



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Termogeneratoriaus automobiliui kūrimas ir tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Justas Leonavičius
Projekto autorius

Doc. Rolandas Makaras
Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Termogeneratoriaus automobiliui kūrimas ir tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Transporto priemonių inžinerija (6211EX021)

Justas Leonavičius

Projekto autorius

Doc. Rolandas Makaras

Vadovas

Prof. Laurencas Raslavičius

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Justas Leonavičius

Termogeneratoriaus automobiliui kūrimas ir tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Justas Leonavičius

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kaunas technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Išduota studentui (-ei) – Justui Leonavičiui

1. Projekto tema

Termogeneratoriaus automobiliui kūrimas ir tyrimas

(Lietuvių kalba)

Development and Research of a Thermogenerator for a Vehicle

(Anglų kalba)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas:

Sukurti termoelektrinį generatorių automobiliams ir ištirti efektyviausią montavimo vietą.

Uždaviniai:

1. Atlikti literatūrinę analizę susijusią su termoelektrinio generatoriaus veikimu ir sandara.
2. Parengti stendo ir montuojamo termoelektrinio generatoriaus tyrimų metodiