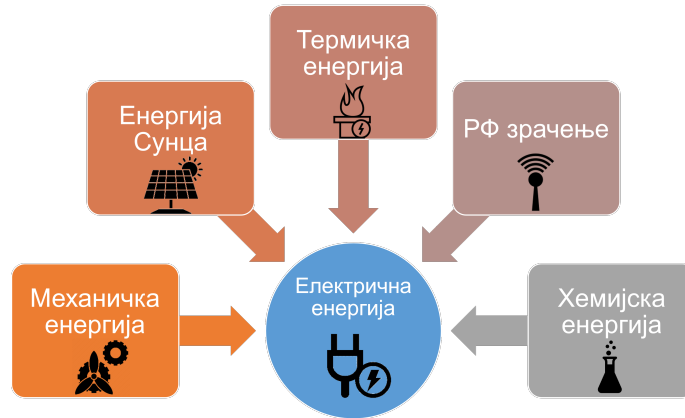
- HS12** Хладњак од микропорозне керамике са ребрима димензија  $(25 \times 25 \times 5, 25)mm$ . 59, 60, 79, 83
- HS13** Раван хладњак од микропорозне керамике димензија  $(40 \times 40 \times 2, 5)mm$ . 64, 65, 79, 85, 86
- HS14** Раван хладњак од микропорозне керамике димензија  $(30 \times 30 \times 2, 5)mm$ . 79, 81, 83, 85
- HS15** Раван хладњак од бакарне пене димензија  $(40 \times 40 \times 5)mm$ . 79, 84–86, 97
- HS16** Раван хладњак од бакарне пене димензија  $(30 \times 30 \times 5)mm$ . 79, 81–83, 85
- HS17** Раван хладњак од бакарне пене димензија  $(40 \times 40 \times 2, 5)mm$ . 79, 86
- HS18** Раван хладњак од бакарне пене димензија  $(30 \times 30 \times 2, 5)mm$ . 46
- HS19** Раван хладњак од бакарне пене димензија  $(25 \times 25 \times 5)mm$ . 59, 60
- HS2** Алуминијумски хладњак са стубићима димензија  $(40 \times 40 \times 5)mm$ . 79, 84–86, 97
- HS3** Алуминијумски хладњак са стубићима димензија  $(35 \times 35 \times 6)mm$ . 79, 81, 83, 84
- HS4** Алуминијумски хладњак са стубићима димензија  $(25 \times 25 \times 9, 4)mm$ . 79, 81–84
- HS5** Алуминијумски хладњак са стубићима димензија  $(20 \times 20 \times 19, 1)mm$ . 79, 81–83
- HS6** Хладњак од алумине са стубићима димензија  $(42 \times 42 \times 12)mm$ . 64–66, 79, 84, 85
- HS7** Хладњак од алумине са стубићима димензија  $(35 \times 35 \times 10)mm$ . 47
- HS8** Хладњак од алумине са стубићима димензија  $(30,5 \times 30,5 \times 6)mm$ . 79, 81–83
- HS9** Хладњак од алумине са стубићима димензија  $(20 \times 20 \times 6)mm$ . 59, 60
- NSA** Алуминијумски хладњак са ребрима димензија  $(14,5 \times 14 \times 6)mm$ . viii, 18, 19, 31, 34–36, 58, 60
- NSB** Алуминијумски хладњак са раширеним ребрима димензија  $(35 \times 35 \times 7, 5)mm$ . 18, 19, 31, 34, 36, 41, 46, 58, 61, 64, 65
- TEG1** Термоелектрични генератор ET-031-10-20. viii, ix, 14, 18, 31, 35–38, 41, 43, 46–48, 58, 60, 61, 64–67
- TEG1a** Термоелектрични генератор ET-031-10-25. 77, 81–83
- TEG2** Термоелектрични генератор CP-08,31,06. 38, 41, 43, 77, 81
- TEG3** Термоелектрични генератор ET-071-08-15. 46–49, 60, 64, 65, 77, 82, 83
- TEG4** Термоелектрични генератор MSPE-071-10-15. 38, 41, 43
- TEG5** Термоелектрични генератор GM200-71-14-16. 46, 47, 49, 60, 64–66, 77, 84
- TEG6** Термоелектрични генератор GM200-127-14-16. viii, x, 46–50, 77, 85, 88, 89, 97

# Глава 1

## Увод

Процес прикупљања енергије из околине и њено претварање у електричну је познат под појмом *energy harvesting*. Када се ради о високим вредностима енергије овај појам се често везује за електране на бази обновљивих извора енергије, док код енергија реда  $W$  и мање он асоцира на самонапајајуће електронске уређаје. Овакви уређаји енергију прикупљају непосредно из окружења и користе је за свој рад без даљег преноса. Енергија из једног или више амбијенталних извора (соларна, топлотна, механичка, хемијска, РФ зрачење) се претвара у електричну помоћу ефикасних минијатурних конвертора и служи за напајање електронских компонената ултра ниске потрошње (слика 1.1). Типичне компоненте су микроконтролери, сензори и РФ примопредајници који су основни елементи чворова бежичних сензорских мрежа (Wireless Sensor Network - WSN). Ови чворови превасходно имају телеметријску функцију, односно врше прикупљање специфичних података из околине, уређују их и прослеђују до централне јединице или других чворова у мрежи. Примене WSN-а су у надгледању различитих величина у животном окружењу, медицини, саобраћају и индустрији тако да постоји потреба за њиховим дугим радним веком без сервисирања [1–4]. Ово усмерава инжењере да напајање чворова са батеријског пребаце у *energy harvesting* домен [5]. Најзаступљенија су фотонапонска решења, где се WSN чворови напајају преко соларних ћелија [6], како на отвореном, тако и у затвореном простору. Механичка енергија може се конвертовати у електричну помоћу три механизма: електростатичког, пиезоелектричног, електромагнетног. На пример, вибрације или притисак, као облици механичког напрезања, изазивају деформације пиезоелектричног материјала што доводи до генерисања напона [7, 8]. Чворови бежичних сензорских мрежа могу се напајати из једног или из комбинације више извора [9–11].

Температурни градијент и топлотни флуks су често присутни у окружењу и погодни су за генерисање електричне енергије неопходне за напајање WSN чворова. Наменски минијатурни термоелектрични генератори (Thermoelectric Generator - TEG) се обично користе за ову врсту конверзије енергије, али се и конвенционални термоелектрични модули (Thermoelectric Module - TEM), који су превасходно намењени грејању/хлађењу, могу успешно применити као извори напајања [12–15]. TEG-ови претварају температурну разлику која постоји између њихових страна у електрични напон користећи Зибеков ефекат. С обзиром да је генерисани напон при температурним разликама од неколико степени Целзијуса реда десетина  $mV$ , он се уводи у коло за складиштење и управљање прикупљеном енергијом преко кога се врши напајање саставних елемената чвора. У погледу ефикасности, после батерија (до 90 %) најбољи



Слика 1.1: Најчешћи извори енергије у *energy harvesting* системима.

однос уложене и добијене снаге показују извори на бази вибрација и РФ зрачења - до 50%. Следе соларне ћелије са ефикасношћу до 24%, док најмању ефикасност показују термоелектрични модули (до 3%) [16, 17]. С друге стране, вишак неискоришћене топлоте је доста присутан у индустрији, тако да се ови модули, иако слабо ефикасни, могу применити као извори напајања за чворове WSN-а.

Са циљем да се пројектују ефикасни самонапајајући WSN чворови са TEG-овима, неопходна је њихова карактеризација базирана на подацима из техничких спецификација уз разматрање различитих радних услова. Карактеризација може бити аналитичка [18], експериментална [12] или нумеричка уз коришћење мултифизичких [19, 20] или симулатора електричних кола [21, 22]. Ефикасан приступ карактеризацији је коришћењем SPICE компатибилних симулатора електричних кола. Код оваквих симулација је неопходно креирати еквивалентни термо-електрични модел самог TEG-а и осталих елемената чвора [23]. Генерално, симулациони модели TEG-ова садрже R или RC кола која представљају термичку отпорност и термичку масу његових елемената док су утицаји појединих термо-електричних ефеката укључени преко контролисаних струјних и напонских извора [24, 25].

Већина постојећих термо-електричних модела TEG-ова је намењена стационарном режиму рада [18, 19, 26]. Осим тога, модели представљени у литератури не разматрају понашање TEM-ова када се користе као генератори унутар комплексних система. Стога је један од предмета истраживања у овој докторској дисертацији креирање SPICE компатибилног модела WSN чвора са TEG/TEM-ом за временски променљиви режим рада. Представљен је једнодимензиони и просторни модел. Истраживање је спроведено у неколико фаза: од развоја појединачних модела TEG-а и хладњака, преко склопа који чине TEG и хладњак до целог WSN чвора. Разматран је компактан чвор реализован са алуминијумским штампаним плочама. Модели су базирани на аналитичким једначинама које описују проток топлоте кроз TEG и остале елементе чвора и њиховим параметрима из техничких спецификација у комбинацији са одговарајућим експерименталним мерењима. Развијени модели су експериментално верификовани и искоришћени за карактеризацију чворова који укључују различите комерцијалне термоелектричне модуле. Разматрани су напон на потрошачу, снага предата потрошачу и ефикасност система при различитим температурним побудама. Посебна пажња је посвећена одређивању времена хладног старта система и максималне температуре његове примене. С обзиром да су карактеристике TEG-ова дефинисане од стране

произвођача, предлог оптимизације система при датим радним условима је усмерен на карактеристике осталих елемената чвора и кола за управљање енергијом.

Битан део сваког самонапајајућег уређаја заснованог на TEG-у јесте хладњак и његовим оптималним избором могу се постићи жељене перформансе. Хладњаци специфичних геометрија (равни, са стубићима или ребрима) и од различитих материјала (алуминијум, керамика алумина, микропорозна керамика или метална пена) могу се користити у оваквим системима [27, 28]. Алуминијумски хладњаци са ребрима су стандардно решење за апликације где се захтева велика површина за одавање топлоте. Хладњаци од алумине се примењују када је потребна висока вредност пробојног напона и добра електромагнетна компатибилност. Хладњаци од микропорозних материјала су дизајнирани за примене где преовладава одвођење топлоте путем природне конвекције унутар ограниченог простора. Микропорозна керамика се користи код равних или хладњака са нископрофилним ребрима које одликују мала дебљина и тежина и елиминисан ефекат антене. Микропорозна структура је особина и недавно представљених нископрофилних хладњака од бакарне пене [29]. Један од предмета истраживања у овој докторској дисертацији је и испитивање утицаја наведених типова хладњака на ефикасност склопова TEG-хладњак намењених самонапајајућим системима, при различитим отпорностима оптерећења. Анализа је базирана на експерименталним мерењима и резултатима нумеричке мултифизичке симулације.

Напон добијен претварањем амбијенталне енергије у електричну треба да се повећа и складишти у одговарајућем резервоару тако да се може користити у условима недовољног прилива енергије из околине. За ту намену развијена су кола за подизање напонског нивоа заснована на Мајснеровом (Meissner) осцилатору, која се реализују дискретно на штампаној плочи или у интегрисаној техници [30, 31]. У овој докторској дисертацији истраживан је овај тип кола, с посебним освртом на његово моделирање и оптимизацију.

Дисертација се састоји од увода, четири поглавља, закључних разматрања, и списка коришћене литературе. У уводном поглављу описан је предмет и дат кратак приказ научног истраживања спроведеног у оквиру дисертације.

У оквиру другог поглавља описани су физички принципи рада и дефинисани битни параметри термоелектричних модула. Осим тога, дати су и резултати експерименталне карактеризације једног термоелектричног модула и литературни преглед примера примене термоелектричних модула као извора напајања у чворовима бежичних сензорских мрежа.

Треће поглавље садржи два потпоглавља. У првом је описан поступак формирања једнодимензионалног SPICE компатибилног модела WSN чвора са TEG-ом за временски променљиви режим рада. Такође, овде су дати резултати карактеризације WSN чвора са различитим TEG-овима добијени формираном SPICE моделом. Просторни SPICE модел WSN чвора са TEG-ом представљен је у другом потпоглављу. Овај модел омогућава симулацију перформанси у стационарном и временском домену. Обухвата саставне неелектричне делове чвора и термоелектрични генератор са укљученим термоелектричним ефектима. Симулациони резултати су упоређени са експерименталним да би се извршила валидација предложеног модела. Модел омогућава карактеризацију чворова бежичне сензорске мреже у погледу ефикасности конверзије енергије.

Четврто поглавље садржи анализу ефикасности низа склопова термоелектрични модул - хладњак намењених самонапајајућим системима. У оквиру ове главе описа-

на је експериментална поставка, поставка симулације, дефинисана је дизајн матрица склопова, дати су и анализирани резултати карактеризације добијени експериментално и симулацијом.

Пето поглавље обрађује коло за подизање вредности напона засновано на Мајснером осцилатору. У оквиру овог поглавља дат је модел за мале сигнале овог кола и резултати његове експерименталне карактеризације.

У закључном разматрању су сумирани резултати истраживања. Истакнут је научни допринос докторске дисертације и предложени правци даљег истраживања. На крају дисертације је дат списак коришћене литературе.

## Глава 2

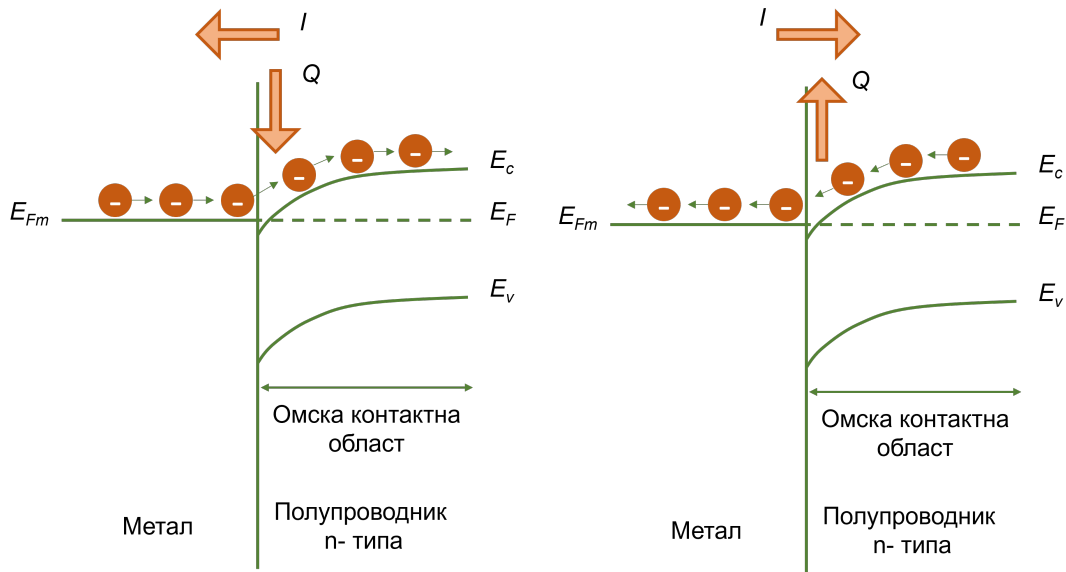
# Термоелектрични модул - ТЕМ

### 2.1 Физички принципи рада и основни параметри

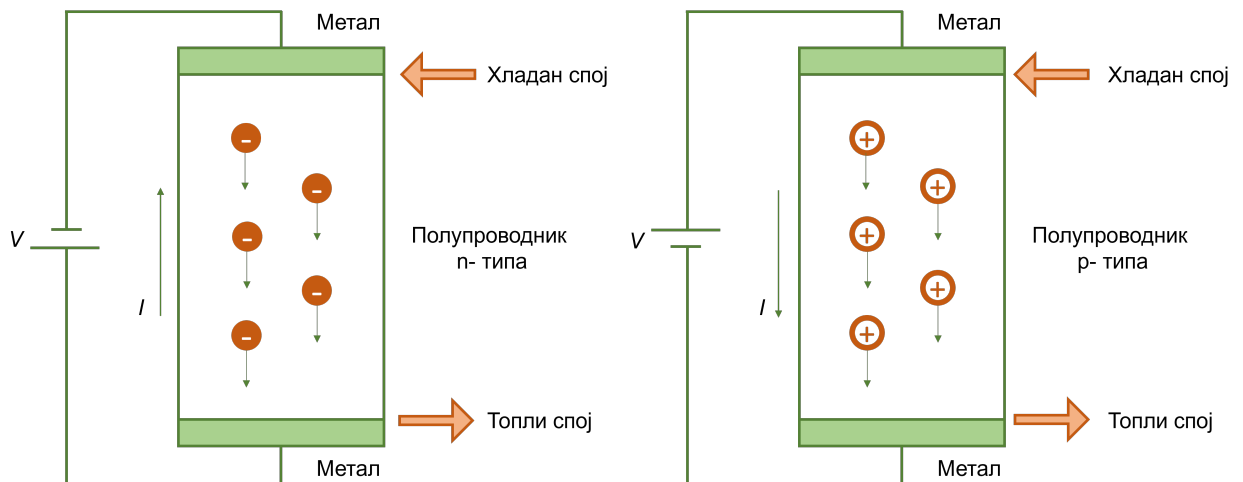
Термоелектрични ефекти (Зибеков, Пелтијев, Џулов и Томсонов) дефинишу везу између термичке и електричне енергије у металима и полупроводницима [32]. У овој дисертацији се разматрају комерцијални термоелектрични модули, познати и као Пелтијеви елементи, који су првенствено намењени за грејање/хлађење. Своју функцију остварују при протицању електричне струје кроз њих услед испољавања различитих термоелектричних ефеката. Разматра се случај када једносмерна струја тече из полупроводника  $n$  типа у метал кроз омски контакт, као што је приказано на слици 2.1. Тада се електрони крећу из метала у проводну зону полупроводника. Струја потиче од електрона који имају енергију блиску Фермијевој енергији у металу  $E_{Fm}$ . Ови електрони прелазе у проводну зону полупроводника и када достигну крај контактне области њихова енергија је у односу на енергију дна проводне зоне  $E_c$  увећана за средњу вредност кинетичке енергије, која износи  $E_k = \frac{3kT}{2}$ , где је  $k$  Болцманова константа, а  $T$  апсолутна температура. Дакле, постоји повећање средње енергије по електрону у контактної области, тако да електрон мора да апсорбује топлоту из околине (енергија вибрација решетке - фонона). Када је смер струје од метала ка полупроводнику  $n$  типа, електрони прелазе из проводне зоне полупроводника на Фермијев ниво метала. Пошто је  $E_{Fm}$  нижи од  $E_c$ , електрон који пролази кроз спој ће губити енергију, која се ослобађа у виду топлоте, као што је приказано на слици 2.1. Може се закључити да, у зависности од смера протока струје, топлота се на споју два различита материјала или апсорбује или ослобађа. Овај ефекат зове се **Пелтијев ефекат**. У случају споја метала и полупроводника  $p$  типа, топлота се апсорбује када струја тече од метала ка полупроводнику, а ослобађа се при протицању струје у другом смеру. Пелтијев ефекат не треба мешати са Џуловим ефектом, који потиче од коначне електричне отпорности материјала  $R$ . **Џулов ефекат** подразумева да услед протицања струје  $I$  кроз материјал долази до дисипације топлоте пропорционалне  $I^2R$ .

Када струја протиче кроз полупроводник са металним контактима на његовима крајевима, један од контаката ће увек апсорбовати топлоту, док ће други увек ослобађати топлоту (слика 2.2). Контакт где се топлота апсорбује ће се охладити (хладан спој), док ће се контакт где се топлота ослобађа, загрејати (топли спој). Хладан спој се може користити за хлађење другог тела, под условом да топлота настала на топлом споју може бити одведена из полупроводника довољно брзо да се онемогући њено пре-

ношење до хладног споја. С друге стране, због коначне отпорности полупроводника увек ће постојати Џулов ефекат, односно загревање узорка.



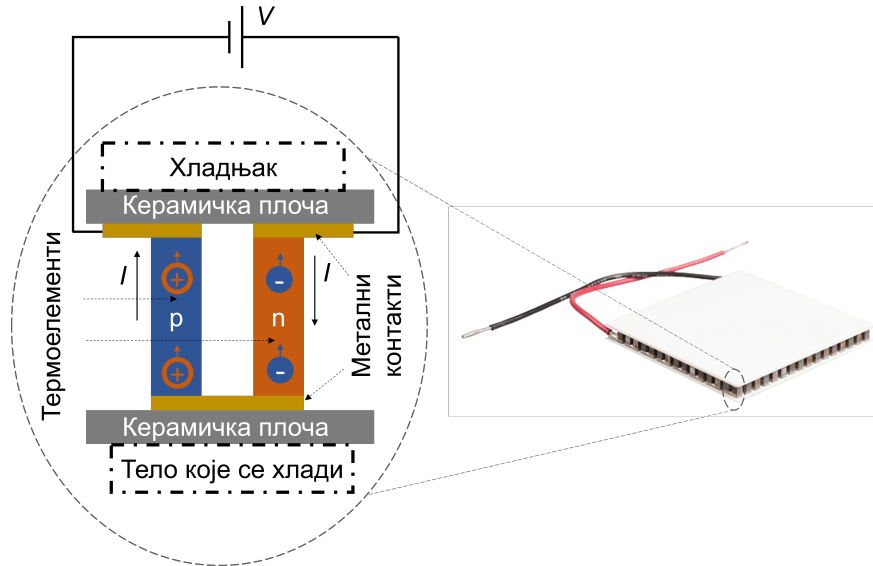
Слика 2.1: Зонски дијаграм споја метала и полупроводника уз објашњење Пелтијевог ефекта, на основу [32].



Слика 2.2: Илустрација Пелтијевог ефекта, на основу [32].

Анализира се основна структура ТЕМ-а са слике 2.3 коју чине два полупроводничка елемента  $p$ - и  $n$ - типа (термоелементи) који су повезани преко металних контаката тако да чине термоелектрични пар. Најчешће коришћени полупроводнички материјали су допирани легуре бизмут-телурид, бизмут-селенид, антимон-телурид, док се за металне контакте најчешће користи бакар. Због структуре овог склопа, смер протоцања струје ће изазивати супротне ефекте на његовим крајевима. Струја која тече кроз  $n$  тип полупроводника до заједничке металне електроде изазива апсорпцију топлоте, која хлади овај спој, а тиме и метал. Иста струја затим улази у полупроводник  $p$  типа и при томе изазива апсорпцију топлоте на споју с металом чиме се иста метална електрода додатно хлади. Други крајеви полупроводника су топли спојеви. На њих се поставља хладњак да би се одвела топлота и на тај начин спречило њено

преношење кроз полупроводнике према хладним спојевима. На металне контакте се постављају керамичке плоче које су електрични изолатори, али добри проводници топлоте. Комерцијални ТЕМ-ови (слика 2.3) се састоје из великог броја редно повезаних термоелектричних елемената  $n$  и  $p$  типа, ради повећања ефикасности хлађења.



Слика 2.3: ТЕМ у улози уређаја за хлађење: унутрашња структура термоелектричног пара и изглед компоненте.

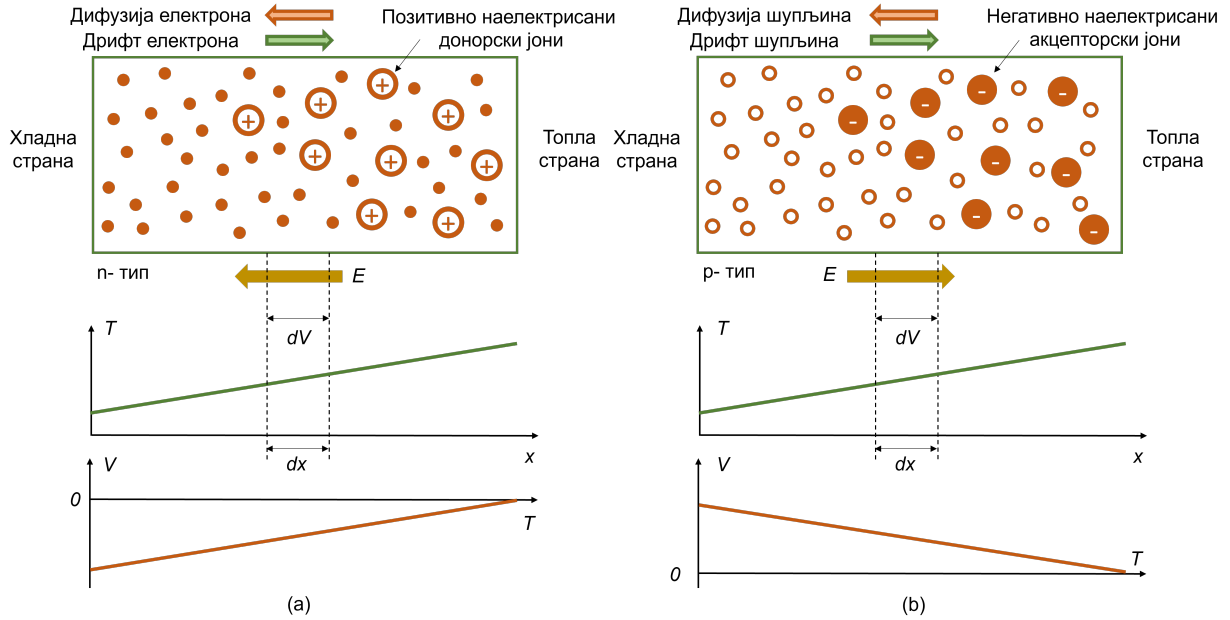
Међутим, комерцијални термоелектрични модули користе се и као термоелектрични генератори напона (струје). Услед примењене температурне разлике на крајевима ТЕМ-а биће генерисан напон, као последица **Зибековог ефекта**. Разматра се полупроводник  $n$ - типа чији се крајеви налазе на различитим температурама, тако да постоји температурна разлика. Десни крај је на вишој температури (топла страна), а леви на нижој (хладна страна) као што је означено на слици 2.4(а). Већински носиоци наелектрисања су електрони, док се шупљине као мањински носиоци занемарују. На топлој страни налази се много електрона који имају веће средње брзине него на хладној страни. Средња кинетичка енергија електрона у проводној зони је  $m_e^*v^2/2 = 3kT/2$ , где је  $m_e^*$  ефективна маса електрона а  $v$  средња брзина електрона. Сходно томе, електрони дифундују од топле ка хладној страни и остављају за собом позитивно наелектрисане донорске јоне на топлој страни. То доводи до стварања унутрашњег електричног поља, тј. напона, као што је илустровано на слици 2.4. Равнотежа се постиже када се дифузија електрона од топле ка хладној страни избалансира њиховим дрефтом (од хладне ка топлој страни) изазваним унутрашњим пољем. Укупна струја је једнака нули. Зибеков коефицијент  $\alpha_x$  дефинише овај ефекат у смислу напона који се јавља као последица температурне разлике:

$$\alpha_x = \frac{dV}{dT}. \quad (2.1)$$

Знак Зибековог коефицијента, по конвенцији, је знак напона који се јавља на хладној страни у односу на топлу страну. Дакле,  $\alpha_n$  за  $n$  тип полупроводника је негативан јер се електрони акумулирају на хладној страни као што је приказано на слици 2.4(а). У полупроводнику  $p$ - типа, разматрамо само шупљине као већинске носиоце наелектрисања. Температурна разлика доводи до дифузије шупљина од топле ка хладној страни,



као што је приказано на слици 2.4(b). Услед дифузије, на топлој страни остају негативно наелектрисани јони акцептора. Зибеков коефицијент има позитивни знак, тј. генерисани напон супротног је знака у односу на  $n$ -тип полупроводника при истој температурној разлици. Треба напоменути да Зибеков ефекат постоји и код метала, али је много израженији код полупроводника.



Слика 2.4: Илустрација уз објашњење Зибековог ефекта, на основу [32]: (а)  $n$ -тип полупроводника, (б)  $p$ -тип полупроводника.

Зибеков коефицијент за  $n$ -тип полупроводника биће изведен у наставку. Укупна густина струје електрона за структуру на слици 2.4(а) треба да буде једнака нули, тако да важи  $J_n = J_{drift} + J_{diff} = 0$  [32]. Дрифтовска компонента густине струје је:

$$J_{drift} = en\mu_n E_x = en\mu_n \left( -\frac{dV}{dx} \right), \quad (2.2)$$

где је  $e$  елементарно наелектрисује,  $n$  концентрација електрона,  $\mu_n$  покретљивост електрона, док је  $E_x$  јачина електричног поља, односно градијент напона дуж  $x$  осе. Услед постојања разлике у густини слободних носилаца наелектрисује, настаје њихово кретање са места више концентрације ка месту ниже концентрације ( $-dn/dx$ ), што проузрокује дифузиону густину струје:

$$J_{diff} = e \frac{d(D_n n)}{dx}, \quad (2.3)$$

где је  $D_n$  дифузиони коефицијент електрона. Тако је укупна густина струје:

$$J_n = J_{drift} + J_{diff} = en\mu_n \left( -\frac{dV}{dx} \right) + e \frac{d(D_n n)}{dx} = 0. \quad (2.4)$$

Под претпоставком да постоји промена напона  $dV$  дуж  $dx$  и да је промена температуре  $dT$  као на слици 2.4, једначина (2.4) може да се помножи са  $dx$  и подели са  $dT$ , тако

да се добија Зибекков коефицијент за  $n$  тип полупроводника:

$$\alpha_n = \frac{dV}{dT} = \frac{1}{n\mu_n} \frac{d(D_n n)}{dT}. \quad (2.5)$$

Дате величине су температурно зависне према следећим законитостима:  $\mu_n = A_\mu T^r$ ,  $D_n = \frac{\mu_n kT}{e} = \frac{A_\mu k}{e} T^{r+1}$ , где су  $A_\mu$  температурно независни параметар покретљивости а  $r$  индекс температурне зависности. Концентрација електрона је  $n = N_C e^{-\frac{E_c - E_F}{kT}} = BT^{3/2} e^{-\frac{E_c - E_F}{kT}}$ , где је  $B$  температурно независан параметар концентрације,  $E_c$  енергија дна проводне зоне, а  $E_F$  Фермијева енергија у полупроводнику. Коришћењем датих зависности и диференцирањем једначине (2.5) по температури, за вредност Зибековог коефицијента добија се:

$$\alpha_n = -\frac{dV}{dT} = -\frac{k}{e} \left[ \frac{E_c - E_F}{kT} + \frac{5}{2} + r \right]. \quad (2.6)$$

Одавде је јасно да је вредност Зибековог коефицијента негативна и да зависи од концентрације донорских примеса у полупроводнику ( $N_d$ ) преко  $\frac{E_c - E_F}{kT}$ . Коришћењем сличних чињеница за шупљине у полупроводнику  $p$  типа добија се вредност Зибековог коефицијента:

$$\alpha_p = \frac{dV}{dT} = \frac{k}{e} \left[ \frac{E_F - E_v}{kT} + \frac{5}{2} + r \right], \quad (2.7)$$

где је  $E_v$  енергија врха валентне зоне. Такође, јасно је да ће код  $p$  типа полупроводника вредност Зибековог коефицијента бити позитивна и зависити од концентрације акцепторских примеса  $N_a$ . У литератури је познато да индекс  $r$  може имати променљиву вредност у зависности од температурног опсега и концентрације примеса [32].

У наставку се анализира комерцијални термоелектрични модул као генератор (слика 2.5). Када се термоелектрични пар изложи температурном градијенту (с једне стране структуре је температура  $T_{hot}$  – топла страна, а с друге стране је температура  $T_{cold}$  - хладна страна) генерисаће се Зибекков напон:

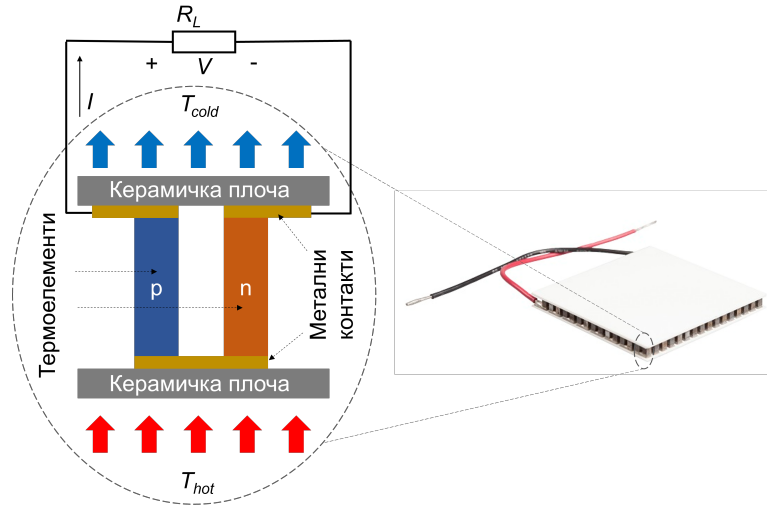
$$V = \alpha \Delta T = \alpha (T_{hot} - T_{cold}), \quad (2.8)$$

где је  $\alpha = \alpha_p - \alpha_n$  – еквивалентни Зибекков коефицијент за термоелементе  $p$ - и  $n$ -типа, а  $\Delta T$  је температурна разлика. Конвенционални ТЕМ-ови садрже велики број термоелектричних парова (слика 2.5) који су електрично редно повезани преко металних контаката, а термички паралелно преко керамичких плоча. Метални контакти првог и последњег термоелемента у низу представљају изводе ТЕМ-а као генератора (ТЕГ). Генерисани напон отвореног кола ТЕГ-а при температурним разликама од неколико десетина степени Целзијуса је реда стотина mV, тако да је приликом његовог коришћења за напајање уређаја увек потребно коло за управљање електричном енергијом.

Термичке отпорности керамичких плоча утичу на промену расподеле температуре унутар ТЕГ-а (слика 2.6), а тиме и на вредност генерисаног напона  $V_{TEG}$ :

$$V_{TEG} = N \alpha \Delta T' = N \alpha \frac{R_{thTEG}}{R_{thTEG} + 2R_{thP}} \Delta T, \quad (2.9)$$

где је  $N$  број термоелектричних парова. Термичке отпорности свих термоелектричних



Слика 2.5: Термоелектрични модул као генератор: унутрашња структура термоелектричног пара и изглед компоненте.

парова  $R_{thTEG}$  и керамичких плоча  $R_{thP}$  су:

$$R_{thTEG} = \frac{l}{2N\lambda A}, \quad (2.10)$$

$$R_{thP} = \frac{l_P}{\lambda_P A_{TEG}}, \quad (2.11)$$

где су  $l$  дужина термоелемента,  $A$  површина његовог попречног пресека,  $l_P$  дебљина керамичке плоче,  $A_{TEG}$  спољашња површина TEG-а (истовремено и керамичких плоча),  $\lambda$  специфична термичка проводност термоелектричног материјала и  $\lambda_P$  специфична термичка проводност керамичког материјала.

Електрична отпорност свих термоелектричних парова чини унутрашњу отпорност TEG-а  $R_{TEG}$ :

$$R_{TEG} = 2N\rho\frac{l}{A}, \quad (2.12)$$

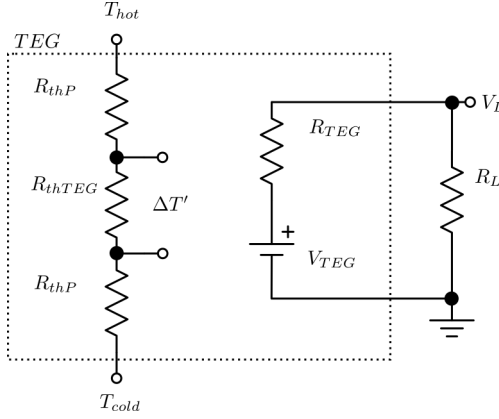
где је  $\rho$  специфична електрична отпорност термоелектричног материјала и ова величина је температурно зависна. Када је на TEG прикључено оптерећење  $R_L$ , кроз њега ће протицати струја  $I_L$ :

$$I_L = \frac{V_{TEG}}{R_{TEG} + R_L}. \quad (2.13)$$

Напон на потрошачу ће бити:  $V_L = V_{TEG} - R_{TEG}I_L$ , док је снага коју TEG предаје потрошачу једнака  $P_L = V_L I_L$ .

У условима протицања струје кроз TEG, долази до изражаја и Пелтијев ефекат који ефективно смањује вредност генерисаног напона јер доводи до смањења температуре  $T_{hot}$  и пораста температуре  $T_{cold}$  пропорционално јачини струје. Услед тога је овај ефекат више изражен при малим вредностима оптерећења  $R_L$ .

Фактор ефикасности  $Z$  (енгл. Figure of merit) је параметар који дефинише способност термоелектричног материјала да конвертује топлоту у електричну снагу и за



Слика 2.6: Еквивалентно термо-електрично коло ТЕГ-а са прикљученим оптерећењем.

један термоелектрични пар ТЕГ-а може се изразити као:

$$Z = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{4\rho\lambda} = \frac{\alpha^2}{4\rho\lambda}. \quad (2.14)$$

Најбољи термоелектрични материјали имају велику вредност Зибековог коефицијента, и ниску вредност специфичне електричне отпорности и термичке проводности. Максимална ефикасност ТЕГ-а  $\eta_{max}$  при датој температурној разлици може се изразити као [33]:

$$\eta_{max} = \left(1 - \frac{T_{cold}}{T_{hot}}\right) \frac{\sqrt{1 + ZT_{avg}} - 1}{\sqrt{1 + ZT_{avg}} + \frac{T_{cold}}{T_{hot}}} \quad (2.15)$$

где је  $T_{avg} = (T_{hot} + T_{cold})/2$  средња вредност температура на топлој и хладној страни.

Предности ТЕГ-а као извора напајања у чворовима бежичних сензорских мрежа су то што нема покретних делова, мале је сложености, тихо ради, ниски су трошкови одржавања и нема лоших утицаја на животну средину [14]. Коришћењем ТЕГ-а могуће је генерисати чисту енергију на једноставан и поуздан начин за потрошаче ултраниске потрошње.

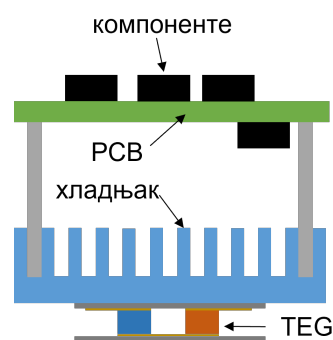
## 2.2 Примена термоелектричних модула као извора напајања у чворовима бежичних сензорских мрежа

Интензивна примена термоелектричних модула у различитим индустријама доводи до проширења тржишта ових компонената. Према резултатима истраживања објављеним у студији [34], годишња стопа раста потражње за ТЕМ-овима биће 7,3 % од 2021. до 2027. године, те се очекује да ће до тада тржиште ТЕМ-ова бити вредно 866 милиона долара. Стандардни ТЕМ-ови (слика 2.5) су остварили значајно већи удео на тржишту у 2020. години, у поређењу са микро ТЕМ-овима реализованим у технологији танких филмова. Захваљујући развоју 5G телекомуникационих система и аутомобилске индустрије прогнозира се да ће у будућности на тржишту бити доминантни микро

ТЕМ-ови [34]. Флексибилни микро ТЕМ-ови омогућиће комерцијализацију носивих микросистема који топлотну енергију човека конвертују у електричну [35]. Савремени чворови бежичних сензорских мрежа имају потрошњу од око  $100 \mu\text{W}$  до  $10 \text{mW}$ . С обзиром на потребну електричну енергију и дуг животни век, ТЕМ-ови су погодни извор напајања у оваквој врсти микросистема.

Чворови WSN-а могу бити пројектовани тако да ТЕГ и хладњак буду одвојено или део штампане плоче. У раду [36] је описан бежични сензорски чвор за примену у индустрији, конкретно ваљаоници. Штампана плоча са ТЕГ-ом CP20151, димензија  $(15 \times 15 \times 5)\text{mm}$ , колом за управљање енергијом LTC3108, температурним сензором, микроконтролером и Xbee трансмитерским колом налази се у сендвич структури између две металне плоче. Једна метална плоча се шрафи на крај вруће цеви, а друга метална плоча је окренута ка околини, тако да је температурна разлика на крајевима ТЕГ-а  $7,5^\circ\text{C}$ . Систем не поседује додатни хладњак. Показано је да од тренутка постављања система на извор топлоте, време за прикупљање енергије потребне за исправан рад микроконтролера је 3 минута. Максимална добијена снага је  $0,14 \text{mW}$  и користи се за аналогно-дигиталну конверзију података са сензора, буђење трансмитерског кола и слање пакета од 10 бајтова података.

У раду [37] представљен је систем за прикупљање енергије са колом за управљање енергијом намењен за напајање чвора бежичне сензорске мреже у затвореном простору. Систем се може монтирати на вруће цеви инсталација за грејање и топлу воду, и има димензије  $(5 \times 6 \times 7)\text{cm}$ . Искоришћен је ТЕГ прилагођеног дизајна, димензија  $(50 \times 50 \times 3,4)\text{mm}$ , са 127 термоелектричних парова. Преко ТЕГ-а постављен је хладњак, а у хладњак су монтирани метални носачи штампане плоче (слика 2.7). На штампаној плочи (PCB - Printed Circuit Board) се налази коло DC/DC конвертора и то: charge-pump коло ултраниског стартног напона S882Z-18, boost прекидачко конвертерско коло TPS61020 и суперкондензатори за складиштење енергије. Експериментално је показано да ће ТЕГ генерисати  $250 \text{mV}$ , колико је потребно за почетак рада charge-pump кола, при температури топле стране од  $60^\circ\text{C}$ . Када ово коло генерише напон од  $0,9 \text{V}$ , укључује се boost коло које на излазу даје напон потребан за напајање чвора WSN-а од  $3,3 \text{V}$ . Максимална излазна снага кола за управљање енергијом је  $1,1 \text{mW}$ .



Слика 2.7: Систем за напајање чвора сензорске мреже помоћу ТЕГ-а, адаптација на основу [37].

Аутори у [18] нису описали изглед чвора WSN-а, али су вршили експеримент када се користи ТЕГ TMG-127-1.0-2.5 са 127 термоелектричних парова и хладњак у комбинацији са колом за управљање енергијом TPS60303. Показали су да је потребна

температурна разлика од  $34^{\circ}\text{C}$  да би се стартовало коло за подизање напона. Напон TEG-а при коме почиње да ради boost коло је  $900\text{ mV}$ , а при том се на излазу тог кола добија  $3\text{ V}$ . Коло чвора WSN-а за читавање података са пасивног сензора, обраду тих података и слање путем РФ модула троши  $31,8\text{ mW}$ .

Прототип energy harvesting система за мерење температуре са могућношћу самосталног покретања и побољшаном ефикасношћу описан је у [38]. Коришћен је TEG са 127 термоелектричних парова, у комбинацији са комерцијалним и специјално развијеним двостепеним колом за подизање напона, који може да покрене систем са  $84\text{ }\mu\text{W}$  улазне снаге при температурној разлици од  $2,6^{\circ}\text{C}$  при чему је потребно  $196\text{ s}$  за хладан старт. Повећање температурне разлике до  $15^{\circ}\text{C}$  омогућава  $4,8\text{ mW}$  снаге.

Прототип сензорског система заснованог на TEG-у TEC1-12706, за примене у спољашњој средини дат је у раду [39]. Систем користи сунчеву енергију коју преко сочива концентрише у металну плочицу која је спојена са топлом страном TEG-а. С друге стране TEG-а је хладњак. За управљање електричном енергијом користи се коло LTC3105, које при улазном напону од  $250\text{ mV}$  генерише излазни напон довољан за напајање сензорског система заснованог на Ардуину. Систем поседује и коло за пуњење батерије и батерију. Прототип је тестиран током целог дана, када су различити интензитети сунчевог зрачења. Експериментално је утврђено да је средња добијена енергија  $133,6\text{ mW}$ .

Чвор WSN-а за мерење температуре у индустрији, на нивоу прототипа, описан је у [40]. Систем садржи два TEG-а TGM287-1.0-1.3, који су преко бакарних плочица својом топлом страном постављени на топли зид. Бакарне плочице постављене су и између хладне стране TEG-а и бакарног хладњака. Око TEG-ова коришћен је аерогел да спречи пренос топлоте на хладну страну TEG-ова. TEG-ови су проводницима спојени са остатком система: колом за управљање електричном енергијом, суперкондензатором, микроконтролерским системом. Аутори су показали да се при температурној разлици од  $14^{\circ}\text{C}$  генерише довољан напон TEG-ова за покретање кола LTC3108. Добијена укупна снага при тој температурној разлици је  $13,1\text{ mW}$ .

Још један индустријски чвор WSN-а презентован је у [41]. Систем заснован на акцелерометру се користи за детекцију истрошености оштрице тестере. TEG QC-32-0.6-1.2 се монтира на машину где постоји дисипација топлоте, док се сензорски део налази на носачу оштрице. WSN чвор може да испоручи  $1,8\text{ mW}$  снаге при температурној разлици од  $19^{\circ}\text{C}$ , при чему је потребно време хладног старта  $58\text{ s}$  од тренутка укључења система тестере. Користи се термоелектрични модул са 32 термоелектрична пара.

У раду [42] представљен је чвор WSN-а базиран на TEG-у код кога се енергија добија из врло малих температурних разлика на међуповршини земља-ваздух. TEG се налази на носачу који се побија у земљу, а остатак система је одвојен на посебној штампаној плочи. Аутори су показали да је максимална добијена енергија током дана  $27,2\text{ mW}$ , а током ноћи  $6,3\text{ mW}$ .

Сензорски систем са 3 TEG-а GM200-71-14-16 представљен је у раду [43]. TEG-ови су постављени један преко другог, при чему се на последњем налази хладњак. Систем се поставља на руку корисника и користи температурну разлику између коже корисника и околине за добијање електричне енергије. Напон са TEG-ова води се у двостепени систем за управљање енергијом. После  $65\text{ s}$  од тренутка постављања система TEG-ова може се добити  $1,62\text{ mW}$  снаге при температурној разлици од  $5^{\circ}\text{C}$ .

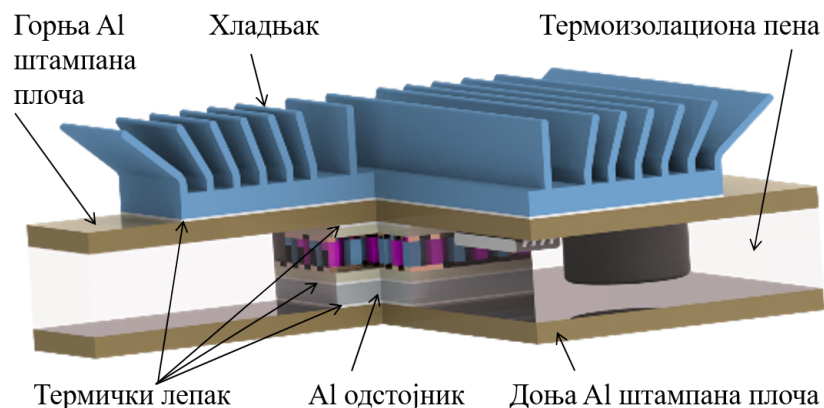
Самонапајајући чвор бежичне сензорске мреже за праћење параметара животне

средине презентован је у раду [44]. Овај систем има специјално пројектовани 3D термоелектрични генератор заснован на силицијуму са 127 термоелектричних парова. Поред посебног дизајна TEG-а аутори су представили и сопствени дизајн интегрисаног кола за управљање енергијом. У раду је показано да је напон хладног старта кола 200 mV, те да се добија излазна снага од 34 mW при температурној разлици од 70 °C.

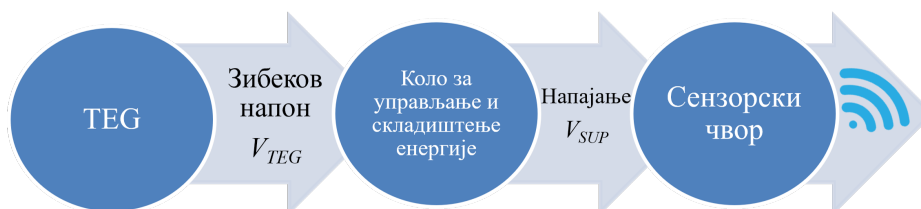
Развијени су и хибридни чворови WSN-а који садрже батеријско и energy harvesting напајање, као што је презентовано у [45]. Овај систем се састоји из 4 редно повезана TEG-а који се налазе између алуминијумске плоче преко које се доводи топлота и цеви кроз коју кружи расхладна течност. Циркулација расхладне течности се врши коришћењем DC пумпе. Коло за управљање електричном енергијом и сензорски чвор су удаљени од energy harvesting система. Описани систем при температурној разлици од 23 °C може да прикупи 450 mW, што је мање од потрошње пумпе, те овакав систем служи само за допуну батерије.

У раду [46] представљен је термоелектрично напајан чвор WSN-а који садржи PIC микроконтролер који врши аквизицију вредности температуре са сензора и шаље податке преко РФ модула. Чвор је реализован у компактној форми коришћењем штампаних плоча (PCB) са алуминијумским језгром и TEM-ом ET-031-10-20 (TEG1) као генератором (слика 2.8)[129,130]. Овај TEG садржи 31 термоелектрични пар. Укупне димензије чвора WSN-а су (52 × 35 × 17,6) mm. Доња штампана плоча користи се као колектор топлоте за топлу страну TEG-а, а горња за одвођење топлоте са хладне стране. PCB са алуминијумским језгром обезбеђује равномернију расподелу температуре у поређењу са PCB-ом од FR-4 материјала [47]. На горњем PCB-у монтиран је нископрофилни алуминијумски хладњак да обезбеди бољи пренос топлоте ка околини. Алуминијумски одстојник је постављен између доње штампане плоче и TEG-а да би компензовао разлику у висинама коришћених електронских компонената. Електронске компоненте система смештене су на горњем PCB-у, док је простор између штампаних плоча испуњен термоизолаторском пеном да би се смањила нежељена размена топлоте. Температурни сензор се налази на унутрашњој страни доње штампане плоче. Термички лепак се користи да би се добила добра механичка и термичка веза између делова система.

Блок дијаграм оваквог чвора бежичне сензорске мреже приказан је на слици 2.9. Поред TEG-а, електронски део чвора чини блок за управљање и складиштење електричне енергије базиран на *boost* колу LTC3108 са трансформатором односа трансформације 1:100 на улазу, два тантална кондензатора од 220  $\mu$ F као примарни резервоари енергије и суперкондензатор од 0,2 F као допунски (backup) резервоар. Велики backup кондензатор се користи да напаја чвор WSN-а када извор топлоте није у могућности да посредством TEG-а генерише напон потребан за функционисање кола за подизање напона. Други делови чвора WSN-а су температурни сензор, микроконтролер PIC16F684 за прикупљање измерених података и 434 MHz РФ модул за бежични пренос података. Чвор је пројектован да обезбеди поуздан хладни старт. Експериментално је показано да је минимална температурна разлика између извора топлоте и околине од  $\Delta T = 13,5$  °C потребна да би TEG генерисао напон од 40 mV, при коме boost коло даје напон довољан за рад система, и при чему је време хладног старта 90 s. При температурној разлици од 25 °C ово време скраћује се на 20 s и тада је прикупљена снага 2,04 mW. За описани чвор WSN-а развијен је модел и урађене су FEM електро-термичке стационарне симулације [20,131]. У овој дисертацији биће коришћен описани компактан чвор WSN-а са термоелектричним модулом.



Слика 2.8: Попречни пресек компактног термоелектрично напајаног чвора бежичне сензорске мреже, адаптација на основу [46,129,130].



Слика 2.9: Блок дијаграм компактног термоелектрично напајаног чвора бежичне сензорске мреже.

У табели 2.1 дат је упоредни преглед најбитнијих карактеристика различитих чворова бежичних сензорских мрежа са TEG-ом као извором напајања. Системи који су реализовани као компактни уређаји користе TEG-ове мањих површина са мањим бројем термоелектричних парова, за разлику од система који су урађени на нивоу прототипа. Најзаступљеније коло за подизање напона и управљање електричном енергијом је LTC3108 компаније Analog Devices. Овом колу потребан је улазни напон од 20 mV - 50 mV да би стартовало и на излазу дало максимално 5 V. У зависности од примене чвора WSN-а и доступне температурне разлике, максималне добијене снаге су претежно реда неколико mW.



Табела 2.1: Упоредни преглед карактеристика чворова WSN који користе TEG као извор напајања.

| Реф. | Опис кола  | Димензије TEG-а<br>(L x W x H)<br>mm | Број<br>термоелектричних<br>парова TEG-а | Кола за<br>управљање<br>електричном<br>енергијом<br>(PWR MNG) | Минимални<br>напон за<br>стартовање<br>PWR MNG<br>кола<br>(mV) | Максимална<br>снага при<br>одређеној<br>температурној<br>разлици<br>(mW) |
|------|--|--------------------------------------|--|---|--|--|
| [46] | Компактан чвор                                   | 15×15×4,3                            | 31                                       | LTC3108   | 40   | 2,04 @ 25°C  |
| [36] | сензорске мреже                                  | 15×15×5                              | 31                                       | LTC3108   | 50   | 0,14 @ 7.5°C   |
| [41] | Дистрибуиран<br>чвор сензорске мреже             | 8×8×2,6                              | 32                                       | LTC3107   | 20   | 1,80 @ 19°C  |
| [37] | Систем TEG-а и<br>кола за управљање<br>енергијом | 50×50×3,4                            | 127                                      | S88ZL-18<br>TPS61020  | 250  | 1,10 @ 40°C  |
| [18] |  | 30×30×4,3                            | 127                                      | TPS60303  | 900  | 31,8 @ 45°C  |
| [39] | Прототип чвора                                   | 40×40×4                              | 127                                      | LTC3105   | 250  | 133,6  |
| [40] | сензорске мреже                                  | 40×40×3,6                            | 2×287                                    | LTC3108   | 50   | 13,1 @14°C   |
| [43] |  | 30×30×3,4                            | 3×71                                     | LTC3108<br>BQ25504  | 20   | 1,62 @5°C  |

## 2.3 Експериментална карактеризација комерцијалног термоелектричног модула са аспекта површина загревања и хлађења

До преноса топлоте долази када две површине имају различите температуре; тада се топлотна енергија преноси са топлије на хладнију површину. Што је температурна разлика већа, биће већа количина топлоте која се преноси. Постоје три начина преноса топлоте: провођење (кондукција), струјање (конвекција) и зрачење (радијација) [48]. У зависности од особина система кроз који се преноси топлота, најчешће се преношење врши комбинацијом ова три начина.

Пренос топлоте провођењем условљен је атомима који своје вибрације преносе суседним атомима. Количина топлоте која се пренесе провођењем  $Q_p$  је:

$$Q_p = \frac{\lambda S}{x} \Delta T, \quad (2.16)$$

где је  $\lambda$  специфична термичка проводност материјала,  $S$  контактна површина нормална на правац простирања топлоте,  $x$  дебљина материјала кроз који се преноси топлота и  $\Delta T$  температурна разлика. Инжењерска пракса налаже да приликом пројектовања система где постоји пренос топлоте провођењем све контактне површине буду глатке и равне и да између делова система треба користити термички лепак или друге материјале за термичку везу [28].

Струјање је пренос топлотне енергије са чврстог тела ка покретном флуиду. Ако је температура тела већа од температуре флуида, флуид се загрева, смањује се његова густина и он струји наврше. Слично, ако је температура тела мања од температуре флуида, флуид се хлади и због повећања његове густине, струји наниже. Овај процес још се назива природно струјање. Постоји и принудно струјање, када се флуид присилно креће. Количина топлоте која се пренесе струјањем  $Q_s$  је:

$$Q_s = hS(T_x - T_f), \quad (2.17)$$

где је  $h$  коефицијент преноса топлоте,  $S$  површина са које се преноси топлота,  $T_x$  температура површине са које се топлота преноси и  $T_f$  температура флуида.

Зрачење је пренос топлотне енергије у облику електромагнетних таласа између две површине на различитим температурама. Количина топлоте која се пренесе зрачењем  $Q_z$  је:

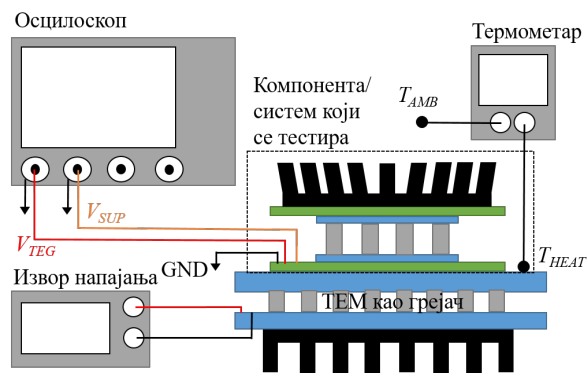
$$Q_z = e_m \sigma S (T_x^4 - T_{AMB}^4), \quad (2.18)$$

где је  $e_m$  емисивност материјала,  $\sigma$  Stefan-Boltzmann-ова константа,  $S$  површина са које топлота зрачи,  $T_x$  температура површине која зрачи и  $T_{AMB}$  температура околине. Показано је да се код система пројектованих да раде у условима природног струјања на нивоу мора, око 70 % топлоте преноси природним струјањем, а 30 % зрачењем [28]. На вишим надморским висинама, почиње да доминира процес зрачења (чак до 90 %).

У литератури су доступни значајни резултати експерименталне карактеризације термоелектричних модула. Истраживање представљено у [49] показује да је потребно повезати два термоелектрична модула редно да би се добио већи напон, док се веће вредности струје добијају ако се модули повежу паралелно. Такође, термоелектрични

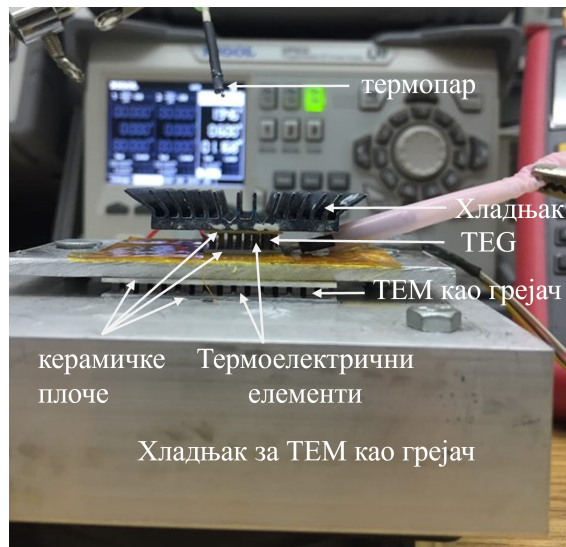
модули повезани редно даће веће вредности снаге него модули повезани паралелно. На основу експерименталне карактеризације могу се поставити модели за мултифизичку симулацију система са термоелектричним модулима [20]. Аутори су у истраживању [50] оптимизовали запремину TEG-а са и без хладњака, повезаног на оптерећење, са циљем постизања максималне прикупљене енергије.

У овој дисертацији урађена је експериментална карактеризација комерцијалног термоелектричног модула у улози TEG-а, при чему је мерен напон отвореног кола при две различите површине извора топлоте и два различита хладњака. Блок шема експерименталне поставке дата је на слици 2.10. Карактерисан је комерцијални термоелектрични модул ET-031-10-20 [51] (TEG1), димензија  $(15 \times 15 \times 4,3)\text{mm}$  у комбинацији са хладњаком са усправним ребрима димензија  $(14,5 \times 14 \times 6)\text{mm}$  - хладњак HSA, као и са хладњаком са закошеним ребрима - хладњак HSB, димензија  $(35 \times 35 \times 7,5)\text{mm}$  (слика 2.11). Два TEM-а су коришћена као извори топлоте: један исте површине као TEG1 који се тестира - извор топлоте А и други са површином  $40\text{mm} \times 40\text{mm}$  - извор топлоте Б. У случају извора топлоте А, пренос топлоте до TEG-а се одвија процесом провођења (кондукције), док у случају извора топлоте Б, поред провођења, топлота се преноси и процесом природне конвекције. Извор топлоте се напаја струјом од  $0,5\text{--}2\text{ A}$  из лабораторијског програмабилног DC извора Agilent E3634A. Велики алуминијумски хладњак се користи да одведе топлоту са хладне стране TEM-а као грејача. Термопарови су коришћени за мерење температуре топле стране TEG-а и температуре околине. Напон отвореног кола током времена снимљен је коришћењем дигиталног осцилоскопа Tektronix DPO4034. Зависност напона у функцији времена снимљена је за три нагло примењене температурне разлике између топле стране TEG-а и околине:  $15^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$  и  $25^\circ\text{C}$ .



Слика 2.10: Блок шема експерименталне поставке за карактеризацију комерцијалног TEM-а у улози TEG-а.

Електрични и термички параметри разматраног TEG-а су приказани у табели 2.2. За  $T_{cold} = 298\text{ K}$  и  $T_{hot} = 323\text{ K}$  теоријска вредност стационарног напона отвореног кола је  $V_{TEG} = 306,9\text{ mV}$ , док је  $T_{avg} = 310,5\text{ K}$ , а вредност  $ZT_{avg} = 0,712$ . На основу једначине (2.15), при датој температурној разлици, максимална ефикасност TEG-а је  $1,06\%$ , док је при  $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ ,  $\eta_{max} = 0,86\%$  и при  $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ ,  $\eta_{max} = 0,64\%$ . Треба напоменути да су параметри специфична електрична отпорност, специфична термичка проводност, као и еквивалентни Зибеков коефицијент температурно зависни, тако да су аналитички добијени резултати само индикативни. На основу једначина (2.10) и (2.11), коришћењем података из табеле 2.2, укупна термичка отпорност разматраног



Слика 2.11: Фотографија експерименталне поставке за карактеризацију комерцијалног ТЕМ-а у улози ТEG-а.

ТEG-а је  $22 \text{ K W}^{-1}$ . Хладњак HSA на основу техничких спецификација има термичку отпорност  $12 \text{ K W}^{-1}$ , док је за хладњак HSB  $11 \text{ K W}^{-1}$ .

На слици 2.12 је приказана зависност напона отвореног кола ТEG-а са хладњакком HSA у функцији времена за примењене три температурне разлике, док је иста зависност за ТEG са хладњакком HSB дата на слици 2.13. У оба случаја, коришћен је извор топлоте А. Основа, као и запремина хладњака HSA су мање него код хладњака HSB. У оба случаја, као што је очекивано, веће вредности напона се генеришу при већим температурним разликама. Међутим, при истој температурној разлици ( $25^\circ\text{C}$ ), напон који генерише ТEG са хладњакком HSA је мањи ( $164 \text{ mV}$ ) у поређењу са напоном добијеним помоћу ТEG-а са хладњакком HSB ( $220 \text{ mV}$ ). Ово се објашњава чињеницом да хладњак HSB има мању термичку отпорност и омогућава већу температурну разлику на ТEG-у, а тиме и већи напон. Поређењем резултата са слике 2.12 и 2.13, такође се може закључити да генерисани напон на ТEG-у са хладњакком HSA опада много брже током времена у односу на напон на ТEG-у са хладњакком HSB. Ово се објашњава чињеницом да хладњак HSB има већу термичку капацитивност због његове веће запремине, тако да он много ефикасније одводи топлоту и тиме одржава температурну разлику на ТEG-у константном. С друге стране, хладњак HSA има мању термичку капацитивност, тако да се током времена брже загрева и смањује температурну разлику ТEG-а, тиме се смањује и вредност генерисаног напона отвореног кола. На нижим температурним разликама ( $15^\circ\text{C}$ ), одвођење топлоте са хладњака HSA је много ефикасније и опадање напона ТEG-а током времена је мање изражено.

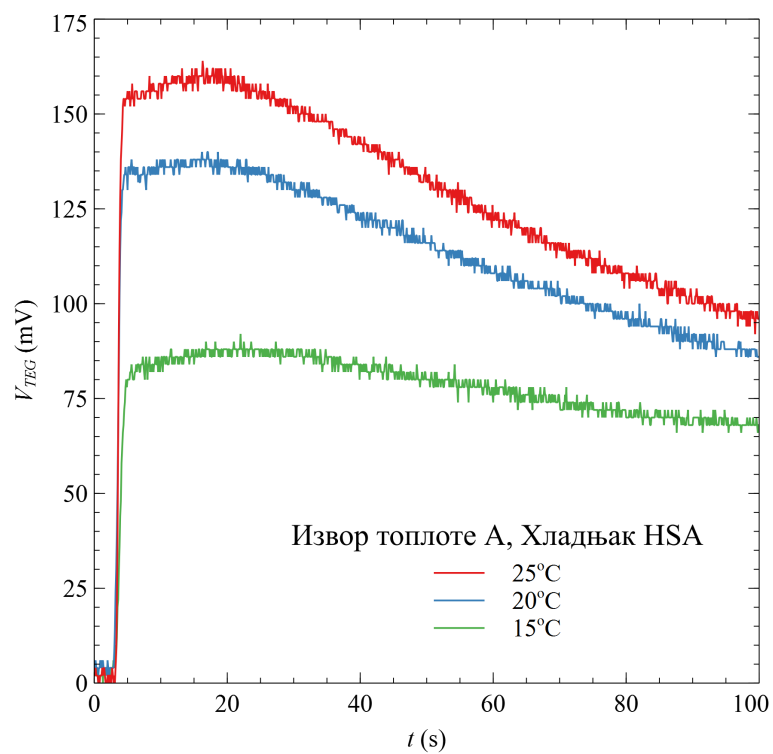
Слика 2.14 приказује зависност напона отвореног кола за ТEG са хладњакком HSB у функцији времена. Извор топлоте Б, чија је површина већа од ТEG-а, је коришћен у овом експерименту. Из тога разлога, поред директног преноса топлоте на топлу страну ТEG-а, јавља се и загревање околине у непосредној близини ТEG-а. Може се приметити да при већој температурној разлици, генеришу се веће вредности напона, али након достизања максималне вредности, напон полако опада са временом. У поређењу са резултатима на слици 2.13, може се уочити да су максималне вредности генерисаног напона при истој температурној разлици веће у случају извора са већом

Табела 2.2: Електрични, термички и геометријски параметри разматраног ТEG-а ET-031-10-20.

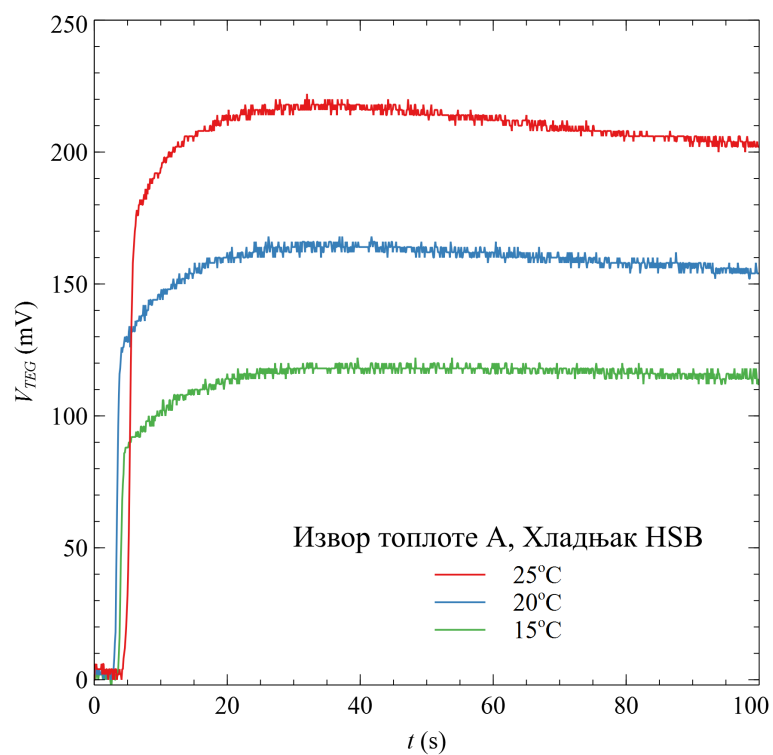
| Параметар на 298 К   | ET-031-10-20 |
|--|--------------|
| Број термоелектричних парова - $N$   | 31           |
| Еквивалентни Зибеков коефицијент - $\alpha$ ( $\mu\text{V K}^{-1}$ )                                       | 396          |
| Специфична електрична отпорност термоелектричног материјала - $\rho$ ( $\mu\Omega\text{ m}$ )              | 11,4         |
| Специфична термичка проводност термоелектричног материјала - $\lambda$ ( $\text{W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ ) | 1,5          |
| Специфична термичка проводност керамичке плоче - $\lambda_P$ ( $\text{W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ )           | 25           |
| Дебљина керамичке плоче - $l_P$ (mm)   | 0,75         |
| Спољашња површина ТEG-а - $A_{TEG}$ ( $\text{mm}^2$ )  | 225          |
| Дужина термоелемента - $l$ (mm)  | 2            |
| Површина попречног пресека термоелемента - $A$ ( $\text{mm}^2$ )   | 1            |

површином. При температурној разлици од  $25^\circ\text{C}$ , у случају ТEG-а са хладњаком HSB загреваног из извора топлоте Б, максимални добијени напон је  $350\text{ mV}$ , што је  $130\text{ mV}$  већи напон него у случају када се користи извор топлоте А. Ово је погодно за energy harvesting системе код којих је битна карактеристика време хладног старта (*cold boot*). Међутим, већа површина извора топлоте од површине ТEG-а омогућава пренос топлоте природном конвекцијом од површине извора топлоте до основе хладњака што смањује укупну температурну разлику између топле и хладне стране ТEG-а. Због тога, напон значајно опада са временом, за разлику од случаја када извор топлоте има исту површину као и ТEG. Коначно, може се закључити да ТEG са хладњаком HSB када је загреван из извора топлоте Б ће при нижим температурним разликама, после одређеног времена, достићи исту вредност напона као са извором топлоте А. Тако ће, после  $100\text{ s}$  од почетка загревања, напон на ТEG-у бити око  $200\text{ mV}$  при температурној разлици од  $20^\circ\text{C}$  када је коришћен извор топлоте Б са већом површином. Приближно исти напон ће бити генерисан после истог времена при температурној разлици од  $25^\circ\text{C}$  када се користи извор топлоте А исте површине као и ТEG, као што се види са слике 2.13.

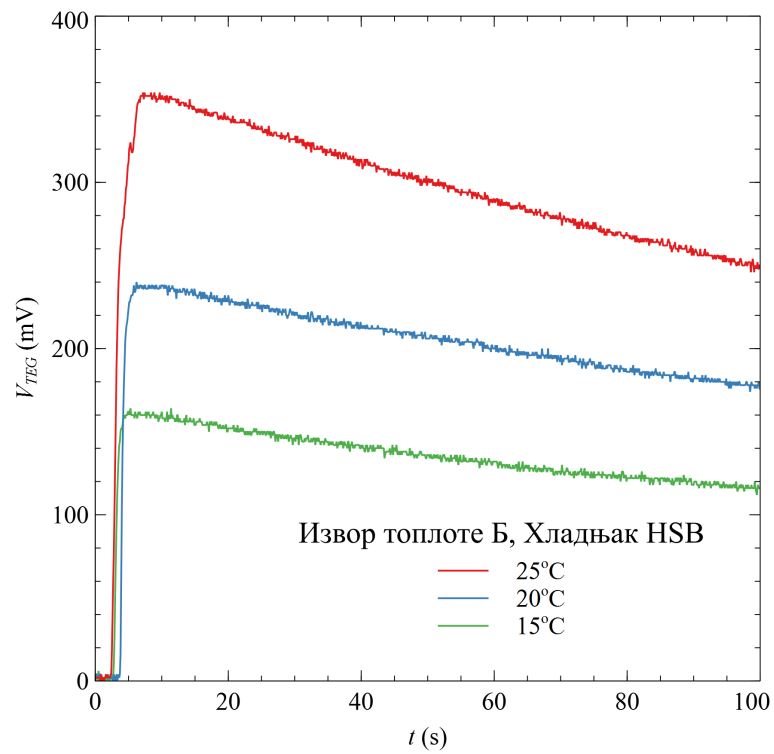
Претходна анализа бави се утицајем површине извора топлоте и димензија хладњака на вредност генерисаног напона отвореног кола ТEG-а у временском домену за различите нагло примењене температурне разлике. Упоредни преглед максималних вредности измереног напона за разматране комбинације топлотни извор/хладњак при датим температурним разликама дат је у табели 2.3. Експериментално је показано да су хладњаци већих димензија ефикаснији за услове хладног старта. С друге стране, велика површина извора топлоте проузрокује загревање околине, зато се смањује температурна разлика током времена, а тиме и напон ТEG-а. Треба напоменути да комбинација извора топлоте Б са хладњаком HSA није испитивана, с обзиром да нема практичну примену. Када се пројектује систем са ТEG-ом потребно је постићи компромис између жељене ефикасности у погледу генерисаног напона и димензија ТEG-а и хладњака.



Слика 2.12: Напон отвореног кола у функцији времена за TEG са хладњаком HSA, загреваног из извора А.



Слика 2.13: Напон отвореног кола у функцији времена за TEG са хладњаком HSB, загреваног из извора А.



Слика 2.14: Напон отвореног кола у функцији времена за TEG са хладњаком HSB, загреваног из извора Б.

Табела 2.3: Упоредни преглед максималних вредности измереног напона у mV.

| Температурна разлика (°C) | 15  | 20  | 25  | 15  | 20  | 25  |
|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Хладњак →                 | HSA |     |     | HSB |     |     |
| Извор топлоте             |     |     |     |     |     |     |
| А                         | 92  | 140 | 164 | 122 | 168 | 222 |
| Б                         | •   | •   | •   | 164 | 240 | 354 |

## Глава 3

# SPICE компатибилни модели WSN чвора са TEG-ом

### 3.1 Једнодимензионални SPICE компатибилни модел за временски променљиви режим рада

При пројектовању софистицираних energy harvesting система заснованих на TEG-у, потребни су електро - термички модели високе тачности. У суштини, такви модели су састављени од низа R или RC елемената да би се представила термичка отпорност или термичка маса TEG-ова. Неки од модела су намењени стационарном режиму рада (steady state) [18, 19, 26, 52], док су други пројектовани за временски променљиви режим (transient) [24, 53–56]. У раду [24] аутори су поредили резултате одзива термоелектричног модула у временском домену добијене експериментално и SPICE компатибилним моделом. Резултати су дати за сценарио где је температурна разлика између плоча TEG-а успостављена у трајању од неколико секунди, а затим је посматрано понашање модула у временском домену мерењем генерисаног напона. SPICE модел за временски променљиви режим рада изведен из диференцијалних једначина за пренос топлоте је презентован у раду [53]. Предложени модел омогућава израчунавање расподеле температуре унутар TEG-а, при чему узима у обзир реалне температурне зависности параметара материјала од кога је TEG направљен. Ово је од посебне важности при симулацији TEG-а изложеног великим температурним разликама.

У раду [19] приказан је поступак одређивања контактне отпорности између термоелектричних елемената унутар TEG-а на основу анализе нелинеарном регресијом. Аутори су дали резултате 3D симулације на бази коначних елемената и експерименталних мерења протока топлоте, напона и струје. Истраживање презентовано у раду [57] фокусира се на одређивање паразитних реактивних елемената који се појављују у TEG-у на основу мерења фазног помераја коришћењем осцилоскопа. Ефективна унутрашња отпорност TEG-а може варирати у односу на специфицирану вредност због међусобне зависности електричних и термичких ефеката. С тим у вези, у раду [58] је презентован систематични метод високе тачности за одређивање унутрашње отпорности TEG-а. Битна карактеристика модела презентованог у раду [59] је његова могућност да генерише преносне функције за мале сигнале које се могу користити при пројектовању мрежа повратне спреге у апликацијама контроле температуре. Неки аутори користе параметре из техничке документације произвођача TEG-ова приликом



дефинисања модела, док их други комбинују са експериментално добијеним резултатима [57–61]. Методологија за екстракцију температурно зависних параметара TEG-а мерењем напона, струје и температуре презентована је у раду [62]. SPICE модели TEG-а за ЛЕД драјвер, самонапајајући носиви електронски систем и систем за примене у домаћинству дати су у радовима [63–65], респективно. У раду [66] су решене нелинеарне једначине дифузије топлоте кроз TEG и предложен је еквивалентни електрични модел ове компоненте. С друге стране, еквивалентни електрични модел презентован у раду [67] укључује диоду везану паралелно са електричном отпорношћу TEG-а да би се симулирала отпорност зависна од струје.

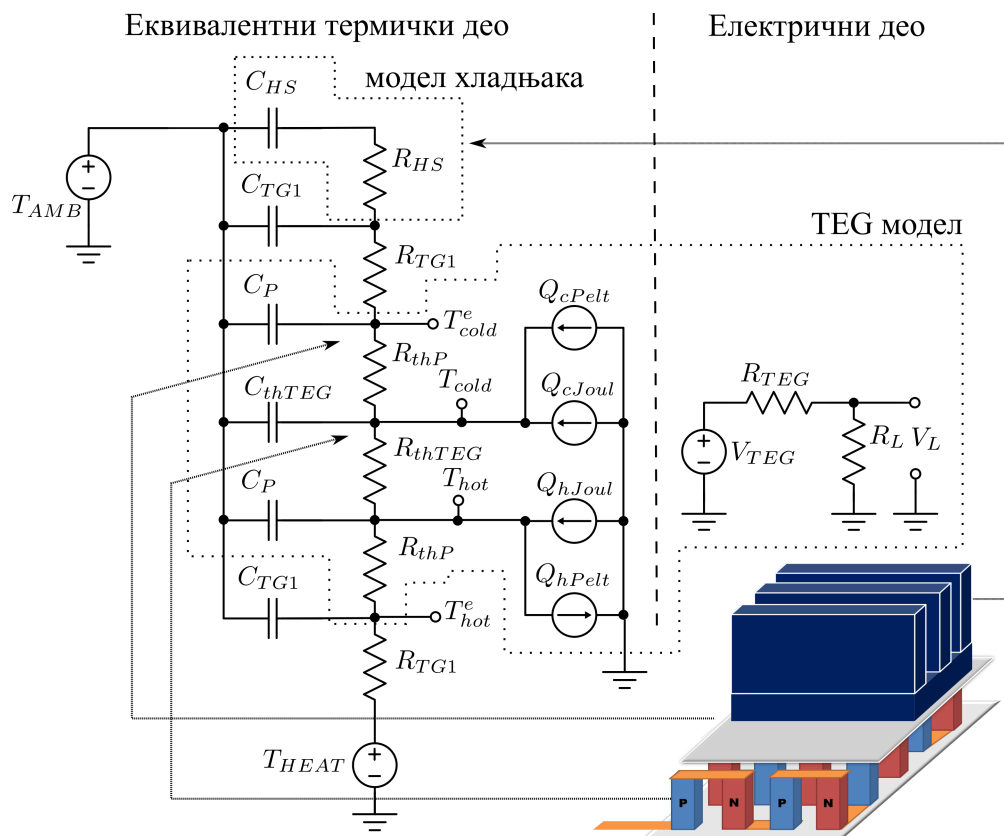
У радовима [12, 67–70] аутори су истраживали еквивалентна кола која моделирају процес конверзије енергије у термоелектричним модулима/генераторима. Ови модели су коришћени заједно са еквивалентним термичким елементима који представљају друге градивне блокове система и карактеристикама електричних оптерећења да би брзо одредили карактеристике чвора бежичне сензорске мреже. Утицај Зибековог, Џуловог и Пелтијевог ефекта на вредност генерисаног напона, као и количина топлоте апсорбована или ослобођена на спојевима TEG-а су укључени у SPICE моделе преко контролисаних напонских и струјних извора. Уопште, еквивалентна кола развијена за симулаторе засноване на SPICE-у, презентована у радовима [63–65], често се могу користити у пројектовању сложених система на једноставнији начин од аналитичких модела предложених у радовима [25, 66, 71].

Модел презентовани у литератури не узимају у обзир понашање термоелектричних модула када се користе као термоелектрични генератори унутар сложених система у временском домену. У радовима [20, 26] показано је како се TEG понаша унутар WSN чвора у стационарном стању, када је температурна разлика фиксирана. У наставку ће бити описан SPICE компатибилни модел WSN чвора са TEG-ом за временски променљив режим рада. Термичке капацитивности су уведене да опишу временски променљив процес протока топлоте унутар TEG-а, који значајно утиче на време хладног старта система са TEG-ом и на вредност ефективне температурне разлике на TEG-у. Методологија развоја модела је презентована поступно: за самостални TEG, за склоп TEG-а и хладњака и за цео чвор бежичне сензорске мреже. Елементи модела су одређени аналитички и/или експериментално. У наставку ће бити дате смернице за конструкцију динамичког модела који омогућава испитивање функционалних перформанси чвора WSN-а када се различити комерцијални термоелектрични модули користе као извор напајања.

### 3.1.1 Формирање модела

Модел TEG-а треба да, што је могуће тачније, представи реално понашање ове компоненте. Циљ је проценити који TEG је најбољи избор за одређени energy harvesting систем, па је важно да модел буде тачан и прецизан. Еквивалентни SPICE електро-термички модел TEG-а са хладњаком је реализован коришћењем компонената са јединственим вредностима и приказан је на слици 3.1.

Аналогија између величина карактеристичних за електрични и термички домен дата у табели 3.1 је коришћена за модел. С тога се шема модела (мрежа) састоји из еквивалентног термичког дела и електричног дела. Сауег-ова (Т или ladder) мрежа, која је термичка RC мрежа са уземљеном капацитивношћу, је искоришћена да моделира пренос топлоте кроз TEG. Главна предност овог типа мреже је та што је изведена



Слика 3.1: Компоненте еквивалентног електро - термичког модела ТЕГ-а са хладњаком.

из основне физике преноса топлоте [72] и омогућава приступ интерним температурама између делова система који моделира. Еквивалентни електро - термички модел је развијен уз претпоставку да су доминантни ефекти у ТЕГ-у Зибеков, Пелтијев и Џулов, док је Томсонов ефекат миноран у применљивом опсегу температурне разлике и због тога је занемарен [12, 73]. Проток топлоте кроз компоненту је разматран једнодимензионо, док су Зибеков коефицијент и специфичне електричне отпорности узете као температурно зависни параметри. У ТЕГ-у су термоелектрични елементи спојени бакарним конекторима. Зато што бакар има велику вредност термичке проводности, а запремина конектора је мала, њихова термичка отпорност и капацитивност нису укључене у термички део модела ТЕГ-а. Ниска специфична електрична отпорност бакра оправдава одсуство електричне отпорности конектора у електричном делу модела ТЕГ-а. Такође, због малог броја термоелектричних парова, паразитни реактивни електрични елементи нису разматрани [21].

Табела 3.1: Аналогија између електричних и термичких величина [24,52,66].

| Електрична величина   | Термичка величина                         |
|-----------------------|---|
| Напон $V(V)$          | Апсолутна температура $T(K)$              |
| Струја $I(A)$         | Количина топлоте $Q(W)$                   |
| Отпорност $R(\Omega)$ | Термичка отпорност $R_{th}(K W^{-1})$     |
| Капацитивност $C(F)$  | Термичка капацитивност $C_{th}(J K^{-1})$ |

Зибекон напон генерисан када се две стране TEG-а нађу на различитим температурама је:

$$V_{TEG} = N\alpha(T_{hot} - T_{cold}) , \quad (3.1)$$

где је  $N$  број термоелектричних парова,  $\alpha = \alpha_p - \alpha_n$  је вредност укупног Зибековог коефицијента,  $T_{hot}$  и  $T_{cold}$  су температуре на топлој и хладној страни термоелектричних елемената TEG-а, респективно. Зибекон коефицијент је температурно зависан параметар са вредношћу  $\alpha_{pn0}$  на референтној температури  $T_0 = 298$  K и температурним коефицијентом  $a_\alpha$ . У симулацијама, његова вредност је израчуната за средњу вредност температуре у TEG-у,  $(T_{hot} + T_{cold})/2$ . Тако је термички генерисан напон моделиран у SPICE-у коришћењем напона контролисаног напонског извора ( $V_{TEG}$ ):

$$V_{TEG} = N\alpha_{pn0} \left[ 1 + a_\alpha \left( \frac{T_{hot} + T_{cold}}{2} - T_0 \right) \right] (T_{hot} - T_{cold}) . \quad (3.2)$$

Електрична отпорност свих термоелектричних елемената TEG-а је његова унутрашња отпорност на референтној температури  $T_0 = 298$  K:

$$R_{TEG0} = \frac{2N\rho l}{A} , \quad (3.3)$$

где је  $\rho = \rho_n = \rho_p$  специфична електрична отпорност термоелектричног материјала на референтној температури  $T_0$ ,  $l$  је дужина и  $A$  је површина попречног пресека појединачног термоелектричног елемента. У SPICE моделу,  $R_{TEG}$  је такође разматрана као температурно зависна:

$$R_{TEG} = R_{TEG0} \left[ 1 + a_\rho \left( \frac{T_{hot} + T_{cold}}{2} - T_0 \right) \right] , \quad (3.4)$$

где је  $a_\rho$  температурни коефицијент специфичне електричне отпорности. Повезивањем оптерећења  $R_L$  на TEG, формира се електрично коло, тако да је омогућено протицање струје (слика 3.1):

$$I_L = I_{TEG} = \frac{V_{TEG}}{R_{TEG} + R_L} . \quad (3.5)$$

Пелтијев ефекат се појављује услед протицања електричне струје и зависи од вредности апсолутне температуре и укупног Зибековог коефицијента. Овај ефекат узрокује апсорпцију одређене количине топлоте  $Q_{cPelt}$  на хладној страни и дисипацију одређене количине топлоте  $Q_{hPelt}$  на топлој страни термоелектричних парова:

$$Q_{cPelt} = N\alpha_{pn0} \left[ 1 + a_\alpha \left( \frac{T_{hot} + T_{cold}}{2} - T_0 \right) \right] T_{cold} I_{TEG} , \quad (3.6)$$

$$Q_{hPelt} = N\alpha_{pn0} \left[ 1 + a_\alpha \left( \frac{T_{hot} + T_{cold}}{2} - T_0 \right) \right] T_{hot} I_{TEG} . \quad (3.7)$$

Функционисање TEG-а је такође праћено Џуловим ефектом. Овај ефекат манифестује се као дисипација топлоте од стране материјала који има коначну отпорност услед протицања електричне струје ( $Q_{Joul}$ ), и равномерно се апсорбује на топлој и

хладној страни TEG-а:

$$Q_{cJoul} = Q_{hJoul} = \frac{1}{2}Q_{Joul} = \frac{1}{2}V_{RTEG}I_{TEG}, \quad (3.8)$$

где је  $V_{RTEG} = V_{TEG} - V_L = I_{TEG}R_{TEG}$ . Количина топлоте услед Пелтијевог ефекта дефинисана једначинама (3.6) и (3.7), као и Џулов ефекат дат једначином (3.8), су моделирани арбитрарним струјним генераторима  $Q_{cPelt}$ ,  $Q_{hPelt}$ ,  $Q_{cJoul}$  и  $Q_{hJoul}$ .

Провођење топлоте кроз термоелектричне елементе TEG-а од топле до хладне стране је описано Фуријеовим законом:

$$Q_{cond} = \frac{T_{hot} - T_{cold}}{R_{thTEG}}. \quad (3.9)$$

Овде  $R_{thTEG}$  представља термичку отпорност свих термоелектричних елемената TEG-а и дата је једначином:

$$R_{thTEG} = \frac{l}{2N\lambda A}, \quad (3.10)$$

где је  $\lambda = \lambda_n = \lambda_p$  специфична термичка проводност термоелектричног материјала.

Укупна количина топлоте апсорбована на топлој страни термоелектричних елемената TEG-а ( $Q_h$ ) и ослобођена у околину на хладној страни ( $Q_c$ ) су балансиране у складу са релацијама:

$$Q_h = Q_{hPelt} + Q_{cond} - Q_{hJoul}, \quad (3.11)$$

$$Q_c = Q_{cPelt} + Q_{cond} + Q_{cJoul}. \quad (3.12)$$

Ова топлота тече кроз керамичке плоче TEG-а према њиховим спољашњим странама које су на температурама  $T_{hot}^e$  и  $T_{cold}^e$ , према Фуријеовом закону:

$$Q_h = \frac{T_{hot}^e - T_{hot}}{R_{thP}}, \quad (3.13)$$

$$Q_c = \frac{T_{cold} - T_{cold}^e}{R_{thP}}. \quad (3.14)$$

Термичка отпорност керамичке плоче ( $R_{thP}$ ) одређује се као:

$$R_{thP} = \frac{l_P}{\lambda_P A_{TEG}}, \quad (3.15)$$

где је  $l_P$  дебљина керамичке плоче,  $\lambda_P$  је специфична термичка проводност керамике и  $A_{TEG}$  је спољашња површина TEG-а. Додатне компоненте на слици 3.1 су термичке отпорности и капацитивности хладњака ( $R_{HS}$ ,  $C_{HS}$ ) и термичког лепка ( $R_{TG1}$ ,  $C_{TG1}$ ). Напонски генератори  $T_{HEAT}$  и  $T_{AMB}$  су еквиваленти температуре извора топлоте и температуре околине, респективно.

Модел чвора бежичне сензорске мреже је направљен на основу електро - термичког модела TEG-а. Све саставне компоненте представљају термичке отпорности и капацитивности повезане у одговарајућим чворовима мреже. Шема SPICE модела чвора WSN-а је приказана на слици 3.2. Термичке отпорности штампаних плоча, термичког лепка и алуминијумског одстојника, се одређују на основу њихове дужине (дебљине) ( $l_x$ ), површине попречног пресека ( $A_x$ ) и специфичне термичке проводности одређеног

материјала ( $\lambda_x$ ) на основу једначине:

$$R_{thx} = \frac{l_x}{\lambda_x A_x} . \quad (3.16)$$

Термичка отпорност термоизолационе пене је моделирана као отпорник велике вредности у колу повратне спреге. Ова термичка отпорност дефинисана је као:

$$R_{FOAM} = \frac{l_{foam}}{\lambda_{foam}(A_{PCB} - A_{TEG})} . \quad (3.17)$$

Вредности термичких отпорности хладњака специфицирају произвођачи у оквиру техничке документације.

Термичка капацитивност је физичка величина која се може мерити и једнака је односу топлоте предате/ослобођене са неког објекта и резултујуће температурне промене. Сходно томе, специфични топлотни капацитет материјала  $c$  зависи од масе и једнак је:

$$c = \frac{C_{th}}{m} = \frac{C_{th}}{d \cdot V} , \quad (3.18)$$

где је  $C_{th}$  термичка капацитивност објекта,  $d$  је густина материјала од кога је објекат направљен,  $m$  је маса објекта и  $V$  је његова запремина. Тако се вредности термичких капацитивности елемената чвора WSN-а израчунавају као:

$$C_{thx} = c_x d_x V_x . \quad (3.19)$$

У табелама 3.2 и 3.3 дате су термичке отпорности и термичке капацитивности елемената чвора бежичне сензорске мреже, респективно.

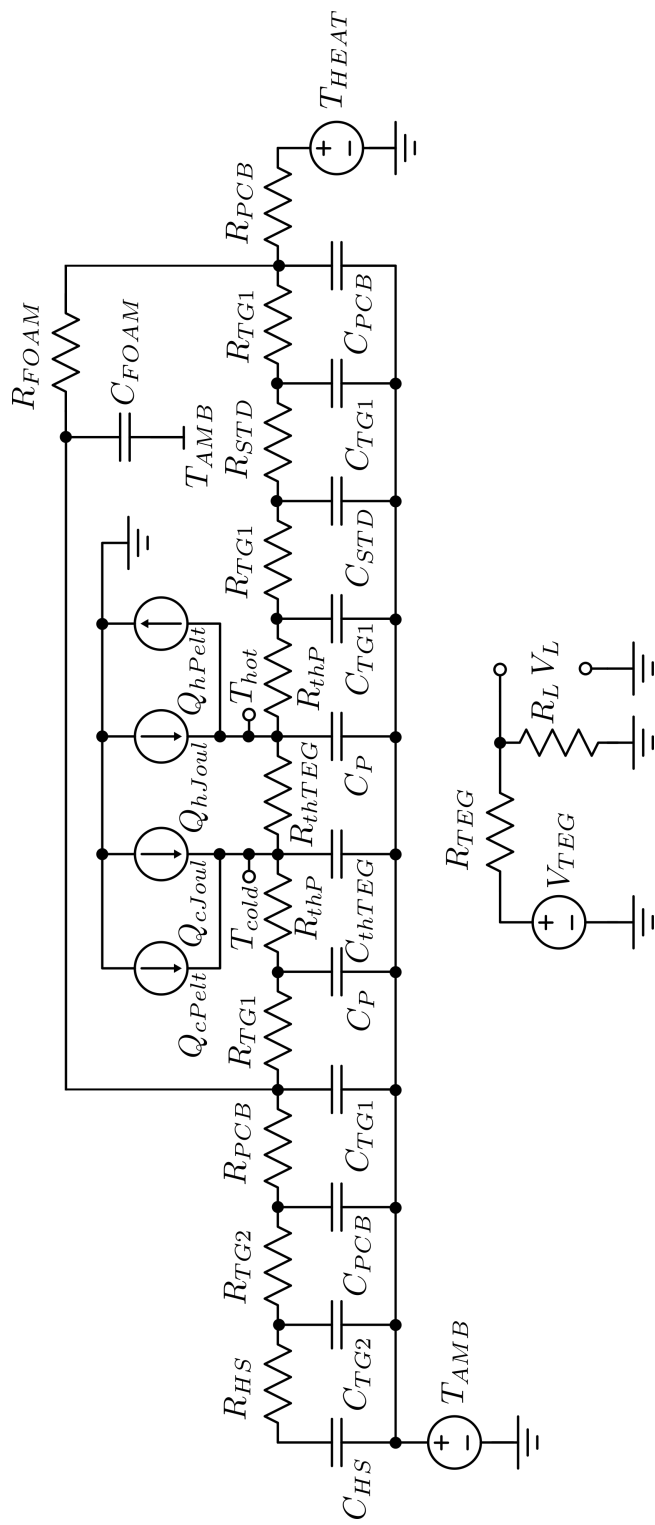
Електрично оптерећење TEG-а ( $R_L$ ) је дефинисано преко улазне отпорности кола за подизање напона и управљање електричном енергијом LTC3108 када оно пуни примарни и баскур кондензатор. Оптерећење је симулирано контролисаним отпорником чија се отпорност мења са струјом која протиче кроз њега. Вредности отпорности  $R_L$  за различите вредности струје  $I_L$  приказане у табели 3.4 одређене су на основу техничке документације кола [74]. У SPICE моделу ове вредности су дате у виду табеле претраживања са линеарном интерполацијом. Овај приступ је изабран због једноставне имплементације у софтверу за симулацију електронских кола, при чему обезбеђује прихватљиву тачност [20, 26].

Табела 3.2: Термичке отпорности елемената чвора бежичне сензорске мреже.

| Параметар   | Al<br>PCB | Термички<br>лепак<br>TG1/TG2 | Термоизолациона<br>пена | Al<br>одстојник |
|---|-----------|------------------------------|-------------------------|-----------------|
| Специфична<br>термичка<br>проводност<br>$\lambda_x$ ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) | 153       | 1,1                          | 0,4                     | 153             |
| Дебљина<br>$l_x$ (mm)   | 1,7       | 0,2                          | 6,5                     | 1,6             |
| Површина<br>попречног<br>пресека<br>$A_x$ ( $\text{mm}^2$ )                             | 1820      | 225/1225                     | 1595                    | 225             |
| Термичка<br>отпорност<br>$R_{thx}$ ( $\text{K W}^{-1}$ )                                | 0,0061    | 0,81/0,148                   | 10,18                   | 0,0465          |

Табела 3.3: Термичке капацитивности елемената чвора бежичне сензорске мреже.

| Параметар  | Al<br>PCB | Термички<br>лепак<br>TG1/TG2 | Термоизолациона<br>пена |
|--|-----------|------------------------------|-------------------------|
| Специфични<br>топлотни<br>капацитет<br>$c_x$ ( $\text{J g}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) | 0,92      | 2,09                         | 0,82                    |
| Густина<br>$d_x$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )  | 2,7       | 2,44                         | 0,58                    |
| Запремина<br>$V_x$ ( $\text{cm}^3$ )   | 3,09      | 0,045/0,245                  | 23,13                   |
| Термичка<br>капацитивност<br>$C_{thx}$ ( $\text{J K}^{-1}$ )                     | 7,685     | 0,229/1,251                  | 11                      |



Слика 3.2: SPICE модел чвора бежичне сензорске мреже са слике 2.8.

Табела 3.4: Зависност отпорности оптерећења TEG-а унутар чвора бежичне сензорске мреже од струје оптерећења.

|                    |    |   |   |     |   |     |     |    |     |     |     |     |     |
|--------------------|----|---|---|-----|---|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $I_L$ (mA)         | 0  | 3 | 5 | 7,3 | 9 | 10  | 13  | 20 | 26  | 30  | 79  | 100 | 200 |
| $R_L$ ( $\Omega$ ) | 10 | 7 | 5 | 4,1 | 4 | 3,9 | 3,8 | 3  | 2,7 | 2,7 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |

### 3.1.2 Експериментална поставка за потврду модела

Фотографија експерименталне поставке за потврду валидности једнодимензионалног модела приказана је на слици 3.3. Блок шема ове експерименталне поставке одговара оној приказаној на слици 2.10. Омогућена је контрола топлотног флукса, као улазног параметра и мерење одређених температура и напона у временском домену. Компонента, односно систем који се тестира (DUT - Device Under Test) поставља се на извор топлоте (грејач) хоризонтално, што је најнеповољнији случај (worst-case) за процес дисипације топлоте. Константни топлотни флукс који се предаје топлој страни DUT-а добија се из одговарајућег термоелектричног (Пелтијевог) модула. Овај грејач се напаја струјом од 0,5–2 А из лабораторијског програмабилног DC извора Agilent E3634A. Велики алуминијумски хладњак се користи да одведе топлоту са хладне стране Пелтијевог модула. Ова експериментална поставка искоришћена је за карактеризацију неколико компонената и система: два различита хладњака, самосталан TEG, склоп TEG-хладњак и чвор бежичне сензорске мреже са и без пратеће електронике. Термички лепак је искоришћен да обезбеди добар термички контакт између грејача и компоненте/система који се тестира. Термометар са два термопара је коришћен да мери температуру околине ( $T_{AMB}$ ) и одговарајућу температуру за специфични DUT. То су температура хладњака ( $T_{HS}$ ), температура хладне стране TEG-а ( $T_{cold}$ ), температура топле стране чвора WSN-а ( $T_{hot}$ ) или температура грејача ( $T_{HEAT}$ ). Напон генерисан TEG-ом ( $V_{TEG}$ ) и напон напајања чвора WSN-а ( $V_{SUP}$ ) су праћени и уснимљени осцилоскопом Tektronix DPO4034.

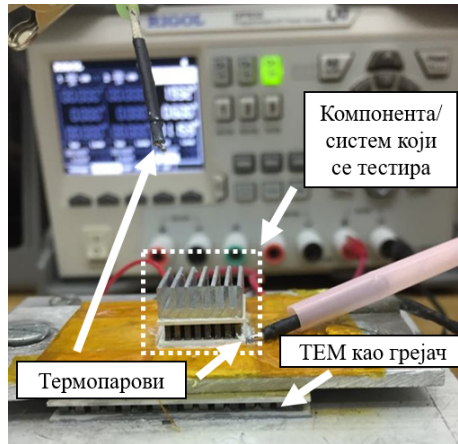
За потврду валидности модела су као DUT-ови одабрани термоелектрични модул ET-031-10-20, произвођача Adaptive (означен као TEG1), два нископрофилна алуминијумска хладњака и WSN чвор описан у [46]. Хладњак HSA са усправним ребрима, димензија ( $14,5 \times 14 \times 6$ ) mm, има површину основе једнаку површини TEG1. С друге стране, хладњак HSB који има закошена ребра и димензије ( $35 \times 35 \times 7,5$ ) mm је део чвора WSN-а који се разматра.

### 3.1.3 Резултати верификације модела

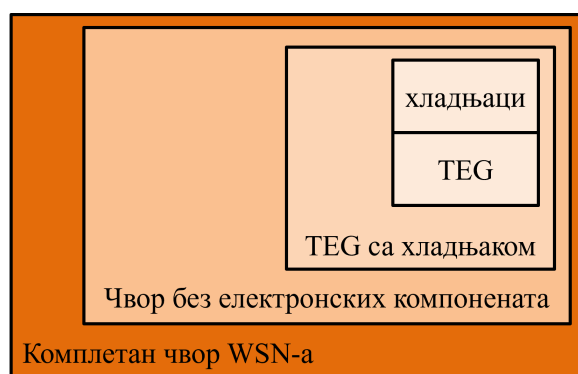
Модел је верификован кроз LTspice [75] симулације. Блок дијаграм на слици 3.4 приказује кораке у процесу верификације модела. Прво је потврђен основни модел TEG-а, а након тога је надограђен елементима који описују хладњак. Затим су у обзир узети делови чвора бежичне сензорске мреже (без електронике) кроз одговарајуће термичке отпорности и капацитивности. Коначно је потврђен комплетан модел чвора WSN-а.

Вредности карактеристичних геометријских, електричних и термичких параметара разматраног TEG-а, као и вредности елемената еквивалентног кола израчунате коришћењем једначина (3.10), (3.15) и (3.19), дате су у табели 3.5.





Слика 3.3: Фотографија експерименталне поставке.



Слика 3.4: Блок дијаграм корака у процесу верификације модела.

Табела 3.5: Карактеристични параметри разматраних ТЕГ-ова.

| Комерцијална ознака ТЕГ-а →   | ЕТ–<br>031-10-20<br>(ТЕГ1) | СР–<br>08,31,06<br>(ТЕГ2)   | МСРЕ–<br>071-10-15<br>(ТЕГ4) |
|---|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Параметар   |                            |                             |                              |
| Максимална радна температура $T_{max}$ (°C)*  | 90                         | 80                          | 110                          |
| Максимална температурна разлика $\Delta T_{TEGmax}$ (°C)*   | 75                         | 67                          | 72                           |
| Број термоелектричних парова $N^*$  | 31                         | 31                          | 71                           |
| Спољашње димензије $L \times W \times H$ (mm)*  | $15 \times 15 \times 4,3$  | $12 \times 12 \times 3,3$   | $20 \times 20 \times 3,8$    |
| Површина ТЕГ-а $A_{TEG}$ (mm <sup>2</sup> )   | 225                        | 144                         | 400                          |
| Димензије термоелектричног елемента $w \times w \times l$ (mm)*   | $1 \times 1 \times 2$      | $0,8 \times 0,8 \times 1,5$ | $1 \times 1 \times 1,5$      |
| Дебљина керамичке плоче $l_P$ (mm)  | 0,75                       | 0,6                         | 0,75                         |
| Укупни Зибков коефицијент $\alpha$ ( $\mu V K^{-1}$ )   | 396                        | 378                         | 396                          |
| Температурни коефицијент $a_\alpha$ (K <sup>-1</sup> )  |                            | $2 \cdot 10^{-3}$           |                              |
| Специфична термичка проводност термоелектричног елемента $\lambda$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) | 1,5                        | 1,7                         | 1,5                          |
| Специфична термичка проводност керамичке плоче $\lambda_P$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )         |                            | 25                          |                              |
| Специфична електрична отпорност термоелектричног елемента $\rho_0$ ( $\mu\Omega m$ )                    | 11,4                       | 10,6                        | 11,4                         |
| Температурни коефицијент $\rho - a_\rho$ (K <sup>-1</sup> )   |                            | $3,4 \cdot 10^{-3}$         |                              |
| Термичка отпорност керамичке плоче $R_P$ (K W <sup>-1</sup> )   | 0,13                       | 0,16                        | 0,075                        |
| Унутрашња термичка отпорност $R_{th,TEG}$ (K W <sup>-1</sup> )  | 21,74                      | 22,22                       | 7,04                         |
| Унутрашња електрична отпорност $R_{TEG0}$ ( $\Omega$ )  | 1,41                       | 1,54                        | 2,43                         |
| Густина материјала термоелектричног елемента $d_{TEG}$ (g cm <sup>-3</sup> )                            |                            | 7,74                        |                              |
| Густина материјала керамичке плоче $d_P$ (g cm <sup>-3</sup> )  |                            | 3,57                        |                              |
| Специфични топлотни капацитет   |                            |                             |                              |
| материјала термоелектричног елемента $c_{TEG}$ (J g <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )                     |                            | 0,165                       |                              |
| Специфични топлотни капацитет   |                            |                             |                              |
| материјала керамичке плоче $c_P$ (J g <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )                                   |                            | 0,837                       |                              |
| Запремина $N$ термоелектричних парова $V_{TEG}$ (cm <sup>3</sup> )                                      | 0,124                      | 0,059                       | 0,213                        |
| Запремина керамичке плоче $V_P$ (cm <sup>3</sup> )  | 0,169                      | 0,086                       | 0,3                          |
| Термичка капацитивност $N$ термоелектричних парова $C_{th,TEG}$ (J K <sup>-1</sup> )                    | 0,158                      | 0,075                       | 0,272                        |
| Термичка капацитивност керамичке плоче $C_P$ (J K <sup>-1</sup> )                                       | 0,504                      | 0,258                       | 0,896                        |

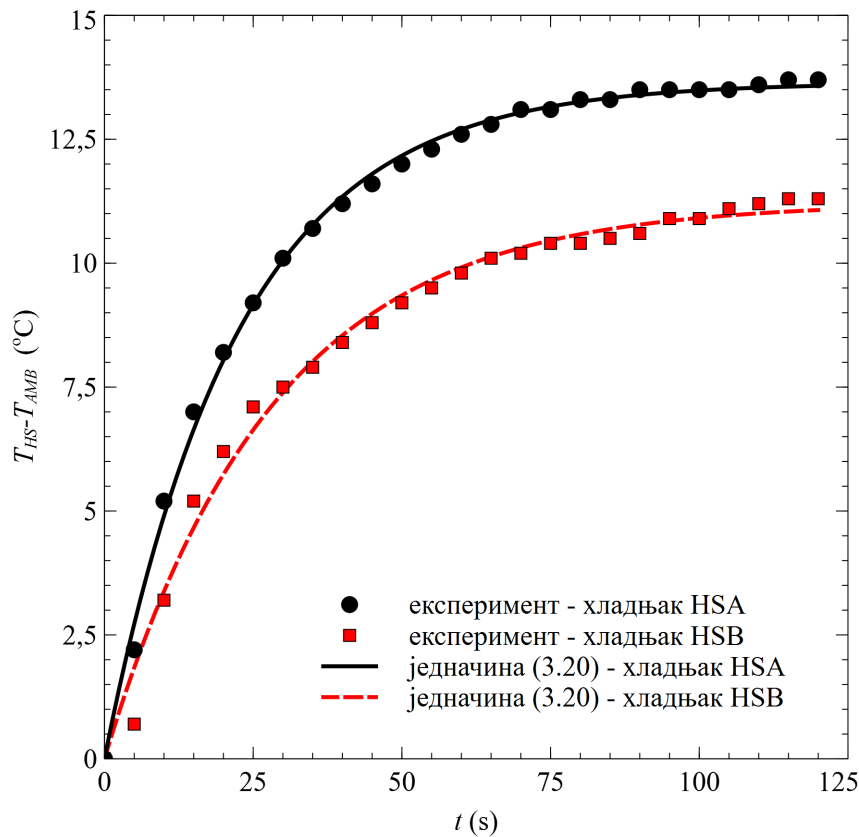
\* Параметри преузети из техничке документације.

Практични метод за решавање временски променљивих термичких проблема је мерење одзива објекта на примењену термичку побуду. Коришћењем електро - термичке аналогије са RC колом, промена температуре објекта на његовој површини у времену после моментално примењене температурне разлике може се изразити као:

$$\Delta T(t) = \Delta T_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_{th}}} \right), \quad (3.20)$$

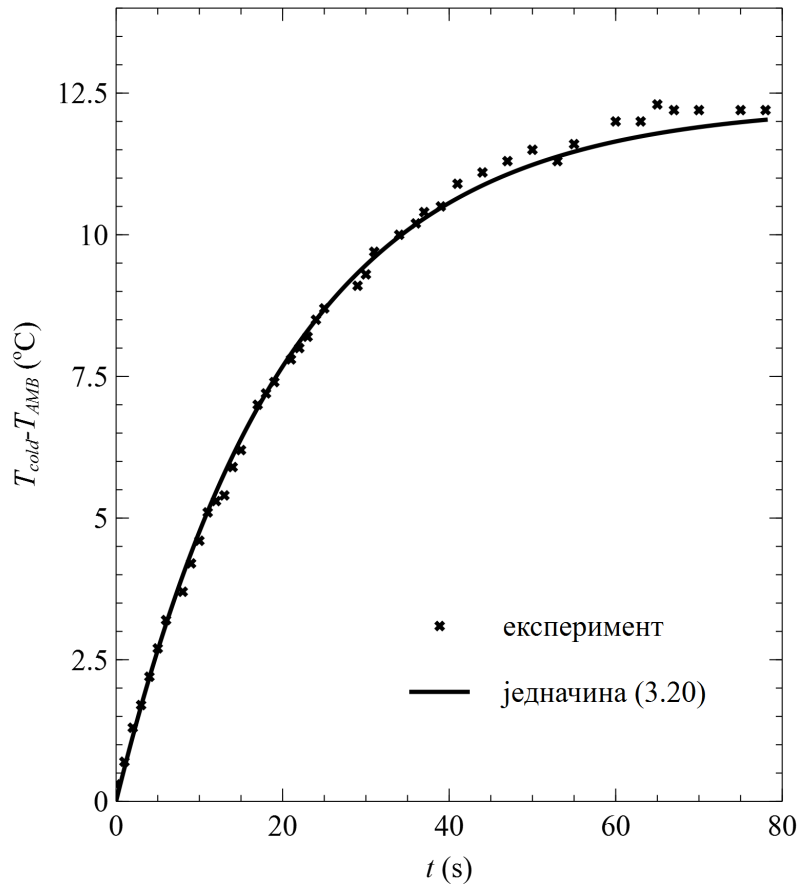
где је  $\Delta T_0$  максимална промена у температури објекта (стационарно стање када је његова термичка капацитивност у потпуности напуњена) и  $\tau_{th} = R_{th}C_{th}$  је термичка временска константа објекта.

У складу са тим, ако је хладњак описан RC моделом са уземљеном термичком капацитивношћу, потребно је одредити његову термичку отпорност и термичку капацитивност. Вредности термичких отпорности у мирном ваздуху хладњака HSA и HSB, на основу техничке документације, су  $R_{thA} = 12 \text{ K W}^{-1}$  и  $R_{thB} = 11 \text{ K W}^{-1}$ . Временске зависности температура хладњака  $T_{HS}$  у односу на температуру околине  $T_{AMB}$  када је температурна побуда  $\Delta T = T_{HEAT} - T_{AMB} = 20^\circ\text{C}$  примењена на њихову основу су приказане на слици 3.5. Ове зависности прате једначину (3.20) и вредности  $\Delta T_0$  и  $\tau_{th}$  се могу одредити нумерички. Добијене вредности су  $\Delta T_{0A} = 13,6^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{thA} = 22,47 \text{ s}$ ,  $\Delta T_{0B} = 11,22^\circ\text{C}$ ,  $\tau_{thB} = 27,93 \text{ s}$ , што за термичке капацитивности даје  $C_{thA} = C_{HSA} = 1,88 \text{ J K}^{-1}$  и  $C_{thB} = C_{HSB} = 2,54 \text{ J K}^{-1}$ .



Слика 3.5: Температурни одзив хладњака на примењену температурну разлику  $\Delta T = T_{HEAT} - T_{AMB} = 20^\circ\text{C}$ .

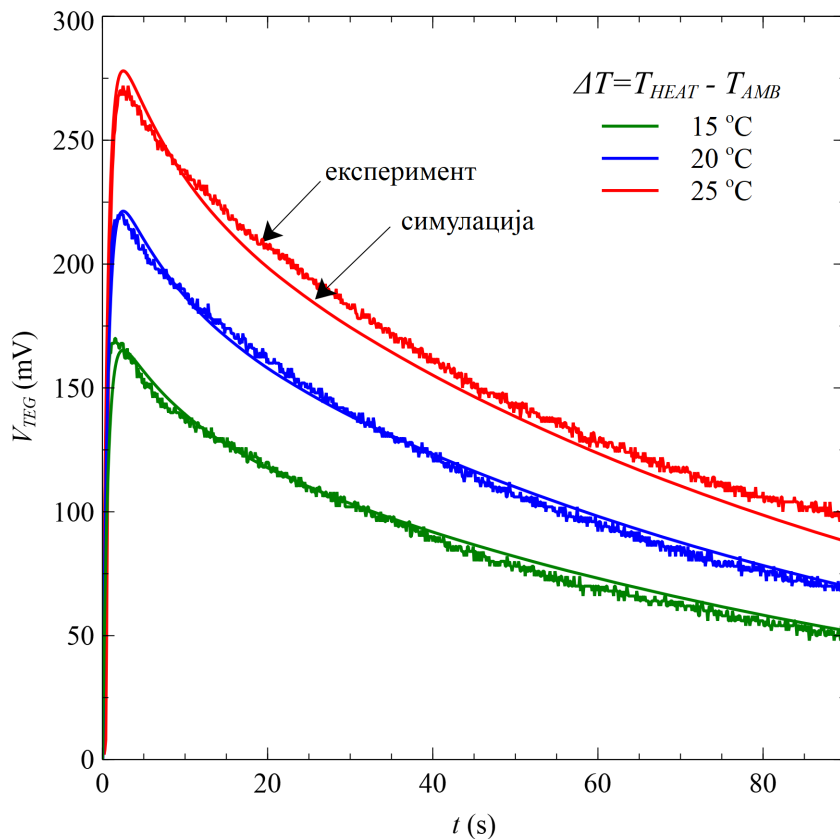
TEG је моделиран са три пара термичких отпорности и капацитивности које одговарају термоелектричним елементима и двама керамичким плочама. Ако је еквивалентна термичка отпорност представљена као збир одговарајућих величина за сваки део TEG-а (TEG1, видети слику 3.1), добија се  $R_{e-thTEG} = R_{thP} + R_{thTEG} + R_{thP} \simeq R_{thTEG} = 22 \text{ K W}^{-1}$ . Еквивалентна термичка капацитивност израчунава се као  $C_{e-thTEG} = C_P + C_{thTEG} + C_P = 1,17 \text{ J K}^{-1}$ . Ови аналитички добијени резултати су експериментално потврђени мерењем температуре хладне стране TEG1,  $T_{cold}$ , у односу на температуру околине као одговор на примењену температурну разлику  $\Delta T = T_{HEAT} - T_{AMB} = 15^\circ\text{C}$  као што је приказано на слици 3.6. Нумерички екстрахована вредност термичке временске константе је  $\tau_{e-thTEG} = 25,66 \text{ s}$ , а из ње израчуната термичка капацитивност је  $C_{e-thTEG} = 1,19 \text{ J K}^{-1}$  што је блиско аналитички добијеној вредности ( $1,17 \text{ J K}^{-1}$ ).



Слика 3.6: Температурни одзив TEG1 на примењену температурну разлику  $\Delta T = T_{HEAT} - T_{AMB} = 15^\circ\text{C}$ .

Да би се верификовао SPICE модел TEG-а са хладњаком, алуминијумски хладњак HSA је залепљен термичким лепком на хладну страну, док је његова топла страна постављена на извор топлоте константне температуре, на који је намазан слој термичког лепка. Генерисани напон је уснимљен коришћењем осцилоскопа Tektronix DPO4034 и извршено је поређење са вредностима добијеним LTspice симулацијама (коло на слици 3.1). Електрично оптерећење кола је дефинисано као врло велико ( $10 \text{ M}\Omega$ ), тако да је  $V_L = V_{TEG}$ . Експеримент и симулације урађене су за три температурне разлике као што је приказано на слици 3.7.

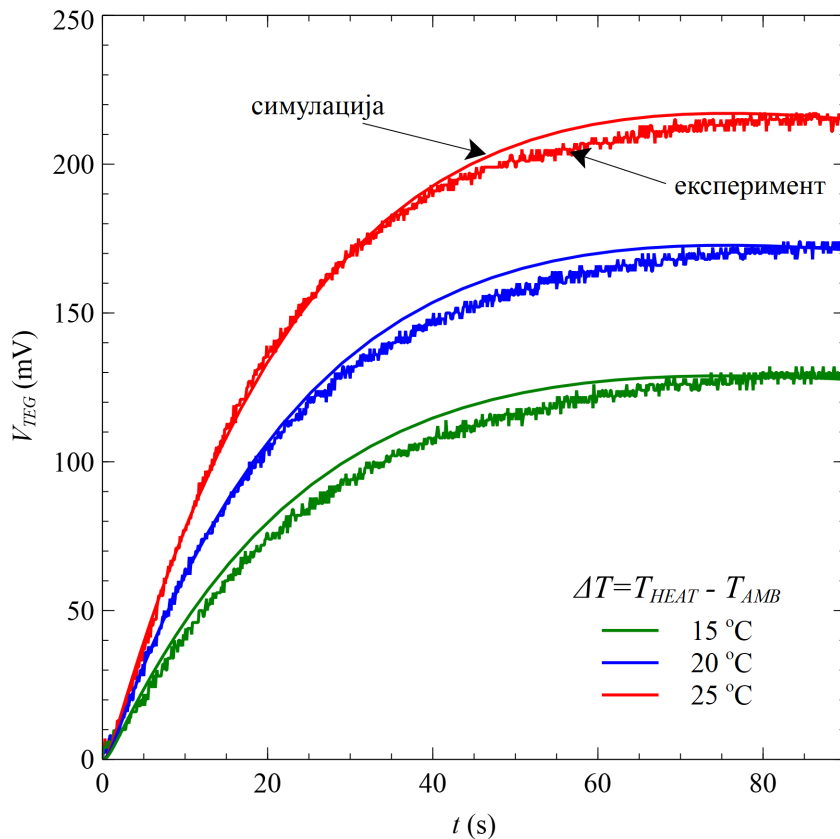
Прво, генерисани напон расте нагло због примењене термичке побуде на топлој страни TEG-а а након достигања вршне вредности постепено опада са временом. Опадање прати температурни одзив хладњака пошто се његова термичка капацитивност пуни преко TEG-а. Напон улази у zasiћење када хладњак није више у могућности да одведе топлоту, тј. када је његова термичка капацитивност у потпуности напуњена. Вршна вредност генерисаног напона је од 170 mV на  $\Delta T = 15^\circ\text{C}$  до 278 mV на  $\Delta T = 25^\circ\text{C}$ . Може се уочити да је постигнуто одлично слагање између експерименталних и резултата симулације. Максимално одступање између резултата је 4,12%. Овим је потврђена могућност примене презентованог модела за карактеризацију различитих TEG-ова у спреси са хладњаком.



Слика 3.7: Генерисани напон у функцији времена за TEG1 са хладњаком HSA за три температурне разлике.

Термички одзив целе структуре чвора бежичне сензорске мреже са TEG1 је приказан на слици 3.8 као зависност генерисаног напона у времену. Сви саставни елементи осим електронских компонената су укључени. Размена топлоте између чвора и околине остварена је са алуминијумским хладњаком HSB. Три температурне разлике између топле стране чвора и околине су испитиване, са  $\Delta T = 15^\circ\text{C}$  као минималном пројектованом вредношћу [46]. Напоменимо, отпорност оптерећења је висока, тако да је  $V_L = V_{TEG}$ . Излазни напон расте споро и достиже константну вредност после неколико десетина секунди. После 90 s, његова вредност је од 130 mV при  $\Delta T = 15^\circ\text{C}$  до 215 mV при  $\Delta T = 25^\circ\text{C}$ . Одзив система је регулисан термичком спрегом између TEG-а, хладњака и других градивних елемената чвора WSN-а, односно временом потребним да се њихове термичке капацитивности напуне. У овом случају, топлота се преноси од извора - грејача до доње штампане плоче и након тога до остатка система

углавном кроз алуминијумски одстојник и TEG. Пренос топлоте кроз термоизолациону пену је минималан зато што она има већу термичку отпорност у односу на остале саставне делове чвора. Горња штампана плоча има важну улогу у одвођењу топлоте зато што представља проширење основе хладњака. Вредности напона TEG-а одређене симулацијом, са датим сетом параметара модела, се добро поклапају са експериментално добијеним вредностима. Максимално одступање између резултата је 6,25% и може се објаснити поједностављеним условима симулације. На пример, није могуће предвидети промене у температури околине које могу утицати на експерименталне резултате.



Слика 3.8: Генерисани напон у функцији времена за разматрани чвор WSN-а са TEG1 и без електронских компонената.

Дубља анализа комплетног чвора бежичне сензорске мреже је урађена посматрањем напона на потрошачу при температурној разлици  $\Delta T = T_{HEAT} - T_{AMB} = 25$  °C. Резултати експеримента и симулација су приказани на слици 3.9(a). Зависности генерисаног напона за чвор WSN-а без електронских компонената (слика 3.8) и напона на потрошачу за комплетни чвор су слични, али у другом случају вредности напона су 50% мање због присуства отпорности оптерећења TEG-а и Пелтијевог ефекта ( $V_L \neq V_{TEG}$ ). Даље, додавањем електронских компонената, запремина термоизолационе пене у чвору WSN-а се смањује, зато и њена термичка капацитивност опада. Експериментално измерене вредности напона имају периодично пропадање када чвор бежичне сензорске мреже шаље податке јер тада црпи знатну струју из резервоарског кондензатора који је повезан на коло за подизање напона. Због интерне конфигурације и принципа рада конвертора LTC3108 [74] ове осцилације у напону се рефлектују и на његов улаз, тј. на напон  $V_L$ . Резултати симулације добро се слажу са средњом

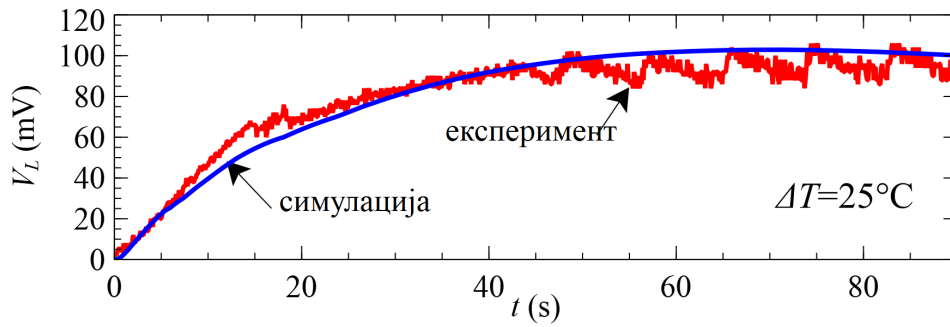
вредношћу напона  $V_L$  у посматраном временском периоду.

На слици 3.9(b) су дате експерименталне вредности напона напајања електронских компонената чвора WSN-а добијене колом за подизање напона ( $V_{SUP}$ ). Поређењем ове зависности са напоном са слике 3.9(a), евидентно је да се коло LTC3108 стартује и почиње пуњење примарног кондензатора када је напон  $V_L$  око 60 mV, што захтева 17 s. Након додатних 30 s, напон напајања достиже вредност од 3 V, што је довољно за покретање микроконтролера, тако да је укупно време хладног старта 47 s. Микроконтролер празни примарни кондензатор до одређеног износа док постојећа температурна разлика омогућава његово допуњавање до 3,3 V. Овај процес пражњење/допуна, слично као у случају напона  $V_L$ , се понавља сваки пут када микроконтролер прикупља и шаље податке (сваких 8 s).

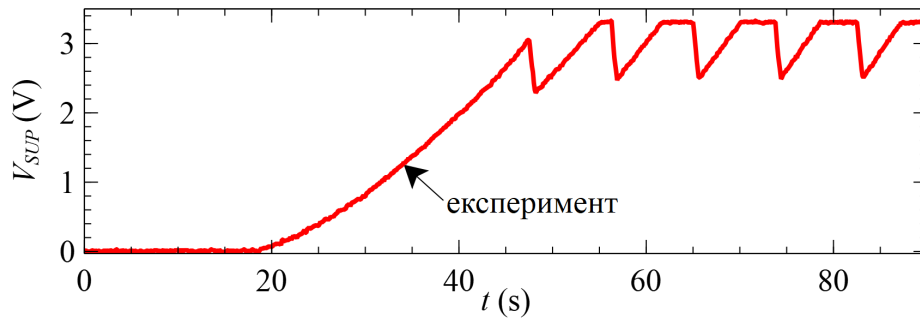
Предност Сауег-овог типа RC мреже, коришћене у описаном SPICE моделу, је могућност приступа интерним температурама у појединим чворовима мреже. У складу са тим, расподела температуре унутар чвора WSN-а добијена симулацијом приказана је на слици 3.9(c). Може се видети да, после постављања чвора на извор загревања, топлота се углавном одмах преноси кроз доњу штампану плочу до алуминијумског одстојника и онда постепено кроз TEG. После 90 s (када систем уђе у стационарно стање), температурна разлика између грејача и топле стране TEG-а је 2 °C. У исто време, TEG се загрева и температура на његовом споју са горњом штампаном плочом расте. Температура на споју горње штампане плоче и хладњака је занемарљиво мања од температуре на споју TEG-а и горње штампане плоче. Ефективна температурна разлика између топле и хладне стране TEG-а је  $\Delta T_{TEG} = 13$  °C. Температурна разлика између основе хладњака, која је залепљена на горњу штампану плочу, и околине је 10 °C. Ови резултати се слажу са резултатима добијеним термовизијском камером, као што је разматрано у [46].

Предложени модел је искоришћен за карактеризацију три комерцијална TEG-а два произвођача као делова структуре разматраног чвора WSN-а. Њихове карактеристике дате су у табели 3.5. TEG-ови су бирани тако да имају унутрашњу електричну отпорност приближну отпорности потрошача, тј. тако да је испуњен услов прилагођења импедансе ( $R_{TEG} = R_L$ ). На тај начин омогућен је максимални пренос снаге од генератора (TEG-а) до потрошача (коло са LTC3108). TEG-ове разликује број термоелектричних парова, параметри материјала, димензије термоелемената и керамичких плоча. Укупне димензије чвора су прилагођене имплементираним TEG-у одговарајућим димензионисањем алуминијумских штампаних плоча, одстојника и термоизолационе пене. Зависности напона на потрошачу ( $V_L$ ) и снаге на потрошачу ( $P_L$ ) на три температурне разлике приказане су на слици 3.10.

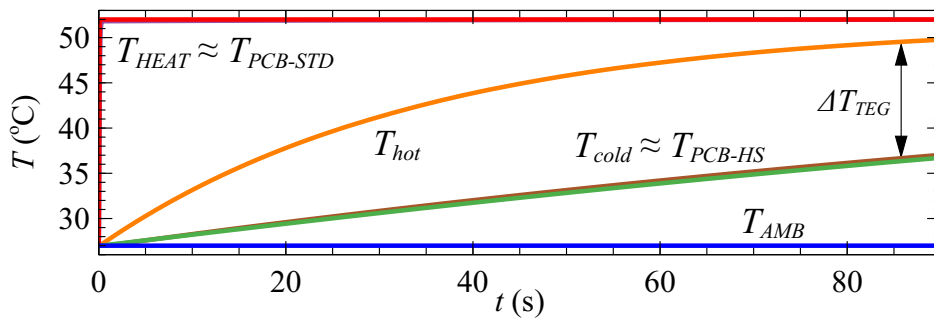
Као што се очекује, са порастом температурне разлике расту напон и снага на потрошачу. TEG4 генерише највеће вредности, и ово је више изражено за веће температурне разлике. После 90 s, при температурној разлици од 25 °C, напон на потрошачу за TEG4 је 140 mV што је 40% већа вредност од 100 mV за TEG1 и дупло веће у поређењу са 70 mV за TEG2. Такође, снага на потрошачу је од 1,6 mW за TEG2 до 7,6 mW за TEG4. Укупна ефикасност система WSN чвора ( $\eta$ ) израчуната као однос  $P_L/Q_{HEAT}$  расте са порастом температурне разлике. Вредност ефикасности расте од 0,04% за TEG2 при  $\Delta T = 15$  °C преко 0,11% за TEG1 при  $\Delta T = 20$  °C до 0,15% за TEG4 при температурној разлици  $\Delta T = 25$  °C. Ниска укупна ефикасност је последица два главна фактора. Први је ниска ефикасност конверзије TEG-ова при малим температурним разликама (1%–2%). Други је успостављена расподела температуре кроз



(a)



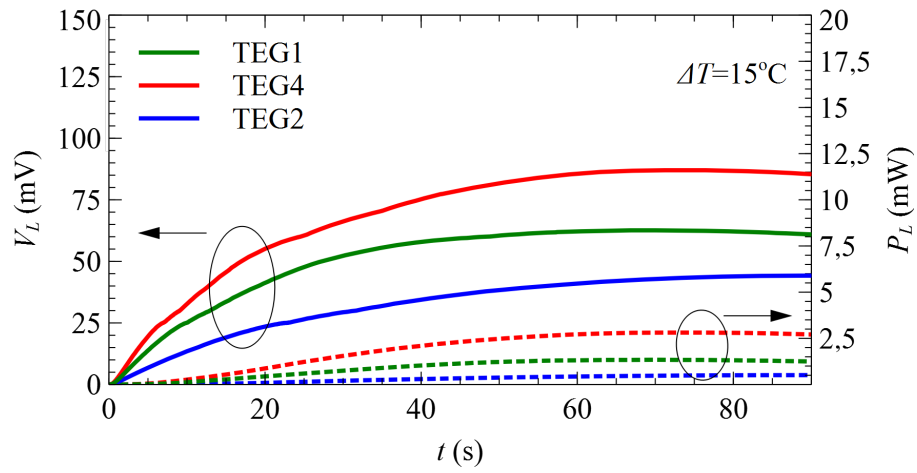
(b)



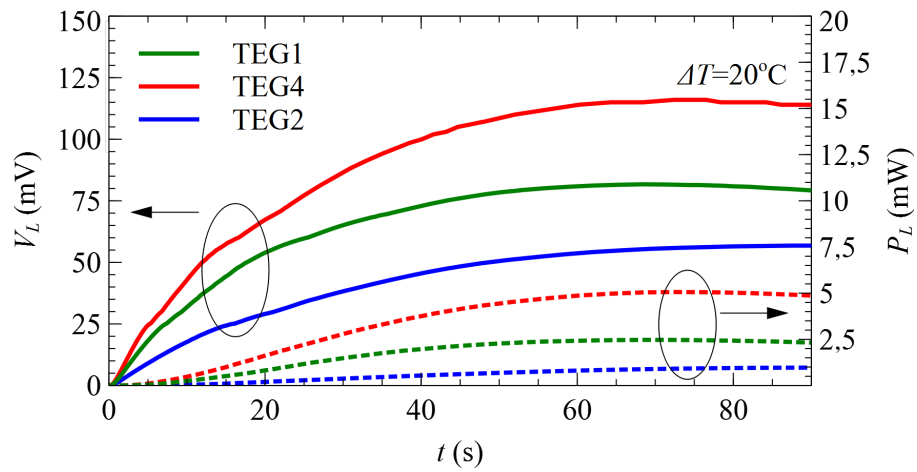
(c)

Слика 3.9: Напон и температуре у комплетном WSN чвору са TEG1 за  $\Delta T = T_{HEAT} - T_{AMB} = 25^\circ\text{C}$ : (a) Напон на оптерећењу TEG-а; (b) Напон напајања електронских компоната чвора; (c) Температуре на карактеристичним спојевима.

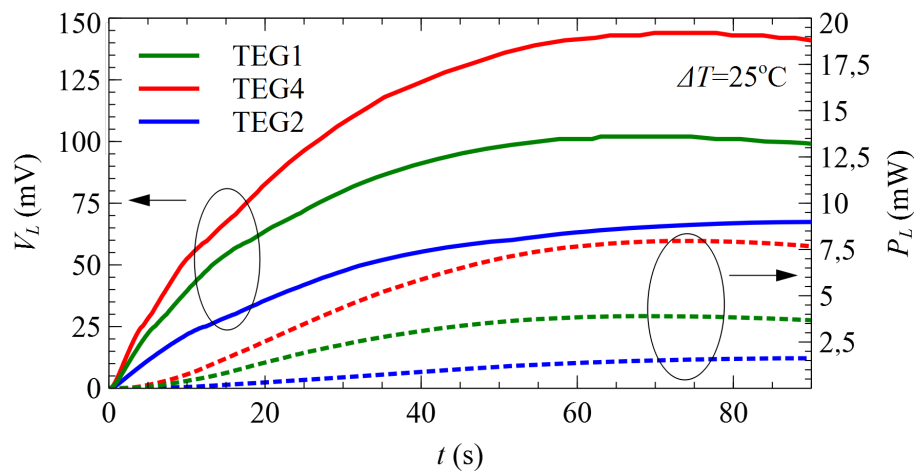




(a)



(b)



(c)

Слика 3.10: Симулиране зависимости напона ( $V_L$ ) и снаге ( $P_L$ ) на оптерећењу од времена за три TEG-а на  $\Delta T$ : (a)  $15^\circ\text{C}$ ; (b)  $20^\circ\text{C}$ ; (c)  $25^\circ\text{C}$ .

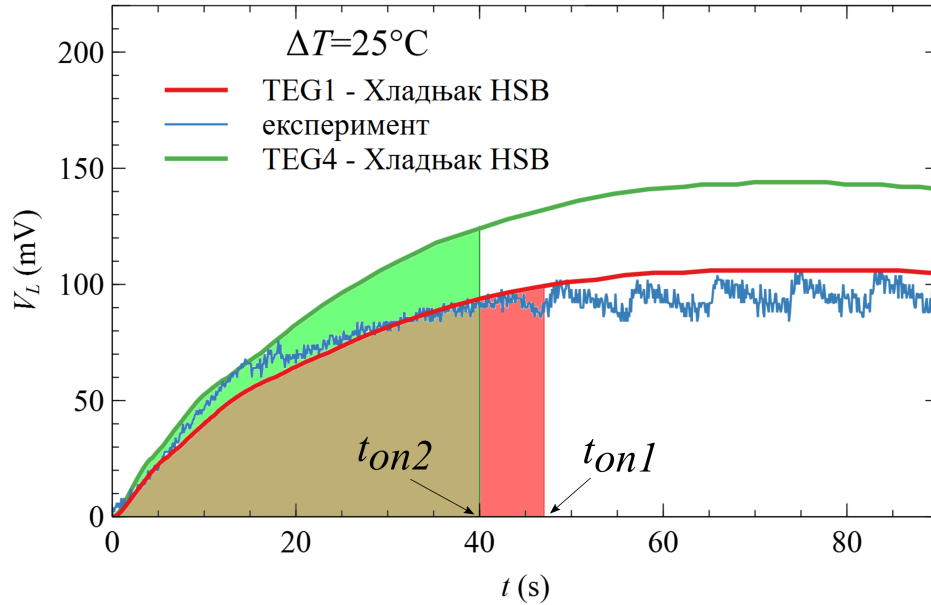
елементе чвора услед природне конвекције као најгорег случаја за механизам дисипације топлоте. Генерално, чвор са TEG4 ће бити 20% бољи у погледу ефикасности од чвора са TEG1 и 90% бољи од чвора са TEG2 за исту температурну разлику. Боље перформансе су последица више него дупло већег броја термоелектричних парова у TEG4 (71) у поређењу са TEG1 и TEG2 (31), и њихове унутрашње електричне отпорности која је ближа услову прилагођења импедансе. Међутим, због веће површине, TEG4 доводи до тога да чвор бежичне сензорске мреже има 20% веће укупне димензије, док би са TEG2 укупне димензије биле смањене 15%. Иако TEG1 и TEG2 имају исти број термоелектричних парова и сличне електричне и термичке отпорности, TEG1 даје око 50% веће вредности напона на потрошачу због дужих термоелектричних ножица. Унутар чвора бежичне сензорске мреже, ово својство обезбеђује већу температурну разлику на крајевима TEG-а што директно утиче на вредност генерисаног напона и претату снагу.

Време хладног старта чвора бежичне сензорске мреже ( $t_{on}$ ) је време које протекне од тренутка постављања чвора на извор топлоте, до достизања напона потребног за рад електронских компонената када су резервоари енергије празни. Ово време има две компоненте, време потребно да се укључи коло за управљање енергијом и време потребно да се постигне жељени напон. Као што је већ истакнуто, код реализованог WSN-а са TEG1 је за стартовање кола за управљање енергијом и почетак пуњења примарног кондензатора потребан напон од 60 mV, што захтева 17 s при температурној разлици од 25 °C. После додатних 30 s, напон напајања достиже 3 V, што је довољно за покретање микроконтролера, тако да је укупно време хладног старта  $t_{on1} = 47$  s (слика 3.11). Количина наелектрисања  $q$  потребна да дође до хладног старта система може се апроксимирати као:

$$q \approx \int_0^{t_{on}} V_L(t) dt. \quad (3.21)$$

На основу ове апроксимације одређена је количина наелектрисања коју је потребно прикупити да би дошло до хладног старта система, што је илустровано осенченом црвеном површином испод криве TEG1 - хладњак HSB (слика 3.11). Из резултата симулације, а на основу познате количине наелектрисања, могуће је одредити време хладног старта за друге комбинације TEG - хладњак. На слици 3.11 дат је пример одређивања времена хладног старта када је WSN реализован са TEG4 и хладњаком HSB. Практичан услов је да површине испод кривих TEG4 - хладњак HSB (осенчено зелено) и TEG1 - хладњак HSB (осенчено црвено) буду исте. Добијено време хладног старта у овом случају је  $t_{on2} = 40$  s. TEG4 има већи број термоелемената, па ће при истој температурној разлици генерисати већи напон за краће време у односу на TEG1, и зато је време хладног старта краће.

Одговарајуће вредности времена хладног старта одређене из зависности напона на потрошачу дате су у табели 3.6. Температурна разлика од  $\Delta T = 15$  °C није довољна за TEG2 да генерише потребну вредност напона. TEG4 омогућава скоро два пута бржи хладни старт него чвор са TEG2 при  $\Delta T = 25$  °C, због боље ефикасности претварања топлотне у електричну енергију. Треба напоменути да TEG1 при датој температурној разлици је ефикасан као TEG4 за 5 °C ниже  $\Delta T$ . Иако TEG2 захтева веће температурне разлике, он може бити примењен у случајевима где димензије чвора представљају битан циљ приликом пројектовања. Треба нагласити да се симулацијама могу одредити на ефикасан и једноставан начин минималне температурне



Слика 3.11: Уз објашњење принципа одређивања времена хладног старта WSN чвора на основу резултата симулације.

разлике потребне да одређени TEG обезбеди предефинисано време хладног старта чвора бежичне сензорске мреже.

Табела 3.6: Време хладног старта чвора WSN-а са разматраним TEG-овима за различите  $\Delta T$ .

| $\Delta T$ ( $^{\circ}C$ ) | TEG1 | TEG2 | TEG4 |
|----------------------------|------|------|------|
| 15                         | 66 s | -    | 55 s |
| 20                         | 54 s | 78 s | 45 s |
| 25                         | 47 s | 70 s | 40 s |

Подаци о расподели температуре унутар чвора (слика 3.9(c)), омогућавају одређивање временских зависности температура топле ( $T_{hot}$ ) и хладне ( $T_{cold}$ ) стране TEG-а, и ефективне температурне разлике на TEG-у ( $\Delta T_{TEG}$ ), када он ради на температурама блиским горњој температурној граници примене, као што је дато на слици 3.12. На овој слици су такође приказане временске зависности напона  $V_L$  када чвор ради под овим условима.

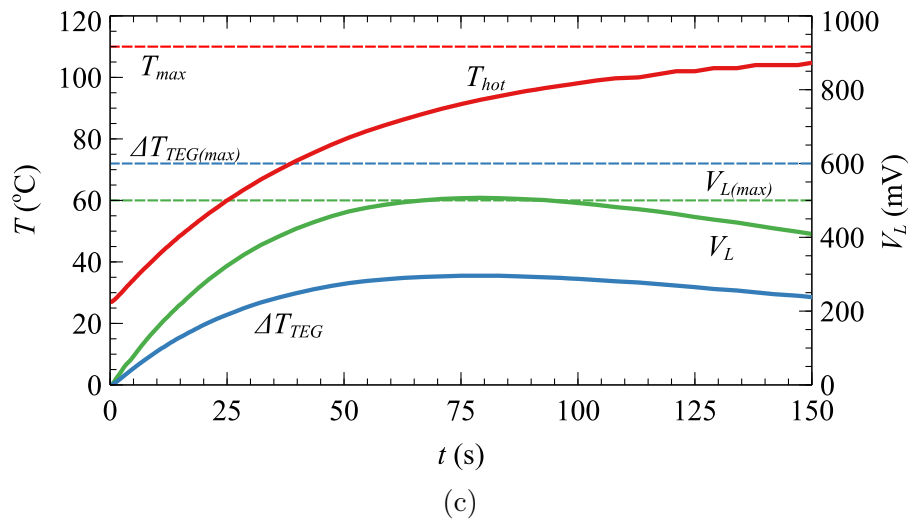
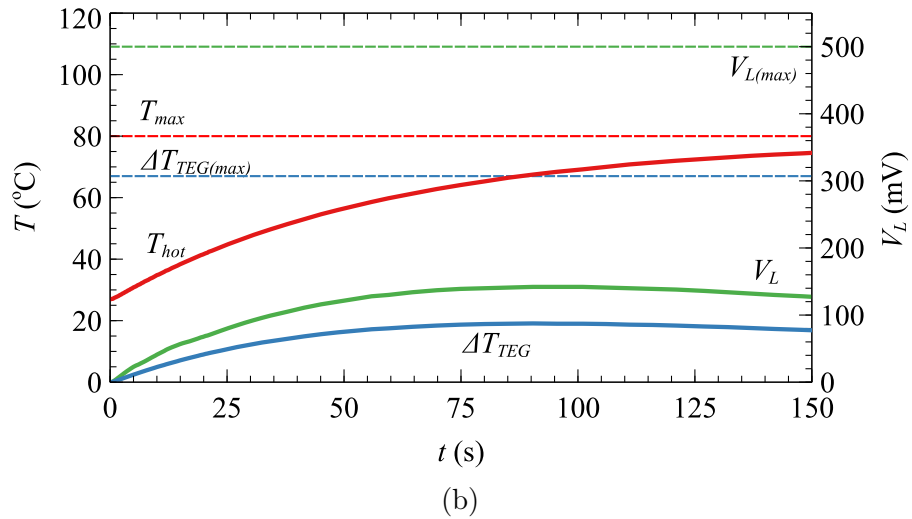
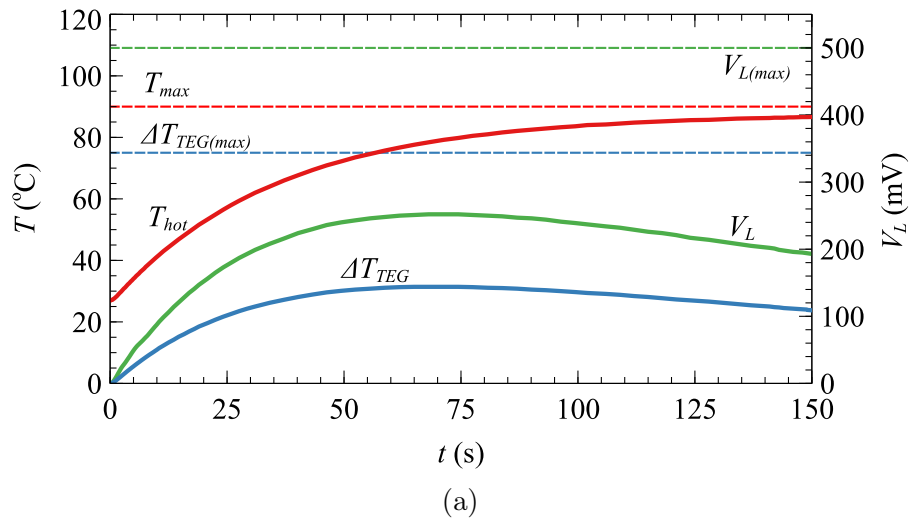
Максимална радна температура TEG-а ( $T_{max}$ ) представља максималну температуру на његовој топлој страни, дакле то је максимална вредност  $T_{HEAT}$ . Максимална температурна разлика ( $\Delta T_{TEGmax}$ ) је специфична за сваки TEG и одређена је његовом технологијом израде. Ове две температуре за разматране TEG-ове су преузете из њихове техничке документације и дате су у табели 3.5. Максимални напон на потрошачу је одређен максималним дозвољеним напонем на улазу кола за управљање енергијом LTC3108 ( $V_{Lmax} = 500 \text{ mV}$ ) [74]. Када се чвор изложи  $T_{HEAT} = T_{max}$ , топла страна TEG-а достиже ову температуру док је  $\Delta T_{TEG}$  доста испод  $\Delta T_{TEGmax}$  за све TEG-ове и стандардне  $T_{AMB}$  вредности. Температура хладне стране је такође и температура унутрашње стране горње штампане плоче на којој се налазе електронске компоненте

(осим сензора температуре). Максималне радне температуре електронских компонента су  $85^{\circ}\text{C}$  или  $125^{\circ}\text{C}$ , зависно од типа и произвођача. Температура штампане плоче је испод ових максимума када је чвор изложен  $T_{HEAT} = T_{max}$ . Узимајући у обзир вредности напона оптерећења, оне постижу максималне вредности после око 70 s, што није критично за TEG1 и TEG2, и ове вредности су много мање од  $V_{Lmax}$ . Међутим, за TEG4 вредност  $V_L$  је врло близу и чак прелази граничне вредности у трајању од десетак секунди, што није прихватљиво за коло за управљање енергијом и цео чвор бежичне сензорске мреже. Шта више, за ниже вредности температуре амбијента, напон на потрошачу ће бити око 6 mV већи за сваки  $^{\circ}\text{C}$  повећаног  $\Delta T$ . Дакле, да би чвор са TEG4 био сигуран, вредност максималне температуре примене  $T_{HEAT}$  треба да буде смањена тако да се добије  $\Delta T = T_{HEAT} - T_{AMB} \leq 80^{\circ}\text{C}$ .

Предложени модел може се користити за оптимизацију перформански чворова бежичних сензорских мрежа са TEG-овима. Пошто су имплементирани TEG-ови комерцијални, њихови технолошки параметри су унапред задати и могу се екстраховати из техничких спецификација. Остали градивни елементи чвора (хладњак, штампане плоче, одстојник, термоизолациона пена), као и коло за управљање енергијом, могу се мењати како би се рад чвора прилагодио датим условима околине. Претходно је детаљно описана процедура за израчунавање вредности елемената модела. Као што је показано, анализом резултата симулације за један одређени дизајн могу се одредити опсези температурне разлике, минимална и максимална примењива температура извора топлоте, снага која се предаје потрошачу, време хладног старта и ефикасност конверзије енергије.

У наставку је предложени модел коришћен као потколо (црна кутија). На слици 3.13 је приказана електрична шема чвора бежичне сензорске мреже као поткола. Корисник потколу прослеђује параметре модела, то су термичке отпорности и капацитивности TEG-а и осталих градивних елемената чвора, као и унутрашњу електричну отпорност TEG-а. На улаз поткола везују се напонски генератори који моделирају температуру топлотног извора и температуру околине. Унутар поткола је контролисани отпорник који моделира отпорност потрошача који је прикључен на TEG и може бити променљив. У овом случају то је улазна отпорност кола за управљање енергијом. Напон и снага предати потрошачу представљају параметре на излазу поткола који омогућавају оптимизацију WSN чвора.

За анализу је направљена тест матрица од четири термоелектрична модула и три хладњака, док остали елементи чвора бежичне сензорске мреже остају исти, али се мењају њихове димензије у складу са изабраним TEG-ом и хладњаком. Термоелектрични модули коришћени у овом истраживању су комерцијалне компоненте, селектоване на основу њихове примењивости у чворовима бежичних сензорских мрежа. Критеријуми избора су број термоелектричних парова, спољашње димензије, дужина термоелемента, као и унутрашња отпорност која је блиска унутрашњој отпорности кола за управљање енергијом. Поред TEG1 који је саставни део реализованог чвора, и овде се узима као референтни, одабрана су још три TEG-а. У табели 3.7 је дат преглед карактеристичних параметара разматраних TEG-ова. Треба напоменути да је материјал за термоелементе свих TEM-ова, допирани бизмут-телурид.

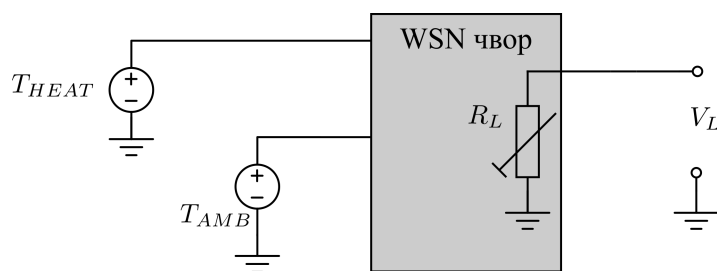


Слика 3.12: Симулиране временске зависности температуре  $T_{hot}$ , ефективне температурне разлике на TEG-у ( $\Delta T_{TEG}$ ) и напона  $V_L$  за  $T_{HEAT} = T_{max}$  и чвор са: (a) TEG1; (b) TEG2; (c) TEG4.  $T_{AMB} = 27^\circ\text{C}$ .

Табела 3.7: Карактеристични параметри размаграних ТEG-ова (II део).

| Комерцијална ознака ТEG-а →   | ET–<br>071-08-15<br>(TEG3)  | GM200–<br>71-14-16<br>(TEG5) | GM200–<br>127-14-16<br>(TEG6) |
|---|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Параметар   |                             |                              |                               |
| Максимална радна температура $T_{max}$ (°C)*  | 90                          | 200                          | 200                           |
| Максимална температурна разлика $\Delta T_{TEGmax}$ (°C)*   | 74                          | -                            | -                             |
| Број термоелектричних парова $N^*$  | 71                          | 71                           | 127                           |
| Спољашње димензије $L \times W \times H$ (mm)*  | $18 \times 18 \times 3,8$   | $30 \times 30 \times 3,8$    | $40 \times 40 \times 3,8$     |
| Површина ТEG-а $A_{TEG}$ (mm <sup>2</sup> )   | 324                         | 900                          | 1600                          |
| Димензије термоелектричног елемента $w \times w \times l$ (mm)*   | $0,8 \times 0,8 \times 1,5$ | $1,4 \times 1,4 \times 1,6$  | $1,4 \times 1,4 \times 1,6$   |
| Дебљина керамичке плоче $l_P$ (mm)  | 0,75                        | 0,8                          | 0,8                           |
| Укупни Зибеков коефицијент $\alpha$ ( $\mu V K^{-1}$ )  | 396                         | 360                          | 360                           |
| Температурни коефицијент $a_\alpha$ (K <sup>-1</sup> )  | $2 \cdot 10^{-3}$           | $5,72 \cdot 10^{-4}$         | $5,72 \cdot 10^{-4}$          |
| Специфична термичка проводност термоелектричног елемента $\lambda$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )           | 1,5                         | 1,59                         | 1,59                          |
| Специфична термичка проводност керамичке плоче $\lambda_P$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )                   | 10,8                        | 25                           | 25                            |
| Специфична електрична отпорност термоелектричног елемента $\rho_0$ ( $\mu\Omega m$ )                              | $3,4 \cdot 10^{-3}$         | $4,98 \cdot 10^{-2}$         | $4,98 \cdot 10^{-2}$          |
| Температурни коефицијент $\rho - a_\rho$ (K <sup>-1</sup> )   | 0,093                       | 0,035                        | 0,02                          |
| Термичка отпорност керамичке плоче $R_P$ (K W <sup>-1</sup> )   | 11                          | 3,62                         | 2,02                          |
| Унутрашња термичка отпорност $R_{thTEG}$ (K W <sup>-1</sup> )   | 3,6                         | 1,19                         | 1,31                          |
| Унутрашња електрична отпорност $R_{TEG0}$ ( $\Omega$ )  | 7,74                        | 7,74                         | 7,74                          |
| Густина материјала термоелектричног елемента $d_{TEG}$ (g cm <sup>-3</sup> )                                      | 3,57                        | 3,57                         | 3,57                          |
| Густина материјала керамичке плоче $d_P$ (g cm <sup>-3</sup> )  | 0,165                       | 0,165                        | 0,165                         |
| Специфични топлотни капацитет материјала термоелектричног елемента $c_{TEG}$ (J g <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) | 0,837                       | 0,837                        | 0,837                         |
| Специфични топлотни капацитет материјала керамичке плоче $c_P$ (J g <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )               | 0,445                       | 0,445                        | 0,445                         |
| Запремина $N$ термоелектричних парова $V_{TEG}$ (cm <sup>3</sup> )  | 0,136                       | 0,136                        | 0,136                         |
| Запремина керамичке плоче $V_P$ (cm <sup>3</sup> )  | 0,243                       | 0,243                        | 0,243                         |
| Термичка капацитивност $N$ термоелектричних парова $C_{thTEG}$ (JK <sup>-1</sup> )                                | 0,174                       | 0,174                        | 0,174                         |
| Термичка капацитивност керамичке плоче $C_P$ (JK <sup>-1</sup> )  | 0,726                       | 0,726                        | 0,726                         |

\* Параметри преузети из техничке документације.



Слика 3.13: Електрична шема чвора WSN-а као поткола.

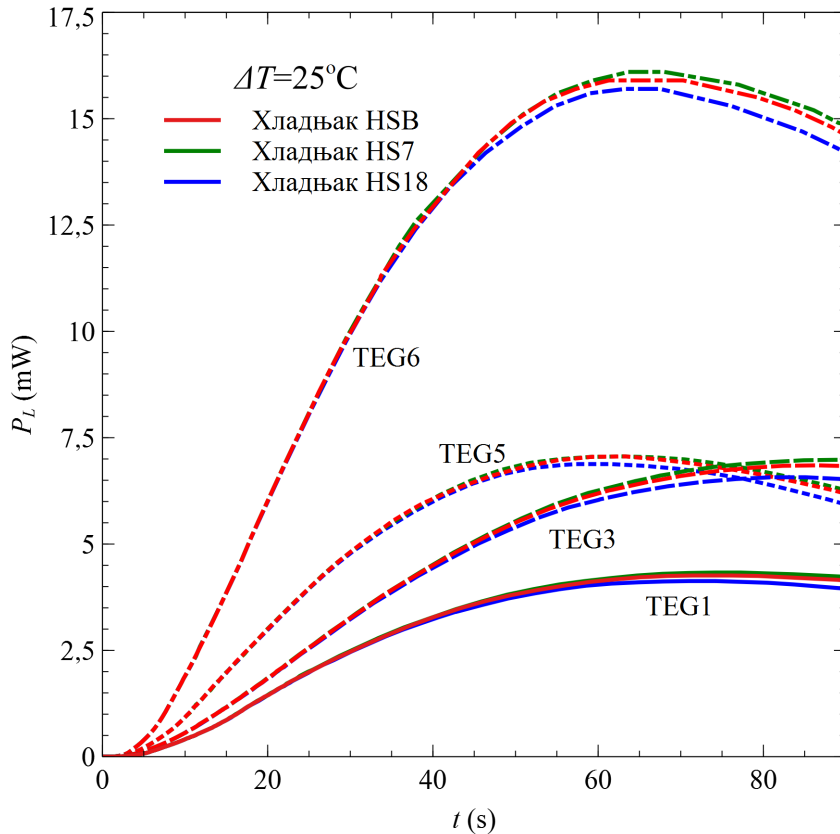
Избор хладњака за ово истраживање је рађен на основу њиховог материјала, геометрије и површине примењених TEG-ова. Материјали су алуминијум, керамика алумина и микропорозна бакарна пена. У табели 3.8 су дате термичке отпорности  $R_{thHS}$ , специфични топлотни капацитет  $c_P$  и густина  $d$  материјала хладњака, запремина хладњака  $V$ , као и израчуната термичка капацитивност  $C_{thHS}$ . Треба напоменути да је хладњак HSB коришћен у референтном дизајну.

Табела 3.8: Својства разматраних хладњака.

|  | HSB                | HS7          | HS18         |
|--|--------------------|--------------|--------------|
| Димензије (mm)                             | 35×35×7,5          | 35×35×10     | 30×30×2,5    |
| Материјал                                  | алуминијум         | алумина      | бакарна пена |
| Геометрија                                 | са ребрима         | са стубићима | равни        |
| Произвођач                                 | Fischer Elektronik | Spreadfast   | Versarien    |
| $R_{thHS}$ (K W <sup>-1</sup> )            | 11                 | 15,4         | 25           |
| $c_P$ (J g <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) | 0,92               | 0,837        | 0,385        |
| $d$ (g cm <sup>-3</sup> )                  | 2,7                | 3,57         | 3,32         |
| $V$ (cm <sup>3</sup> )                     | 1,02               | 4,694        | 2,25         |
| $C_{thHS}$ (JK <sup>-1</sup> )             | 2,54               | 14,03        | 2,86         |

На слици 3.14 је приказана зависност снаге предате потрошачу у функцији времена при примењеној температурној разлици од 25 °C, за све комбинације TEG-хладњак. Резултати показују да, независно од избора TEG-а, утицај хладњака је уочљив тек када систем уђе у стабилно стање. При томе хладњаци од алуминијума и алумине дају боље перформансе WSN чвора у односу на хладњак од бакарне пене. Хладњаци од алуминијума и алумине дају врло сличне резултате, с тим да се хладњаци од алумине показују као ефикаснији. Ако као референтни хладњак поставимо хладњак од алумине, хладњак од алуминијума је 2-3% мање ефикасан, док је хладњак од бакарне пене мање ефикасан око 6%. Са аспекта избора TEG-а, TEG6 даће највећу снагу, а TEG1 најмању. Међутим, TEG1 и TEG3 због својих мањих габарита, тј. мање термичке капацитивности, у комбинацији са хладњацима већих димензија, се ефикасно хладе, тако да се одржава константа температурна разлика на крајевима TEG-а, што резултује тиме да снага која се предаје потрошачу буде константна. С друге стране, TEG5 и TEG6 већих габарита, димензија сличних као димензије основе хладњака, иако после одређеног времена доприносе максималној снази која се предаје потрошачу, након тога та снага опада. Наиме, TEG-ови се загревају, хладњаци не успевају ефикасно да одведу вишак топлоте, тако да се смањује температурна разлика

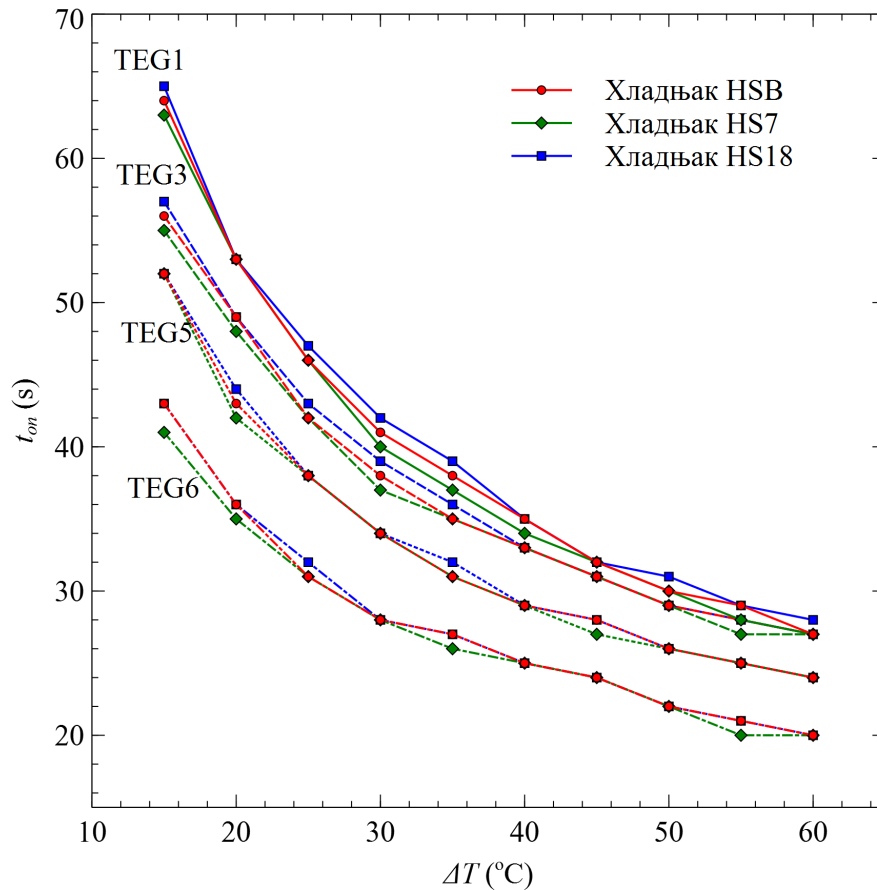
на крајевима TEG-а, а тиме обара и вредност снаге која се предаје потрошачу. Иако TEG5 преда већу снагу потрошачу брже него TEG3, после 90 s TEG3 ће испоручивати већу снагу. Од тренутка примене топлоте на топлој страни WSN-а, систем са TEG5 и хладњаком HSB ће предавати максималну снагу (7,06 mW) после 63 s, док ће систем са TEG3 и хладњаком HS7 за исто време испоручивати потрошачу 6,4 mW, што је 10 % мање снаге. Када систем уђе у стабилно стање, склоп са TEG5 и хладњаком HS7 даваће 5,77 mW снаге, а склоп TEG3 и хладњака HS7 6,9 mW, тј. 19 % више снаге.



Слика 3.14: Зависност снаге предате потрошачу у функцији времена за различите комбинације TEG-ова и хладњака као делова чвора WSN-а.

На слици 3.15 је приказана зависност времена хладног старта у функцији примењене температурне разлике на WSN чвор за све комбинације TEG-хладњак. Очекивано, са порастом температурне разлике, време хладног старта опада. Са повећањем површине TEG-а, смањењем термичке отпорности термоелемената, као и повећањем термичке капацитивности, смањује се време хладног старта. Најмање време хладног старта (око 42 s при температурној разлици од  $15^\circ\text{C}$ ) постиже се са TEG-ом највеће површине, најмање термичке отпорности термоелектричних парова и највеће термичке капацитивности (TEG6). TEG1 има 1,7 пута мању површину од TEG6 и с њим ће време хладног старта чвора при истој температурној разлици бити око 64 s. При већим температурним разликама (већим од  $40^\circ\text{C}$ ), не постоји значајна разлика у временима хладног старта за TEG-ове мањих димензија. Резултати симулације показују да избор хладњака не утиче много на време хладног старта чвора WSN-а; разлика је у зависности од изабраног хладњака 1-2 s, за исти TEG. Утврђено је да је хладњак HS7 најбољи у поређењу са осталим испитиваним хладњацима, тј. у комбинацији са свим испитиваним TEG-овима утиче на краће време хладног старта чвора WSN-а.

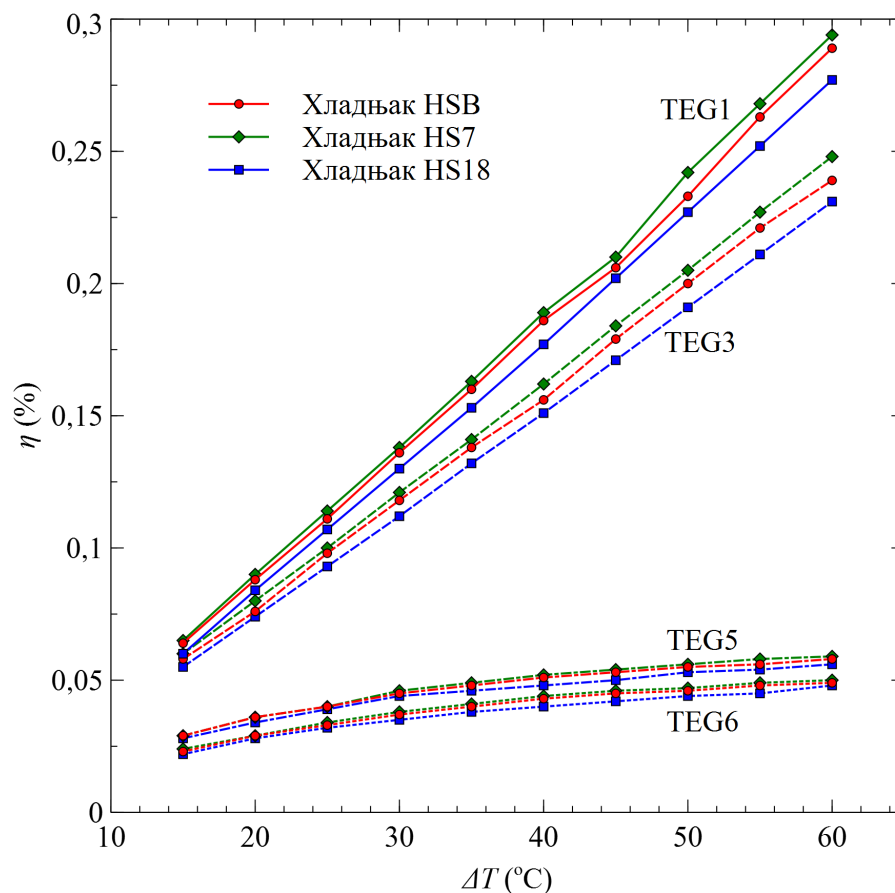




Слика 3.15: Зависност времена хладног старта WSN чвора у функцији примењене температурне разлике  $\Delta T = T_{HEAT} - T_{AMB}$  за различите комбинације TEG-хладњак.

На слици 3.16 је приказана зависност укупне ефикасности конверзије енергије за чвор бежичне сензорске мреже ( $\eta$ ) за све комбинације TEG - хладњак у функцији температурне разлике. Претходно су детаљно описани узроци ниских вредности ефикасности. Може се уочити да са порастом температурне разлике линеарно расте вредност ефикасности. Већу ефикасност показују TEG-ови мање површине. При нижим температурним разликама нису изражене разлике у погледу ефикасности за све комбинације TEG - хладњак. Очигледно је да ће TEG-ови мање површине имати веће промене ефикасности у односу на TEG-ове велике површине. Са порастом температурне разлике изражена је промена ефикасности за TEG1 (при  $\Delta T = 15^\circ\text{C}$  је  $\eta = 0,064\%$ , а при  $\Delta T = 60^\circ\text{C}$  је  $\eta = 0,294\%$ ), док за TEG6 велике површине, при истом опсегу температурних промена нема велике промене ефикасности (при  $\Delta T = 15^\circ\text{C}$  је  $\eta = 0,029\%$ , а при  $\Delta T = 60^\circ\text{C}$  је  $\eta = 0,056\%$ ). При поређењу ефикасности за чворове са TEG1 и TEG3, који су сличних површина, може се уочити да тек при већим температурним разликама постоји израженија промена овог параметра са избором хладњака. Без обзира на изабрани TEG, у свим случајевима, ако алуминијумски хладњак поставимо за референтни, хладњак од алумине ће утицати на повећање ефикасности. С друге стране, хладњак од бакарне пене ће смањити ефикасност. На пример, референтни чвор реализован са TEG1 и хладњаком од алуминијума, при температурној разлици од  $55^\circ\text{C}$  имаће ефикасност  $\eta = 0,268\%$ . Ако би био искоришћен хладњак од алумине ефикасност би порасла за  $0,002\%$ , док би се са хладњаком од микропорозне бакарне

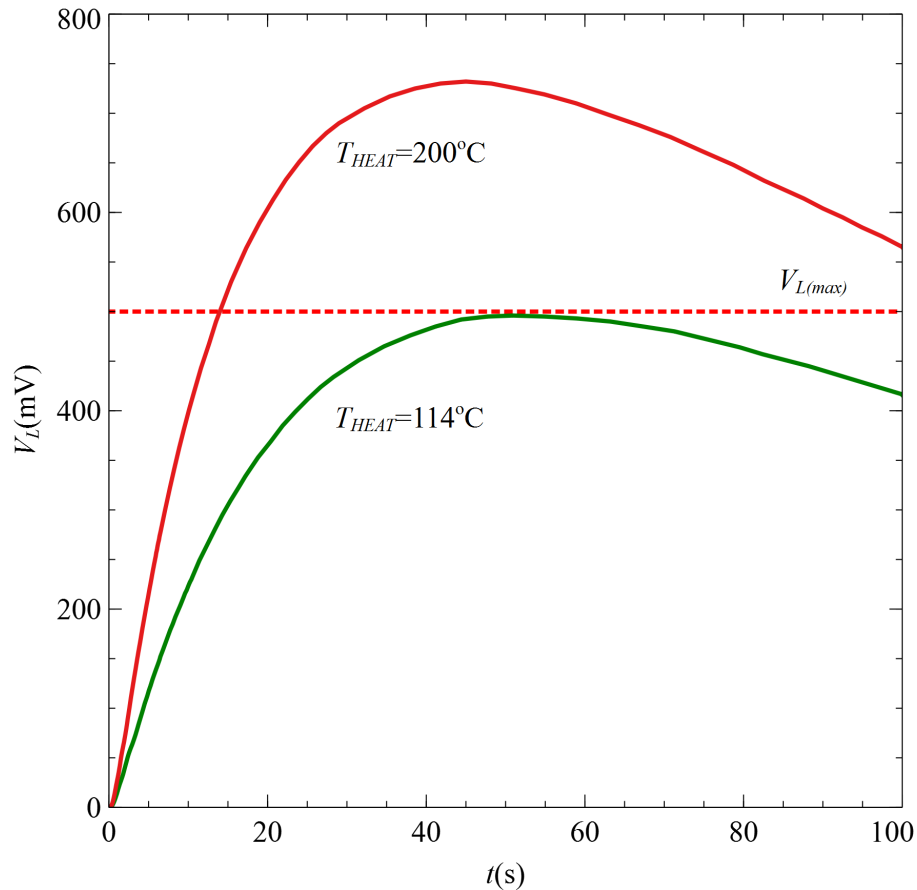
пене смањила за 0,004%. Треба напоменути да су ове промене израженије за TEG-ове мањих површина, јер су основе хладњака веће од њихове површине па успешно одржавају температурну разлику.



Слика 3.16: Зависност ефикасности WSN чвора у функцији примењене температурне разлике  $\Delta T = T_{HEAT} - T_{AMB}$  за различите комбинације TEG-хладњак.

Предложени модел може се користити за одређивање максималне примењиве температуре топлотног извора. Симулацијама је утврђено да се TEG3 и TEG5 могу применити у чвору WSN-а и при максималним радним температурама на топлој страни прописаним од стране произвођача (табела 3.7). У том случају напон који ће бити на улазу кола за управљање енергијом не прелази  $V_{L(max)} = 500 \text{ mV}$ . Међутим, TEG6 као део чвора WSN-а не сме се користити на максималној температури примене коју даје произвођач (200 °C). Као што је илустровано на слици 3.17 у том случају напон који се из TEG-а доводи на улаз кола за управљање енергијом је далеко изнад дозвољеног. Симулацијом је одређено да максимална температура топлотног извора не сме бити већа од 114 °C, у супротном биће генерисан напон који није безбедан за коло LTC3108.

Као што је већ речено, разматрани чвор бежичне сензорске мреже има компактан дизајн што га чини робусним и неосетљивим на повећано механичко напрезање. Због круте сендвичасте структуре може да издржи вибрације значајних амплитуда и фреквенција. Термоизолациона пена која попуњава простор између алуминијумских штампаних плоча додатно штити електронске компоненте од механичких утицаја као и од утицаја повишене влажности ваздуха. Такође, постоји могућност да се простор између штампаних плоча обложи или излије у пластици да би уређај био отпоран на



Слика 3.17: Зависност напона на потрошачу у функцији времена за TEG6 у оквиру WSN чвора при различитим температурама тоplotног извора.

влажу. Критичан корак у поступку реализације уређаја је остваривање доброг контакта између хладњака и горње штампане плоче помоћу термичког лепка. Температурни лимити уређаја дефинисани су на основу података из техничке документације о температурним лимитима компонената чвора. Погодан је за различите примене где је потребно мерити температуре до  $100^\circ\text{C}$ . Обезбеђује снагу истог реда величине као и слични уређаји (неколико  $\text{mW}$  при ефективним температурним разликама од  $15^\circ\text{C}$ – $25^\circ\text{C}$ ). Иако је време хладног старта чвора одређено углавном термичким својствима његових саставних делова, избор TEG-а са 127 термоелектричних парова може смањити ово време на 20 s.

## 3.2 Просторни SPICE компатибилни модел

Симулације које се изводе у мултифизичком домену (механичком, термичком и електричном) методом коначних елемената (FEM - Finite Element Method) дају најтачније резултате када је реч о перформансама система као што су чворови WSN-а. Међутим, такви алати за симулацију су слабо компатибилни са симулаторима коришћеним у електричном дизајну кола. С друге стране, SPICE симулације представљају ефикасан приступ у пројектовању и оптимизацији чворова WSN-а при избору одговарајућег TEG-а са неколико аспеката (ефикасност, време хладног старта, димензије чвора). У складу са тим, постоји потреба за развојем еквивалентних просторних (3D) SPICE модела неелектричних делова система да би се постигла задовољавајућа тачност симулационих резултата.

Аналогија преноса топлоте коришћењем RC кола, чиме се дефинише веза електричног и термичког домена, према литератури, први пут је уведена још 1965. године [76]. Овај добро познати метод је коришћен за моделирање термичких ефеката различитих електронских компонената [18, 21, 24, 68]. Такође, концепт просторног RC модела први пут је уведен 1999. године за моделирање међувеза у интегрисаним колима [77]. Овај концепт касније су користили и други аутори да моделирају синхроне машине [78], везе у колима са циљем анализе поузданости [79] и соларне ћелије [80]. У раду [81], аутори су описали општи еквивалентни модел за расподелу температуре који узима у обзир латерални и вертикални проток топлоте и ефекат њене апсорпције. Модел укључује термичке отпорности и капацитивности, као и струјни генератор који симулира топлотни флуks који потиче од снаге генерисане у градивној ћелији. Аутори су представили концепт повезивања неколико елементарних ћелија са циљем електро-термичке симулације комплексних система. У раду [82], аутори су предложили компактни термички модел који може бити коришћен у процесу пројектовања интегрисаних кола са хлађењем путем протока течности, реализованим у MEMS технологији. Просторни модел чврстих делова система је заснован на термичкој RC мрежи, док је за моделирање подсистема за хлађење путем течности модел проширен напонски контролисаним струјним изворима који представљају проток топлоте у/из микроканала. Модел је успешно верификован поређењем симулационих и експерименталних података, на примеру 3D мултипроцесорског система на чипу са хлађењем путем протока течности. Цео систем је описан у симулацији повезивањем елементарних ћелија. Концепт просторног термичког модела са дистрибуираним термичким отпорностима унутар елементарне ћелије је коришћен у раду [79]. Аутори су користили овај приступ да прикажу побољшани проширени Kryl subspace метод за повећање брзине симулације VLSI кола са великим бројем улазних портова. Они су показали да, применом овог метода, време симулације не зависи од броја улазних портова. У раду [83], просторна RC мрежа чипа је коришћена за термичку анализу. Аутори су поредили времена симулације са оваквим приступом у моделирању за два итеративна метода: Cholesky Preconditioned Conjugate Gradient (ICCG) и Fast Transform Preconditioned Conjugate Gradient (FT-PCG). За симулацију сложених система заснованих на TEG-у може се користити и језик Modelica. У раду [84] представљен је временски просторни модел са једнодимензионалном резолуцијом за термоелектрични модул, чији су улазни параметри, параметри материјала и геометрије. Овим приступом избегава се увођење електротермалне аналогије потребне у SPICE моделирању.

Термоелектрични ефекти су уведени у просторни модел по први пут у раду [85].

Аутори су применили модел за симулацију термоелектричног harvester-a на чипу. Овај рад био је полазна тачка за моделирање чвора WSN-a који је предмет ове дисертације. За разлику од оригиналног модела [85], у овој дисертацији, термичке и електричне отпорности су моделиране параметарски дефинисаним отпорницима, без коришћења dummy отпорности, чиме је смањен број елемената еквивалентног кола. Једно од последњих истраживања где се користи просторни еквивалентни RC модел је објављено у [86]. Аутори су моделирали термоелектрични систем који садржи термоелектрични модул и металну плочицу, коришћењем симулационог окружења за контролу процеса Simscape-Simulink. Просторни модел је примењен да опише пренос топлоте кондукцијом кроз и конвекцијом са металне плочице.

У наставку ће бити дат просторни SPICE компатибилни модел чвора бежичне сензорске мреже који садржи неелектричне делове (као што су алуминијумске штампане плоче и хладњак) и TEG. Модел TEG-a, заснован на оном предложеном у [85], поред преноса топлоте кроз његове керамичке плоче, укључује и термоелектричне ефекте који се јављају унутар компоненте. Модел омогућава електричну и термичку карактеризацију чвора WSN-a са различитим TEG-овима и хладњацима. Овај приступ омогућава електричну симулацију сложених система, као што је чвор WSN-a, при чему се до решења долази брже и користи се мање меморије него у FEM симулацијама. Предност просторног модела је што се његови параметри могу одредити без додатних експеримената. Димензије се могу преузети из техничке документације термоелектричних модула, док се параметри материјала могу наћи у релевантим базама података [87, 88]. Недостатак просторног модела је његово сложено еквивалентно коло. Међутим, ова сложеност не доводи до проблема конвергенције при симулацији у временском домену.

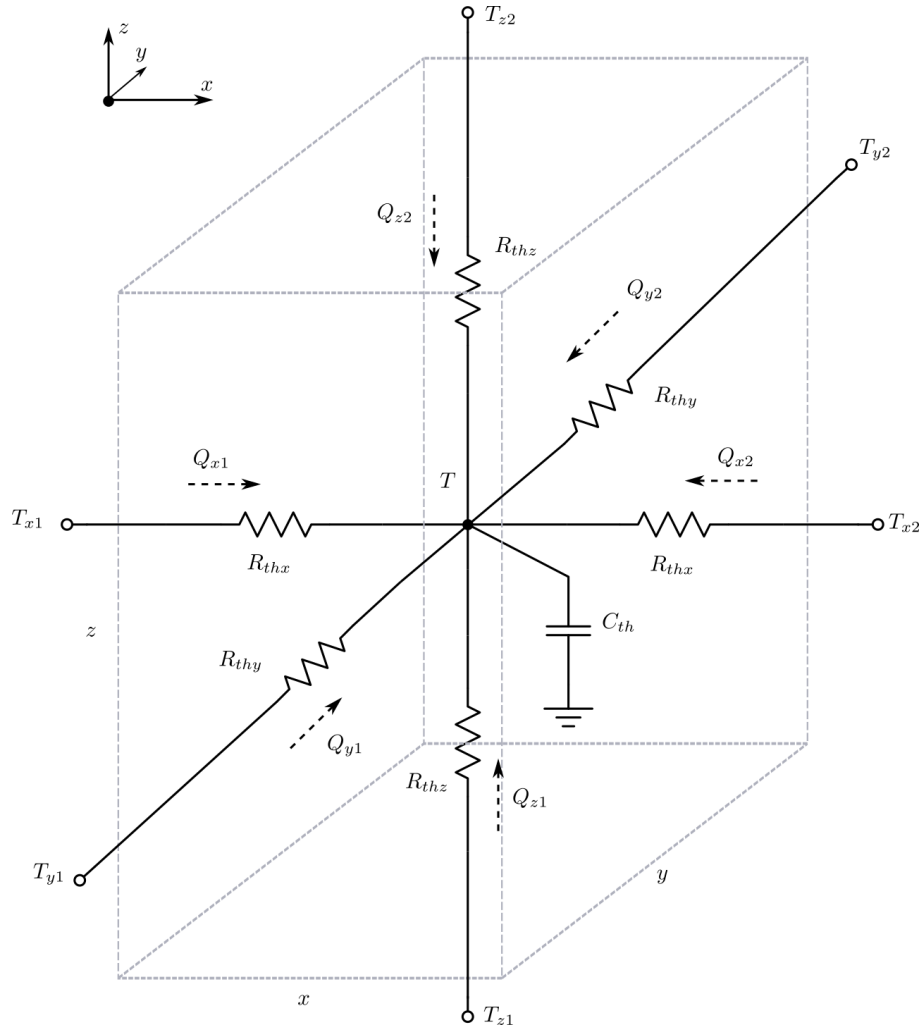
### 3.2.1 Формирање просторног SPICE модела неелектричних делова чвора WSN-a

Чвор WSN-a коришћен у овој дисертацији има неколико неелектричних делова који одређују перформансе система својим термичким својствима - штампане плоче са алуминијумским језгром, алуминијумски одстојник, слојеви термичког лепка, термоизолациона пена, керамичке плоче TEG-a и хладњак. Просторни еквивалентни SPICE модел сваког дела, базиран на електротермичкој аналогiji (Табела 3.1), може се представити одговарајућим електричним величинама. Ово је добро познати приступ у моделирању, који се користи више од 20 година [22, 77, 79, 82, 85]. Градивна ћелија модела има димензије  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , као што је приказано на слици 3.18. Свака ћелија се карактерише апсолутном температуром у централној тачки  $T$  и температурама на њеним површинама  $T_{ij}$  ( $i = x, y, z; j = 1, 2$ ). Укупна термичка отпорност ћелије је дистрибуирана дуж координатних оса од централне тачке до сваке површине. Парцијалне термичке отпорности су:

$$R_{thx} = \frac{1}{2\lambda} \frac{x}{yz}, R_{thy} = \frac{1}{2\lambda} \frac{y}{xz}, R_{thz} = \frac{1}{2\lambda} \frac{z}{xy}, \quad (3.22)$$

где је  $\lambda$  специфична термичка проводност материјала. Ова вредност је температурно зависна, са вредношћу  $\lambda_0$  на референтној температури  $T_{ref} = 300$  K и температурним коефицијентом  $\alpha_\lambda$ . Из тог разлога су термичке отпорности моделиране отпорницима чије су вредности параметарски зависне, у складу са једначином:

$$R_{thi} = \frac{R_{thi0}}{1 + a_\lambda(T - T_{ref})}, (i = x, y, z). \quad (3.23)$$



Слика 3.18: Градивна ћелија SPICE компатибилног просторног еквивалентног модела неелектричних делова чвора WSN-а, на основу [77,79,82,85].

Укупна термичка капацитивност  $C_{th}$  је повезана између централне тачке ћелије и термичке масе (0 K). Вредност термичке капацитивности је:

$$C_{th} = cdV_{cell}, \quad (3.24)$$

где је  $c$  специфични топлотни капацитет материјала,  $d$  је густина материјала и  $V_{cell} = x \times y \times z$  је запремина градивне ћелије.

Проток топлоте од површине ћелије према њеном центру ( $Q_{ij}$ ) прати Фуријеов закон провођења топлоте:

$$T_{ij} - T = R_{thi}Q_{ij}, (i = x, y, z,); (j = 1, 2). \quad (3.25)$$

Температура у централној тачки градивне ћелије се поставља као почетни услов и обично је једнака температури околине.

### 3.2.2 Формирање просторног SPICE модела термоелектричног генератора

Термоелектрични генератор се састоји из великог броја термоелектричних парова електрично повезаних редно преко металних контаката и термички везаних паралелно преко две керамичке плоче. Керамичке плоче TEG-а су неелектрични делови и оне се моделирају на претходно описани начин. С друге стране, термоелектрични парови се састоје од термоелемената направљених од полупроводничких легура *n*- и *p*- типа на бази *Bi-Te* или *Pb-Te* и зато TEG модел треба да укључи термоелектричне ефекте. Инспирација за овај модел долази од оригиналног модела описаног у [85], коришћеног за симулацију термоелектричног модула на чипу. У овој дисертацији, оригинални модел је поједностављен и примењен за симулацију термоелектричног генератора, као саставног дела чвора WSN-а. Слика 3.19 приказује шему SPICE компатибилног просторног модела једног термоелемента који представља градивну ћелију. Покретни носиоци наелектрисања унутар термоелемента дифундују од топле стране према хладној страни када се он изложи температурној разлици. Акумулација носилаца наелектрисања резултира укупним наелектрисањем (негативним за електроне и позитивним за шупљине) на хладној страни елемента и појавом напона. Везе између величина везаних за један термоелемент су дате у наставку. Електрични потенцијал  $v_{i1}$  ће се појавити на једној страни ћелије због температуре  $T_{i1}$  и потенцијал  $v_{i2}$  ће се појавити на другој страни ћелије због температуре  $T_{i2}$ :

$$v_{i1} = \alpha T_{i1}, \quad (3.26)$$

$$v_{i2} = \alpha T_{i2}, (i = x, y, z). \quad (3.27)$$

Овде је  $\alpha$  Зибеков коефицијент термоелектричног материјала (*n*- или *p*-тип полупроводника) који је температурно зависан. Он има вредност  $\alpha_0$  на референтној температури  $T_{ref} = 300$  K и температурни коефицијент  $a_\alpha$ . Дакле, електрични део SPICE модела са слике 3.19 садржи два контролисана напонска генератора (означена као  $V_{i1}$  и  $V_{i2}$ ) чије вредности су једнаке потенцијалима  $v_{i1}$  и  $v_{i2}$  [85]. Вредност напона кроз ћелију дуж одређене осе при отвореном колу представља Зибеков напон:

$$V_i = v_{i1} - v_{i2} = \alpha_0[1 + a_\alpha(T - T_{ref})](T_{i1} - T_{i2}), (i = x, y, z). \quad (3.28)$$

Разлика температура  $T_{i1}$  и  $T_{i2}$  одређује знак генерисаног напона.

Електрична отпорност термоелектричног елемента дефинисаног типа полупроводника представља део унутрашње отпорности TEG-а  $R_{TEG}$ . Електрична отпорност градивне ћелије је расподељена дуж координатних оса од централне тачке до сваке површине. Ове парцијалне електричне отпорности су:

$$R_x = \rho \frac{x}{2yz}, R_y = \rho \frac{y}{2xz}, R_z = \rho \frac{z}{2xy}, \quad (3.29)$$

где је  $\rho$  специфична електрична отпорност термоелектричног материјала, која је температурно зависна са температурним коефицијентом  $a_\rho$ . У SPICE моделу отпорности су моделиране отпорницима који су параметарски зависни према следећем изразу:

$$R_i = R_{i0}[1 + a_\rho(T - T_{ref})], (i = x, y, z), \quad (3.30)$$

где је  $R_{i0}$  парцијална електрична отпорност на референтној температури.

Оптерећење  $R_L$  повезано на TEG затвара електрично коло и омогућава проток електричне струје  $I_L$ . Ова струја тече кроз термоелементе и има компоненте -  $i_{ij}$ . То доводи до појаве Пелтијевог и Џуловог ефекта. Пелтијев ефекат узрокује апсорпцију топлоте на једној страни елемента и дисипацију топлоте на другој страни:

$$Q_{Pelt_{ij}} = \alpha_0[1 + a_\alpha(T - T_{ref})]T_{ij}i_{ij}, (i = x, y, z); (j = 1, 2). \quad (3.31)$$

Термички део SPICE модела зато мора да буде проширен тако да укључи овај ефекат, па је зато додатно шест контролисаних струјних генератора. Њихове вредности представљају производ напона на генераторима  $V_{ij}$  и струје кроз њих [85] (видети слику 3.19):

$$Q_{Pelt_{ij}} = (v_{ijj} - v_{ij})i_{ij}, (i = x, y, z); (j = 1, 2). \quad (3.32)$$

Џулов ефекат се такође појављује код TEG-а. Манифестује се као дисипација топлоте са материјала који има електричну отпорност различиту од нуле услед протицања електричне струје:

$$Q_{Joul_{ij}} = (v_{ijj} - v_0)i_{ij}, (i = x, y, z); (j = 1, 2). \quad (3.33)$$

SPICE модел за Џулов ефекат се састоји из шест контролисаних струјних генератора, по један за сваку отпорност [85]. Пошто сви генератори доводе струју до централне тачке ћелије, њихова сума је представљена само једним генератором на слици 3.19.

Термоелектрични пар састоји се из термоелемената чији су Зибекови коефицијенти супротног знака па се генерисани напони сабирају. Укупно, TEG са  $N$  термоелектричних парова изложен температурној разлици  $\Delta T^*$  (на топлој страни структуре је  $T_{hot}$  и на хладној страни је  $T_{cold}$ ) генерише Зибеков напон:

$$V_{TEG} = N\alpha(T_{hot} - T_{cold}) = N\alpha\Delta T^*. \quad (3.34)$$

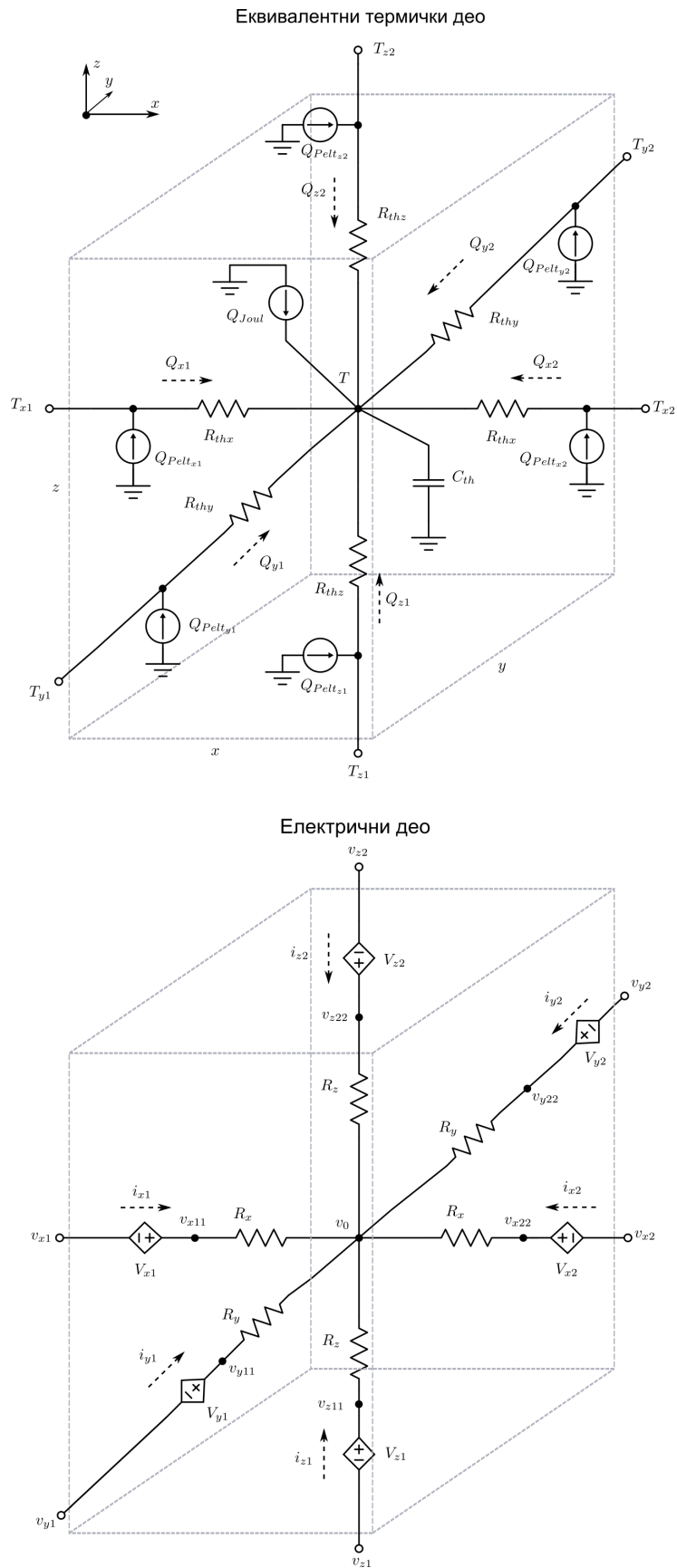
Укупни Зибеков коефицијент за n- и p-тип полупроводника  $\alpha = \alpha_p - \alpha_n$  је такође температурно зависан. Проток електричне струје доводи до пада напона на унутрашњој отпорности TEG-а, тако да је напон на потрошачу једнак:

$$V_L = V_{TEG} - R_{TEG}I_L = R_L I_L. \quad (3.35)$$

### 3.2.3 Формирање просторног SPICE модела комплетног чвора WSN-а

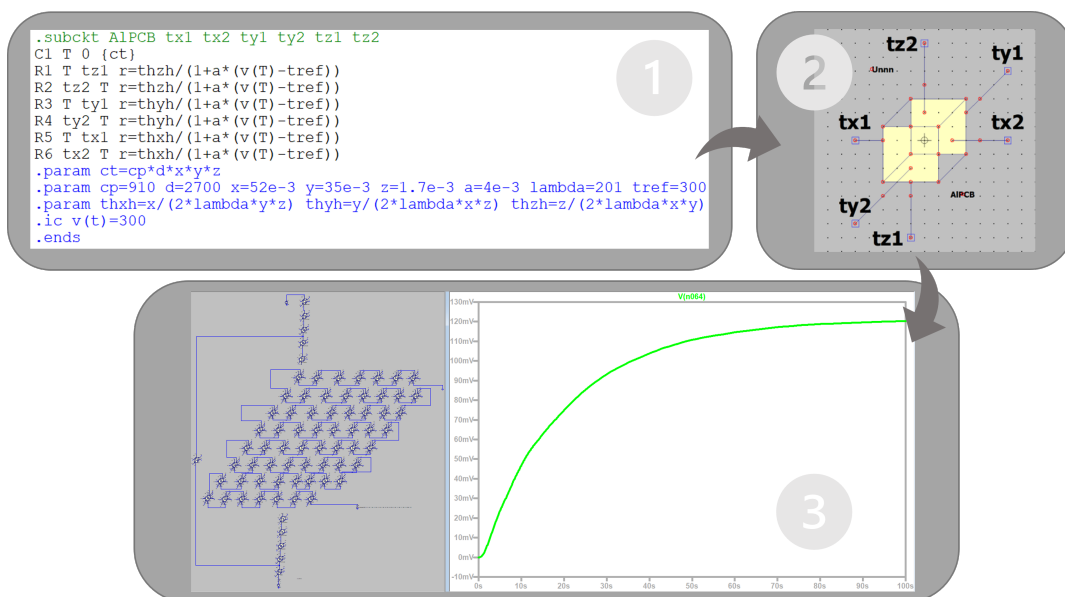
Методологија симулације (слика 3.20) подразумева три главна корака. Први је дефинисање SPICE нетлисте за градивну ћелију, у форми поткола, на основу модела описаних у потпоглављима 3.2.1 и 3.2.2. Наредни корак је формирање симбола градивне ћелије са одговарајућим изводима и његово повезивање са SPICE нетлистом. Финални корак подразумева креирање главног симулационог фајла са свим деловима система при чему се користе симболи градивних ћелија и подешавају се услови симулације. Градивне ћелије неелектричних делова (штампане плоче, одстојника, керамичких плоча TEG-а, хладњак, слојеви термичког лепка, термоизолациона пена)





Слика 3.19: Градивна ћелија SPICE компатибилног просторног еквивалентног модела термоелемента, на основу [85].

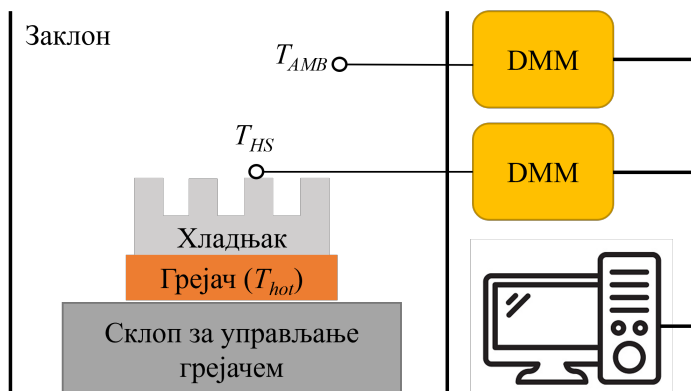
имају укупно 6 извода ( $T_{x1}, T_{x2}, T_{y1}, T_{y2}, T_{z1}, T_{z2}$ ). Градивне ћелије термоелемената n- и p- типа имају додатних 6 извода ( $v_{x1}, v_{x2}, v_{y1}, v_{y2}, v_{z1}, v_{z2}$ ). Модел омогућава симулације за стационарни и временски променљиви режим.



Слика 3.20: Блок дијаграм методологије симулације.

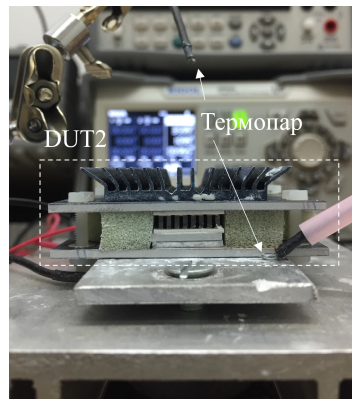
### 3.2.4 Експериментална поставка за потврду модела

Да би се извршила потврда просторног модела урађени су експерименти. Једна експериментална поставка је коришћена за мерење температурног одзива хладњака, а друга за мерење параметара чвора WSN-а. Експериментална поставка за мерење температурног одзива хладњака је шематски представљена на слици 3.21. Хладњак је фиксиран на површини грејача термички проводном траком, а систем је окружен заклоном који обезбеђује услове природног хлађења. Грејач генерише тренутну топлотну побуду ( $T_{hot}$ ), док термопарови мере температуру на површини хладњака ( $T_{HS}$ ) и температуру околине ( $T_{AMB}$ ). Све вредности температура прате се коришћењем рачунаром контролисаних дигиталних мултиметара (DMM) Agilent 34410A.



Слика 3.21: Шематски приказ експерименталне поставке за мерење температурног одзива хладњака.

Експерименти за карактеризацију чвора WSN-а су изведени у лабораторији коришћењем поставке чија је блок шема дата на слици 2.10, а фотографија на слици 3.22. Ова поставка омогућава контролу улазног топлотног флуksа и мерење релевантних температура и напона у временском домену. Термоелектрични модул (ТЕМ) служи као извор топлоте - грејач. Програмабилни лабораторијски DC извор напајања Agilent E3634A обезбеђује напајање за ТЕМ струјом у опсегу од 0,5-2А. Велики алуминијумски хладњак дисипира топлоту са хладне стране ТЕМ-а. Експериментална поставка испуњава услове природне конвекције где се систем која се тестира (DUT) поставља хоризонтално на грејач. Термички лепак омогућава добре термичке спојеве између грејача и DUT-а. Два термопара повезана на дигитални термометар мере температуре околине  $T_{AMB}$  и грејача  $T_{HEAT}$ . Експериментална карактеризација је урађена за склоп који се састоји од ТЕГ-а ET-031-10-20 (ТЕГ1), произвођача Adaptive и ниско профилног алуминијумског хладњака са ребрима (HSB), димензија  $(35 \times 35 \times 7,5)$  mm као DUT1 и описаног компактнoг чвора WSN-а као DUT2. У експерименту, DUT на температури  $T_{AMB}$  је нагло постављен на грејач дефинисане температуре  $T_{HEAT}$ . Осцилоскоп Tektronix DPO4034 снима вредности напона које се предају потрошачу од стране DUT-а. Три вредности температурне разлике  $\Delta T = T_{HEAT} - T_{AMB}$  су одређене за DUT1 и једна вредност за DUT2.



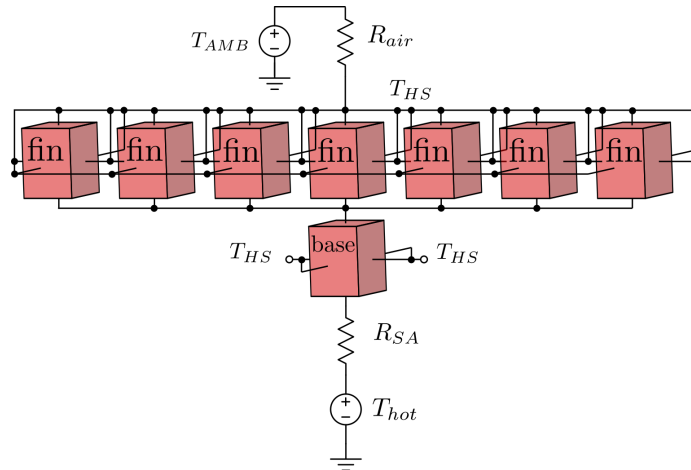
Слика 3.22: Фотографија експерименталне поставке за карактеризацију чвора WSN-а.

### 3.2.5 Резултати верификације за просторни модел

Модел хладњака најједноставније се може креирати коришћењем Cauer или Foster топологије RC кола [89]. Софтвер за симулацију електричних кола LTspice има уграђени модел хладњака развијен на основу Cauer-ове топологије [90]. У овој дисертацији дати су резултати симулације хладњака моделираног просторним SPICE компатибилним моделом. Модел је проверен поређењем резултата симулације са експериментално добијеним подацима и са FEM симулацијама.

Алуминијумски хладњак (HSA), укупних димензија  $(14,5 \times 14 \times 6)$ mm, је изабран за проверу модела. У табели 3.9 дати су параметри материјала овог хладњака. Прво је направљено потколо градивне ћелије хладњака, а након тога и симулациона шема приказана на слици 3.23. Цео хладњак је подељен на 8 градивних ћелија, једна за основу хладњака (base) димензија  $x = 14,5$  mm,  $y = 14$  mm,  $z = 1,8$  mm и седам за ребра хладњака (fin) димензија  $x = 0,92$  mm,  $y = 14$  mm,  $z = 4,2$  mm. Укупна термичка отпорност хладњака укључује термичку отпорност одређену димензијама ( $R_S$ )

и термичку отпорност између хладњака и околине ( $R_{SA}$ ). Елемент  $R_S$  је дефинисан просторним моделом, док је отпорност  $R_{SA}$  дата у техничкој документацији хладњака. Два напонска генератора су искоришћена да дефинишу вредности температуре на топлој страни хладњака ( $T_{hot}$ ) и температуре околине ( $T_{AMB}$ ). Такође, додата је термичка отпорност ваздуха ( $R_{air} \approx 1 \times 10^6 \text{ K W}^{-1}$ ).



Слика 3.23: Симулациона шема за алуминијумски хладњак.

Вредности температуре хладњака ( $T_{HS}$ ) добијене временски зависним SPICE симулацијама коришћењем просторног модела и стандарног Saucer RC модела [89], као и одређене експериментално, дате су на слици 3.24. Температура околине била је  $T_{AMB} = 25^\circ\text{C}$ , док је нагло примењена температура  $T_{hot}$  била подешена на  $33,7^\circ\text{C}$ . Резултати симулације добро прате резултате експерименталних мерења. Максимално релативно одступање резултата симулације је 5% у односу на експеримент. Резултати симулације за оба модела се одлично слажу. Временска анализа показује да хладњак постиже стабилно стање после 60 s. Добијени резултати су очекивани с обзиром на добру термичку проводност материјала од кога је хладњак направљен и мале вредности термичке капацитивности основе и ребара хладњака.

Друга провера просторног SPICE модела за хладњак HSA је урађена поређењем са FEM стационарном термичком симулацијом коришћењем софтвера Ansys 2020 R2 [91]. Креирана је 3D геометрија овог хладњака, а карактеристике материјала дате су у табели 3.9. Вредност коефицијента дисипације топлоте при природној конвекцији је подешена на  $h = 20 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ . Термичка снага од 0,2 W (што одговара  $T_{hot} = 33,7^\circ\text{C}$ ) је дефинисана као термичко оптерећење. Резултати симулације су приказани на слици 3.25. Расподела температуре у структури хладњака је унутар опсега од  $0,03^\circ\text{C}$ , што се може сматрати униформном расподелом. Температура у стабилном стању једнака је примењеној температури  $T_{hot}$  што потврђује резултате добијене просторним моделом хладњака.

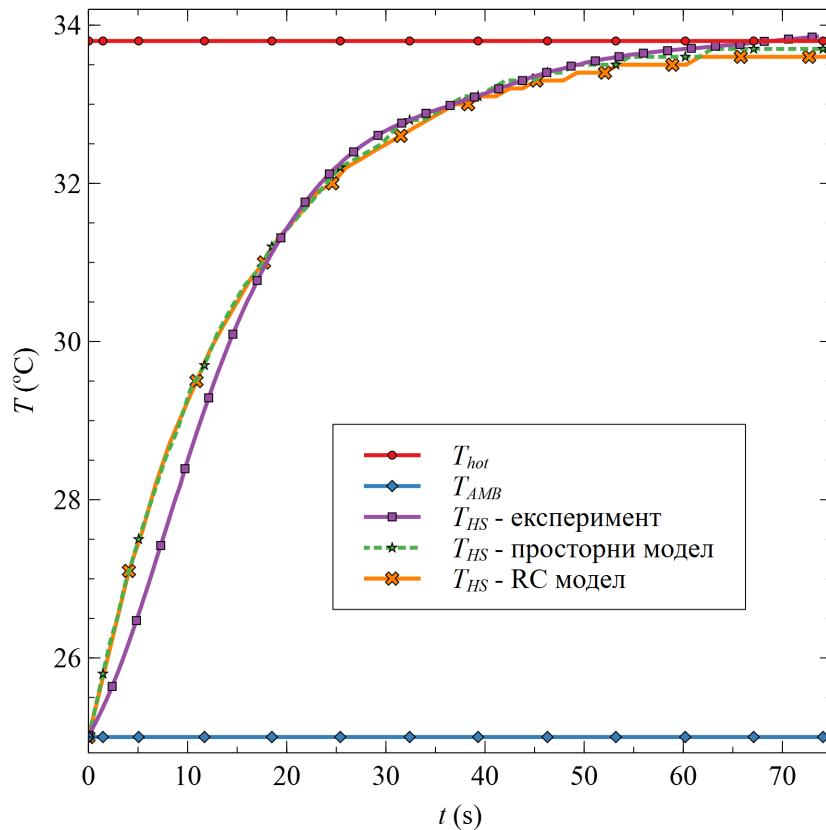
Просторни SPICE модел је коришћен за карактеризацију и три ниско профилна хладњака направљена од керамике алумине (HS9), бакарне пене (HS19) и микропорозне керамике (HS12). Параметри изабраних хладњака дати су у табели 3.9. Хладњаки имају сличне укупне димензије, али различите геометрије. Резултати симулације температурних одзива су приказани на слици 3.26. Све симулације су изведене за  $T_{AMB} = 25^\circ\text{C}$  и  $T_{hot} = 35^\circ\text{C}$ . За 2 минута, само HS9 не достиже температуру од  $35^\circ\text{C}$ , што указује на његову добру ефикасност. Овај хладњак има велики број стубића и

Табела 3.9: Својства хладњака коришћених у анализи просторног модела.

| Хладњак  | HSA                       | HS9                     | HS19                    | HS12                        |
|--|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Материјал  | алуминијум                | алумина                 | бакарна пена            | микропорозна керамика       |
| Геометрија   | 7 ребара                  | 25 стубића              | раван                   | 7 ребара                    |
| Димензије<br>$L \times W \times H$ (mm)  | $14,5 \times 14 \times 6$ | $20 \times 20 \times 6$ | $25 \times 25 \times 5$ | $25 \times 25 \times 5, 25$ |
| Термичка отпорност<br>од хладњака ка<br>околини<br>$R_{SA}$ (K W <sup>-1</sup> )                         | 12                        | 40                      | 35,8                    | 10,21                       |
| Густина<br>$d$ (kg m <sup>-3</sup> )   | 2700                      | 3660                    | 3320                    | 1800                        |
| Специфични топлотни<br>капацитет<br>$c$ (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )                            | 910                       | 880                     | 385                     | 670                         |
| Специфична<br>термичка<br>проводност<br>на $T_{ref}$<br>$\lambda_0$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) | 200                       | 25                      | 45                      | 125                         |
| Температурни<br>кофицијент<br>$\lambda - a_\lambda$ (K <sup>-1</sup> )                                   | $4 \cdot 10^{-3}$         | $-2,7 \cdot 10^{-3}$    | $-1 \cdot 10^{-4}$      | 0                           |

ефикасно дисипира топлоту. С друге стране, због најмање запремине, HSA се загрева најбрже. Његова ребра побољшавају ефикасност хлађења у присуству струјања флуида у ком се налази. HS19 и HS12 имају приближно исте димензије, док је порозност керамичког хладњака два пута мања од порозности хладњака од бакарне пене. Ова два хладњака показују блиске временске зависности температуре. Поређењем ефикасности хладњака у истим временским интервалима (30 s од почетка загревања), HS9 има 11 %, док HS19 и HS12 имају око 7 % боље перформансе него HSA. У самонапајајућим микросистемима, као што су чворови бежичних сензорских мрежа, где је хладни старт битан параметар, хладњак од алумине би био бољи избор у поређењу са другим разматраним хладњацима. Исти резултати су добијени применом стандардног Saueg RC модела, који је много једноставнији од просторног модела, али захтева екстракцију термичке капацитивности из експерименталних података. С друге стране, просторни модел израчунава термичку капацитивност на основу познатих димензија и параметара материјала од кога је хладњак направљен. Са просторним SPICE моделом, није могуће добити резултате високе резолуције као у FEM симулацијама. Међутим, време извршења симулације и захтеви хардвера су мањи у случају SPICE симулација.

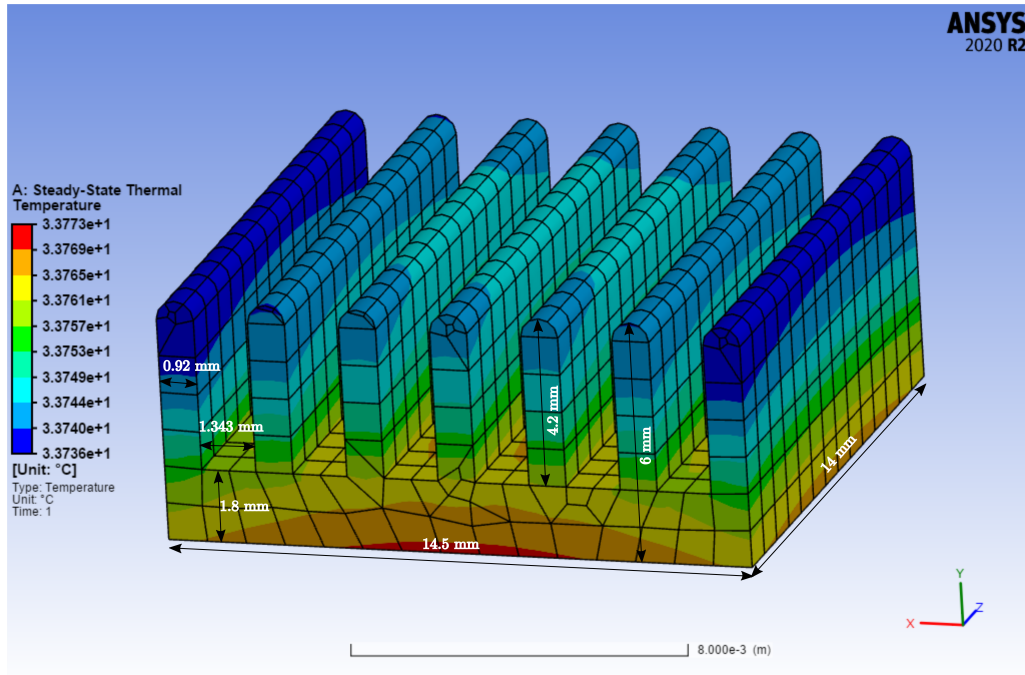
У наставку је концепт просторног модела искоришћен за симулацију чвора бежичне сензорске мреже. Симулацијама се разматрају три различита TEG-а (TEG1, TEG3, TEG5) чији су геометријски, електрични и термички параметри дати у табелама 3.5 и 3.7. TEG-ови се разликују по броју термоелектричних парова и димензијама термоелемената и керамичких плоча. Избор TEG-ова вршен је и на основу унутрашње



Слика 3.24: Временске зависности температуре хладњака HSA добијене SPICE симулацијама и експериментално.

отпорности која треба да буде блиска улазној отпорности оптерећења (кола LTC3108) да би се постигао максимални пренос снаге. Перформансе чвора WSN-а такође зависе од монтираног хладњака, зато су за симулације изабрана и три хладњака са различитим геометријама и од различитих материјала. У табели 3.10 дати су геометријски и термички параметри изабраних хладњака, а у табели 3.11 ови параметри за друге неелектричне делове чвора WSN-а. Параметри изабраних хладњака преузети су из техничке документације [92–94]. У табели 3.11 систематизовани су само они подаци потребни за дефинисање просторног модела, за разлику од табела 3.2 и 3.3 које дају скуп вредности потребних за дефинисање једнодимензионалног модела. Параметри материјала доступни су у одговарајућој бази података [88]. Треба напоменути да су димензије неелектричних делова дате за чвор WSN-а коришћен у експерименту, док су симулацијама са другим изабраним TEG-овима ове димензије скалиране у складу са димензијама TEG-а.

Симулација склопа TEG1 са хладњаком HSB (DUT1 у експериментима) омогућава проверу развијеног SPICE модела. Слика 3.27 приказује поједностављену симулациону шему за овај склоп. Сваки неелектрични саставни део (два слоја термичког лепка, две керамичке плоче и хладњак) имају сопствене градивне ћелије на шеми. Такође, сваки од 62 термоелемента је представљен једном градивном ћелијом, док је на слици 3.27 приказано само њих 6 због прегледности. Електричне везе између термоелемента означене су црвеним линијама на слици 3.27. Метални контакти који повезују термоелементе редно су врло танки и имају веома високу електричну проводност. Из тога разлога, метални контакти су представљени једноставном електричном везом.

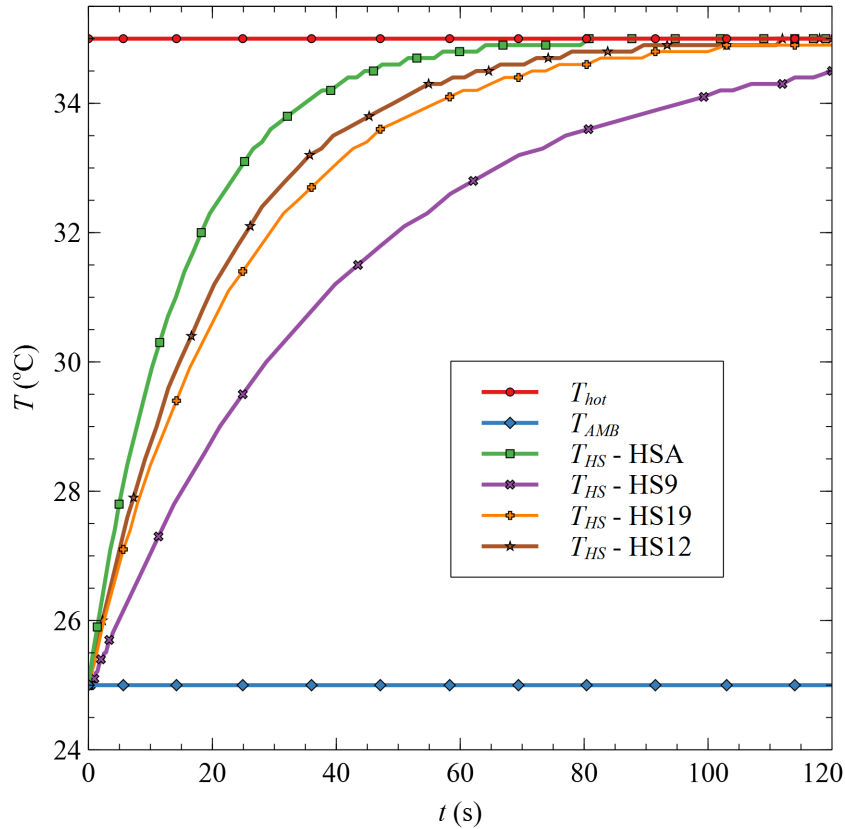


Слика 3.25: Расподела температуре на хладњаку HSA добијена стационарном FEM симулацијом.

Отпорник  $R_L = 1 \text{ M}\Omega$  симулира услов отвореног кола када је  $V_L = V_{TEG}$ . Горњи чвор доње керамичке плоче је повезан са доњим делом сваког термоелемента (лабела  $h$ ). Слично, горњи чворови термоелемената су повезани са доњим чвором горње керамичке плоче TEG-а (лабела  $c$ ). Треба напоменути да је термичка отпорност хладњака ка околини ( $R_{SA}$ ) узета у обзир унутар градивне ћелије хладњака. Напонски генератори  $T_{HEAT}$  и  $T_{AMB}$  су аналогни температурама топлотног извора и околине, респективно. Отпорност  $R_{HEAT} = 0,4 \text{ K W}^{-1}$  представља термичку отпорност топлотног извора.

Резултати симулације и експеримента су приказани на слици 3.28. Након достижања иницијалне вршне вредности, генерисани напон постепено опада због спорог пуњења велике термичке капацитивности хладњака и мале површине преко које се топлота преноси са TEG-а на хладњак. Вршне вредности  $V_{TEG}$  су од  $175 \text{ mV}$  при  $\Delta T = 15^\circ \text{C}$  до  $275 \text{ mV}$  при  $\Delta T = 25^\circ \text{C}$ . Експериментални и резултати симулације показују исту тенденцију са максималним одступањем од  $12,5\%$ , што потврђује валидност модела. Као што је раније приказано, једнодимензионални модел чвора бежичне сензорске мреже даје сличне резултате у погледу одступања између симулација и експеримента.

Слика 3.29 приказује симулациону шему за чвор WSN-а. Сваки нелектрични део је представљен посебном градивном ћелијом. Због прегледности, само два термоелемента TEG-а (један термоелектрични пар) су приказани на шеми, заједно са њиховим принципом електричног повезивања. Шема прати пут преноса топлоте, од топлотног извора ( $T_{HEAT}$ ) преко свих делова чвора до околине ( $T_{AMB}$ ). Поново,  $R_{SA}$  термичка отпорност је унутар градивне ћелије хладњака и вредност  $R_{HEAT}$  је  $0,4 \text{ K W}^{-1}$ . Градивна ћелија термоизолационе пене је повезана у повратној петљи између врха доње штампане плоче и дна горње штампане плоче зато што она представља термички високо отпорни елемент на путу протока топлоте између ових штампаних плоча. Отпорник



Слика 3.26: Временске зависности температуре разматраних хладњака добијене SPICE симулацијом.

$R_L$  је електрично оптерећење TEG-а и његова вредност представља улазну отпорност кола за подизање напона LTC3108 када оно пуни примарни и backup кондензаторе и зависи од вредности струје  $I_L$ . Зависност  $R_L$  од  $I_L$  је дата у табели 3.4. Иако ко-ло LTC3108 има сопствени SPICE модел, због његове сложености, време симулације се значајно продужава, захтева постављање прецизних почетних услова и доводи до конвергенционих проблема. То је разлог зашто је овом колу у симулацију укључено као контролисани отпорник са вредностима дефинисаним у табели претраживања са линеарном интерполацијом.

Резултати експерименталних мерења и симулације чвора WSN-а су приказани на слици 3.30. Они представљају временске промене напона предатог од TEG-а колу за подизање напона LTC3108 ( $V_L$ ) при температурној разлици  $\Delta T = 25^\circ\text{C}$ . Напон на потрошачу расте споро и достиже константну вредност после неколико десетина секунди. После 50 s, вредност  $V_L$  је 100 mV. Термички одговор чвора је регулисан термичком спрегом између градивних елемената чвора WSN-а, који се карактерише временом потребним да се напуне њихове термичке капацитивности. Пренос топлоте иде од грејача до доње штампане плоче и након тога ка остатку чвора углавном кроз алуминијумски одстојник и TEG јер је пренос топлоте кроз термоизолациону пену минималан због њене велике термичке отпорности. Горња штампана плоча представља екстензију основе хладњака и повећава укупну дисипацију топлоте.

Просторни модел је искоришћен за карактеризацију чвора WSN-а са различитим TEG-овима и хладњацима, чије су карактеристике дате у табелама 3.5, 3.7 и 3.10,



Табела 3.10: Својства разматраних хладњака у просторном моделу.

| Параметар  | HSB               | HS6                  | HS13                  |
|--|-------------------|----------------------|-----------------------|
| Материјал  | алуминијум        | алумина              | микропорозна керамика |
| Геометрија   | 14 ребара         | 121 стубић           | раван                 |
| Спољашње димензије<br>$L \times W \times H$ (mm)   | 35×35×7,5         | 42×42×12             | 40×40×2,5             |
| Термичка отпорност од хладњака ка околини<br>- $R_{SA}$ (K W <sup>-1</sup> )                   | 8                 | 9,4                  | 9,7                   |
| Густина - $d$ (kg m <sup>-3</sup> )  | 2700              | 3660                 | 1800                  |
| Специфични топлотни капацитет - $c$ (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )                      | 910               | 880                  | 670                   |
| Специфична термичка проводност на $T_{ref}$ - $\lambda_0$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) | 201               | 25                   | 125                   |
| Температурни коефицијент<br>$\lambda - a_\lambda$ (K <sup>-1</sup> )                           | $4 \cdot 10^{-3}$ | $-2,7 \cdot 10^{-3}$ | 0                     |

респективно. Комбинација сваког TEG-а са сваким хладњаком даје девет комбинација које су разматране. Димензије других делова чвора WSN-а су скалиране у складу са димензијама изабраног TEG-а и хладњака. Резултати симулације представљени су као  $V_L$  вредности у стационарном режиму рада у функцији температурне разлике ( $\Delta T$ ) за све конфигурације чвора, као што је приказано на слици 3.31. Опсег разматраних температура је онај неопходан за успешно покретање самонапајајућих система који имају конвертор LTC3108. Вредност  $V_L$  расте линеарно са порастом температурне разлике. TEG5 генерише највише вредности напона са свим хладњацима у поређењу са друга два TEG-а, што је посебно изражено при већим температурним разликама. При температурној разлици од 25 °C, TEG5 генерише напон од 200 mV, што је 72 % више него TEG1 и 40 % више него TEG3. Чвор WSN-а са TEG1 ће достићи напон од 100 mV при температурној разлици од 25 °C, док ће исти напон чвор са TEG3 бити при  $\Delta T = 20$  °C, и са TEG5 већ при  $\Delta T = 15$  °C. Разлог је већи број термоелектричних парова у TEG-овима, тј. њихова већа површина. Иако TEG3 и TEG5 имају исти број термоелектричних парова, већа дужина и површина попречног пресека термоелемента узрокује да TEG5 генерише веће напоне у односу на TEG3. С друге стране, због већих димензија, TEG5 ће повећати укупне димензије чвора WSN-а за 37 %, а TEG3 за 6 %. Пошто TEG1 има мање димензије у поређењу са друга два TEG-а, он је прихватљив за апликације где је минијатуризација чвора WSN-а од примарне важности, иако то захтева веће температурне разлике да би се постигла минимална потребна вредност напона на потрошачу.

Избор хладњака утиче на вредност генерисаног напона. Хладњаци направљени од алуминијума (HSB) и алумина керамике (HS6) показују супериорније карактеристике у поређењу са хладњаком направљеним од микропорозне керамике (HS13) зато што имају већи број ребара и велику слободну површину за хлађење, али такође и већу укупну запремину. С друге стране, HS13 има једноставну геометрију и малу висину што доприноси минимизацији укупних димензија чвора WSN-а. Чвор са TEG5 при  $\Delta T = 25$  °C ће генерисати напон од 158 mV са HSB, док ће са HS6 овај напон бити

Табела 3.11: Својства неелектричних делова чвора WSN-а.

| Параметар  | Al РСВ            | Термички<br>лепак      | Термоизолациона<br>пена | Al одстојник      |
|--|-------------------|------------------------|-------------------------|-------------------|
| Спољашње<br>димензије<br>$L \times W \times H$<br>(mm)   | 52×35×1,7         | 15×15×0,2<br>35×35×0,2 | 52×35×13,8              | 15 ×15×1,6        |
| Густина<br>$d$ (kg m <sup>-3</sup> )   | 2700              | 2440                   | 1580                    | 2700              |
| Специфични<br>топлотни<br>капацитет<br>$c$ (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )                         | 910               | 2090                   | 820                     | 910               |
| Специфична<br>термичка<br>проводност<br>на $T_{ref}$<br>$\lambda_0$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) | 201               | 1,1                    | 0,4                     | 201               |
| Температурни<br>коэффициент<br>$\lambda - a_\lambda$ (K <sup>-1</sup> )                                  | $4 \cdot 10^{-3}$ | 0                      | 0                       | $4 \cdot 10^{-3}$ |

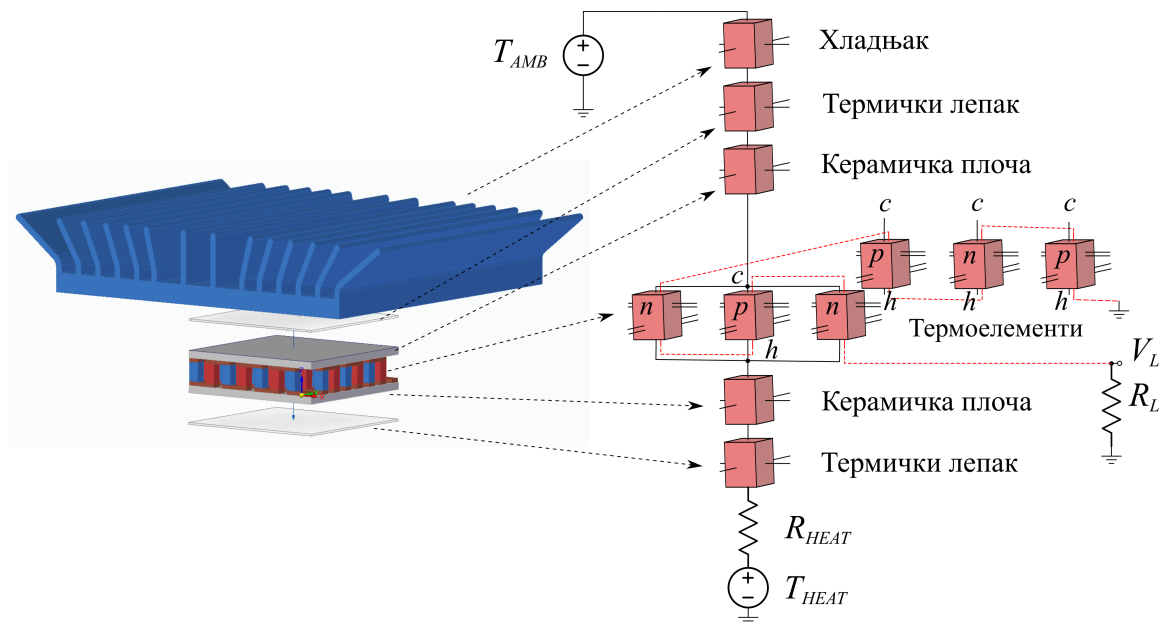
28 % већи, а са HS13 30 % нижи. Перформансе чвора WSN-а са TEG1 и HS6 су исте као перформансе чвора са TEG3 и HSB. Квантитативна анализа свих комбинација показује да хладњак од алумина керамике даје око 30 % веће, а хладњак од микропорозне керамике око 30 % мање напоне у поређењу са напонима генерисаним у чвору WSN-а са алуминијумским хладњаком.

Слика 3.32 приказује зависности снаге коју TEG предаје потрошачу у функцији температурне разлике за чворове WSN-а са различитим комбинацијама TEG-хладњак. Пратећи вредности генерисаног напона, вредност снаге такође расте са порастом температурне разлике. Избор TEG-а и хладњака утиче на вредност снаге на исти начин као и на вредности напона на потрошачу. Вредности снаге су у опсегу од 0,7 mW за чвор WSN-а са TEG1 и HS13 при температурној разлици од 15 °C до 66,5 mW за чвор са TEG5 и HS6 при температурној разлици од 50 °C.

Укупна ефикасност WSN чвора рачуна се као:

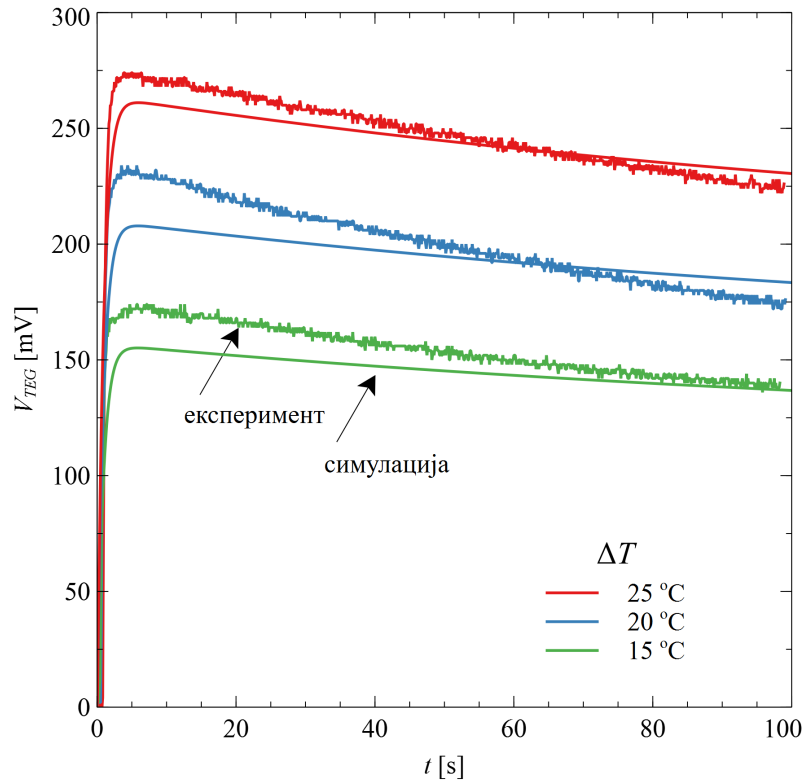
$$\eta = \frac{P_L}{Q_{HEAT}}, \quad (3.36)$$

где  $Q_{HEAT}$  представља топлотни флуks грејача, тј. струју кроз напонски генератор  $T_{HEAT}$  на шеми са слике 3.29. У складу са сликом 3.32, повећање температурне разлике узрокује пораст укупне ефикасности. Слика 3.33 приказује вредности ефикасности за све испитиване чворове WSN-а при температурној разлици од 25 °C и 50 °C. Чвор WSN-а са TEG1 и HS13 показује најмању ефикасност (0,09 %), док чвор WSN-а са TEG5 и HS6 има највећу ефикасност (0,26 %). За све разматране TEG-ове, склопо-

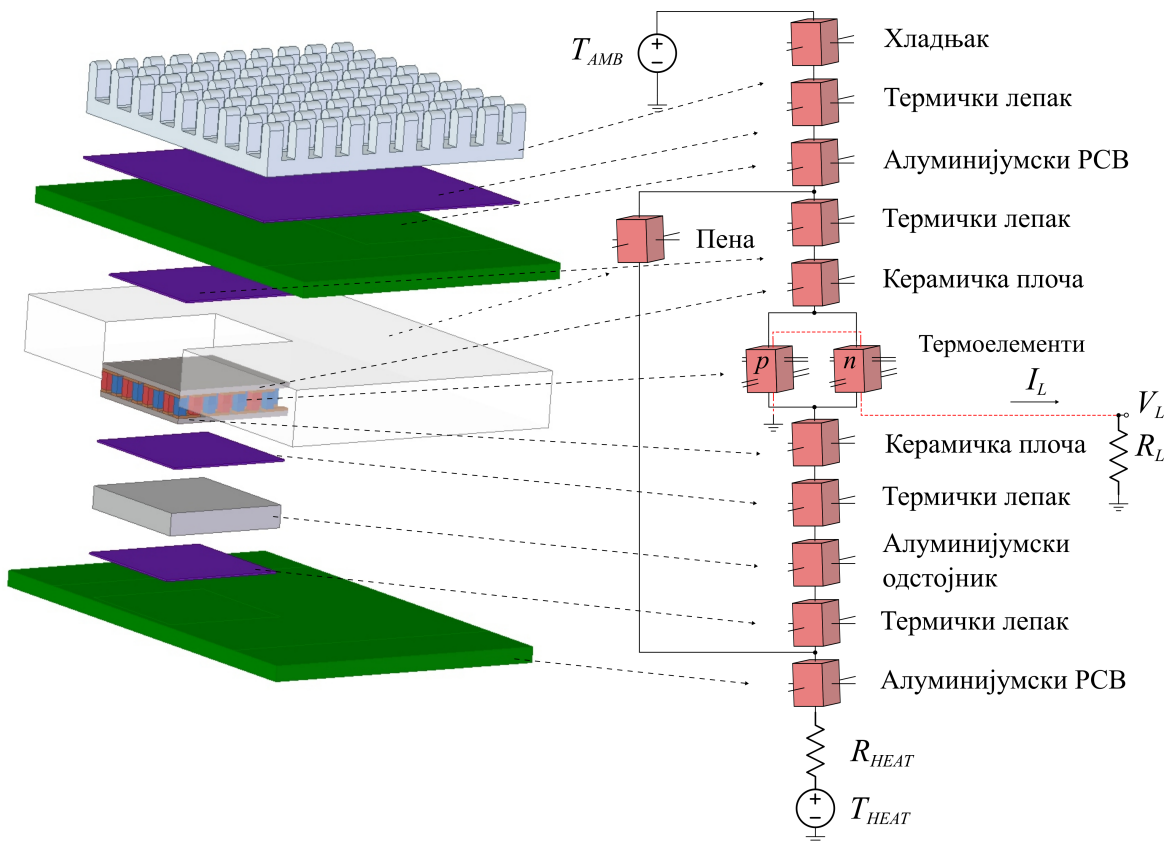


Слика 3.27: Симулациона шема за склоп TEG1 са хладњаком HSB.

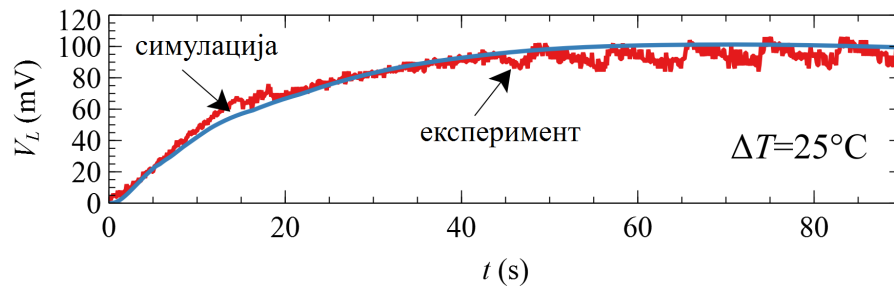
ви са хладњаком од микропорозне керамике показују најнижу вредност ефикасности конверзије (0,09 % до 0,13 %), што је око 50 % мања ефикасност у поређењу са склоповима са хладњаком од алумине. У складу са тим, хладњаци од алумине доприносе највећим вредностима ефикасности (0,15 % до 0,26 %), што је око 30 % више у поређењу са склоповима са хладњаком од алуминијума (0,12 % до 0,2 %). TEG-ови са мањим бројем термоелектричних парова захтевају око 25 % веће температурне разлике да би постигли исту ефикасност као када се користе већи TEG-ови. Тако ће, на пример, чвор бежичне сензорске мреже са TEG1 и хладњаком HS6 имати ефикасност од 0,26 % при температурној разлици од 50 °C, док ће иста ефикасност бити достигнута у систему са TEG5 и хладњаком HS6 већ при температурној разлици од 25 °C. Ниска укупна ефикасност је примарно узрокована ниском ефикасношћу конверзије TEG-а при ниским температурним разликама (1 % -2 %) услед специфичне дистрибуције температуре кроз елементе чвора у условима природне конвекције.



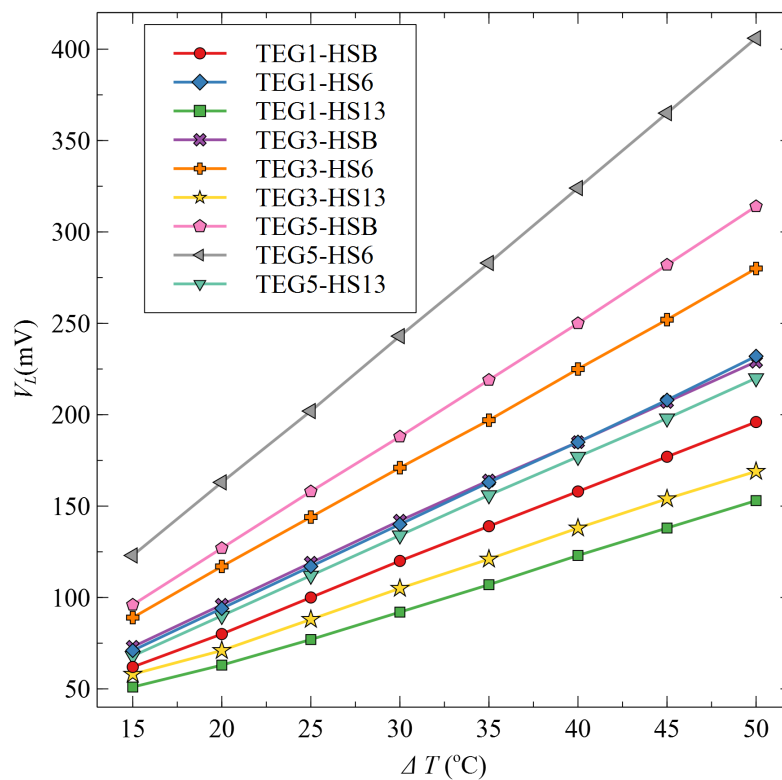
Слика 3.28: Генерисани напон у функцији времена за склоп TEG1 са хладњаком HSB при три температурне разлике.



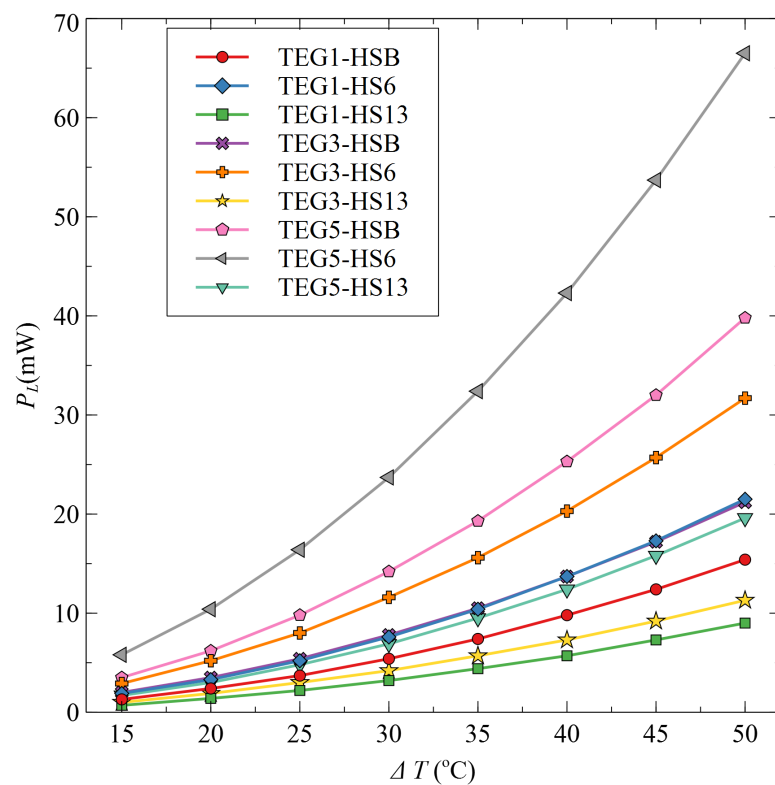
Слика 3.29: Симулациона шема за чвор бежичне сензорске мреже, на основу [46,129,130].



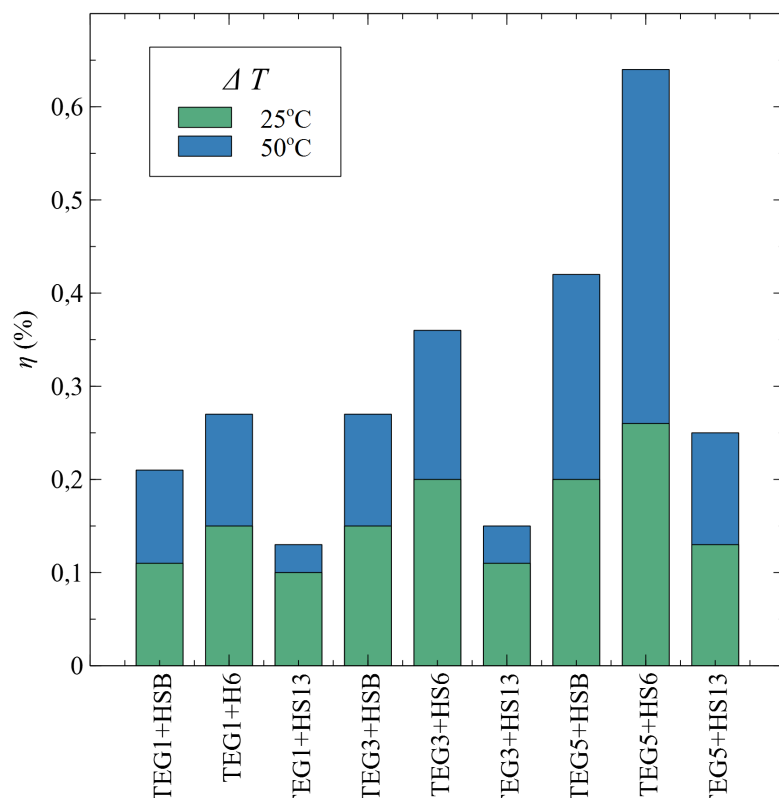
Слика 3.30: Напон на оптерећењу TEG-a у функцији времена при  $\Delta T = T_{HEAT} - T_{AMB} = 25^\circ\text{C}$ .



Слика 3.31: Генерисани напон  $V_L$  у функцији температурне разлике за чворове безичне сензорске мреже са различитим комбинацијама TEG-хладњака.



Слика 3.32: Генерисана снага предата потрошачу  $P_L$  у функцији температурне разлике за чворове бежичне сензорске мреже са различитим комбинацијама TEG-хладњак.



Слика 3.33: Укупна ефикасност система за чворове бежичне сензорске мреже са различитим комбинацијама TEG-хладњак.

## Глава 4

# Анализа ефикасности склопова термоелектрични модул - хладњак намењених самонапајајућим системима

Термоелектрични модули у спрези са различитим типовима хладњака се често срећу као делови преносних мини уређаја за хлађење/грејање или термоелектрично напајаних бежичних сензорских чворова. За ефикасан рад ТЕМ-ова је неопходна допунска размена топлоте са његове хладне и/или топле стране што се обезбеђује како активним тако и пасивним хладњацима. С обзиром да су стандардни пасивни хладњаци знатно једноставније конструкције и без потребе за додатним подсклоповима за проток расхладног флуида, они су широко присутни у комерцијалним системима. Перформансе склопова са пасивним хладњацима, под дефинисаним радним условима, осим од карактеристика ТЕМ-а зависе и од конструкције и материјала употребљеног хладњака [27]. Пренос топлоте кроз и са склопа ТEG-хладњак подразумева комбинацију механизма преноса топлоте описаних у поглављу 2.3.

Алуминијумски хладњаци са екструдираним ребрима или стубићима су стандардно решење за примене у којима се захтева једноставно повећање површине за одвођење топлоте. Хладњаци од керамике алумине ( $Al_2O_3$ ) замењују алуминијумске при захтевима за високим пробојним напонима и електромагнетном компатибилношћу и примењују се код LED расвете, модула снаге и специфичних интегрисаних кола [95]. Микропорозни керамички хладњаци равне или једноставне ребрасте геометрије су нископрофилни, лагани и без ефекта антене [96]. Њихова микропорозна структура обезбеђује повећање ефективне контактне површине са флуидом и ниски топлотни капацитет по јединици запремине, што их чини погодним за примену у системима где превладава природно хлађење (без струјања околног флуида) унутар ограниченог простора. Комерцијално доступне хладњаке од бакарне пене такође карактерише микропорозна структура, као и додатна превлака од бакар-оксида ради повећања емисивности [97].

У литератури се може наћи велики број примера пројектовања и модела за хладњаке различитих геометрија израђених од различитих материјала. У раду [98] аутори су направили упоредну анализу ефикасности три различите геометрије металног хладњака: са стубићима, равним и троугластим ребрима у условима природног струјања.

Анализа је показала да супериорна својства показују хладњаци са троугластим ребрима, али да када је критеријум избора висина и цена производње хладњака добар избор је хладњак са стубићима. Предлог решења хлађења преносних уређаја нископрофилним хладњаком кружног облика са ребрима дат је у раду [99]. Овакав хладњак специфичне геометрије погодан је за услове принудног струјања околног флуида. У раду [100] је дата компаративна анализа перформанси различитих керамичких хладњака. Хладњаци од металне алуминијумске пене анализирани су у раду [101]. Аутори су показали да ови хладњаци могу ефикасно одводити топлоту у условима принудног струјања. Анализа како ширина простора између ребара и висина хладњака од металне пене утичу на ефикасност хладњака представљена је у раду [102]. Закључак овог рада је да су ефикаснији хладњаци од металне пене са ребрима у односу на равне хладњаке од истог материјала, јер је омогућено струјање ваздуха између ребара. У раду [103] урађено је испитивање ефикасности хладњака од металне пене за различите углове усмерености топлотног извора у случају природног струјања. Поред хладњака од алуминијумске пене, аутори у радовима [29, 104] су представили експериментална истраживања ефикасности хладњака од бакарне пене. За предикцију ефикасности хладњака развијени су и одговарајући модели. У раду [105] дат је аналитички модел за кубоидне и четвртасте хладњаке у условима природног хлађења. Модел који омогућава оптимизацију распореда стубића хладњака да би био погодан за одвођење топлоте у условима природног струјања описан је у раду [106]. У раду [107] дат је 3D аналитички модел хладњака са равним ребрима за услове природног струјања, који се може користити за оптимизацију димензија хладњака. Решења за пасивно хлађење LED модула предложена су у раду [108], док је у раду [109] описано решење за хлађење помоћу хладњака од бакарне пене, носивог уређаја заснованог на TEG-у који топлотну енергију човека претвара у електричну.

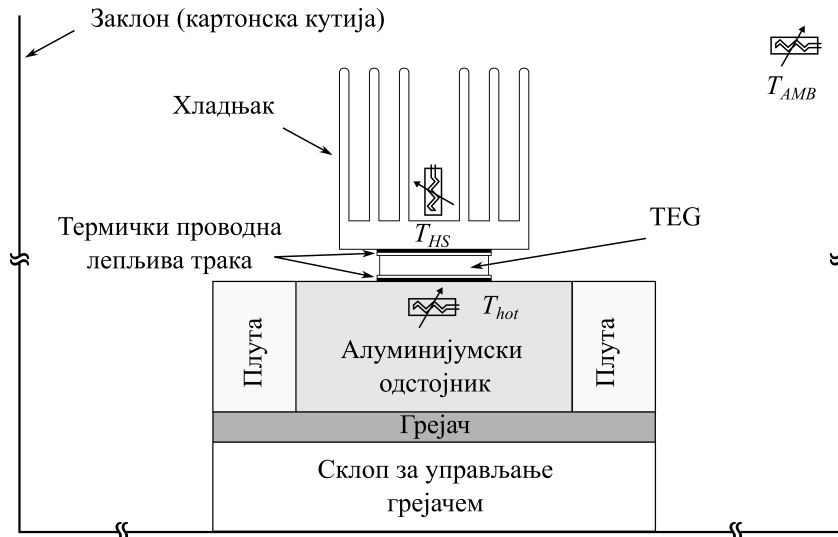
У овом поглављу анализира се функционисање склопова TEG-хладњак првенствено за примену у бежичним сензорским чворовима у условима природног хлађења. Основни циљ је да се упореде перформансе нестандартних пасивних хладњака (керамичких и микропорозних) са алуминијумским хладњацима блиских спољашњих димензија. Осим вредности генерисаног напона на потрошачу, прати се и временски одзив склопа на изненадну термичку побуду, односно његова термичка инертност. Сва експериментална мерења прате нумеричке симулације са циљем успостављања стандардизоване процедуре за предвиђање карактеристика новопроектисаних склопова.

## 4.1 Експериментална поставка

Експерименти су изведени у лабораторији, при Катедри за микроелектронику, Електронског факултета у Нишу, коришћењем поставке која обезбеђује аутоматизовану контролу радних услова и мерење напона предатог од стране TEG-а потрошачу, илустроване на слици 4.1. Цилиндрични грејач, чији је пречник 100 mm, је коришћен као извор топлоте. На њега је монтиран алуминијумски одстојник димензија (58 × 50 × 25)mm и изолован плутом тако да усмерава проток топлоте на склоп TEG-хладњак. Термичка лепљива трака дебљине 0,2 mm и термичке проводности  $2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  је искоришћена да учврсти спојеве између одстојника, TEG-а и хладњака. Склоп TEG-хладњак је у хоризонталном положају. Картонска кутија димензија (430 × 250 × 400)mm са отвором на врху окружује комплетну експерименталну поставку. Ова кутија представља заклон који обезбеђује услове природног хлађења. Три минијатурна сензора PT100



у класи А се користе за мерење температуре на одстојнику ( $T_{hot}$ ), хладњаку ( $T_{HS}$ ) и температуре околине ( $T_{AMB}$ ). Унутар одстојника испод горње површине, укопан је сензор за мерење температуре  $T_{hot}$ . Грејач генерише топлотну побуду која је уједно и температура топле стране TEG-а  $T_{hot}$ . Треба напоменути да је сензор за мерење температуре  $T_{HS}$  причвршћен на површину хладњака између ребара или стубића (где је то применљиво) коришћењем исте термичке лепљиве траке.

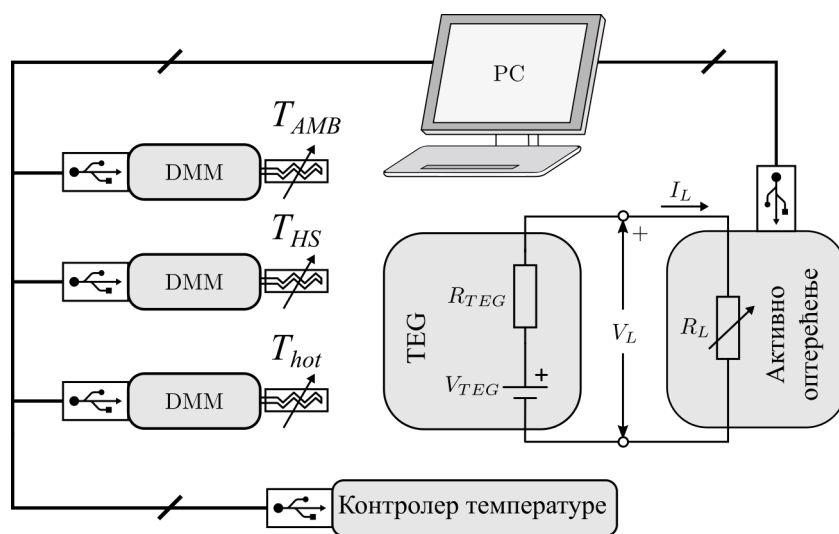


Слика 4.1: Илустрација експерименталне поставке (димензије нису пропорционалне).

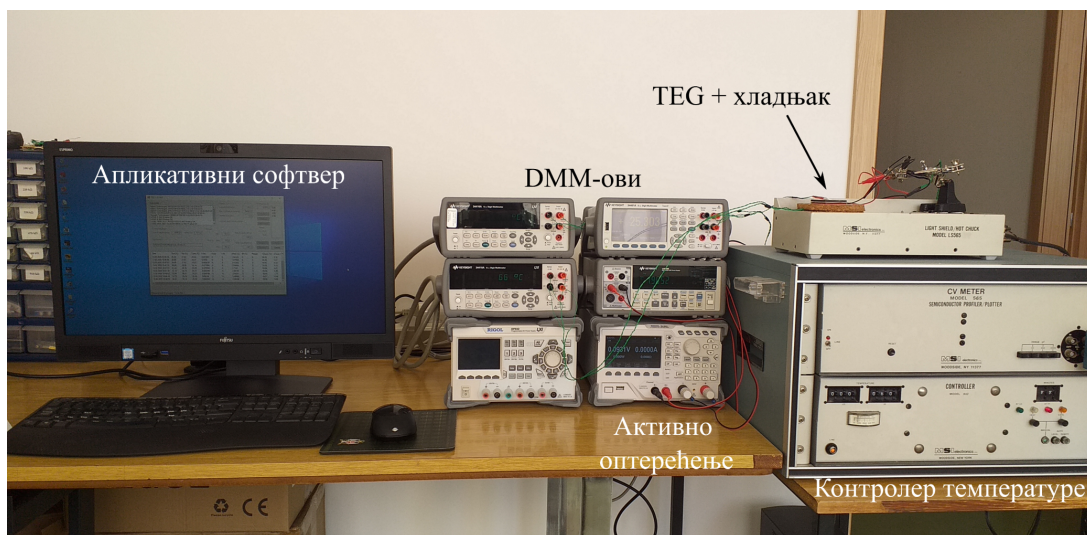
На слици 4.2 је приказана шема мерне поставке. Контролер температуре са резолуцијом  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  је коришћен за подешавање температуре извора топлоте. Сви температурни сензори повезани су на дигиталне мултиметре Keysight 34410A и 34461A (DMM). Термoeлектрични генератор, представљен на слици својим еквивалентним електричним колом, је повезан на програмабилно активно оптерећење Rigol DL3201A, при чему је коришћена конфигурација 4-жице (4-wire). Активно оптерећење истовремено представља потрошач променљиве вредности ( $R_L$ ) и има улогу мултиметра. Рачунар је коришћен за контролу свих инструмената преко USB-а и посебно написане софтверске апликације, као што је приказано на слици 4.3.

Дијаграм тока експерименталне процедуре дат је на слици 4.4. Иницијално, температура грејача је унапред подешена и праћена је вредност температуре  $T_{hot}$ . Истовремено, активно оптерећење мери напон отвореног кола TEG-а  $V_{L(oc)}$ . Критеријум термичке стабилности система је да промене  $T_{hot}$  и  $V_{L(oc)}$  буду мање од 0,1% и 2,5%, респективно, најмање пола сата. Када систем уђе у термичку равнотежу, вредност отпорности активног оптерећења поставља се на вредност  $R_L$  и мере се напон  $V_L$  и струја кроз потрошач  $I_L$ . Отпорност оптерећења се мења од  $5\ \Omega$  до  $2\ \Omega$  са кораком  $1\ \Omega$ . Изабрани опсег одговара улазној отпорности кола за подизање напона која се користе у апликацијама бежичних сензорских мрежа и унутрашњој отпорности разматраних TEG-ова. Мерења за сваку подешену отпорност оптерећења трајала су 120 s. По завршетку мерења,  $R_L$  се искључује, али се наставља мерење напона  $V_{L(oc)}$ . Када се он врати на вредност пре него што је  $R_L$  активирано, систем поставља наредну вредност температуре грејача и циклус се понавља.

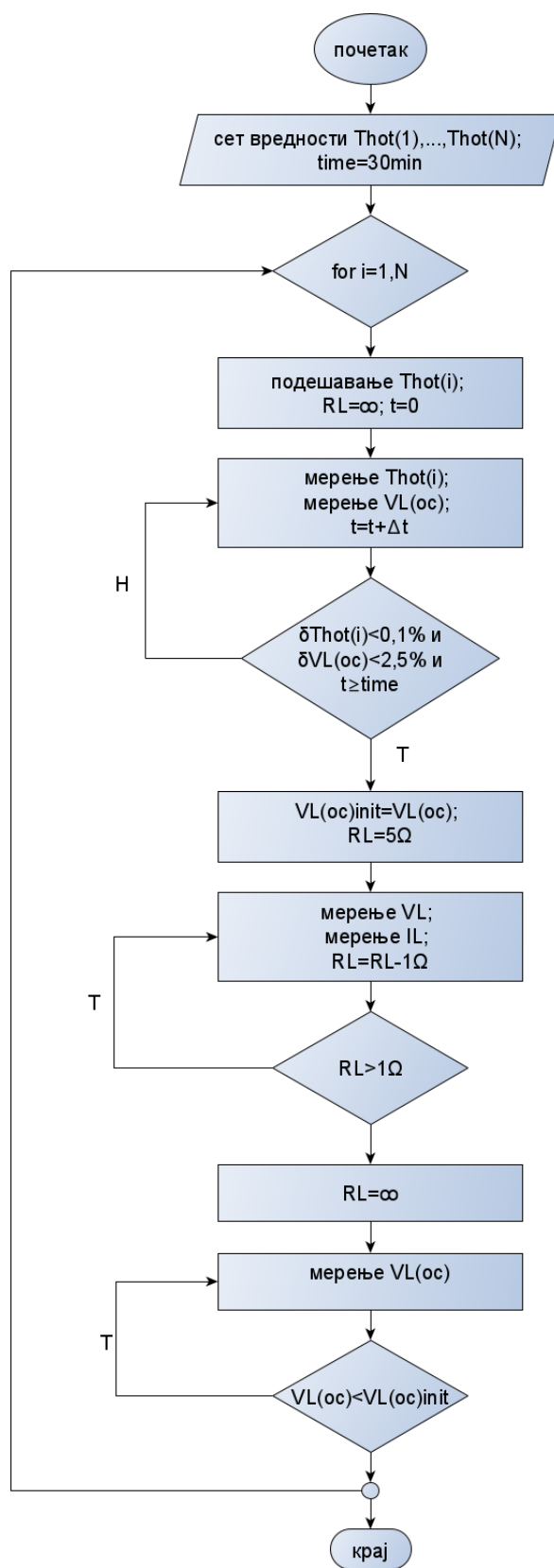
Унутрашње отпорности TEG-ова ( $R_{TEG}$ ) су мерене коришћењем LCR метра Agilent 4284A на температури  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  и фреквенцији  $f = 1\text{ kHz}$ . У складу са процедуром



Слика 4.2: Шема мерења за поставку приказану на слици 4.1.



Слика 4.3: Фотографија експерименталне поставке (картонска кутија уклоњена ради прегледности).

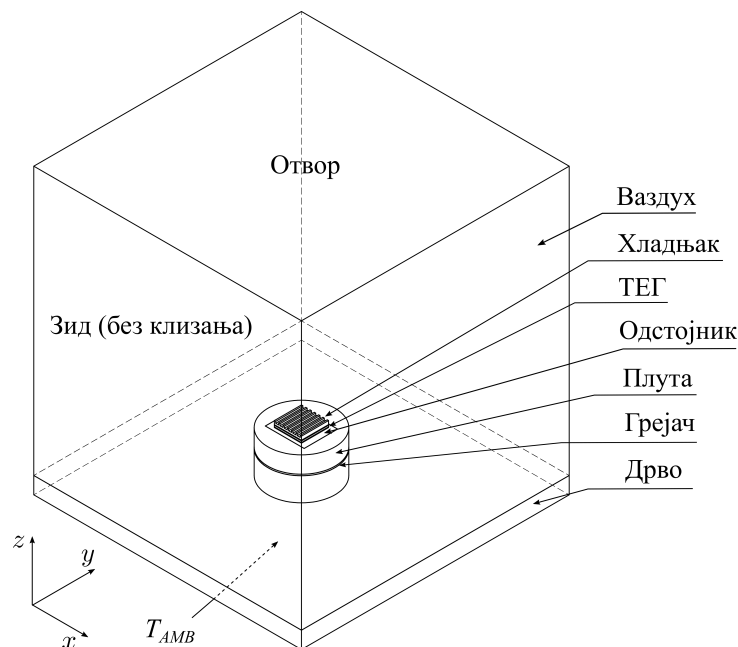


Слика 4.4: Дијаграм тока експерименталне процедуре.

описаном у [27] и [110], емисивност хладњака на собној температури одређена је коришћењем термопара К типа, калибрисаног помоћу калибратора Fluke 9103 и термичком камером FLIR i7. Емисивност плуте и картонске кутије су узете из таблица емисивности као 0,7 и 0,81, респективно.

## 4.2 Поставка симулације

Поставка симулације у потпуности прати експерименталну поставку са слике 4.1. Илустрација геометрије за симулацију са граничним условима дата је на слици 4.5. Елементи склопа и окружење су моделирани у САД софтверу [111] и увезени у FEA симулатор за нумеричку мултифизичку анализу методом коначних елемената [91]. Симулира се стационарно стање при одговарајућој температурној побуди применом модула за решавање проблема у спрегнутом термо-електричном и домену динамике флуида. Дрвена плоча чија се доња површина одржава на температури околине  $T_{AMB}$  је основа. Симулациони домен обухвата околни флуид (ваздух) довољних димензија да гранични услови одговарају условима природног хлађења. Укупне димензије домена ваздуха су  $(400 \times 400 \times 400)$ mm. Треба напоменути да даље повећање овог домена није довело до уочљивих промена у резултатима симулације. Примењен је гранични услов зида (без клизања) за дно и вертикалне стране домена флуида. Са горње стране је домен отворен како би се дозволило слободно одвођење топлоте; постављена је константна вредност притиска (0 Pa) и онемогућен повратни ток ваздуха. За флуид (ваздух) се сматра да је потпуно компресибилан. Коришћен је ламинарни модел струјања, са гравитацијом постављеном у негативном смеру  $z$ -осе.



Слика 4.5: Илустрација геометрије за симулацију са граничним условима.

Проток топлоте кроз структуру и домен околног флуида прати први закон термодинамике и Фуријеов закон преноса топлоте под претпоставком да је успостављена локална термичка равнотежа (температуре флуида и чврстог тела једнаке,  $T_f = T_s = T$ )

према релацијама:

$$(d \cdot c)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + d \cdot c \cdot \vec{u} \cdot \nabla T + \nabla \vec{q} = Q, \quad (4.1)$$

$$\vec{q} = -\lambda_{eff} \nabla T. \quad (4.2)$$

Овде,  $Q$  представља топлоту која се доводи систему,  $\vec{q}$  вектор топлотног флукса и  $\vec{u}$  вектор брзине флуида, док су  $d$  и  $c$  густина и топлотни капацитет при константном притиску чврстог тела, респективно. Ефективне вредности специфичне термичке проводности  $\lambda$  и производа  $d \cdot c$  описују својства порозне средине. Ове вредности зависе од порозности средине  $\theta_p$ , својстава чврсте фазе ( $\lambda, d, c$ ) и флуида унутар пора ( $\lambda_p, d_p, c_p$ ) и прате модел теорије ефективног медијума (Effective Medium Theory - ЕМТ) [112] и принцип ефективне вредности унутар запремине:

$$(1 - \theta_p) \frac{\lambda - \lambda_{eff}}{\lambda + 2\lambda_{eff}} + \theta_p \frac{\lambda_p - \lambda_{eff}}{\lambda_p + 2\lambda_{eff}} = 0, \quad (4.3)$$

$$(d \cdot c)_{eff} = \theta_p d_p c_p + (1 - \theta_p) d \cdot c. \quad (4.4)$$

Поред тога, проток флуида кроз отворене поре укључује Дагсу-јев закон који повезује вектор брзине са градијентом притиска ( $\nabla p$ ), динамичким вискозитетом флуида ( $\eta_f$ ) и пермеабилности протока флуида порозног медијума ( $\kappa$ ):

$$\vec{u} = -\frac{\kappa}{\eta_f} \nabla p. \quad (4.5)$$

ТЕГ-ови и хладњаџи су моделирани детаљно, коришћењем димензија из техничке документације произвођача. Ваздух између ножица је симулиран као чврсто тело, јер се за хоризонтално постављене ТЕГ-ове не може успоставити конвективно струјање ваздуха унутар модула [113]. Спојеве формирану термичком лепљивом траком, услед мале дебљине, су узети у разматрање као идеални термички контакти. Модели за грејач - извор топлоте, одстојник и облогу од плуте су направљени као чврста тела са поједностављеном геометријом. Грејач обезбеђује константан доток топлоте као услов термичког оптерећења. Укључени механизми преноса топлоте су провођење кроз чврсте и микропорозне структуре, ламинарно струјање загрејаног флуида под дејством гравитације и зрачење. У условима природног хлађења, зрачење има значајан допринос одвођењу топлоте са елемената склопа како путем директног зрачења површине ка амбијенту тако и путем индиректног зрачења од једне ка другој површини [27, 114]. Зрачење је укључено у симулацију коришћењем емисивности добијених као што је раније описано. Аутоматски креирана мрежа је накнадно побољшана у околини додирне површине хладњака са ваздухом све док се вредности температуре на бази хладњака између узастопних симулација нису разликовале за мање од  $0,1^\circ\text{C}$ . Типична мрежа садржи око 400000-500000 дискретизационих елемената, у зависности од геометрије хладњака и величине ТЕГ-а. Симулирано електрично оптерећење је екстерни отпорник повезан између извода ТЕГ-а.

### 4.3 Карактеристике разматраних склопова

Термоелектрични генератори коришћени у експерименту су комерцијалне компоненте, изабране на основу применљивости у чворовима бежичних сензорских мрежа. Крите-

ријуми су били укупне димензије, број термоелектричних парова, дужина и материјал термоелемената, као и унутрашња отпорност TEG-а, која треба да буде компатибилна са улазном отпорношћу кола за управљање електричном енергијом [18, 20, 38]. При томе, multi-stage TEG-ови због високе цене нису разматрани. У табели 4.1 су дати карактеристични параметри разматраних TEG-ова. Треба напоменути да су термоелектрични парови свих разматраних TEG-ова направљени од допираног бизмут-телурида ( $Bi_2Te_3$ ) чија својства конкретно зависе од произвођача. Укупни Зибеков коефицијент, специфична електрична отпорност и специфична термичка проводност су температурно зависне. За TEG-ове TEG1a, TEG2 и TEG3 је узето да температурни коефицијент  $\alpha_{pn}$  износи  $1,9 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  а температурни коефицијент  $\rho = 3,4 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . Код TEG5 и TEG6 температурне зависности прате релације:

$$\alpha_{pn}(T) = 1.22 \cdot 10^{-5} \times T^3 - 0.021 \times T^2 + 10.23 \times T - 1081 [\mu\text{V K}^{-1}], \quad (4.6)$$

$$\rho(T) = -1.48 \cdot 10^{-5} \times T^2 + 0.017 \times T - 2.78 [10^{-5} \Omega \text{ m}], \quad (4.7)$$

$$\lambda(T) = 3.96 \cdot 10^{-5} \times T^2 - 0.026 \times T + 5.84 [\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}]. \quad (4.8)$$

Избор хладњака направљен је на основу њиховог материјала, геометрије и површине TEG-а на који се поставља. Материјали за хладњаке су алуминијум, као традиционално коришћен материјал за ове примене, керамика алумина као нови стандард за LED апликације, и микропорозна керамика и бакарна пена, као тренутно нови материјали за хладњаке. Геометрије су типичне за комерцијалне хладњаке направљене од наведених материјала. Димензије одговарају површини основе TEG-а, узимајући у обзир дужину и ширину, док су висине оне које су доступне за одређену геометрију. У табели 4.2 су дати параметри изабраних хладњака, док су у табели 4.3 дата својства материјала коришћена у симулацијама. Код микропорозних хладњака, услед сложене структуре условљене постојањем отворених пора, за прорачун ефективних вредности специфичне термичке проводности, специфичног топлотног капацитета, као и ефикасности протока флуида, софтвер користи вредности коефицијента порозности и пермеабилности протока флуида [115]. Подаци су преузети из техничке документације произвођача, на основу мерења и из литературе [115].

Табела 4.1: Карактеристични параметри разматраних TEG-ова.

| Комерцијална ознака TEG-a →   | MCPF-     | CP          | ET-         | GM200-      | GM200-      |
|---|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Параметар   | (TEG1a)   | (TEG2)      | (TEG3)      | (TEG5)      | (TEG6)      |
| Максимална температурна разлика при $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$            | 73        | 67          | 74          | 175         | 175         |
| $\Delta T_{max}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )   |           |             |             |             |             |
| Максимална снага (W)  | 4,4       | 4,5         | 11,7        | 2,82        | 4,73        |
| Максимална струја при $\Delta T_{max}$ (A)                                      | 2,0       | 2,1         | 2,2         | 1,23        | 1,19        |
| Максимални напон при $\Delta T_{max}$ (V)                                       | 3,8       | 3,7         | 4,6         | 2,3         | 3,98        |
| Број термоелектричних парова $N$  | 31        | 31          | 71          | 71          | 127         |
| Укупне димензије $L \times W \times H$ (mm)                                     | 15×15×4,8 | 12×12×3,3   | 18×18×3,8   | 30×30×3,8   | 40×40×3,8   |
| Површина попречног пресека термоелемента  | 1         | 0,64        | 0,64        | 1,96        | 1,96        |
| $A$ (mm <sup>2</sup> )  |           |             |             |             |             |
| Дужина термоелемента $l$ (mm)   | 2,5       | 1,5         | 1,5         | 1,6         | 1,6         |
| Димензије $Su$ конектора (mm)   | 3×1×0,4   | 2,4×0,8×0,3 | 2,4×0,8×0,4 | 4,2×1,4×0,3 | 4,2×1,4×0,3 |
| Дебљина керамичке плоче (mm)  | 0,75      | 0,6         | 0,75        | 0,8         | 0,8         |
| Унутрашња отпорност при $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ $R_{TEG}$ ( $\Omega$ ) | 1,78      | 1,64        | 3,6         | 1,19        | 1,31        |

Табела 4.2: Димензије  $L \times W \times H$  (mm), геометрија и материјали разматраних хладњака.

| Геометрија                 | Материјал  |                      |                       |                     |
|----------------------------|--|----------------------|-----------------------|---------------------|
|                            | алуминијум   | алумина              | микропорозна керамика | бакарна пена        |
| са екструдираним стубићима | 40×40×10<br>(HS1)*                                   |                      |                       |                     |
|                            | 40×40×5<br>(HS2)**                                   | 42×42×12<br>(HS6)    |                       |                     |
|                            | 35×35×6<br>(HS3)*                                    | 30,5×30,5×6<br>(HS8) | •                     | •                   |
|                            | 25×25×9,4<br>(HS4)**                                 |                      |                       |                     |
|                            | 20×20×19,1<br>(HS5)†                                 |                      |                       |                     |
| са равним ребрима          |  |                      | 40×40×5,25<br>(HS10)  |                     |
|                            | •  | •                    | 30×30×5,25<br>(HS11)  | •                   |
|                            |  |                      | 25×25×5,25<br>(HS12)  |                     |
| раван                      |  |                      | 40×40×2,5<br>(HS13)   | 40×40×5<br>(HS15)   |
|                            | •  | •                    | 30×30×2,5<br>(HS14)   | 30×30×5<br>(HS16)   |
|                            |  |                      |                       | 40×40×2,5<br>(HS17) |
|                            |  |                      |                       |                     |
| Произвођач                 | *Fischer<br>Elektronik<br>**CCI<br>†ABL<br>Heatsinks | Spreadfast           | AMEC<br>Thermasol     | Versarien           |

У табели 4.4 је приказана експериментална дизајн матрица разматраних склопова. TEG-ови из табеле 4.1 и хладњаци из табеле 4.2 су комбиновани тако да је формирано 37 различитих склопова  $An$  ( $n = 1, \dots, 37$ ) који могу бити део чвора бежичне сензорске мреже. Однос између површине основе хладњака и површине основе TEG-а је био у опсегу 1-6,5.

## 4.4 Резултати анализе ефикасности

Скуп измерених резултата, као што је илустровано на слици 4.6, је добијен за сваки од склопова из табеле 4.4. На склоп се примењује изненадна термичка побуда, која ствара температурну разлику на странама TEG-а, а тиме се генерише напон  $V_L$ . Оваква побуда одговара условима хладног старта у самонапајајућим системима. У првом тренутку постоји премашење напона које настаје услед термичке инертности склопа [56]



Табела 4.3: Својства материјала хладњака коришћена за симулације.

| Параметар   | Материјал  |         |                       |                      |
|---|------------|---------|-----------------------|----------------------|
|   | алуминијум | алумина | микропорозна керамика | бакарна пена         |
| Густина<br>$d$ ( $\text{kg m}^{-3}$ )   | 2700       | 3660    | 1800                  | 3320                 |
| Специфична термичка проводност<br>( $\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) | 201        | 25      | 125                   | 45                   |
| Специфични топлотни капацитет<br>( $\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) | 900        | 900     | 670                   | 385                  |
| Порозност (%)   | •          | •       | 30                    | 63                   |
| Пермеабилност протока флуида ( $\text{m}^2$ )                                       | •          | •       | $0,54 \cdot 10^{-10}$ | $5,32 \cdot 10^{-8}$ |
| Емисивност при $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$                                      | 0,85       | 0,6     | 0,6                   | 0,7                  |

Табела 4.4: Склопови TEG-хладњак – експериментална дизајн матрица.

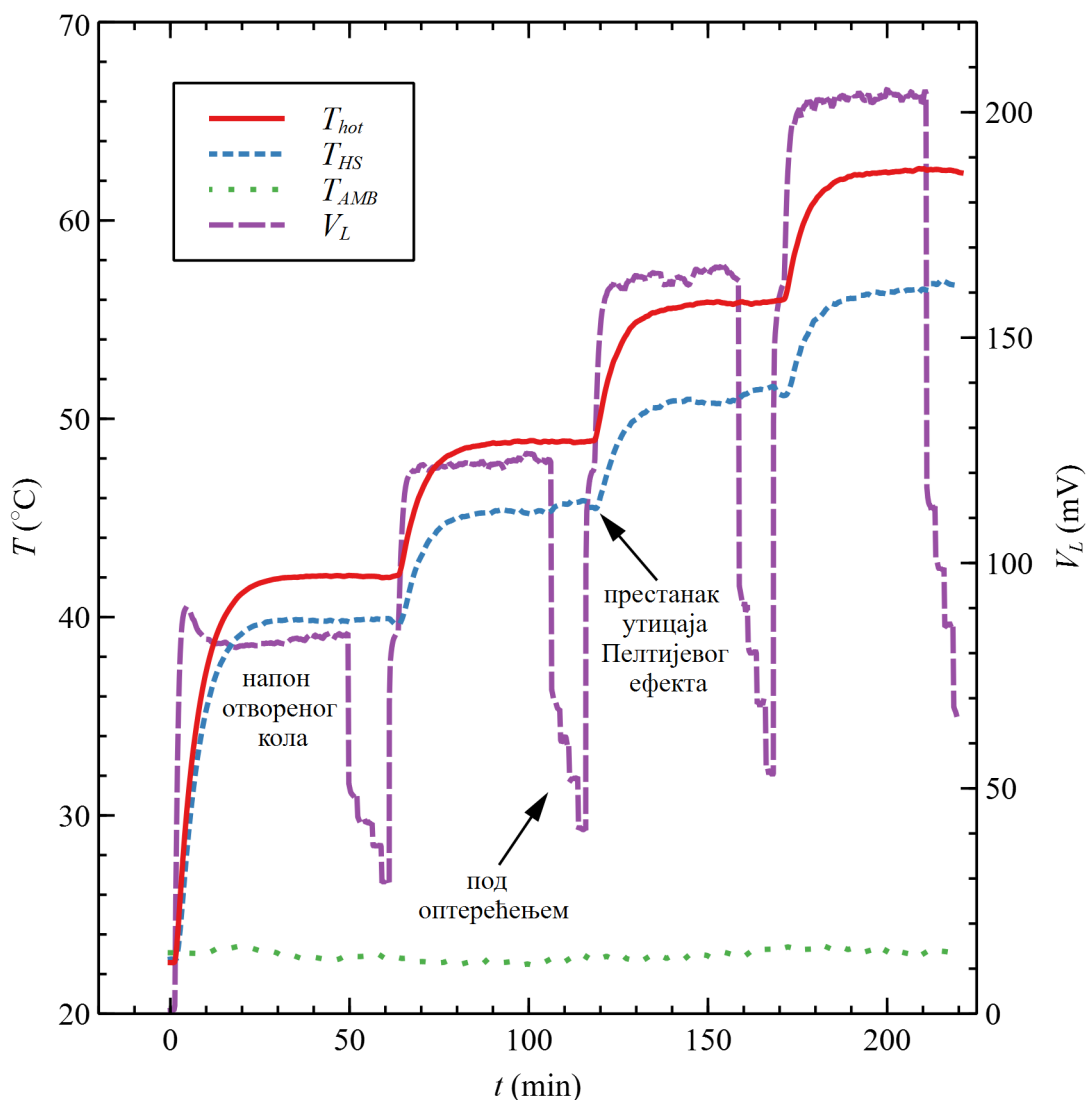
| TEG   | Хладњак |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
|       | HS1     | HS2 | HS3 | HS4 | HS5 | HS6 | HS8 | HS10 | HS11 | HS12 | HS13 | HS14 | HS15 | HS16 | HS17 |
| TEG1a |         |     | A1  | A2  | A3  |     | A4  |      | A5   |      |      | A6   |      | A7   |      |
| TEG2  |         |     |     | A8  | A9  |     | A10 |      | A11  |      |      |      |      | A12  |      |
| TEG3  |         |     | A13 | A14 | A15 |     | A16 |      | A17  | A18  |      | A19  |      | A20  |      |
| TEG5  | A21     | A22 | A23 |     |     | A24 |     | A25  | A26  |      | A27  | A28  | A29  | A30  |      |
| TEG6  | A31     | A32 |     |     |     | A33 |     | A34  |      |      | A35  |      | A36  |      | A37  |

и оно лагано опада како се склоп загрева и пуне његове термичке капацитивности. Равни делови криве  $T_{hot}$  одговарају термичкој равнотежи за сваку примењену температуру грејача. Због неизбежних микро флукуација температуре околине  $T_{AMB}$ , појављују се и минималне промене температуре хладњака  $T_{HS}$ . Дакле, крива  $V_L$  се такође незнатно мења у овим областима. Међутим, као што је раније поменуто, промене напона су у опсегу до 2,5%. Мерени напон је напон отвореног кола  $V_{L(oc)}$  док се не активира активно оптерећење. Сваки скок криве напона под оптерећењем  $V_L$  одговара промени од  $1 \Omega$  отпорности оптерећења  $R_L$ . Услед протицања струје  $I_L$  кроз ТЕГ под оптерећењем јавља се Пелтијев ефекат. Деловање Пелтијевог ефекта повећава температуру хладне, а смањује температуру топле стране, односно смањује ефективну температурну разлику на ТЕГ-у [116] а тиме и смањење напона  $V_L$ . Смањење напона је израженије при већим температурним разликама  $\Delta T$  и нижим вредностима  $R_L$  услед виших вредности  $I_L$ . Када се активно оптерећење искључи, Пелтијев ефекат нестаје, што доводи до пада температуре хладњака, док се напон постепено враћа на вредност отвореног кола. Овај феномен се може квалитативно уочити при искључењу активног оптерећења код склопова са алуминијумским хладњацима јер су они мање инертни и лакше се ослободе топлоте генерисане Пелтијевим ефектом.

У наставку ће бити анализирани резултати експерименталних мерења представљени у виду зависности напона  $V_{L(oc)}$  од температурне разлике  $\Delta T = T_{hot} - T_{AMB}$  за сваки од разматраних ТЕГ-ова. Опсег температурних разлика је карактеристичан за најчешће доступне разлике у температури грејача и околине код самонапајајућих система.

Зависности напона отвореног кола  $V_{L(oc)}$  у функцији температурне разлике  $\Delta T$  за ТЕГ1а са различитим хладњацима, тј. за склопове А1 - А7 су приказане на слици 4.7. При нижим температурним разликама (до  $30^\circ\text{C}$ ) најефикаснији је алуминијумски хладњак HS3 велике запремине и сложене геометрије, са екструдираним стубићима. С друге стране, изнад ове температуре бољу ефикасност показује HS5 од истог материјала, али веће висине стубића, тј. веће запремине. У разматраном опсегу температурних разлика, нешто мање је ефикасан алуминијумски хладњак HS4, који има око 25% мању запремину у односу на остале разматране хладњаке од истог материјала. Експерименти су показали да се хладњаци HS8, HS11 и HS16 могу међусобно мењати јер показују приближно исту ефикасност. Ови хладњаци имају приближно исте запремине, али су од различитих материјала. Хладњак HS8 има сложену геометрију са екструдираним стубићима, док је HS16 просте геометрије - раван. При нижим температурним разликама (до  $25^\circ\text{C}$ ) хладњаци HS8 и HS11 су ефикаснији у односу на HS16 зато што имају стубиће нешто веће висине. ТЕГ1а са хладњаком HS14 (склоп А6) ће давати најниже вредности напона у односу на остале разматране склопове. Наиме, хладњак HS14 има најмању висину, тј. запремину и равне је геометрије, направљен од бакарне пене. Алуминијумски хладњаци ће у разматраном опсегу температурних разлика дати око 15% већу ефикасност у поређењу са хладњацима направљеним од керамичких материјала. Међутим, алуминијумски хладњаци имају сложену геометрију, скупу за производњу, за разлику од једноставно синтерованих керамичких хладњака. Хладњаци од бакарне пене су у размотреном опсегу температурних разлика показали око 15% мању ефикасност у односу на склопове са хладњацима од керамичких материјала.

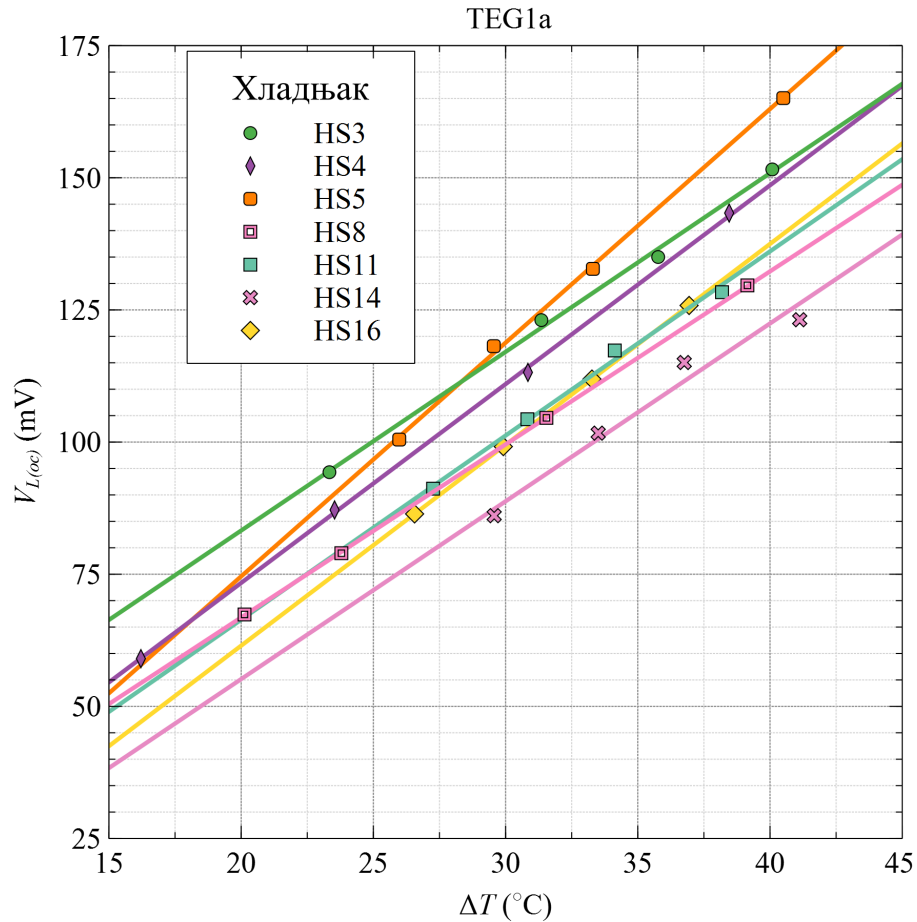
Зависности напона отвореног кола  $V_{L(oc)}$  у функцији температурне разлике  $\Delta T$  за ТЕГ2 са различитим хладњацима, тј. за склопове А8 - А12 су приказане на слици 4.8. Хладњаци HS4 и HS5 су супериорнији у односу на хладњаке HS8, HS11 и HS16, јер су



Слика 4.6: Измерене температуре и напон на оптерећењу за склоп А31.

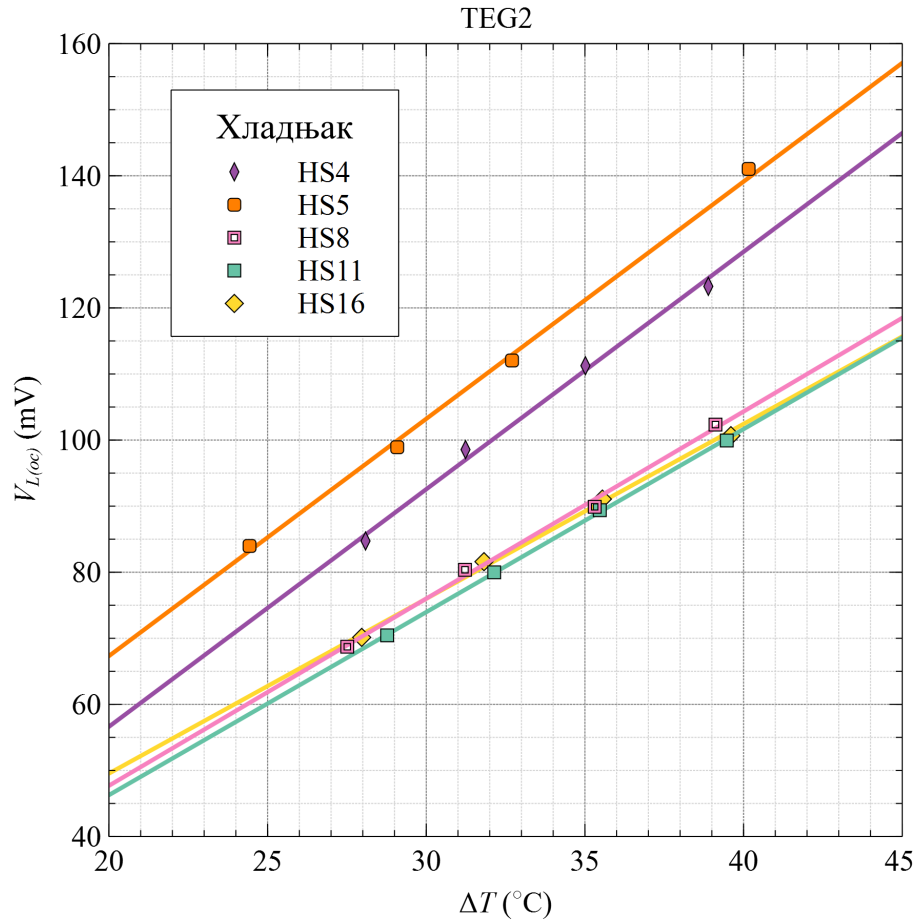
направљени од алуминијума са великим бројем екструдираних стубића. У целом опсегу разматраних температурних разлика вредности напона са хладњаком HS5 су 10% више у поређењу са хладњаком HS4. Иако су ова два хладњака од истог материјала и исте геометрије, запремина хладњака HS5 већа је око 30% у односу на HS4. С друге стране, хладњаци HS8, HS11 и HS16 су блиских ефикасности, тј. нема битне разлике у перформансама склопова А10 - А12. Ова три хладњака имају приближно исте запремине, али су направљени од различитих материјала. Најједноставнију геометрију има хладњак од бакарне пене, док хладњак од алумине има стубиће па би био бољи избор ако склоп ради у условима принудног струјања. Квантитативним поређењем карактеристика добија се да су ова три хладњака 30% мање ефикасна у односу на HS4, односно 40% у односу на HS5.

Зависности напона отвореног кола  $V_{L(oc)}$  у функцији температурне разлике  $\Delta T$  за TEG3 са различитим хладњацима, тј. за склопове А13 - А20 су дате на слици 4.9. На почетку треба напоменути да су са TEG3 коришћени исти хладњаци као са TEG1а. TEG3 има већи број термоелектричних парова у поређењу са TEG1а, зато су вредно-



Слика 4.7: Експериментално добијена зависност напона отвореног кола од температурне разлике  $\Delta T = T_{hot} - T_{AMB}$  за склопове А1 - А7.

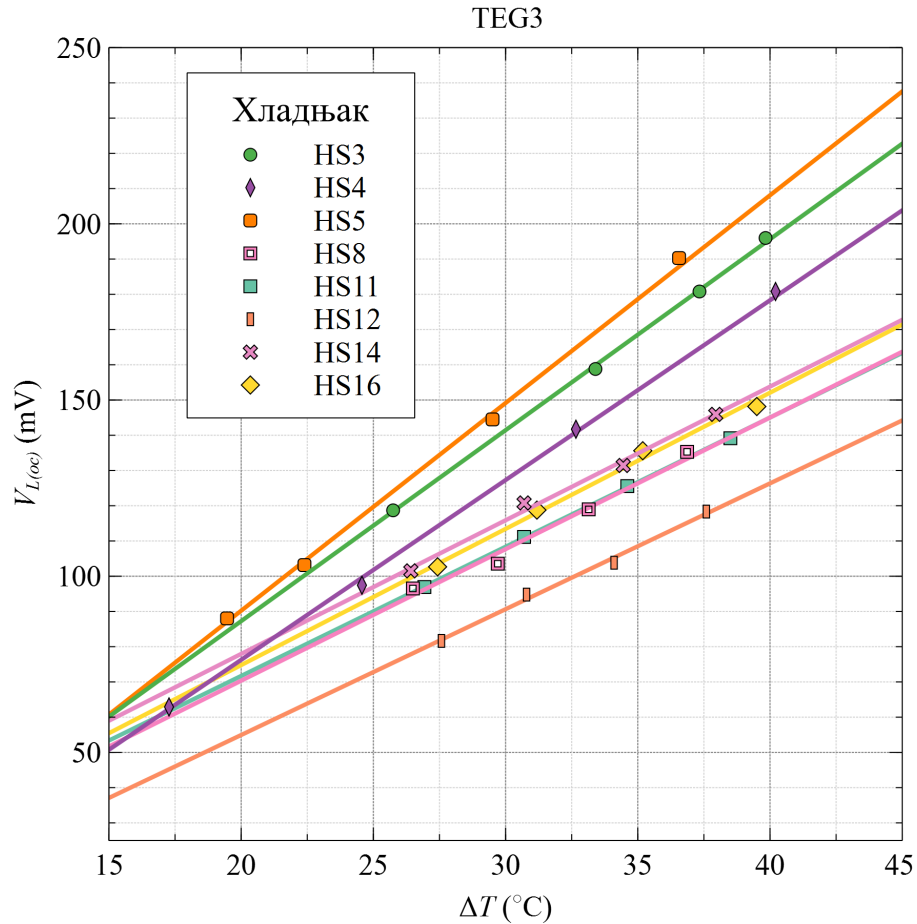
сти генерисаног напона веће за 15 % до 20 %. TEG3 има и већу површину од TEG1a тако да топлоту ефикасније одводе хладњаци веће запремине. У разматраном опсегу температурних разлика најефикаснији је хладњак HS5, затим HS3, па HS4, у складу с њиховим запреминама. HS5 има највећу, а HS4 најмању запремину. Ова три хладњака су направљена од алуминијума и имају сложена геометрија - екструдирани стубиће. Уочава се да су разлике у вредности генерисаног напона израженије при већим температурним разликама. Експерименти показују да се међусобно могу мењати хладњаци HS14 и HS16, јер имају исте перформансе. Оба хладњака имају исту површину основе и равни су. Међутим, HS16 има дупло већу висину, али је направљен од бакарне пене па даје исту ефикасност као тањи хладњак HS14 од микропорозне керамике. Незнатно мању ефикасност од ове групе хладњака показују HS8 и HS11, који се међусобно могу мењати јер дају исте перформансе. Ови хладњаци имају приближно исту запремину, али су од различитих материјала и геометрије. Може се уочити да ниже ефикасности показују хладњаци од керамичких материјала (око 25 %), у односу на алуминијумске. За разматране склопове, склоп са хладњаком HS12 даје најмање вредности напона. У односу на алуминијумске хладњаке, вредност напона је мања за 35 % до 40 %, а у односу на остале керамичке хладњаке за 10 % до 15 %. Хладњак HS12 има најмању запремину у поређењу са осталим разматраним хладњацима, а направљен је од микропорозне керамике. При врло ниским температурним разликама (мањим од 20 °C)



Слика 4.8: Експериментално добијена зависност напона отвореног кола од температурне разлике  $\Delta T = T_{hot} - T_{AMB}$  за склопове А8 - А12.

керамички хладњази показују боље или исте перформансе у односу на алуминијумски хладњак најмање запремине (HS4). Ово је значајно за самонапајајуће системе који раде при ниским температурним разликама, јер се керамички хладњази једноставније израђују.

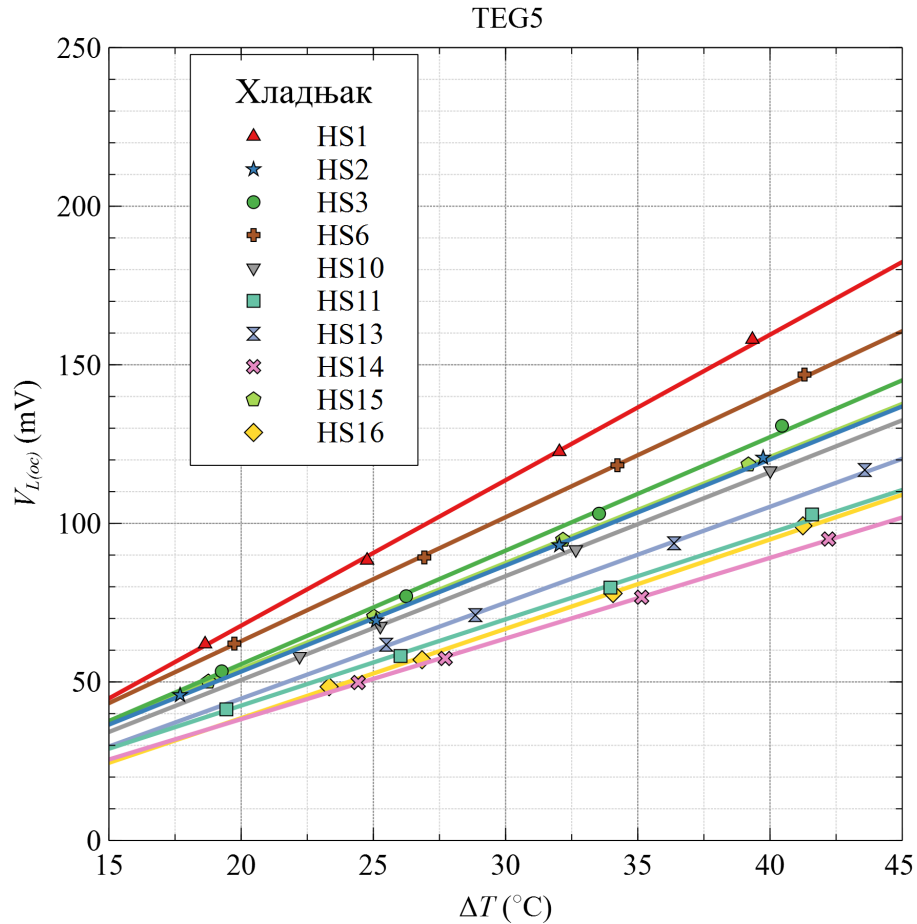
Зависности напона отвореног кола  $V_{L(oc)}$  у функцији температурне разлике  $\Delta T$  за TEG5 са различитим хладњацима, тј. за склопове А21 - А30 су приказане на слици 4.10. Најбоље перформансе у разматраном опсегу температурних разлика показује алуминијумски хладњак HS1, највеће запремине од свих разматраних хладњака направљених од истог материјала. Следи га хладњак исте геометрије (са стубићима) HS6. Овај хладњак има око 25% већу запремину у односу на HS1, али је направљен од керамике алумине па даје ниже напоне. Разлика између генерисаних напона је посебно изражена при већим температурним разликама, где се они разликују и до 25%. У односу на HS6, хладњак од алуминијума HS3 доприноси 20% мањим напонима. Хладњази HS3 и HS6 имају исту геометрију, али је HS3 мање запремине. Затим, исте перформансе показују хладњази HS2 и HS15 који имају исте димензије, али су од различитог материјала и геометрије. Ово је значајно јер се међусобно могу мењати хладњак HS2 са екструдираним стубићима од алуминијума и равни хладњак HS15 од бакарне пене. Незнатно мању ефикасност у односу на претходну групу даје хладњак HS10 исте површине основе, али нешто веће висине ребара, а који је направљен од мик-



Слика 4.9: Експериментално добијена зависност напона отвореног кола од температурне разлике  $\Delta T = T_{hot} - T_{AMB}$  за склопове А13 - А20.

ропорозне керамике. По ефикасности, следи хладњак HS13 исте површине основе као и хладњак HS10, али дупло мање дебљине. Хладњак HS13 утиче на, и до 10%, ниже вредности генерисаног напона. Хладњаци су од истих материјала, с тим да је HS13 раван. Нема значајне разлике у перформансама хладњака HS11 и HS16 који имају приближно исте димензије. Благо је ефикаснији хладњак од алумине HS11 зато што има мало већу висину ребара у односу на равни HS16 од бакарне пене. Интересантно је да при нижим температурним разликама, хладњак HS16 је по ефикасности приближнији хладњаку HS14, који је исте површине основе али има дупло мању дебљину и направљен је од микропорозне керамике. При већим температурним разликама, HS14 утиче на смањење напона и до 10% у односу на склоп са хладњаком HS16.

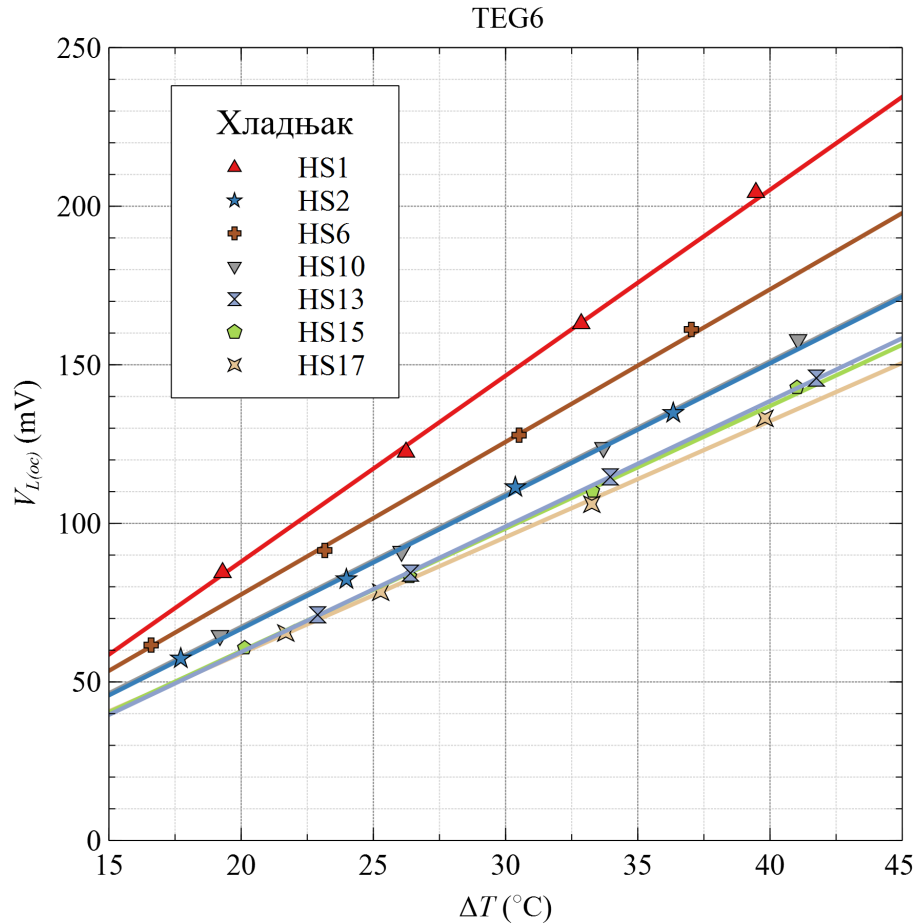
Зависности напона отвореног кола  $V_{L(oc)}$  у функцији температурне разлике  $\Delta T$  за TEG6 са различитим хладњацима, тј. за склопове А31 - А37 су дати на слици 4.11. Хладњаци HS1 и HS6 дају највише вредности напона за цео опсег разматраних температурних разлика, што је и очекивано с обзиром да имају највећи број и висину стубића али они заузимају највећу запремину. Уочава се да хладњаци HS2 и HS10, блиских спољашњих габарита, имају скоро идентичну ефикасност. Ово је значајно јер је HS2 екструдирани алуминијумски хладњак, сложене геометрије, а HS10 од микропорозне керамике, нископрофилни и једноставне геометрије. Микропорозни равни хладњаци HS13 и HS15 су скоро једнаких перформанси. При томе, дебљина и пороз-



Слика 4.10: Експериментално добијена зависност напона отвореног кола од температурне разлике  $\Delta T = T_{hot} - T_{AMB}$  за склопове А21 - А30.

ност хладњака од керамике је двоструко мања у односу на хладњак од бакарне пене. Хладњак HS15 даје исту ефикасност при нижим температурним разликама као и HS17 иако је душло веће висине. Чак и при већим температурним разликама, добијају се незнатно већи напони у случају склопа А36. Квантитативним поређењем карактеристика хладњака HS2 и HS15, уочава се да алуминијумски хладњак даје приближно 10% више напона, што не представља превелик допринос. Истовремено, анализа резултата за микропорозне керамичке хладњаке HS10 и HS13, указује да двоструко већа дебљина хладњака побољшава перформансе за свега 8%.

Као што је напоменуто, однос између површине основе хладњака и површине основе TEG-а је био у опсегу 1-6,5. Највећи однос ових површина је код склопа А10, док већина разматраних склопова TEG-хладњак има однос површина 1-2. Анализом резултата са слика 4.7-4.11 може се закључити да однос површина хладњака и TEG-а није пресудан у погледу ефикасности склопа, већ да перформансе доминантно одређују избор TEG-а, као и димензије и материјал хладњака. На пример, при температурној разлици од  $25^\circ\text{C}$ , склоп А28 ће генерисати напон 50 mV, а склоп А31, напон од 118 mV, при чему оба склопа имају однос површина основе хладњака и TEG-а једнак 1. Склоп А28 чине TEG5 и хладњак HS14 који је раван од микропорозне керамике, док је склоп А31 састављен од највећег TEG6 и највећег алуминијумског хладњака са екструдираним стубићима HS1. С друге стране, склоп са највећим односом површи-



Слика 4.11: Експериментално добијена зависност напона отвореног кола од температурне разлике  $\Delta T = T_{hot} - T_{AMB}$  за склопове А31 - А37.

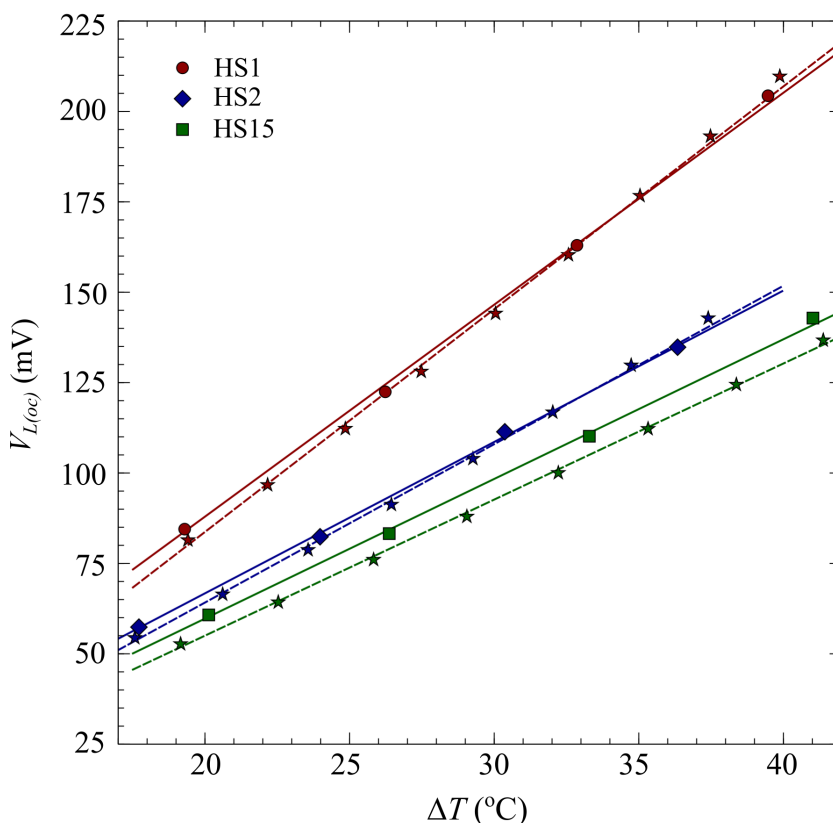
на основе хладњака и TEG-а при истој температурној разлици генерисаће напон од 62 mV. То је склоп А10 који је састављен из TEG2 и хладњака од алумине HS8. Када се пореде склопови састављени од TEG-а и хладњака од истог материјала, ефикаснији ће бити они склопови који имају већи однос површине основе хладњака и TEG-а. На пример, склопови А25 и А26 састављени су од TEG5 и хладњака од микропорозне керамике са равним ребрима (HS10 и HS11). При температурној разлици од 25 °C ће ови склопови генерисати напоне 68 mV и 56 mV, респективно. Однос површина основе хладњака и TEG-а су 1,78 за А25 и 1 за А26.

Може се закључити да стандардни алуминијумски хладњаци, велике запремне врло ефикасно одводе топлоту и доприносе највећим генерисаним напонима TEG-а. Међутим, у условима природног хлађења, а узевши у обзир габарите и сложеност геометрије, керамички материјали (алумина и микропорозна керамика) показују одличну ефикасност. Равни хладњаци од бакарне пене се такође могу успешно применити у условима природног хлађења. Евидентно је да стубићи код екструдираних хладњака побољшавају ефикасност преваходно код хлађења уз постојање струјања околног флуида.

За све склопове урађене су нумеричке симулације да би се успоставила стандардна процедура за предвиђање карактеристика новопроектираних склопова TEG-хладњак.



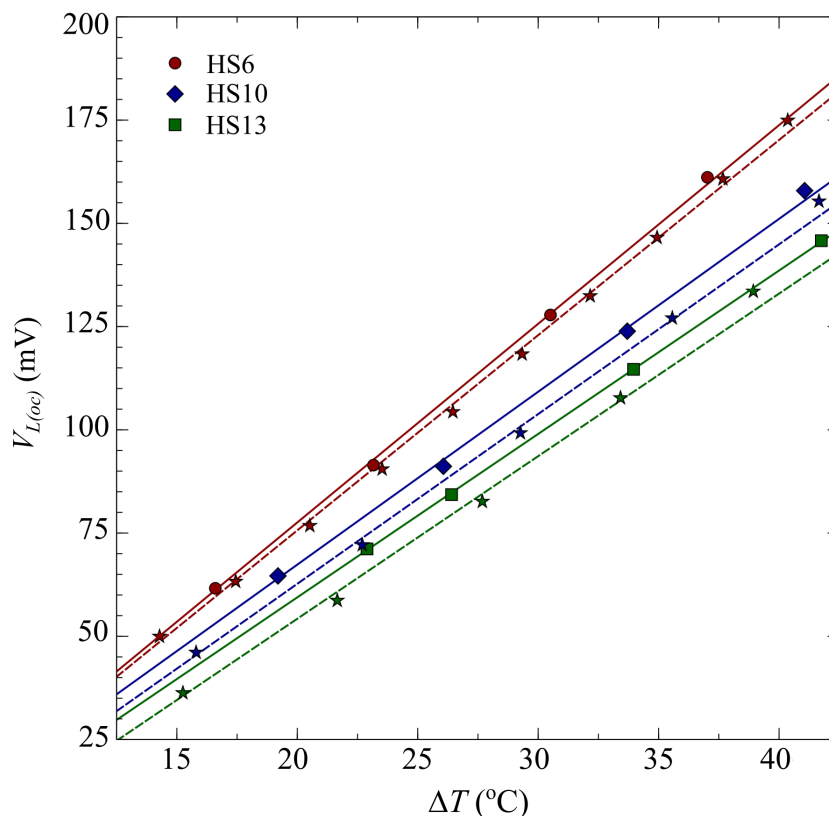
На сликама 4.12 и 4.13 су приказани резултати експерименталних мерења и симулација у виду зависности напона отвореног кола од температурне разлике за склопове са TEG6 и одабраним хладњацима. Резултати симулације веома добро прате резултате експерименталних мерења. Максимално одступање код алуминијумских и алумина хладњака је 6% док је код микропорозних хладњака 10%, првенствено због немогућности софтвера да адекватно симулира ефекте индиректног зрачења код оваквих материјала. Напомиње се да, обично занемаривано, зрачење утиче чак до 30% на вредност генерисаног напона добијену симулацијама. Иста одступања експерименталних и симулационих резултата добијена су и за остале разматране склопове TEG-хладњак.



Слика 4.12: Зависност напона отвореног кола од температурне разлике  $\Delta T = T_{hot} - T_{AMB}$  за склопове са TEG6 и хладњацима од алуминијума и бакарне пене. Симболи и пуне линије - експеримент; звездице и испрекидане линије - симулације.

Да би се илустровала расподела температуре на склопу TEG-хладњак и околном флуиду дата је слика 4.14. Приказана је температурна расподела добијена симулацијом за склоп А34 при  $\Delta T = T_{hot} - T_{AMB} = 40^\circ\text{C}$  и без електричног оптерећења TEG-а. Јасно се уочава расподела температуре кроз термоелементе и на хладној страни TEG-а као и профил струјања топлог ваздуха са хладњака, односно облик перјанице. Симулацијама је уочено да ефекат зрачења значајно доприноси изгледу расподеле и вредностима температуре на елементима склопа. Слична расподела температуре добија се и за остале разматране склопове TEG-хладњак.

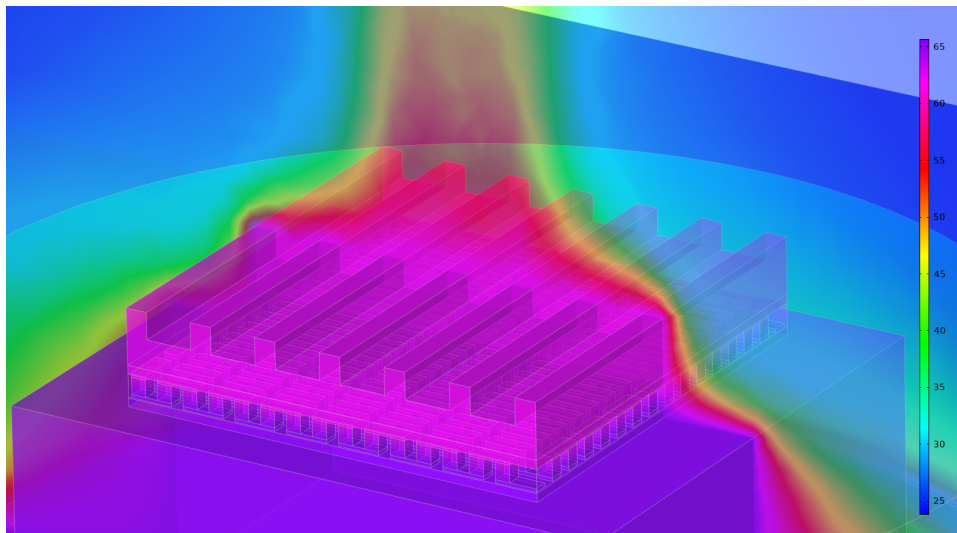
Експериментални резултати зависности напона на потрошачу од температурне разлике за различите отпорности оптерећења омогућавају квантитативну процену утицаја Пелтијевог ефекта на вредност генерисаног напона. Као илустрација, на слици 4.15 је дата зависност напона на потрошачу  $V_L$  од температурне разлике за склоп А34



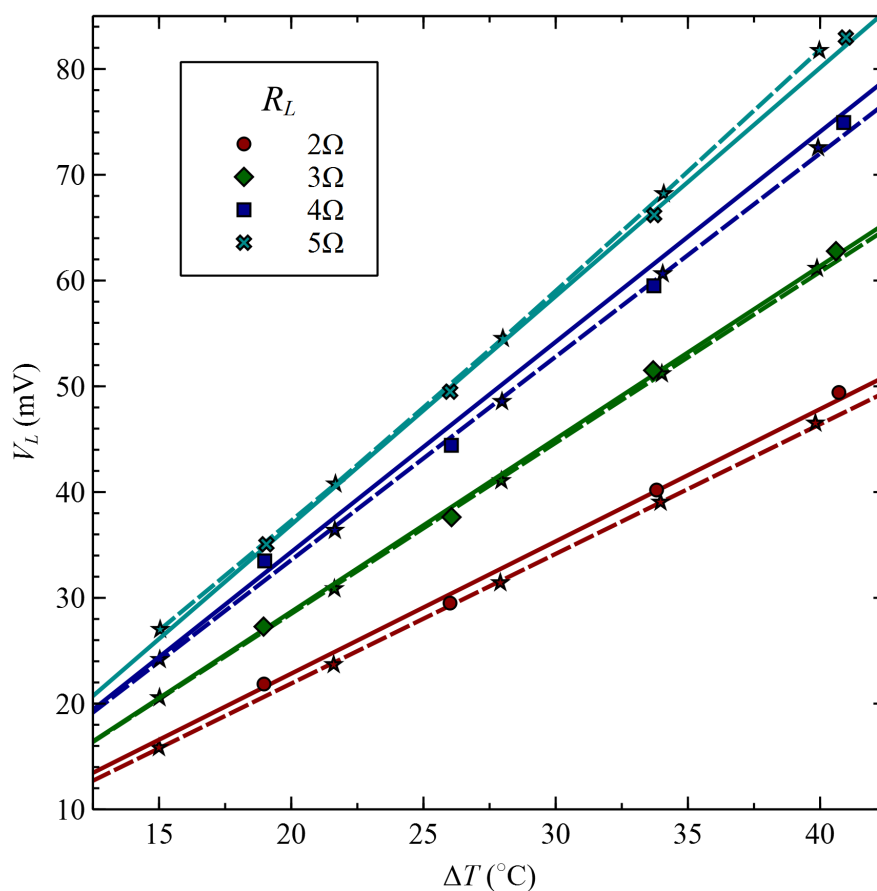
Слика 4.13: Зависност напона отвореног кола од температурне разлике  $\Delta T = T_{hot} - T_{AMB}$  за склопове са TEG6 и хладњацима од алумине и микропорозне керамике. Симболи и пуне линије - експеримент; звездице и испрекидане линије - симулације.

при различитим вредностима активног оптерећења  $R_L$ . У односу на вредност  $V_L$  која би се добила расподелом  $V_{L(oc)}$  на отпорностима  $R_L$  и  $R_{TEG}$ , овај ефекат доприноси њеном смањењу за 22% до 36% у зависности од температурне разлике  $\Delta T$  и отпорности оптерећења  $R_L$ . Анализа утицаја Пелтијевог ефекта на вредност генерисаног напона урађена је и за остале разматране склопове. Може се закључити да је утицај Пелтијевог ефекта израженији код TEG-ова са већим бројем термопарова због већих вредности струје  $I_L$ . Релативна промена напона на потрошачу креће се у границама од 30% до 50% у зависности од температурне разлике  $\Delta T$  и отпорности оптерећења  $R_L$ .

Вредност генерисаног напона  $V_{L(oc)}$  за све разматране склопове TEG-хладњак при  $\Delta T = 25^\circ\text{C}$  приказане су на слици 4.16. Усвојен референтни напон за поређење резултата је 60 mV. Склопови A26, A28 и A30, које чине TEG5 и хладњаци од микропорозне керамике HS11 и HS14 и бакарне пене HS16 неће генерисати довољан напон при овој температурној разлици. Ови склопови су најмање ефикасни јер их чине хладњаци равне геометрије и однос површина TEG-а и хладњака је 1. Неколико склопова са хладњацима од микропорозне керамике (A11, A27) ће при датој температурној разлици генерисати граничну вредност напона од 60 mV. С друге стране, највећу вредност напона (120 mV) при температурној разлици од  $25^\circ\text{C}$  генерисаће склоп A15, кога чини TEG3 са алуминијумским хладњаком HS5 са екструдираним стубићима, највеће висине. Следе, склоп A31 састављен од TEG6 највећих димензија од разматраних, са алуминијумским хладњаком HS1 са екструдираним стубићима највећих димензија,

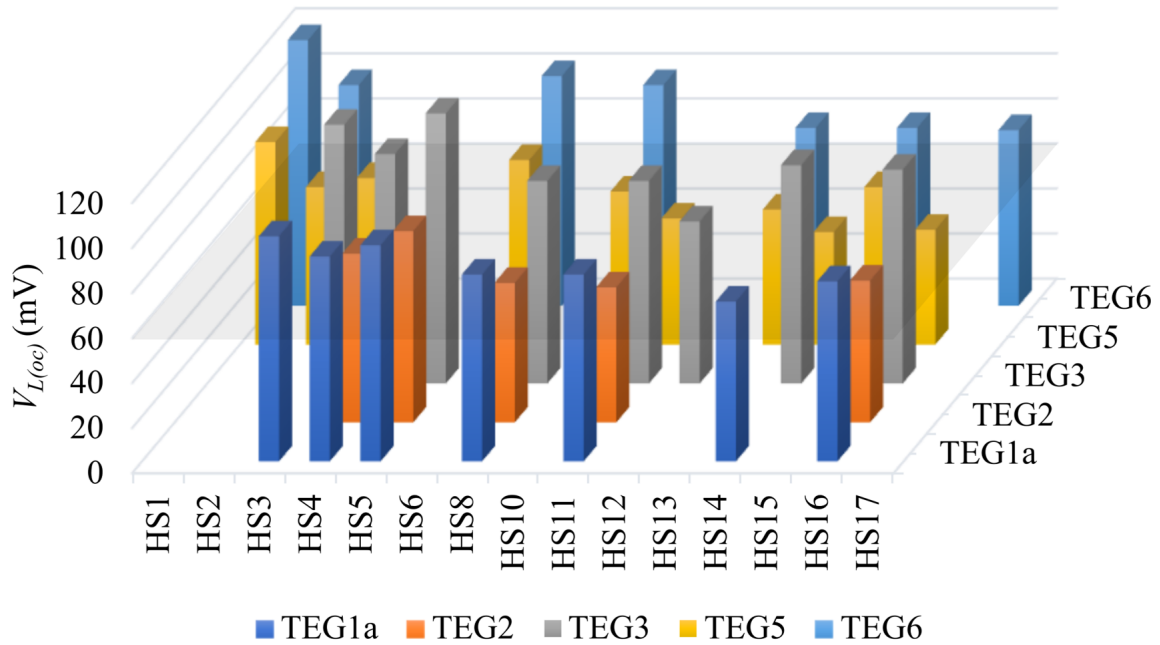


Слика 4.14: Распoдела температуре на склопу А34 и околном флуиду добијена симу-  
лацијом при  $\Delta T = T_{hot} - T_{AMB} = 40\text{ }^\circ\text{C}$  и при отвореном колу.



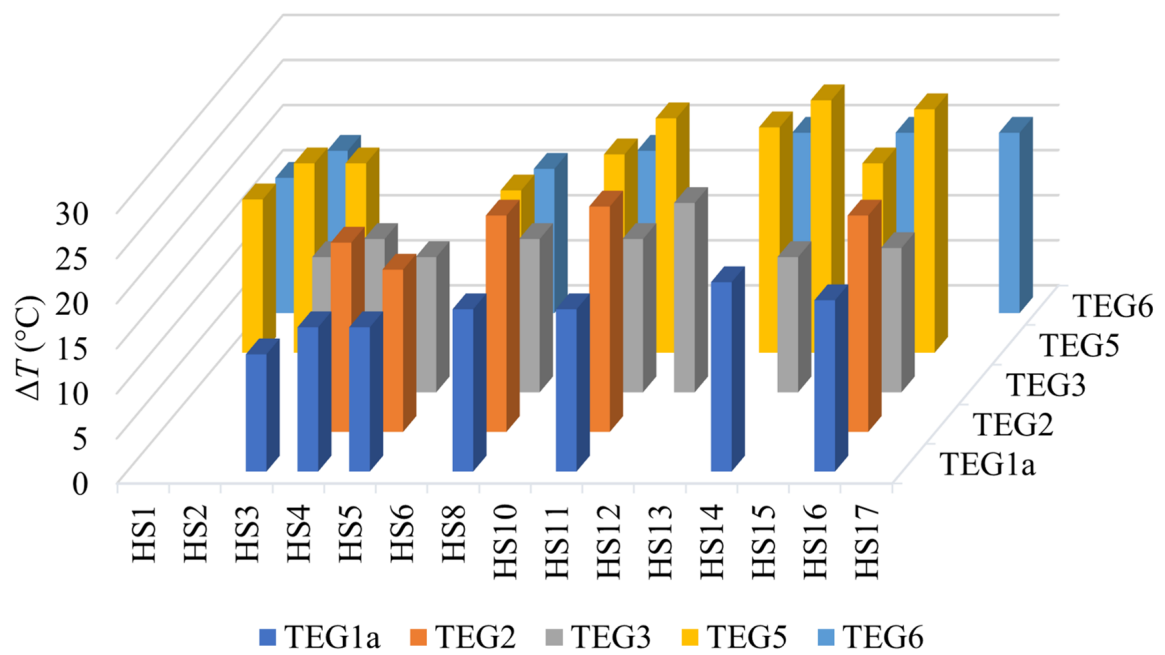
Слика 4.15: Зависност напона на потрошачу од температурне разлике  $\Delta T = T_{hot} - T_{AMB}$  за склоп А34. Симболи и пуне линије – експеримент; звезде и испрекидане линије - симулације.

као и склоп A13 кога карактерише однос између површине основе хладњака HS3 и површине основе TEG3 од 3,8 пута.



Слика 4.16: Вредност генерисаног напона  $V_{L(oc)}$  за све разматране склопове TEG-хладњака при  $\Delta T = 25^\circ\text{C}$ .

Вредности температурне разлике  $\Delta T$  за све разматране склопове TEG-хладњака при  $V_{L(oc)} = 60\text{ mV}$  дате су на слици 4.17. Најмања температурна разлика ( $13^\circ\text{C}$ ) потребна је склопу A1 кога чине TEG1a и алуминијумски хладњака HS3 са екструдираним стубићима, чији је однос површина 5,4. Исти напон ће склопови A26, A28, A30 достићи тек при температурним разликама за неколико степени већим од  $25^\circ\text{C}$ , што је последица геометрије и материјала хладњака. Већина разматраних склопова ће дати напон постићи при температурним разликама око  $20^\circ\text{C}$ .



Слика 4.17: Вредности температурне разлике  $\Delta T$  за све разматране склопове TEG-хладњак при  $V_{L(oc)} = 60 \text{ mV}$ .

## Глава 5

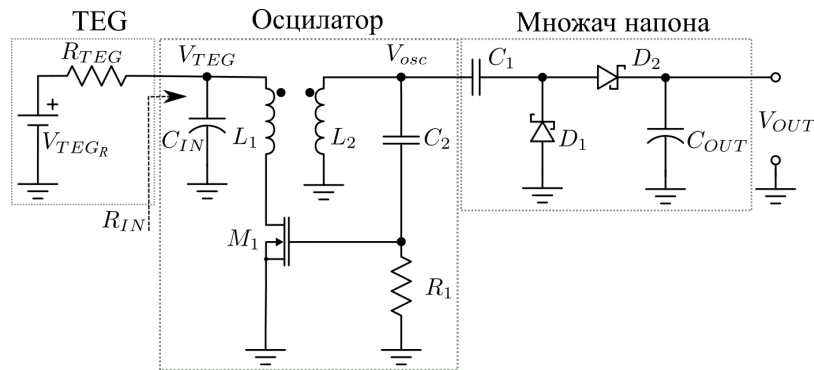
# Моделирање кола за подизање напона

У уређајима мале потрошње, уместо стандардних извора напајања и батерија могу се користити алтернативни извори енергије. Такви системи комбинују три одвојене технологије: конверзију неелектричне енергије из околине у електричну енергију, управљање енергијом што подразумева подизање и регулацију вредности генерисане енергије и складиштење енергије [117]. Напон добијен конверзијом термичке у електричну енергију треба да буде повећан и енергија сачувана тако да може бити искоришћена за напајање сложених система, као што су чворови бежичних сензорских мрежа. За ове потребе су развијена кола за подизање напона, заснована на Мајснеровом осилатору. Оваква кола су реализована на штампаној плочи [30] или интегрисана на чипу [118]. У раду [119] представљено је коло за подизање напона са магнетним елементима интегрисаним на чипу које захтева улазни напон већи од 25 mV да би заосциловало и почело да подиже излазни напон. Аутори су у раду [31] презентovali дизајн осцилаторног интегрисаног кола за подизање напона направљеног у 0,32  $\mu\text{m}$  технологији са два микротрансформатора са различитим језгрима. Поједностављена конфигурација интегрисаног кола за подизање напона LTC3108 је описана у [47]. Нека од истраживања о нисконапонским колима за подизање напона дата су у [120, 121] за термоелектрични, [122] за соларни, [123] за механички или [124] за РФ energy harvesting.

У овом поглављу представљено је нисконапонско коло за подизање напона за термички energy harvesting при условима природног хлађења. Карактеризација укључује склоп комерцијални TEG - хладњак и спроведена је да би се истражио утицај хладњака на вредност термоелектрично генерисаног напона. Овај напон је довољан да би се покренуло осцилаторно коло чији је излазни напон даље повећан коришћењем кола за множење напона. Добијени исправљени напон је складиштен у великом кондензатору и може се користити за напајање других елемената чвора бежичне сензорске мреже. Електрично коло осцилатора и кола за множење напона је реализовано коришћењем дискретних комерцијалних електронских компонената. Урађена је експериментална карактеризација целог кола за подизање напона и за коло осцилатора је развијен аналитички модел за мале сигнале који омогућава одређивање фреквенције осциловања.

## 5.1 Пројектовање кола за подизање напона

Најважнији захтеви за DC-DC конверторе за подизање напона су што је могуће мањи почетни улазни напон и што је могуће већа ефикасност конверзије снаге. Добијени повећани напон треба да буде довољно висок да обезбеди повезаним електронским колима потребно напајање. Конвертор треба да се сигурно стартује и при ниским улазним напонима без употребе помоћног напајања из батерије. Стога је пројектовано коло за подизање напона засновано на осцилатору са могућношћу самопокретања. Искоришћен је Мајснеров тип осцилатора (Meissner) који се састоји из step-up трансформатора и n-каналног MOSFET транзистора са уграђеним каналом [125]. Коло за множење напона, тј. дуплирање напона (voltage doubler) [126] је такође укључено у пројектовано коло. Електрична шема кола приказана је на слици 5.1.

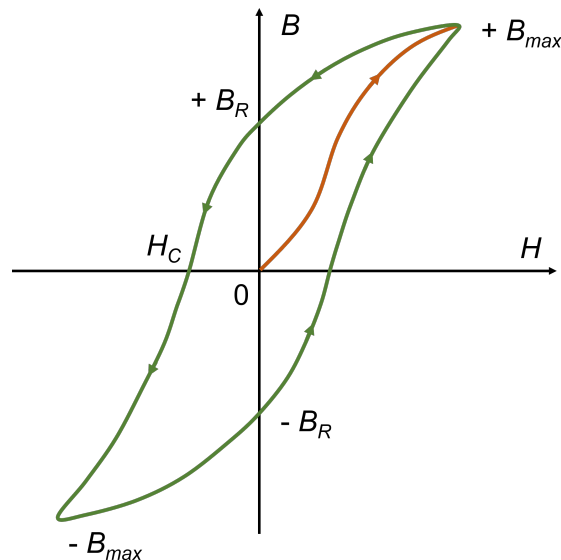


Слика 5.1: Електрична шема кола за подизање напона заснованог на Мајснеровом осцилатору и множачу напона.

N-канални MOSFET са уграђеним каналом BSP149 ( $M_1$ ) је изабран због нормално - укљученог стања при разматраним ниским улазним напонима јер има негативни напон прага  $V_{th}$  [127]. Друга предност овог транзистора је његова мала отпорност између дрејна и сорса у укљученом стању, која се креће од  $1,7\ \Omega$  до  $3,5\ \Omega$ . Charge pump кондензатор  $C_1$ , који је саставни део кола за дуплирање напона, утиче на вредност максималне излазне струје. Минимална вредност од  $1\ \text{nF}$  је препоручена када коло ради са ниским улазним напонима, при чему се користи трансформатор односа броја намотаја  $1 : 100$  [74]. Превелика вредност капацитивности може угрозити рад кола када се користи извор велике унутрашње отпорности и када коло ради са ниским улазним напонима. У овом случају изабран је керамички кондензатор капацитивност  $C_1 = 100\ \text{nF}$ . Кондензатор  $C_2$  користи се као кондензатор за спрегу са гејтом транзистора. Вредност капацитивности овог кондензатора изабрана је тако да осцилације кола почну врло брзо након што улазни напон достигне  $60\ \text{mV}$ . Експериментално добијена вредност капацитивности је  $C_2 = 4,5\ \text{nF}$ . Отпорник  $R_1$  обезбеђује стабилан почетак осцилација у колу. Изабрана вредност отпорности отпорника је  $R_1 = 2,2\ \text{M}\Omega$ . Шоткијеве диоде ( $D_1$  и  $D_2$ ) се користе за реализацију кола за множење (дуплирање напона). Ове диоде су боље у поређењу са силицијумским диодама због нижег напона директне поларизације. За складиштење прикупљене енергије користи се електролитски кондензатор  $C_{OUT}$  капацитивности  $100\ \mu\text{F}$ .

Избор трансформатора је посебно важан у процесу пројектовања овакве врсте кола. Главне карактеристике трансформатора у колима за подизање ниских улазних напона су висока вредност фактора добротe, мала површина отиска на штампаној

плочи и висок однос броја намотаја. Комерцијални минијатурни тороидални микро-трансформатори са феритним и магнетним нискотемпературним со-fired керамичким језгрима се најчешће примењују за energy harvesting [31]. У овом случају изабран је комерцијални микротрансформатор са односом броја намотаја 1 : 100. Када се на примарне намотаје трансформатора доведе напон, кроз њих протиче струја. Ова струја ствара магнетну силу  $H$  која прави магнетни флукс  $\Phi$  густине  $B$  у језгру трансформатора. Када магнетна сила порасте од нуле, густина флукса порасте до одређене максималне вредности. Изнад овог нивоа, даље повећање  $H$  резултира не значајним порастом  $B$  зато што долази до засићења у магнетном материјалу (слика 5.2) [128]. Идеални трансформатор нема губитке у намотајима и језгру и има коефицијент спреге једнак јединици. У пракси, сви магнетни материјали, када се једном намагнетишу, задржавају одређену магнетизацију  $B_R$  када се  $H$  смањи на нулу. Сила магнетнења која се мора применити да би се поништила заостала густина флукса је коерцитивна сила  $H_c$  (слика 5.2). Генерално, микротрансформатори могу имати велике губитке у језгру због вртложних струја и хистерезиса. Губици у хистерезису настају због додатне снаге која је потребна да окрене магнетно поље у магнетном материјалу у присуству наизменичне струје.



Слика 5.2: Хистерезисна петља магнетних материјала.

Напонски извор ( $V_{TEG}$ ) који изазива протицање струје кроз примарни намотај  $L_1$  и нормално укључен MOSFET са уграђеним каналом је повезан на step-up трансформатор. Ова струја индукује позитивни напон на секундарном намотају  $L_2$  чиме се повећава напон на гејту транзистора  $M_1$  а тиме и струја у примарном намотају. Када ова струја изазове засићење у језгру, напон на секундарном намотају почиње да опада. Транзистор почиње да обара струју кроз примарни намотај трансформатора што доводи до окретања напона на секундарном намотају и негативног напона на гејту. Транзистор ради у области близу искључења, што води до опадања струје кроз примарни намотај, и зато, преко трансформатора се јавља мања негативна вредност напона на гејту. Транзистор се брзо укључује и остаје у проводном стању док струја кроз примарни намотај достигне засићење тако да процес осциловања почне поново.

Сигнал из осцилаторног кола ( $V_{osc}$ ) води се у полуталасни удвостручивач напона. Коло удвостручивача напона је састављено из два дела: кола за подизање напонског



нивоа (clamp) кога чине  $C_1$  и  $D_1$  и исправљачког кола кога чине  $D_2$  и  $C_{OUT}$ . Током негативне полупериоде улазног напона, диода  $D_1$  проводи, пуњећи кондензатор  $C_1$  до напона  $V_{C1} = V_{D1} - V_{OSC}$ . Треба напоменути да  $V_{OSC}$  представља амплитуду излазног напона осилатора  $V_{osc}$ . Током позитивне полупериоде улазног напона, диода  $D_1$  не проводи струју, док диода  $D_2$  води пуњећи кондензатор  $C_{OUT}$ . Ако усвојимо да је  $V_{D1} = V_{D2} = V_D$ , излазни напон ће бити:

$$V_{OUT} = V_{OSC} - V_{C1} - V_{D2} = 2(V_{OSC} - V_D) . \quad (5.1)$$

Ако диоде представљају кратак спој када су у проводном стању, кондензатор  $C_{OUT}$  ће се празнити преко потрошача током негативне полупериоде улазног напона и допуњивати до  $2V_{OSC}$  током позитивне полупериоде.

## 5.2 Модел за мале сигнале осцилатора у колу за дизање напона

Модел за мале сигнале осцилаторног кола приказан је на слици 5.3. Главни параметри транзистора и трансформатора који утичу на услове осциловања су:  $g_m$  – транскондуктанса MOS транзистора,  $C_{gs}$  – капацитивност између гејта и сорса MOS транзистора,  $L_1$  – индуктивност примара трансформатора,  $L_2$  – индуктивност секундара трансформатора,  $R_{S1}$  – редна унутрашња отпорност примарног намотаја трансформатора,  $R_{S2}$  – редна унутрашња отпорност секундарног намотаја трансформатора,  $R_1$  – спољашња отпорност,  $C_2$  – спољашња капацитивност,  $M$  – међусобна индуктивност трансформатора,  $k_L$  – коефицијент спреге између примара и секундара трансформатора, где је:

$$M = k_L \sqrt{L_1 L_2} . \quad (5.2)$$

Струја кроз намотаје у примару трансформаторај, тј. кроз дрејн транзистора је:

$$i_1 = g_m v_g . \quad (5.3)$$

На основу Кирхофових закона, за коло са слике 5.3 може се написати:

$$\frac{sMg_mv_g - v_g}{R_{s2} + sL_2 + \frac{1}{sC_2}} - \frac{v_g}{R_1} - v_g sC_{gs} = 0 . \quad (5.4)$$

Треба напоменути да је  $s = j\omega$ . Решавањем једначине 5.4 добија се:

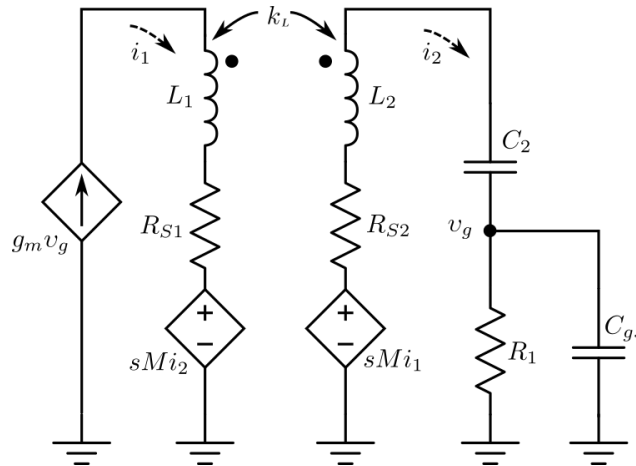
$$\begin{aligned} -\omega C_2 + j\omega^2 C_2 M g_m &= \frac{\omega R_{s2} C_2}{R_1} - \omega C_{gs} (\omega^2 L_2 C_2 - 1) \\ &+ j(\omega^2 C_{gs} R_{s2} C_2) + j \frac{\omega^2 L_2 C_2 - 1}{R_1} . \end{aligned} \quad (5.5)$$

Резонантна фреквенција се добија из услова да је реални део једначине 5.5 једнак нули:

$$\omega^2 C_{gs} C_2 L_2 - \frac{R_{s2} C_2}{R_1} - C_{gs} - C_2 = 0 . \quad (5.6)$$

Решавањем једначине 5.6, а с обзиром да је  $\omega = 2\pi f$ , за фреквенцију осциловања  $f$  добија се:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R_{s2}C_2 + R_1C_{gs} + R_1C_2}{R_1C_{gs}L_2C_2}}. \quad (5.7)$$

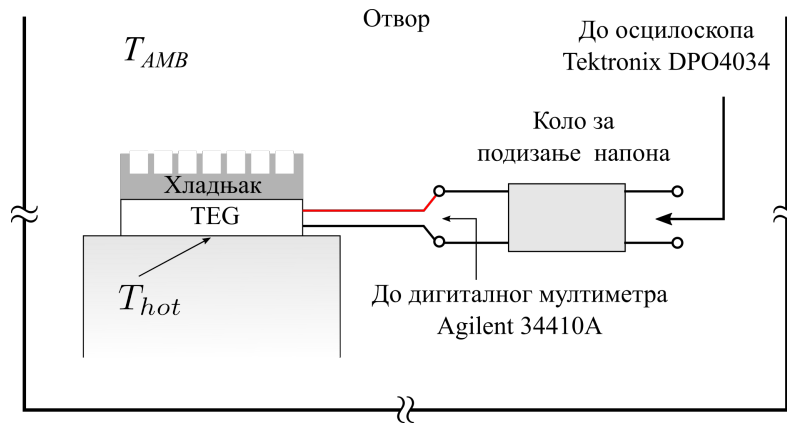


Слика 5.3: Шема еквиваленог модела за мале сигнале осцилаторног кола.

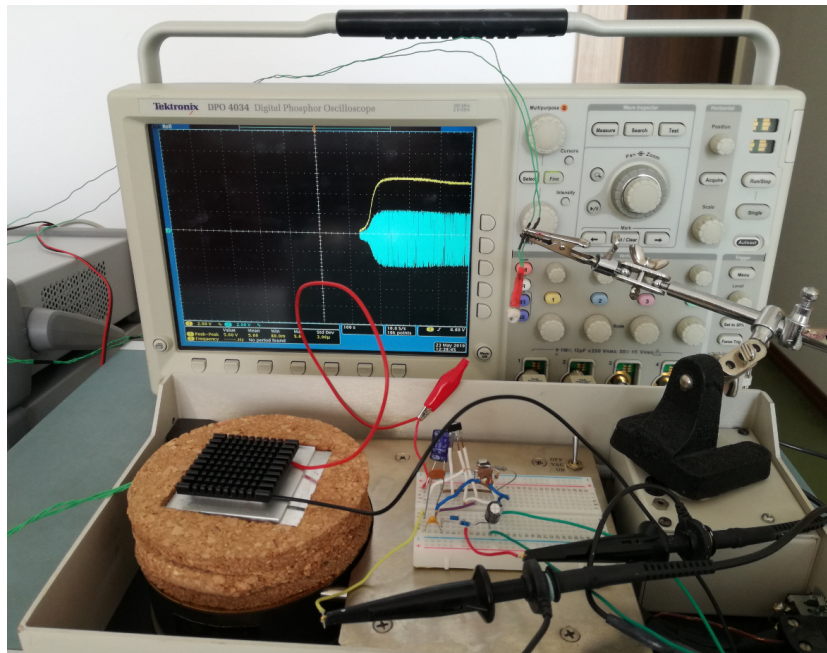
### 5.3 Експериментална поставка за верификацију модела

Експериментална поставка, као што је илустровано на слици 5.4, укључује закљон који ограничава посматрани домен, грејач за TEG, термоелектрични генератор са хладњаком и коло за подизање напона као склоп који се тестира, осцилоскоп Tektronix DPO4034, дигитални мултиметар и два PT100 температурна сензора. Један PT100 сензор мери температуру топле стране TEG-а  $T_{hot}$ , док други мери температуру околине  $T_{AMB}$ . Када се покрене експеримент, температура грејача се подеси на жељену вредност и одговарајуће вредности напона се континуално мере. Напони генерисани од стране TEG-а и осцилаторног кола, као и излазни напон кола за подизање напона се мере коришћењем дигиталног мултиметра Agilent 34410A и дигиталног осцилоскопа Tektronix DPO4034. Фотографија експерименталне поставке, без закљона, дата је на слици 5.5.

За напајање кола за подизање напона изабран је комерцијални термоелектрични модулу GM200-127-14-16 (TEG6). Изабрани термоелектрични модул има следеће карактеристике - димензије:  $(40 \times 40 \times 3,4)\text{mm}$ , број термоелектричних парова 127, унутрашња електрична отпорност на собној температури ( $25^\circ\text{C}$ ) је  $2,1\ \Omega$ . Да би ТЕМ исправно радио као генератор са његове хладне стране мора се одводити топлота коришћењем одговарајућег хладњака. Овде су разматрана два нископрофилна хладњака: алуминијумски и од металне (бакарне) пене. Термичка отпорност алуминијумског хладњака је  $9,38\ \text{K W}^{-1}$ , док је за хладњак од бакарне пене вредност термичке отпорности  $17,4\ \text{K W}^{-1}$ . Укупне димензије оба хладњака су исте  $(40 \times 40 \times 5)\text{mm}$ . Алуминијумски хладњак (HS2) има стубиће, док је хладњак од металне пене (HS15) у форми квадрa



Слика 5.4: Илустрација експерименталне поставке.



Слика 5.5: Фотографија експерименталне поставке без заклона.

(раван). Алуминијумски хладњак је изабран као најчешће коришћени тип хладњака. Нископрофилни хладњак од металне пене користи микропорозну бакарну пему чије међусобно повезане и отворене поре креирају велику површину за хлађење. Танки слој бакар оксида повећава емисивност бакарне пене. Овај хладњак је изабран као алтернатива за дисипацију топлоте у условима природне конвекције и унутар ограниченог простора.

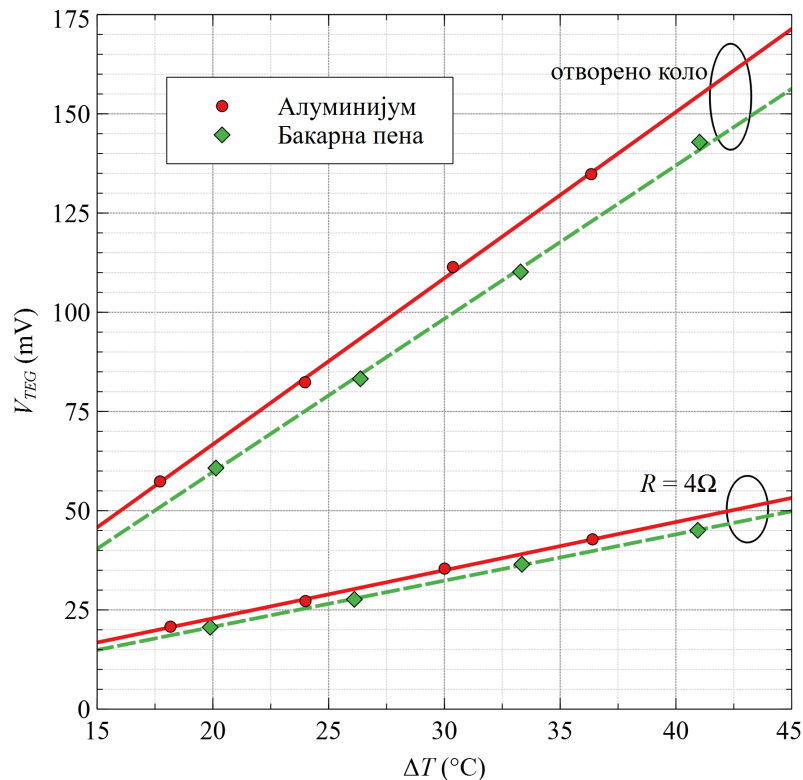
## 5.4 Резултати верификације модела

LCR метар Agilent 4284A је коришћен за одређивање неопходних података за аналитичку анализу осцилаторног кола. Измерене вредности индуктивности и отпорности приказане су у табели 5.1. На основу техничке документације транзистора BSP149 [127] вредност улазне капацитивности  $C_{gs}$  је 850 pF. Заменом вредности параметара у једначину 5.7, израчуната фреквенција осцилаторног кола је 129,9 kHz.

Табела 5.1: Измерене вредности параметара трансформатора на 1 kHz

| Параметар трансформатора             | Измерена вредност |
|--------------------------------------|-------------------|
| Индуктивност примара - $L_1$         | 0,2 $\mu\text{H}$ |
| Редна отпорност примара - $R_{S1}$   | 7 m $\Omega$      |
| Индуктивност секундара - $L_2$       | 2,1 mH            |
| Редна отпорност секундара - $R_{S2}$ | 5,2 $\Omega$      |

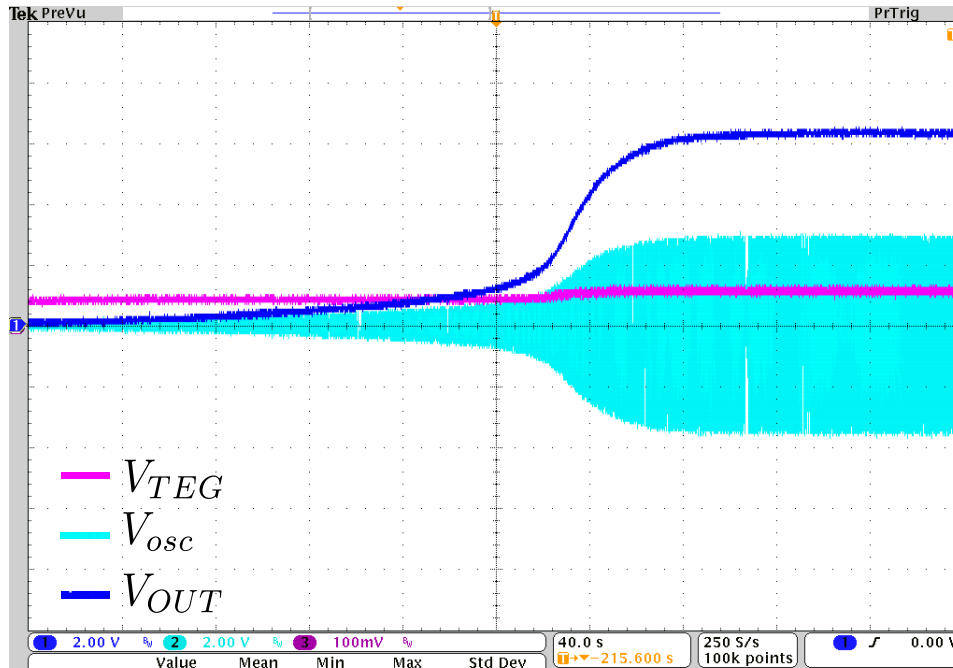
Пре експерименталних мерења карактеристика кола за подизање напона, урађена је карактеризација склопа TEG-хладњак са циљем одређивања вредности температурне разлике потребне за генерисање довољног улазног напона. Зависности напона отвореног кола TEG-а ( $V_{TEGoc}$ ) и напона на TEG-у када је оптерећен са отпорношћу од 4  $\Omega$  ( $V_{TEG}$ ) у функцији температурне разлике  $\Delta T = T_{hot} - T_{AMB}$  за два различита типа хладњака дате су на слици 5.6. У температурном опсегу од интереса, напон отвореног кола, као и напон TEG-а под оптерећењем линеарно расте са порастом температурне разлике. TEG са алуминијумским хладњаком генерише веће вредности напона него TEG са хладњаком од бакарне пене. Ово је очекивано с обзиром на вредности термичке отпорности ова два хладњака. TEG са оптерећењем обезбеђује знатно ниже вредности напона него TEG без оптерећења због пада напона на унутрашњој отпорности TEG-а и Пелтијевог ефекта [18]. Такође, разлика између напона за два хладњака је мање изражена.



Слика 5.6: Зависност напона отвореног кола TEG-а и напона оптерећеног TEG-а у функцији температурне разлике за алуминијумски и хладњак од бакарне пене.

Напон који је генерисао TEG са алуминијумским хладњаком, напон осцилаторног кола и напон на излазном кондензатору у функцији времена приказани су на слици

5.7. Приказани експериментални резултати добијени су када је температура на топлој страни TEG-а била  $T_{hot} = 56,8^{\circ}\text{C}$ , а температура околине  $T_{AMB} = 24,5^{\circ}\text{C}$ . У овом случају, за температурну разлику од  $\Delta T = 32,3^{\circ}\text{C}$ , TEG је генерисао напон од  $V_{TEG} = 59\text{ mV}$ . Одмах након успостављања напона, почињу осцилације и пораст изазног напона који после 230 s достиже 3,3 V. Анализа показује да после 300 s коло улази у стационарно стање и излазни кондензатор је напуњен на вредност напона од 6,2 V. Експериментално добијен излазни напон је у складу са напонам дефинисаним једначином 5.1, док је амплитуда напона осцилатора у позитивној полупериоди око 3 V.

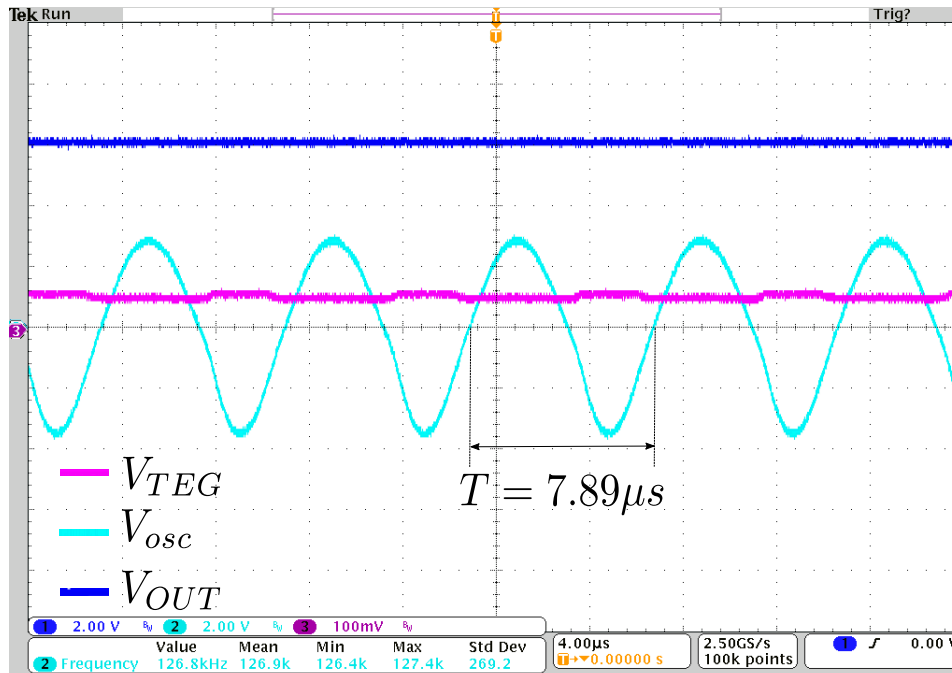


Слика 5.7: Напон генерисан TEG-ом са алуминијумским хладњаком, напон осцилаторног кола и напон на излазном кондензатору у функцији времена. x- оса: 40 s/div, y- оса: 2 V/div (за  $V_{osc}$  и  $V_{OUT}$ ); 100 mV/div (за  $V_{TEG}$ ).

Добијене вредности напона на TEG-у са хладњаком од металне пене су сличне онима приказаним на слици 5.7. Међутим, овај склоп захтева мало већу температурну разлику ( $\Delta T = 35,9^{\circ}\text{C}$ ) у односу на TEG са алуминијумским хладњаком да би постигао исти напон који побуђује осцилаторно коло. У овом случају неопходно је да температура на топлој страни TEG-а буде  $T_{hot} = 60,4^{\circ}\text{C}$  при истој температури околине. Може се закључити да се хладњаци од бакарне пене такође могу укључити у дизајн термичких energy harvesting система под одговарајућим условима. Иако су њихове перформансе одвођења топлоте нешто ниже у поређењу са алуминијумским хладњацима, њихове предности су компактна форма, нископрофилна равна геометрија и мала тежина.

На основу резултата са слике 5.6, добијена је вредност улазне отпорности кола за подизање напона  $R_{IN}$  док се пуни излазна капацитивност, и она износи 4  $\Omega$ . Анализом сигнала напона осцилаторног кола коришћењем осцилоскопа Tektronix DPO4034 (слика 5.8) одређена је фреквенција осцилација од 126,9 kHz. Може се закључити да се резултати добијени аналитичким моделом и експериментално одлично слажу.

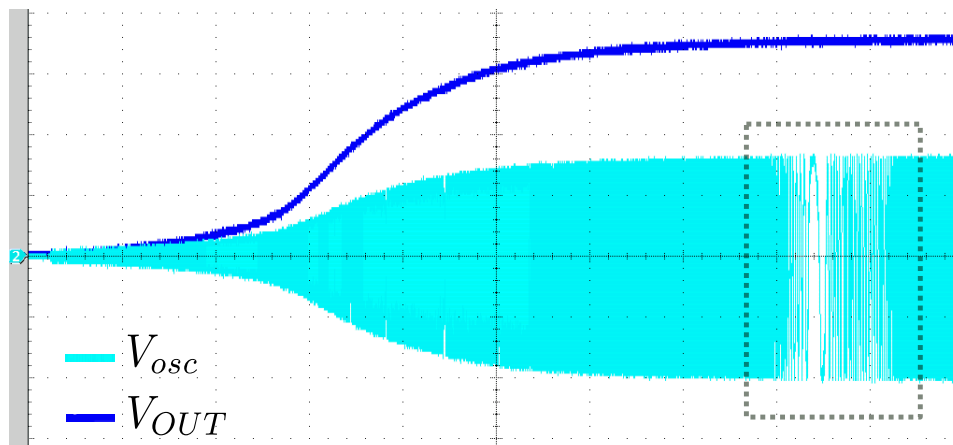
Када се разматра ефикасност конверзије снаге, представљено коло омогућава да



Слика 5.8: Увећани приказ - напон генерисан ТЕГ-ом са алуминијумским хладњаком, напон осцилаторног кола и напон на излазном кондензатору у функцији времена. x-оса:  $4 \mu s/div$ , y-оса:  $2 V/div$  (за  $V_{osc}$  и  $V_{OUT}$ );  $100 mV/div$  (за  $V_{TEG}$ ).

око 20% улазне електричне снаге добијене ТЕГ-ом буде пренето до излазног кондензатора. Треба напоменути да комерцијална интересана кола за подизање напона и управљање енергијом, као што је LTC3108 [74] имају ефикасност у опсегу од 5–40% зависно од вредности улазног напона, тако да је вредност добијена у овом случају задовољавајућа.

Током анализе кола, примећено је да се осцилације заустављају на одређено време, које је много дуже од периоде осцилација (слика 5.9). Овај феномен у литератури је познат као *squegging* [74] - пригушење осцилација. Он се јавља када се на кондензатору  $C_2$  накупи наелектрисање тако да долази до померања DC радне тачке и осцилације се заустављају. Када се кондензатор испразни, осцилације се настављају. Тешко је предвидети када ће се овај феномен појавити. Иако овај феномен није штетан, он смањује просечну излазну струју која се може добити. Овај ефекат пригушења осцилација се може превазићи додавањем отпорника у паралели са кондензатором  $C_2$ , преко кога ће се он празнити. Вредности отпорности треба да буду у опсегу од  $100 k\Omega$  до  $1 M\Omega$  да би се избегао ефекат пригушења, а да нема негативног утицаја на перформансе кола.



Слика 5.9: Илустрација ефекта пригушења осцилација.

# Глава 6

## Закључак

Основни циљ ове дисертације је карактеризација различитих комерцијалних ТЕМ-ова у улози ТЕГ-а унутар WSN чвора са алуминијумским штампаним плочама са аспекта ефикасности прикупљања енергије, времена хладног старта, димензија и компактности система, као и минималне и максималне температуре њихове примене. Да би се испунио овај циљ, креирани су ефикасни еквивалентни термо-електрични SPICE компатибилни модели WSN чвора за временски променљиви режим рада. Током истраживања је изабрана адекватна топологија еквивалентног електричног кола за моделирање и симулацију ТЕГ-ова као самосталних компонената и као делова сложених система и постављене су аналитичке релације које описују проток топлоте кроз ТЕГ и остале елементе чвора на основу аналогије између електричних и термичких величина. За симулације је коришћен програм LTspice.

На почетку истраживања направљен је упоредни преглед најбитнијих карактеристика различитих чворова бежичних сензорских мрежа са ТЕГ-ом као извором напајања. Закључено је да системи који су реализовани као компактни уређаји користе ТЕГ-ове мањих површина са мањим бројем термоелектричних парова, за разлику од система који су урађени на нивоу прототипа. Најзаступљеније коло за подизање напона и управљање електричном енергијом је LTC3108 компаније Analog Devices. Овом колу потребан је улазни напон од (20-50) mV да би стартовало и на излазу дало максимално 5 V. У зависности од примене чвора WSN-а и доступне температурне разлике, максималне добијене снаге су претежно реда неколико mW.

С обзиром да основни елемент сваког термоелектрично напајаног чвора WSN-а представља ТЕГ, пре креирања SPICE компатибилног модела, извршена је експериментална карактеризација одабраног комерцијалног ТЕМ-а у улози ТЕГ-а. Анализиран је утицај површине извора топлоте и димензија хладњака на временску зависност генерисаног напона отвореног кола ТЕГ-а за различите тренутно примењене температурне разлике. Експериментално је показано да је испитивани хладњак веће запремине ефикаснији, у односу на хладњак мање запремине. С друге стране, велика површина извора топлоте узрокује загревање околине и смањење температурне разлике током времена, а самим тим и напона ТЕГ-а. Закључено је да се приликом пројектовања система са ТЕГ-ом мора постићи компромис између жељене ефикасности у смислу излазне снаге и димензија ТЕГ-а и хладњака.

Први представљен модел чвора WSN-а је једнодимензионални у погледу простирања топлоте кроз њега. Вредности елемената еквивалентног кола чвора WSN-а од-



ређене су из техничке документације произвођача и/или из експерименталних података заснованих на температурном одзиву градивних елемената чвора. Модел је потврђен упоређивањем симулационих са експерименталним резултатима за самосталан TEG, TEG са хладњаком, као и за чвор WSN-а без и са одговарајућим електронским компонентама. Симулације чвора WSN-а, са неколико комерцијалних термоелектричних модула при различитим температурним разликама, обезбедиле су податке о генерисаном напону на потрошачу и снази у времену. SPICE модел је такође коришћен за анализу расподеле температуре унутар чвора WSN-а. Резултати карактеризације добијени симулацијом указују да избор одговарајућег TEG-а за чвор WSN-а зависи од постављених циљева пројектовања и доступних температурних разлика. TEG са већим бројем термоелектричних парова (127) омогућава краће време хладног старта и ниже минималне температурне разлике за исправан рад. Међутим, такви TEG-ови утичу на повећање укупних димензија чвора WSN-а и преко 20 %, у односу на TEG-ове са мањим бројем термоелектричних парова (31). TEG-ови са мањим бројем термоелектричних парова могу се имплементирати у чворовима у којима постоји потреба за минимизацијом димензија. Модел омогућава да се за одређени TEG одреди температурна разлика потребна за добијање жељеног времена хладног старта, извођењем низа симулација. Истраживање је показало да је важан параметар TEG-а дужина термоелемента. Када је TEG саставни део чвора, дужи термоелементи ће обезбедити веће температурне разлике на његовим крајевима, а тиме и веће вредности генерисаног напона. Такав TEG даје време хладног старта које је упоредиво са временом хладног старта за TEG са већим бројем термоелектричних парова ако се  $\Delta T$  повећа за 5 °C. Једно од запажања је и да је максимална температура која се сме применити на TEG са 71 термоелектричним паром ограничена дозвољеним улазним напонам кола за подизање напона које омогућава напајање чвора WSN-а. Максимална температура извора топлоте не сме бити већа од 80 °C изнад температуре околине, иако је максимална дозвољена радна температура TEG-а много већа. Генерално, презентовани SPICE модел може се користити у пројектовању и процесу оптимизације термоелектричних energy harvesting чворова WSN-а да би се изабрао најпогоднији TEG са различитих аспеката, као што су ефикасност конверзије енергије, време хладног старта, димензије и компактност чвора, максимална температура примене.

Други представљен је просторни SPICE компатибилни модел чвора WSN-а, чија је намена да превазиђе некомпатибилност мултифизичких CAD симулационих алата са симулаторима електричних кола. Модел омогућава симулацију неелектричних и електричних делова чвора WSN-а истовремено. Вредности параметара модела су одређене из техничке документације елемената чвора и техничких спецификација материјала од којих су направљени. Модел је потврђен поређењем експерименталних и резултата симулације. Искоришћен је за карактеризацију чвора WSN-а са различитим TEG-овима и хладњацима да би се дефинисала најпогоднија комбинација TEG-хладњак у погледу ефикасности конверзије енергије. Сваки разматрани TEG у комбинацији са хладњаком од керамике алумине даје 30 % већу ефикасност конверзије него са разматраним алуминијумским хладњаком и око 50 % већу ефикасност у поређењу са хладњацима од микропорозне керамике. Као што је већ истакнуто, критеријум минијатуризације у пројектовању чворова WSN-а доводи до потребе за TEG-овима мањих димензија. Овакав TEG, због мањег броја термоелектричних парова, треба око 25 % веће температурне разлике да би достигао исту ефикасност конверзије као већи TEG-ови. Модел, такође, омогућава симулацију различитих чворова WSN-а у стационарном режиму и временском домену, са циљем одређивања времена хладног

старта и максималне температуре примене.

Као важан циљ истраживања се издваја и постављање критеријума за одабир геометрије и материјала хладњака оптималних за примену са различитим TEG-овима као деловима WSN чвора у смислу ефикасности конверзије топлотне у електричну енергију. У овом истраживању је акценат стављен на примене чвора WSN-а са TEG-ом и хладњаком под најнеповољнијим условима рада тј. у условима природне конвекције (природном хлађењу). Током истраживања је развијена аутоматизована експериментална процедура за мерење напона предатог потрошачу од стране склопа TEG-хладњак при различитим температурним побудама. Дефинисана је експериментална дизајн матрица склопова и развијена симулациона поставка за њихово моделирање коришћењем нумеричке термо-електричне анализе у спрегнутим доменима и анализе динамике флуида. Анализом добијених резултата уочава се да керамички хладњаци, било чврсти или микропорозни, показују најбоље перформансе за дата геометријска ограничења. Наиме, иако екструдирани алуминијумски хладњаци доприносе већим генерисаним напонима, због габарита и сложене геометрије, у оваквим системима могу се адекватно заменити керамичким хладњацима. Стубићи побољшавају ефикасност код хлађења уз постојање струјања околног флуида. Посвећена је пажња и раду склопова под оптерећењем који одговарају реалном функционисању чвора WSN-а. Тада долази до изражаја Пелтијев ефекат који смањује вредност ефективно генерисаног напона чак до 36%. Симулације су показале и да ефекат зрачења увећава вредност генерисаног напона до 30%.

Додатно, један од циљева дисертације је пројектовање, тестирање и оптимизација кола за подизање напонског нивоа погодног за примену у самонапајајућим системима. Током истраживања развијен је аналитички модел за мале сигнале за одређивање фреквенције осциловања осцилатора у колу за подизање напонског нивоа, заснованог на Мајснеровом осцилатору. Аналитички одређена фреквенција Мајснеровог осцилатора, на основу изведеног модела за мале сигнале, се слаже са експериментално добијеним резултатима. Анализом напонских сигнала у карактеристичним тачкама кола, добијено је да при температурној разлици од око 30 °C, TEG са хладњаком генерише напон довољан за почетак осциловања осцилаторног кола (око 60 mV). После око 4 min, излазни напон при константној температурној разлици ће бити подигнут до 3,3 V. Максимални добијени једносмерни напон је око 6 V. Ово коло може бити коришћено за подизање ниских улазних напона из различитих energy harvesting извора.

Имајући у виду постављене циљеве на почетку спроведеног истраживања, као и резултате до којих се дошло, може се рећи да ова дисертација има више научних доприноса:

- Развијени SPICE компатибилни модели WSN чвора, једнодимензионални и просторни, за временски променљиви и стационарни режим рада који омогућавају истраживање функционалних карактеристика када су различити комерцијални термоелектрични модули коришћени као извори напајања;
- Извршена карактеризација комерцијалних термоелектричних модула искоришћених за напајање WSN чвора са алуминијумским штампаним плочама са аспекта ефикасности прикупљања енергије, времена хладног старта, димензија и компактности система, као и минималне и максималне температуре примене;

- Постављен критеријум за избор оптималне геометрије и материјала хладњака компатибилних са TEG-овима намењеним напајању чвора WSN-а у условима природне конвекције на основу експеримената и симулације;
- Дефинисан модел за мале сигнале за одређивање фреквенције осциловања осцилатора у колу за подизање напонског нивоа.

Даљи планови везани за истраживање у овој области се односе на испитивање перформанси чвора WSN-а при употреби вишестепених и TEG-ова са новим материјалима, као што су термоелектрични генератори на бази силицијума и фулерена. Изазов је формирање SPICE модела ових TEG-ова. Такође, будуће истраживање подразумева дубљу анализу кола за подизање напона засновано на Мајснеровом осцилатору, али и других топологија ове врсте електронских кола.

# Литература

- [1] M. T. Penella-López and M. Gasulla-Forner, *Powering Autonomous Sensors*. Springer Netherlands, 2011.
- [2] *Energy Autonomous Micro and Nano Systems*. John Wiley Sons, 2012. [Online]. Available: [https://www.ebook.de/de/product/21168117/energy\\_autonomous\\_micro\\_and\\_nano\\_systems.html](https://www.ebook.de/de/product/21168117/energy_autonomous_micro_and_nano_systems.html)
- [3] N. A. Bhatti, M. H. Alizai, A. A. Syed, and L. Mottola, “Energy harvesting and wireless transfer in sensor network applications,” *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 12, no. 3, pp. 1–40, 2016.
- [4] Q. Wan, Y.-K. Teh, Y. Gao, and P. K. T. Mok, “Analysis and design of a thermoelectric energy harvesting system with reconfigurable array of thermoelectric generators for IoT applications,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 64, no. 9, pp. 2346–2358, 2017.
- [5] K. S. Adu-Manu, N. Adam, C. Tapparello, H. Ayatollahi, and W. Heinzelman, “Energy-harvesting wireless sensor networks (EH-WSNs),” *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 14, no. 2, pp. 1–50, 2018.
- [6] Lj. Vračar, A. Prijić, D. Nešić, S. Dević, and Z. Prijić, “Photovoltaic energy harvesting wireless sensor node for telemetry applications optimized for low illumination levels,” *Electronics*, vol. 5, no. 4, p. 26, 2016.
- [7] C. Drezet, N. Kacem, and N. Bouhaddi, “Design of a nonlinear energy harvester based on high static low dynamic stiffness for low frequency random vibrations,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 283, pp. 54–64, 2018.
- [8] C.-F. Hung, P.-C. Yeh, and T.-K. Chung, “A miniature magnetic-force-based three-axis AC magnetic sensor with piezoelectric/vibrational energy-harvesting functions,” *Sensors*, vol. 17, no. 2, p. 308, 2017.
- [9] Y. Luo, L. Pu, G. Wang, and Y. Zhao, “RF energy harvesting wireless communications: RF environment, device hardware and practical issues,” *Sensors*, vol. 19, no. 13, p. 3010, 2019.
- [10] Z. Zergoune, N. Kacem, and N. Bouhaddi, “On the energy localization in weakly coupled oscillators for electromagnetic vibration energy harvesting,” *Smart Materials and Structures*, vol. 28, no. 7, p. 07LT02, 2019.
- [11] H. Wang, W. Li, D. Xu, and J. Kan, “A hybrid microenergy storage system for power supply of forest wireless sensor nodes,” *Electronics*, vol. 8, no. 12, p. 1409, 2019.

- [12] P. Dziurdzia, “Modeling and simulation of thermoelectric energy harvesting processes,” in *Sustainable Energy Harvesting Technologies - Past, Present and Future*. InTech, 2011.
- [13] S. Skipidarov and M. Nikitin, *Thermoelectrics for Power Generation*. Rijeka: IntechOpen, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5772/62753>
- [14] D. Enescu, “Thermoelectric energy harvesting: Basic principles and applications,” in *Green Energy Advances*. IntechOpen, 2019.
- [15] R. I. Pereira, M. M. Camboim, A. W. Villarim, C. P. Souza, S. C. Jucá, and P. C. Carvalho, “On harvesting residual thermal energy from photovoltaic module back surface,” *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 111, p. 152878, 2019.
- [16] S. Chalasani and J. M. Conrad, “A survey of energy harvesting sources for embedded systems,” in *IEEE SoutheastCon*, 2008, pp. 442–447.
- [17] C. Knight, J. Davidson, and S. Behrens, “Energy options for wireless sensor nodes,” *Sensors*, vol. 8, no. 12, pp. 8037–8066, 2008.
- [18] S. Dalola, M. Ferrari, V. Ferrari, M. Guizzetti, D. Marioli, and A. Taroni, “Characterization of thermoelectric modules for powering autonomous sensors,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, no. 1, pp. 99–107, 2009.
- [19] O. Höglblom and R. Andersson, “Analysis of thermoelectric generator performance by use of simulations and experiments,” *Journal of Electronic Materials*, vol. 43, no. 6, pp. 2247–2254, 2014.
- [20] D. Milić, A. Prijić, Lj. Vračar, and Z. Prijić, “Characterization of commercial thermoelectric modules for application in energy harvesting wireless sensor nodes,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 121, pp. 74–82, 2017.
- [21] M. O. Cernaianu and A. Gontean, “High-accuracy thermoelectrical module model for energy-harvesting systems,” *IET Circuits, Devices & Systems*, vol. 7, no. 3, pp. 114–123, 2013.
- [22] M. Pedram and S. Nazarian, “Thermal modeling, analysis, and management in VLSI circuits: Principles and methods,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 94, no. 8, pp. 1487–1501, 2006.
- [23] E. Kanimba and Z. Tian, “Modeling of a thermoelectric generator device,” in *Thermoelectrics for Power Generation - A Look at Trends in the Technology*. InTech, 2016.
- [24] S. Lineykin and S. Ben-Yaakov, “Analysis of thermoelectric coolers by a SPICE-compatible equivalent-circuit model,” *IEEE Power Electronics Letters*, vol. 3, no. 2, pp. 63–66, 2005.
- [25] D. Mitrani, J. Salazar, A. Turó, M. J. García, and J. A. Chávez, “One-dimensional modeling of TE devices considering temperature-dependent parameters using SPICE,” *Microelectronics Journal*, vol. 40, no. 9, pp. 1398–1405, 2009.

- [26] A. Prijić, M. Marjanović, Lj. Vračar, D. Danković, D. Milić, and Z. Prijić, “A steady-state SPICE modeling of the thermoelectric wireless sensor network node,” in *4th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering, IEE-TRAN*, 2017, pp. MOI2.3.1–6.
- [27] M. Baldry, V. Timchenko, and C. Menictas, “Optimal design of a natural convection heat sink for small thermoelectric cooling modules,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 160, p. 114062, 2019.
- [28] Wakefield-vette, “Heatsink design facts and guidelines for thermal analysis, technical brief.” [Online]. Available: <https://www.digikey.com/en/pdf/w/wakefield-thermal-solutions/heat-sink-design-for-thermal-analysis>
- [29] T. ur Rehman, H. M. Ali, A. Saieed, W. Pao, and M. Ali, “Copper foam/PCMs based heat sinks: An experimental study for electronic cooling systems,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 127, pp. 381–393, 2018.
- [30] P. Woias, M. Islam, S. Heller, and R. Roth, “A low-voltage boost converter using a forward converter with integrated Meissner oscillator,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 476, p. 012081, 2013.
- [31] E. Macrelli, A. Romani, R. P. Paganelli, A. Camarda, and M. Tartagni, “Design of low-voltage integrated step-up oscillators with microtransformers for energy harvesting applications,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 62, no. 7, pp. 1747–1756, 2015.
- [32] S. Kasap, *Principles of Electronic Materials and Devices*. Paperbackshop UK Import, 2017.
- [33] G. J. Snyder, “Thermoelectric energy harvesting,” in *Energy Harvesting Technologies*. Springer US, pp. 325–336.
- [34] “Tržište termoelektričnih modula.” [Online]. Available: <https://www.kbvresearch.com/thermoelectric-modulesmarket/>
- [35] V. Karthikeyan, J. U. Surjadi, J. C. Wong, V. Kannan, K.-H. Lam, X. Chen, Y. Lu, and V. A. Roy, “Wearable and flexible thin film thermoelectric module for multi-scale energy harvesting,” *Journal of Power Sources*, vol. 455, p. 227983, 2020.
- [36] J. M. Lopera, H. del Arco Rodriguez, J. M. P. Pereira, A. R. de Castro, and J. L. R. Vigil, “Practical issues in the design of wireless sensors supplied by energy harvesting thermoelectric generators,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 1, pp. 996–1005, 2019.
- [37] W. Wang, V. Cionca, N. Wang, M. Hayes, B. O'Flynn, and C. O'Mathuna, “Thermoelectric energy harvesting for building energy management wireless sensor networks,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 9, no. 6, p. 232438, 2013.
- [38] M. Guan, K. Wang, D. Xu, and W.-H. Liao, “Design and experimental investigation of a low-voltage thermoelectric energy harvesting system for wireless sensor nodes,” *Energy Conversion and Management*, vol. 138, pp. 30–37, 2017.

- [39] D. Charris, D. Gomez, and M. Pardo, “A portable thermoelectric energy harvesting unit to power up outdoor sensors and devices,” in *IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*. IEEE, 2019.
- [40] L. Hou, S. Tan, Z. Zhang, and N. W. Bergmann, “Thermal energy harvesting WSNs node for temperature monitoring in IIoT,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 35 243–35 249, 2018.
- [41] M. Magno, L. Sigrist, A. Gomez, L. Cavigelli, A. Libri, E. Popovici, and L. Benini, “SmarTEG: An autonomous wireless sensor node for high accuracy accelerometer-based monitoring,” *Sensors*, vol. 19, no. 12, p. 2747, 2019.
- [42] L. Sigrist, N. Stricker, D. Bernath, J. Beutel, and L. Thiele, “Thermoelectric energy harvesting from gradients in the earth surface,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 11, pp. 9460–9470, 2020.
- [43] C. Xia, D. Zhang, W. Pedrycz, K. Fan, and Y. Guo, “Human body heat based thermoelectric harvester with ultra-low input power management system for wireless sensors powering,” *Energies*, vol. 12, no. 20, p. 3942, 2019.
- [44] J.-P. Im, J. Kim, J. Lee, J. Woo, S. Im, Y. Kim, Y.-S. Eom, W. Choi, J. Kim, and S. Moon, “Self-powered autonomous wireless sensor node by using silicon-based 3d thermoelectric energy generator for environmental monitoring application,” *Energies*, vol. 13, no. 3, p. 674, 2020.
- [45] G. Verma and V. Sharma, “A novel thermoelectric energy harvester for wireless sensor network application,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 5, pp. 3530–3538, 2019.
- [46] A. Prijić, Lj. Vračar, D. Vučković, D. Milić, and Z. Prijić, “Thermal energy harvesting wireless sensor node in aluminum core PCB technology,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 337–345, 2015.
- [47] Z. Prijić, A. Prijić, and Lj. Vračar, “Design techniques for wireless sensor network nodes powered by ambient energy harvesting,” in *IEEE 31st International Conference on Microelectronics (MIEL)*. IEEE, 2019.
- [48] R. A. F. Hugh D. Young, *University Physics with Modern Physics*. Pearson, 2015.
- [49] K. H. Mahmud, S. A. Yudistirani, and A. I. Ramadhan, “Analysis of power characteristics of model thermoelectric generator (TEG) small modular,” *International Journal of Scientific & Technology Research*, vol. 6, pp. 161–167, 2017.
- [50] M. Lossec, B. Multon, and H. B. Ahmed, “Sizing optimization of a thermoelectric generator set with heatsink for harvesting human body heat,” *Energy Conversion and Management*, vol. 68, pp. 260–265, 2013.
- [51] “ET-031-10-20, datasheet.” [Online]. Available: <https://www.europanthermodynamics.com/products/datasheets/0-ET-031-10-20.pdf>
- [52] M. Ferrari, V. Ferrari, M. Guizzetti, D. Marioli, and A. Taroni, “Characterization of thermoelectric modules for powering autonomous sensors,” in *IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference IMTC*. IEEE, 2007.

- [53] M. Chen, L. Rosendahl, I. Bach, T. Condra, and J. K. Pedersen, “Transient behavior study of thermoelectric generators through an electro-thermal model using SPICE,” in *25th International Conference on Thermoelectrics*. IEEE, 2006.
- [54] Y. Moumouni and R. J. Baker, “Improved SPICE modeling and analysis of a thermoelectric module,” in *IEEE 58th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*. IEEE, 2015.
- [55] D. T. Crane, “An introduction to system-level, steady-state and transient modeling and optimization of high-power-density thermoelectric generator devices made of segmented thermoelectric elements,” *Journal of Electronic Materials*, vol. 40, no. 5, pp. 561–569, 2010.
- [56] N. Q. Nguyen and K. V. Pochiraju, “Behavior of thermoelectric generators exposed to transient heat sources,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 51, no. 1-2, pp. 1–9, 2013.
- [57] M. O. Cernaianu and A. Gontean, “Parasitic elements modelling in thermoelectric modules,” *IET Circuits, Devices & Systems*, vol. 7, no. 4, pp. 177–184, 2013.
- [58] M. J. Dousti, A. Petraglia, and M. Pedram, “Accurate electrothermal modeling of thermoelectric generators,” in *Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*. IEEE Conference Publications, 2015.
- [59] S. Lineykin and S. Ben-Yaakov, “Modeling and analysis of thermoelectric modules,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, no. 2, pp. 505–512, 2007.
- [60] V. I. Kubov, Y. Y. Dymyrov, and R. M. Kubova, “LTspice-model of thermoelectric Peltier-Seebeck element,” in *IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. IEEE, 2016.
- [61] Y. Moumouni and R. J. Baker, “Concise thermal to electrical parameters extraction of thermoelectric generator for SPICE modeling,” in *IEEE 58th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*. IEEE, 2015.
- [62] D. Mitrani, J. Tome, J. Salazar, A. Turo, M. Garcia, and J. Chavez, “Methodology for extracting thermoelectric module parameters,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 54, no. 4, pp. 1548–1552, 2005.
- [63] M. Maaspuro, “Experimenting and simulating thermoelectric cooling of an LED module,” *International Journal of Online and Biomedical Engineering*, vol. 11, no. 4, p. 47, 2015.
- [64] P. Dziurdzia, I. Brzozowski, P. Bratek, W. Gelmuda, and A. Kos, “Estimation and harvesting of human heat power for wearable electronic devices,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 104, p. 012005, 2016.
- [65] C. Beisteiner and B. G. Zagar, “C8.1 - thermo-electric energy harvester for low-power sanitary applications,” in *Sensor*. AMA Service GmbH, Von-Münchhausen-Str. 49, 31515 Wunstorf, Germany, 2013.



- [66] M. Chen, L. Rosendahl, T. Condra, and J. Pedersen, "Numerical modeling of thermoelectric generators with varying material properties in a circuit simulator," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, no. 1, pp. 112–124, 2009.
- [67] S. Siouane, S. Jovanović, and P. Poure, "Equivalent electrical circuits of thermoelectric generators under different operating conditions," *Energies*, vol. 10, no. 3, p. 386, 2017.
- [68] J. Chavez, J. Ortega, J. Salazar, A. Turo, and M. Garcia, "SPICE model of thermoelectric elements including thermal effects," in *17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. IEEE.
- [69] R. Menozzi, P. Cova, N. Delmonte, F. Giuliani, and G. Sozzi, "Thermal and electro-thermal modeling of components and systems: A review of the research at the university of Parma," *Facta universitatis - series: Electronics and Energetics*, vol. 28, no. 3, pp. 325–344, 2015.
- [70] Z. Yang, S. Lan, R. Stobart, E. Winward, R. Chen, and I. Harber, "A comparison of four modelling techniques for thermoelectric generator," in *SAE Technical Paper Series*. SAE International, 2017.
- [71] A. Abdelkefi, A. Alothman, and M. R. Hajj, "Performance analysis and validation of thermoelectric energy harvesters," *Smart Materials and Structures*, vol. 22, no. 9, p. 095014, 2013.
- [72] "NXP semiconductors, Using RC thermal models, Application note AN11261, Rev. 2," 2014.
- [73] M. Zhang, Y. Tian, H. Xie, Z. Wu, and Y. Wang, "Influence of Thomson effect on the thermoelectric generator," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 137, pp. 1183–1190, 2019.
- [74] "Linear technology corporation, LTC3108 ultralow voltage step-up converter and power manager, data sheet," 2010.
- [75] "Circuit design tools calculators–LTspice." [Online]. Available: <http://www.linear.com/solutions/ltspace>
- [76] A. Bhattacharyya, "Heat transfer analogies," Aktiebolaget atomenergi, Tech. Rep., 1965.
- [77] P. Salome, C. Leroux, P. Crevel, and J. Chante, "Investigations on the thermal behavior of interconnects under ESD transients using a simplified thermal RC network," in *Electrical Overstress/ Electrostatic Discharge Symposium Proceedings*. ESD Assoc, 1998.
- [78] C. Bekhaled, S. Hlioui, L. Vido, M. Gabsi, M. Lecrivain, and Y. Amara, "3D magnetic equivalent circuit model for homopolar hybrid excitation synchronous machines," in *International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics*. IEEE, 2007.

- [79] T.-Y. Wang and C. C.-P. Chen, “SPICE-compatible thermal simulation with lumped circuit modeling for thermal reliability analysis based on modeling order reduction,” in *SCS 2003. International Symposium on Signals, Circuits and Systems*. IEEE Comput. Soc.
- [80] K. Carstens, M. Reuter, J. Cichoszewski, P. Gedeon, and J. Werner, “Influence of thickness deviation on crystalline silicon solar cell performance,” *Energy Procedia*, vol. 8, pp. 461–466, 2011.
- [81] M. Pedram and S. Nazarian, “Thermal modeling, analysis, and management in VLSI circuits: Principles and methods,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 94, no. 8, pp. 1487–1501, 2006.
- [82] A. Sridhar, A. Vincenzi, D. Atienza, and T. Brunschwiler, “3d-ICE: A compact thermal model for early-stage design of liquid-cooled ICs,” *IEEE Transactions on Computers*, vol. 63, no. 10, pp. 2576–2589, 2014.
- [83] G. Floros, K. Daloukas, N. Evmorfopoulos, and G. Stamoulis, “A preconditioned iterative approach for efficient full chip thermal analysis on massively parallel platforms,” *Technologies*, vol. 7, no. 1, p. 1, 2018.
- [84] F. Felgner, L. Exel, M. Nesarajah, and G. Frey, “Component-oriented modeling of thermoelectric devices for energy system design,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 3, pp. 1301–1310, 2014.
- [85] S. Lineykin, M. Sitbon, and A. Kuperman, “Spatial equivalent circuit model for simulation of on-chip thermoelectric harvesters,” *Micromachines*, vol. 11, no. 6, p. 574, 2020.
- [86] J. Araque-Mora and L. Angel, “Distributed equivalent circuit for modeling heat transfer process in a thermoelectric system,” in *IEEE 5th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, 2021, pp. 326–331.
- [87] Thermoel toolkit, Seebeck coefficient predictive component. [Online]. Available: <http://info.eecs.northwestern.edu/SeebeckCoefficientPredictor>
- [88] PubChem. National Center for Biotechnology Information, U.S. National Library of Medicine. [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>
- [89] P. N. M. Marz, “Thermal modeling of power-electronicsystems,” Application Note, 2020. [Online]. Available: [https://www.iisb.fraunhofer.de/content/dam/iisb2014/en/Documents/Research-Areas/Energy\\_Electronics/publications\\_patents\\_downloads/Publications/Therm\\_Modelling\\_2000\\_IISB.pdf](https://www.iisb.fraunhofer.de/content/dam/iisb2014/en/Documents/Research-Areas/Energy_Electronics/publications_patents_downloads/Publications/Therm_Modelling_2000_IISB.pdf)
- [90] D. Eddleman, “LTspice: SOAtherm support for pcb and heatsink thermal models.”
- [91] “Ansys 2020 R2 software.” [Online]. Available: <https://www.ansys.com/resource-center/brochure/ansysrelease-capabilities>
- [92] “Ceramic heat spreader pin fin series, datasheet.” [Online]. Available: <https://www.farnell.com/datasheets/2012338.pdf>

- [93] “Ceramic heat sinks for cooling of leds and semiconductors drivers, article.” [Online]. Available: <http://endrich.hu/>
- [94] “AMEC thermasol, ceramic heatsink introduction, slides.” [Online]. Available: <https://amecthermasol.co.uk/>
- [95] “European Thermodynamics Ltd.” [Online]. Available: <https://www.europanthermodynamics.com/>
- [96] “AMEC Thermasol.” [Online]. Available: <https://amecthermasol.co.uk/datasheets/MPCCeramicSeries.pdf>
- [97] “Versarien Technologies Ltd.” [Online]. Available: <http://www.versarien-technologies.co.uk/>
- [98] M. Iyengar and A. Bar-Cohen, “Least-material optimization of vertical pin-fin, plate-fin, and triangular-fin heat sinks in natural convective heat transfer,” in *Sixth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*. IEEE, 1998.
- [99] E. Walsh and R. Grimes, “Low profile fan and heat sink thermal management solution for portable applications,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 46, no. 11, pp. 1182–1190, 2007.
- [100] S. Sevik, “A comparative experimental study on the heat dissipation performance of rectangular and wavy-fin ceramic heat sinks,” in *3rd International November 24 Head Teacher Education and Innovative Sciences Symposium*, 2021.
- [101] L. Jin and K. C. Leong, “Heat transfer performance of metal foam heat sinks subjected to oscillating flow,” *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol. 29, no. 4, pp. 856–863, 2006.
- [102] S. Feng, F. Li, F. Zhang, and T. J. Lu, “Natural convection in metal foam heat sinks with open slots,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 91, pp. 354–362, 2018.
- [103] M. Paknezhad, A. Rashidi, T. Yousefi, and Z. Saghir, “Effect of aluminum-foam heat sink on inclined hot surface temperature in the case of free convection heat transfer,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 10, pp. 199–206, 2017.
- [104] Z.-Q. Zhu, Y.-K. Huang, N. Hu, Y. Zeng, and L.-W. Fan, “Transient performance of a PCM-based heat sink with a partially filled metal foam: Effects of the filling height ratio,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 128, pp. 966–972, 2018.
- [105] J. Culham, M. Yovanovich, and S. Lee, “Thermal modeling of isothermal cuboids and rectangular heat sinks cooled by natural convection,” *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A*, vol. 18, no. 3, pp. 559–566, 1995.
- [106] K. Lampio and R. Karvinen, “A new method to optimize natural convection heat sinks,” *Heat and Mass Transfer*, vol. 54, no. 8, pp. 2571–2580, 2017.

- [107] A. Castelan, B. Cougo, S. Dutour, and T. Meynard, “3D analytical modelling of plate fin heat sink on forced convection,” *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 158, pp. 296–307, 2019.
- [108] H. Ye and G. Zhang, “A review of passive thermal management of LED module,” *Journal of Semiconductors*, vol. 32, no. 1, p. 014008, 2011.
- [109] Y. Shi, Y. Wang, D. Mei, and Z. Chen, “Wearable thermoelectric generator with copper foam as the heat sink for body heat harvesting,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 43 602–43 611, 2018.
- [110] “FLIR Systems Inc., FLIR iX User’s Manual, Publ. no t559580 (2011).”
- [111] “FreeCAD 3D parametric modeler.” [Online]. Available: <https://www.freecadweb.org/>
- [112] Z. G. Wang, S. H. Lee, C. K. Kim, C. M. Park, K. Nahm, and S. A. Nikitov, “Effective medium theory of the one-dimensional resonance phononic crystal,” *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 20, no. 5, p. 055209, 2008.
- [113] R. Bjørk, D. Christensen, D. Eriksen, and N. Pryds, “Analysis of the internal heat losses in a thermoelectric generator,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 85, pp. 12–20, 2014.
- [114] S. Feng, M. Shi, H. Yan, S. Sun, F. Li, and T. J. Lu, “Natural convection in a cross-fin heat sink,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 132, pp. 30–37, 2018.
- [115] D. J. Thewsey and Y. Y. Zhao, “Thermal conductivity of porous copper manufactured by the lost carbonate sintering process,” *Physica Status Solidi (A)*, vol. 205, no. 5, pp. 1126–1131, 2008.
- [116] M. Liao, Z. He, C. Jiang, X. Fan, Y. Li, and F. Qi, “A three-dimensional model for thermoelectric generator and the influence of peltier effect on the performance and heat transfer,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 133, pp. 493–500, 2018.
- [117] J. K. Hart and K. Martinez, “Environmental sensor networks: A revolution in the earth system science?” *Earth-Science Reviews*, vol. 78, no. 3, pp. 177–191, 2006.
- [118] P. Chen, K. Ishida, K. Ikeuchi, X. Zhang, K. Honda, Y. Okuma, Y. Ryu, M. Takamiya, and T. Sakurai, “Startup techniques for 95 mV step-up converter by capacitor pass-on scheme and VTH-tuned oscillator with fixed charge programming,” *IEEE Journal of Solid State Circuits*, pp. 1252–1260, 2012.
- [119] P. Garcha, D. El-Damak, N. Desai, J. Troncoso, E. Mazotti, J. Mullenix, S. Tang, D. Trombley, D. Buss, J. Lang, and A. Chandrakasan, “A 25 mV-startup cold start system with on-chip magnetics for thermal energy harvesting,” in *43rd IEEE European Solid State Circuits Conference*. IEEE, 2017.
- [120] N. V. Desai, Y. Ramadass, and A. P. Chandrakasan, “A bipolar  $\pm 40$  mV self-starting boost converter with transformer reuse for thermoelectric energy harvesting,” in *International symposium on Low power electronics and design*. ACM, 2014.

- [121] P. Woias, "5.6 - thermoelectric energy harvesting from small and variable temperature gradients," in *Tagungsband*. AMA Service GmbH, Von-Münchhausen-Str. 49, 31515 Wunstorf, Germany, 2015.
- [122] A. Shrivastava, N. E. Roberts, O. U. Khan, D. D. Wentzloff, and B. H. Calhoun, "A 10 mV-input boost converter with inductor peak current control and zero detection for thermoelectric and solar energy harvesting with 220 mV cold-start and -14.5dBm, 915 MHz RF kick-start," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 50, no. 8, pp. 1820–1832, 2015.
- [123] M. Arifujjaman, M. Iqbal, J. Quaioco, and M. Khan, "Modeling and control of a small wind turbine," in *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. IEEE, 2005.
- [124] S.-E. Adami, V. Marian, N. Degrenne, C. Vollaire, B. Allard, and F. Costa, "Self-powered ultra-low power DC-DC converter for RF energy harvesting," in *IEEE Faible Tension Faible Consommation*. IEEE, 2012.
- [125] J. Damaschke, "Design of a low-input-voltage converter for thermoelectric generator," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 5, pp. 1203–1207, 1997.
- [126] K. C. S. Adel S. Sedra, *Microelectronic Circuits*, 5th ed. Oxford University Press, 2004.
- [127] Infineon, "BSP149 small-signal-transistor, data sheet," 2012. [Online]. Available: <http://www.linear.com>
- [128] M. E. Schultz, *Grob's basic electronics*. McGraw-Hill, 2011.
- [129] "Termoelektrični samonapajajući uređaj baziran na tehnologiji metalnih štampanih ploča, Patent br. 55393, Republika Srbija, Zavod za intelektualnu svojinu, Rešenje 990 br. 2017/2798-P-2014/064 od 16.03.2017. godine. Nosilac patenta: Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu. Pronalazači: Lj. Vračar, Z. Prijić, A. Prijić, Registrovan patent na nacionalnom nivou." [Online]. Available: <http://pub.zis.gov.rs/rs-pubserver/pdf-document?PN=RS55393%20RS%2055393&iDocId=93144&iepatch=.pdf>
- [130] Ljubomir Vračar, "Projektovanje i realizacija taktilnih i samonapajajućih mikrosistema," doktorska disertacija, Elektronski fakultet Niš, 2014.
- [131] Dejan Milić, "Karakterizacija termoelektričnih modula primenjenih za napajanje čvorova bežičnih senzorskih mreža," doktorska disertacija, Elektronski fakultet Niš, 2018.

## Биографија аутора

Милош Марјановић је рођен 22.11.1989. године у Књажевцу. Основну школу „Димитрије Тодоровић Каплар“ Књажевац и Књажевачку гимназију завршио је са одличним успехом. Носилац је Вукове дипломе из гимназије. Електронски факултет у Нишу уписао је школске 2008/09. године и дипломирао 10.07.2013. године на студијском програму Микроелектроника и микросистеми, са просечном оценом током студија 10.00 (десет) и оценом 10 (десет) на дипломском испиту и тиме стекао звање дипломираног инжењера електротехнике за микроелектронику и микросистеме. Тема дипломског рада била је „Генератор сигнала заснован на програмабилном систему на чипу“. У току студија био је награђиван повељама Електронског факултета за постигнуте резултате. У школској 2012/13. години био је стипендиста Фонда за младе таленте Републике Србије – Доситеја. Проглашен је за најбољег студента Електронског факултета у Нишу у 2012. години, поводом дана Ниша, 11. јануара. Добитник је јавног признања општине Књажевац и награде града Ниша (2014.) за дипломираног студента Електронског факултета са просеком 10.00. Носилац је Повеље Електронског факултета у Нишу за најбољег дипломираног студента генерације 2008. Универзитет у Нишу му је 28.05.2014. године доделио Сребрни знак као најбољем студенту Електронског факултета у школској 2012/13. години.

Током студија у оквиру стручне праксе, коју је обавио у Лабораторији за електротехничке материјале, учествовао је у осмишљавању, постављању и реализацији лабораторијских вежби из предмета Материјали за електронику. Такође, у току студија био је ангажован као демонстратор волонтер на предмету Полупроводничке компоненте. Од 1. октобра 2013. године до 21. фебруара 2014. радио је на месту стручни сарадник за научноистраживачки рад на Електронском факултету у Нишу. Фебруара 2014. изабран је у звање сарадник у настави на Електронском факултету у Нишу. У фебруару 2016. године изабран је у звање асистент за ужу научну област Микроелектроника и микросистеми, а реизабран марта 2019. и марта 2022. године. До сада је био ангажован на извођењу рачунских и лабораторијских вежби на предметима: Електронске компоненте, Полупроводничке компоненте, Лабораторијски практикум – Физика, Лабораторијски практикум – Електронске компоненте, Материјали за електронику, Електротехнички материјали (ЕЕН), Пројектовање штампаних плоча, Моделирање и симулација микроелектронских компонената и кола, Електронска физика чврстог тела, Технологије микросистема, Пројектовање и симулација микроелектронских компонената, Компоненте и кола снаге, Физика, Нови материјали и технологије, Микроелектромеханичке компоненте (МЕМС). У школској 2017/18. години реализовао је видео туторијале за извођење лабораторијских вежби из предмета Физика и Електронске компоненте. Од 26. априла 2018. године је шеф Лабораторије за моделирање и симулацију микрокомпонената и микросистема. Аутор или коаутор је електронског наставног материјала за више предмета.

Учествовао је на пројектима финансираних у оквиру програмске активности “Развој високог образовања” Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије: “Иновирање програма предмета „Пројектовање штампаних плоча“ увођењем концепта управљања подацима (ПЦБПДМ)“, под руководством проф. др Зорана Пријића; “Иновирање програма предмета „Дигитална микроелектроника“ и “Интегрисани микросистеми“ применом концепта пројектне наставе (ДИМИС)“, под руководством проф. др Данијела Данковића и “Модификација практичне наставе из групе предмета на модулу Електронске компоненте и микросистеми (МОД2ЕКМ)“, под руководством проф. др Анете Пријић.

Ангажован је као истраживач на пројекту „Развој, оптимизација и примена технологија самонапајајућих сензора“ финансираног од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. До сада је објавио укупно 70 радова, 8 у истакнутим часописима од међународног значаја (M14, M22, M23, M24), 4 у водећим научним часописима од националног значаја (M51, M53), 24 на међународним (M33, M34) и 34 на домаћим научним скуповима (M63). Добитник је награде за младе истраживаче на конференцији ЕТРАН 2013 (секција НМ) и ЕТРАН 2014 (секција МО). Рад са ЕТРАН-а 2016. године проглашен је за најбољи у секцији МО. Ангажован је на пројекту “Enhancement of Scientific Excellence and Innovation Potential in Electronic Instrumentation for Ionizing Radiation Environments - ELICSIR“, који се финансира из програма Европске Уније Horizon 2020 за истраживање и иновације (Grant No. 857558), позив Widespread-3-2018-twinning.

Члан је међународног удружења инжењера електронике и електротехнике (IEEE) од 2010. године. Септембра 2015. изабран је за председника IEEE студентског огранка Ниш. На месту секретара Међународне конференције студентских пројеката „IEEEESTEC“ је од 2012. године, потпредседник ове конференције је од 2013, од 2014. технички уредник и од 2021. године уредник Зборника конференције. Фебруара 2021. године изабран је за секретара IEEE ED/SSC подружнице. Од јуна 2015. је у организационом одбору међународне конференције RAD (International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research). Учествовао је у организацији неколико конференција MIEL.

Ангажован је у активностима промоције Електронског факултета у средњим школама од 2013. године. Био је члан тима Електронског факултета на такмичењу за најбољу технолошку иновацију у 2013. години. Одржао је више предавања по позиву на семинарима и био члан жирија на такмичењима у организацији студентских организација EESTEC, BEST, SICEF. Од августа 2018. године учествује у реализацији пројеката из области промоције и популаризације науке које финансира Центар за промоцију науке: “Преточимо знање у практичан рад”, “Практичним радом до знања”, “Идемо и ми на IEEEESTEC конференцију” и “За IEEEESTEC се спреми”, “Вијуге покрену за IEEEESTEC се спреми”, “У сусрет 15. IEEEESTEC-у” којима руководи проф. др Данијел Данковић, а реализовани су у Научним клубовима Ниш и Лесковац. Од 2018. године води Ардуино радионице за студенте Електронског факултета, али и ученике средњих школа, као и стручне праксе и обуке наставника средњих школа у области програмирања микроконтролера. Године 2021. учествовао је у реализацији пројекта “STEM visits IEEEESTEC conference”, у оквиру иницијативе IEEE TryEngineering, финансираног преко 2021 IEEE Pre-University STEM Portal Grant-a. Током 2022. године учествовао је у наставку STEM пројекта, под називом “Let STEM visit again IEEEESTEC”.

## Списак објављених научних радова

1. Marko Andjelković, **Miloš Marjanović**, Bojan Draško, Cristiano Calligaro, Oliver Schrape, Umberto Gatti, Felipe Kuentzer, Stefan Ilić, Goran Ristić, Miloš Krstić, "Analysis of Single Event Transient Effects in Standard Delay Cells Based on Decoupling Capacitors", *Journal of Circuits, Systems and Computers*, Vol. 31, No. 18, 2240007, 2022, DOI: 10.1142/S0218126622400072.
2. Marko Andjelković, **Miloš Marjanović**, Junchao Chen, Stefan Ilić, Goran Ristić, Miloš Krstić, "PS-BBICS: Pulse Stretching Bulk Built-in Current Sensor for On-chip Measurement of Single Event Transients", *Microelectronics Reliability*, Vol. 138, 114726, 2022, ISSN: 0026-2714, DOI: 10.1016/j.microrel.2022.114726.
3. Danijel Danković, **Miloš Marjanović**, Nikola Mitrović, Emilija Živanović, Milan Danković, Aneta Prijić, Zoran Prijić, "The Importance of Students' Practical Work in High Schools for Higher Education in Electronic Engineering", *IEEE Transactions on Education*, 2022, DOI: 10.1109/TE.2022.3202629.
4. **Miloš Marjanović**, Aneta Prijić, Branislav Randjelović, Zoran Prijić, "A Transient Modeling of the Thermoelectric Generators for Application in Wireless Sensor Network Nodes", *Electronics*, Vol. 9, No. 6, 1015, 2020, DOI: 10.3390/electronics9061015.
5. Vesna Paunović, Vojislav Mitić, Miloš Đorđević, **Miloš Marjanović**, Ljubiša Kocić, "Electrical Characteristics of Er Doped  $BaTiO_3$  Ceramics", *Science of Sintering*, Vol. 49, No. 2, pp. 129-137, 2017, DOI: 10.2298/SOS1702129P.
6. Danijel Danković, Ivica Manić, Vojkan Davidović, Aneta Prijić, **Miloš Marjanović**, Aleksandar Ilić, Zoran Prijić, Ninoslav Stojadinović, "On the Recoverable and Permanent Components of NBTI in P-Channel Power VDMOSFETs", *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, Vol. 16, No. 4, pp. 522-531, 2016, DOI: 10.1109/TDMR.2016.2598557.
7. **Miloš Marjanović**, Aleksandra Stojković, Aneta Prijić, Danijel Danković, Zoran Prijić, "Spatial SPICE Model of a Wireless Sensor Network Node Based on a Thermoelectric Generator", *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics*, Vol. 35, No. 4, pp. 513-539, 2022. DOI: 10.2298/FUEE2204513M.
8. Vesna Paunović, Vojislav Mitić, **Miloš Marjanović**, Ljubiša Kocić, "Dielectric Properties of La/Mn Codoped Barium Titanate Ceramics", *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics*, Vol. 29, No. 2, pp. 285-296, 2016, DOI: 10.2298/FUEE1602285P.



9. **Miloš Marjanović**, Aleksandra Stojković, Aneta Prijić, Danijel Danković, Zoran Prijić, "A SPICE Compatible Spatial Equivalent Circuit Model of the Heatsink", *Proc. 32nd IEEE International Conference on Microelectronics (MIEL-2021)*, pp. 103-106, Niš, Serbia, September 2021, DOI: 10.1109/MIEL52794.2021.9569185.
10. **Miloš Marjanović**, Aneta Prijić, Zoran Prijić, "Open Circuit Test of a Thermoelectric Generator with Different Heatsources and Heatsinks", *Proc. Student conference "Energy efficiency and sustainable developemnt"*, pp. 8-13, Skoplje, North Macedonia, 2019, ISBN: 978-9989-630-92-7.
11. Jana Vračar, **Miloš Marjanović**, Aleksandra Stojković, Zoran Prijić, Aneta Prijić, Ljubomir Vračar, "Application of a Low-Voltage Step-Up Circuit for Thermal Energy Harvesting Under Natural Convection", *Proc. 6th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering - IcETRAN 2019*, pp. 564-569, Silver Lake, Serbia, June 2019, ISBN: 978-86-7466-785-9.
12. Miloš Đorđević, Jana Vračar, Aleksandra Stojković, **Miloš Marjanović**, "Uređaj za praćenje i akviziciju prisustva studenata predavanjima", *Proc. Sarajevo Innovations Festival*, pp. 50-57, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2018, ISSN: 2490-3418.
13. Aneta Prijić, **Miloš Marjanović**, Ljubomir Vračar, Danijel Danković, Dejan Milić, Zoran Prijić, "A Steady-State SPICE Modeling of the Thermoelectric Wireless Sensor Network Node", *Proc. 4th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering - IcETRAN 2017*, pp. MOI2.3.1-6, Kladovo, Serbia, June 2017, ISBN 978-86-7466-692-0.
14. Miloš Đorđević, **Miloš Marjanović**, Vesna Paunović, Vojislav Mitić, Zoran Prijić, "Electrical Resistivity of Er/Yb doped  $BaTiO_3$  ceramics", *Proc. 4th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering - IcETRAN 2017*, pp. NMI1.2.1-6, Kladovo, Serbia, June 2017, ISBN 978-86-7466-692-0.
15. **Miloš Marjanović**, Vesna Paunović, Danijel Danković, Aneta Prijić, Zoran Prijić, Vojislav Mitić, "Characterization and SPICE Modeling of Passive Electronic Devices at High Frequencies", *Proc. IV Advanced Ceramics and Applications Conference*, Springer, Chapter 30, pp. 435-446, 2017, ISBN: 978-94-6239-213-7, DOI: 10.2991/978-94-6239-213-730.
16. **Miloš Marjanović**, Aneta Prijić, Danijel Danković, Zoran Prijić, Vojkan Davidović, "PSPICE Modeling of Ionizing Radiation Effects in P-Channel Power VDMOS Transistors", *Proc. 3rd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering - IcETRAN 2016*, pp. MOI1.3.1-6, Zlatibor, Serbia, June 2016, ISBN 978-86-7466-618-0.
17. Vesna Paunović, **Miloš Marjanović**, Miloš Đorđević, Vojislav Mitić, Ljubiša Kocić, "Electrical Characteristics of Nb Doped  $BaTiO_3$  Ceramics", *Proc. III Advanced Ceramics and Applications Conference*, Springer, Chapter 10, pp. 143-158, 2016, ISBN: 978-94-6239-156-7, DOI: 10.2991/978-94-6239-157-4.
18. Aleksandar Milenković, Dragan Janković, **Miloš Marjanović**, Petar Rajković, "Proposal for Hardware-Software Module for Recording Arrival of Patients in the Waiting Room of the Chosen Doctor by Using RFID Technology", *Zbornik radova sa*

*XXI međunarodnog naučno - stručnog skupa INFORMACIONE TEHNOLOGIJE - sadašnjost i budućnost*, pp. 97-100, Žabljak, Montenegro, 2016, ISBN: 978-86-85775-18-5.

19. Nebojša Janković, Chadwin D. Young, **Miloš Marjanović**, "Spice Simulations of Aging Effects in Double-Gate FinFETs", *Proc. 6th Small Systems Simulation Symposium*, pp.50-53, Niš, Serbia, February 2016, ISBN: 978-86-6125-154-2.
20. Miloš Mitić, **Miloš Marjanović**, "Modeling and Simulation of Single-Junction Solar Cell", *Proc. 3rd Students Conference "Energy Efficiency and Sustainable Development" - SCEESD*, pp. 34-39, Skoplje, North Macedonia, November 2015, ISBN: 978-9989-630-80-4.
21. **Miloš Marjanović**, Danijel Danković, Aneta Prijić, Vesna Paunović, Zoran Prijić, "High Frequency Characterization and Modelling of Ceramic Capacitors", *Prof. 12th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services "TELSIKS"*, pp. 110-113, Niš, Serbia, October 2015, DOI: 10.1109/TELSKS.2015.7357749.
22. **Miloš Marjanović**, Danijel Danković, Vojkan Davidović, Aneta Prijić, Ninoslav Stojadinović, Zoran Prijić, Nebojša Janković, "Modeling and PSPICE Simulation of Radiation Stress Influence on Threshold Voltage Shifts in p-Channel Power VDMOS Transistors", *Proc. Third International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research - RAD 2015*, pp. 405-408, Budva, Montenegro, June 2015, ISBN: 978-86-80300-01-6.
23. **Miloš Marjanović**, Vesna Paunović, Zoran Prijić, Aneta Prijić, Danijel Danković, "On the measurement methods for dielectric constant determination in Nb/BaTiO<sub>3</sub> ceramic", *Proc. X International Symposium INDUSTRIAL ELECTRONICS, INDEL - 2014*, pp. 38-41, Banja Luka, Republic Srpska, November 2014, ISBN: 978-99955-46-22-9.
24. Danijel Danković, **Miloš Marjanović**, "The Importance of the IEEEESTEC Students' Projects Conference", *Proc. International Conference on Technology Transfer, ICTT 2013*, pp. 265-268, Niš, Serbia, 2013, ISBN: 978-86-6125-083-5.
25. Aneta Prijić, **Miloš Marjanović**, Jana Vračar, Aleksandra Stojković, Zoran Prijić, "Consideration of alternative materials for passive heatsinks under a natural cooling conditions", *Book of abstracts 10th Serbian Ceramic Society Conference "Advanced Ceramics and Application"*, p. 43, Belgrade, Serbia, September 2022.
26. Vesna Paunović, Aleksandra Stojković, Neda Stanojević, **Miloš Marjanović**, Zoran Prijić, "Electrical characteristics of Sb doped BaTiO<sub>3</sub> ceramics", *Book of abstracts 10th Serbian Ceramic Society Conference "Advanced Ceramics and Application"*, p. 42, Belgrade, Serbia, September 2022.
27. **Miloš Marjanović**, Marko Andjelković, Miloš Krstić, Goran Ristić, "Simulation of single event transient effects in CMOS circuits using open access tools and device models", *Book of abstracts RAD 2022 Conference (Spring Edition)*, Herceg Novi, Montenegro, June 2022, DOI: 10.21175/rad.spr.abstr.book.2022.27.8.

28. Vesna Paunović, Vojislav Mitić, Ljubiša Kocić, **Miloš Marjanović**, Miloš Đorđević, "The Rare-Earths influences on doped  $BaTiO_3$  Ceramics Microstructure and Electric Characteristics", *Book of abstracts the 5th Serbian Ceramic Society Conference "Advanced Ceramics and Application V"*, p. 44, Belgrade, Serbia, September 2016.
29. **Miloš Marjanović**, Vesna Paunović, Danijel Danković, Aneta Prijić, Zoran Prijić, "Characterization and PSPICE Modeling of Ceramic-Core Inductors at High Frequencies", *Book of abstracts the 4th Serbian Ceramic Society Conference "Advanced Ceramics and Application"*, p. 77, Belgrade, Serbia, September 2015, ISBN: 978-86-91567-3-1.
30. Miloš Đorđević, **Miloš Marjanović**, Vesna Paunović, Vojislav Mitić, "The Dielectric characteristic of Er doped  $BaTiO_3$  Ceramics", *Book of abstracts the 4th Serbian Ceramic Society Conference "Advanced Ceramics and Application"*, p. 62, Belgrade, Serbia, September 2015, ISBN: 978-86-91567-3-1.
31. **Miloš Marjanović**, Miloš Đorđević, Vesna Paunović, "Dielectrical Properties of  $Er_2O_3$  doped  $BaTiO_3$  Ceramics", *Book of abstracts the 13th Young Researchers' Conference Materials Sciences and Engineering - YRC 2014*, p. 33, Belgrade, Serbia, December 2014, ISBN: 978-86-80321-30-1.
32. **Miloš Marjanović**, Miloš Đorđević, Vesna Paunović, Vojislav Mitić, "The Electrical Characteristics of Nb doped  $BaTiO_3$  Ceramics", *Book of abstracts the 3rd Serbian Ceramic Society Conference "Advanced Ceramics and Application"*, Belgrade, Serbia, September-October 2014.
33. **Miloš Marjanović**, Danijel Danković, Aneta Prijić, Zoran Prijić, Nebojša Janković, Vojkan Davidović, "Modeling and PSPICE Simulation of NBTI Effects in VDMOS Transistors", *Serbian Journal Of Electrical Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 69-79, 2015, DOI: 10.2298/SJEE1501069M.
34. Miloš Đorđević, **Miloš Marjanović**, Vesna Paunović, "Dielektrične karakteristike  $Er_2O_3$  dopirane  $BaTiO_3$  keramike", *TEHNIKA - NOVI MATERIJALI*, Vol. 24, No. 4, pp. 577-580, 2015, ISSN: 0040-2176.
35. **Miloš Marjanović**, Dragana Dimitrijević, Vesna Paunović, Zoran Prijić, "Microstructural and Dielectrical Characterization of Ho Doped  $BaTiO_3$  Ceramics", *Serbian Journal Of Electrical Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 35-46, 2014.
36. **Miloš Marjanović**, Danijel Danković, Vojkan Davidović, Aneta Prijić, Ninoslav Stojadinović, Zoran Prijić, Nebojša Janković, "Modeling and PSPICE Simulation of Radiation Stress Influence on Threshold Voltage Shifts in P-Channel Power VDMOS Transistors", *Radiation and Applications in Physics, Chemistry, Biology, Medical Sciences, Engineering and Environmental Sciences*, Vol. 1, No. 1, pp. 26-30, 2016, DOI: 10.21175/RadJ.2016.01.05.
37. Danijel Danković, Emilija Živanović, **Miloš Marjanović**, "Petnaest godina Konferencije studentskih projekata IEEEESTEC", *Proc. IEEEESTEC - 15th Student Projects Conference*, pp. 1-4, Niš, Srbija, 2022, ISBN: 978-86-6125-257-0.

38. **Miloš Marjanović**, Emilija Živanović, Danijel Danković, Goran Ristić, "Dozimetar jonizujućeg zračenja zasnovan na Arduino mikrokontroleru i senzoru BG51", *Proc. IEEEESTEC - 15th Student Projects Conference*, pp. 299-302, Niš, Srbija, 2022, ISBN: 978-86-6125-257-0.
39. Emilija Živanović, **Miloš Marjanović**, Sandra Veljković, Nikola Mitrović, Jana Vračar, Danijel Danković, "U susret jubileju: naša petnaesta godina kroz radionice i druženje", *Proc. IEEEESTEC - 15th Student Projects Conference*, pp. 315-319, Niš, Srbija, 2022, ISBN: 978-86-6125-257-0.
40. Vesna Paunović, **Miloš Marjanović**, Zoran Prijić, "Mikrostrukturna i dielektrična karakterizacija PLZT keramike", *Zbornik radova konferencije ETRAN*, Novi Pazar, Srbija, 2022, ISBN: 978-86-7466-930-3.
41. Aleksandra Stojković, **Miloš Marjanović**, Vesna Paunović, Aneta Prijić, Zoran Prijić, "Električne karakteristike BaTiO<sub>3</sub> keramike dopirane antimonom", *Zbornik radova konferencije ETRAN*, Novi Pazar, Srbija, 2022, ISBN: 978-86-7466-930-3.
42. **Miloš Marjanović**, "Termoelektrični modul kao izvor napajanja u čvorovima bežičnih senzorskih mreža - pregled", *Proc. IEEEESTEC - 14th Student Projects Conference*, pp. 189-193, Niš, Srbija, 2021, ISBN: 978-86-6125-242-6.
43. Danijel Danković, **Miloš Marjanović**, Jana Vračar, Nikola Mitrović, Sandra Veljković, Emilija Živanović, "IEEEESTEC na-S-paja", *Proc. IEEEESTEC - 14th Student Projects Conference*, pp. 283-286, Niš, Srbija, 2021, ISBN: 978-86-6125-242-6.
44. Aleksandra Stojković, **Miloš Marjanović**, Jana Vračar, Aneta Prijić and Zoran Prijić, "Performanse sklopova termoelektrični modul-hladnjak namenjenih samonapajajućim sistemima u uslovima prirodnog hlađenja", *Zbornik radova konferencije ETRAN*, pp. 330-334, Etno selo Stanišići, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina, 2021.
45. Danijel Danković, **Miloš Marjanović**, "Projekat Centra za promociju nauke "Za IEEEESTEC se spremi" na Elektronskom fakultetu u Nišu", *Proc. IEEEESTEC - 13th Student Projects Conference*, pp. 199-200, Niš, Srbija, 2020, ISBN: 978-86-6125-230-3.
46. Miloš Đorđević, **Miloš Marjanović**, Vesna Paunović, Danijel Danković, "Karakterizacija dopirane BaTiO<sub>3</sub> keramike primenom nove metode za merenje električnih karakteristika", *Zbornik radova konferencije ETRAN*, pp. NM 1.3.1-NM 1.3.5, Čačak, Srbija, 2020.
47. **Miloš Marjanović**, Danko Danković, Danijel Danković, "Projekat Centra za promociju nauke "Pretočimo znanje u praktičan rad" realizovan u Naučnim klubovima Niš i Leskovac", *Proc. IEEEESTEC - 12th Student Projects Conference*, pp. 105-108, Niš, Srbija, 2019, ISBN: 978-86-6125-215-0.
48. Aleksandar Denić, Miloš Ristić, Uroš Zdravković, Stefan Stojčić, Stefan Tošić, Filip Nikolić, Nikola Ćirić, **Miloš Marjanović**, "Realizacija kalkulatora pomoću Arduina", *Proc. IEEEESTEC - 12th Student Projects Conference*, pp. 317-320, Niš, Srbija, 2019, ISBN: 978-86-6125-215-0.

49. **Miloš Marjanović**, "Student and Young Professional kongres u Portu, Portugalija", *Proc. IEEEESTEC - 11th Student Projects Conference*, pp. 47-50, Niš, Srbija, 2018, ISBN: 978-86-6125-204-4.
50. **Miloš Marjanović**, Danijel Danković, "Deset godina Konferencije studentskih projekata IEEEESTEC", *Proc. IEEEESTEC - 11th Student Projects Conference*, pp. 1-4, Niš, Srbija, 2017, ISBN: 978-86-6125-193-1.
51. Stefan Ilić, **Miloš Marjanović**, "Ispitivanje uticaja debljine tunel oksida kod Flash EEPROM ćelije pomoću TCAD alata", *Proc. IEEEESTEC - 10th Student Projects Conference*, pp. 243-246, Niš, Srbija, 2017, ISBN: 978-86-6125-193-1.
52. **Miloš Marjanović**, Vesna Paunović, Aneta Prijić, Danijel Danković, Zoran Prijić, "Analiza debljine silicijum dioksida pomoću TCAD simulatora", *Zbornik radova konferencije ETRAN*, pp. NM 1.3.1-NM 1.3.5, Kladovo, Srbija, 2017, ISBN: 978-86-7466-692-0.
53. Miloš Djordjević, **Miloš Marjanović**, Vesna Paunović, Vojislav Mitić, Zoran Prijić, "Specifična električna otpornost Er dopirane  $BaTiO_3$  keramike", *Zbornik radova konferencije ETRAN*, Zlatibor, Srbija, 2016.
54. Pakwan Piwsoi, **Miloš Marjanović**, "Realization of Band-stop Butterworth Filter for 50 Hz", *Proc. IEEEESTEC - 8th Student Projects Conference*, pp. 187-190, Niš, Srbija, 2015, ISBN: 978-86-6125-150-4.
55. Miloš Djordjević, **Miloš Marjanović**, Vesna Paunović, Vojislav Mitić, Zoran Prijić, "Električne karakteristike i fazna transformacija Yb dopirane  $BaTiO_3$  keramike", *Zbornik radova konferencije ETRAN*, Srebrno jezero, Srbija, 2015.
56. **Miloš Marjanović**, "Upravljanje saobraćajnom signalizacijom, parkingom i rasvetom korišćenjem PSoC-", *Proc. IEEEESTEC - 7th Student Projects Conference*, pp. 1-4, Niš, Srbija, 2014, ISBN: 978-86-6125-114-6.
57. **Miloš Marjanović**, Danijel Danković, Aneta Prijić, Zoran Prijić, Vojkan Davidović, Nebojša Janković, "Modeliranje i PSPICE simulacija NBTI efekata kod VDMOS tranzistora", *Zbornik radova konferencije ETRAN*, Vrnjačka Banja, Srbija, 2014.
58. **Miloš Marjanović**, Vesna Paunović, Vojislav Mitić, "Uticaj sinteze prahova i aditiva na svojstva  $BaTiO_3$  keramike", *Zbornik radova konferencije ETRAN*, Vrnjačka Banja, Srbija, 2014.
59. **Miloš Marjanović**, "Generator osnovnih signala zasnovan na programabilnom sistemu na čipu", *Proc. IEEEESTEC - 6th Student Projects Conference*, pp. 5-10, Niš, Srbija, 2013, ISBN: 978-86-6125-097-2.
60. Dragana Dimitrijević, **Miloš Marjanović**, "Dielektrične karakteristike  $Ho/BaTiO_3$  keramike", *Proc. IEEEESTEC - 6th Student Projects Conference*, pp. 87-90, Niš, Srbija, 2013, ISBN: 978-86-6125-097-2.
61. Željko Kalezić, **Miloš Marjanović**, "Aplikacija "IEEEESTEC" kviz", *Proc. IEEEESTEC - 6th Student Projects Conference*, pp. 175-178, Niš, Srbija, 2013, ISBN: 978-86-6125-097-2.

62. **Miloš Marjanović**, Dragana Dimitrijević, Vesna Paunović, Zoran Prijić, "Mikrostrukturna i dielektrična svojstva Ho dopirane  $BaTiO_3$  keramike", *Zbornik radova konferencije ETRAN*, pp. NM1.3.1-6, Vrnjačka Banja, Srbija, 2013.
63. **Miloš Marjanović**, Aleksandar Vulović, "PSoC signal generator", *Proc. IEEEESTEC - 5th Student Projects Conference*, pp. 29-33, Niš, Srbija, 2012, ISBN: 978-86-6125-073-6.
64. **Miloš Marjanović**, Dragana Dimitrijević, Sandra Ilijin, Aleksandar Ilić, "Realizacija indikatora ugla obrtanja pomoću akcelometra", *Proc. IEEEESTEC - 5th Student Projects Conference*, pp. 59-62, Niš, Srbija, 2012, ISBN: 978-86-6125-073-6.
65. Aleksandar Ilić, **Miloš Marjanović**, "Realizacija igre Missile Invader na LED matrici pomoću PIC mikrokontrolera", *Proc. IEEEESTEC - 5th Student Projects Conference*, pp. 97-101, Niš, Srbija, 2012, ISBN: 978-86-6125-073-6.
66. Dalibor Trajković, Damir Nešić, **Miloš Marjanović**, "Sistem On Line glasanja za izbor najboljeg rada na IEEEESTEC konferenciji", *Proc. IEEEESTEC - 5th Student Projects Conference*, pp. 145-148, Niš, Srbija, 2012, ISBN: 978-86-6125-073-6.
67. **Miloš Marjanović**, Dragana Dimitrijević, Sandra Ilijin, Velibor Pantović, Slobodan Ivković, "Uređaj za kontrolu uličnog osvetljenja", *Proc. IEEEESTEC - 4th Student Projects Conference*, pp. 1-4, Niš, Srbija, 2011, ISBN: 978-86-6125-052-1.
68. **Miloš Marjanović**, Aleksandar Ilić, "Analiza SPI komunikacionog protokola pomoću logičkog analizatora", *Proc. IEEEESTEC - 4th Student Projects Conference*, pp. 5-10, Niš, Srbija, 2011, ISBN: 978-86-6125-052-1.
69. **Miloš Marjanović**, "Realizacija elektronske brave za sef korišćenjem potencijometra i PIC mikrokontrolera", *Proc. IEEEESTEC - 4th Student Projects Conference*, pp. 71-75, Niš, Srbija, 2011, ISBN: 978-86-6125-052-1.
70. **Miloš Marjanović**, "Detektor osvetljenosti sa LED indikatorima", *Proc. IEEEESTEC - 3rd Student Projects Conference*, pp. 5-9, Niš, Srbija, 2010, ISBN: 978-86-6125-021-7.

## ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом

### **Моделирање ефикасности минијатурних термоелектричних модула**

која је одбрањена на Електронском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, \_\_\_\_\_.

Потпис аутора дисертације:



Милош Б. Марјановић

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНОГ И ЕЛЕКТРОНСКОГ ОБЛИКА  
ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ**

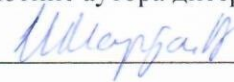
Наслов дисертације:

**Моделирање ефикасности минијатурних термоелектричних модула**

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном облику.

У Нишу, \_\_\_\_\_.

Потпис аутора дисертације:



Милош Б. Марјановић



## ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

### **Моделирање ефикасности минијатурних термоелектричних модула**

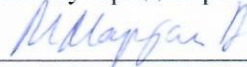
Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
- 3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)**
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

У Нишу, \_\_\_\_\_.

Потпис аутора дисертације:



Милош Б. Марјановић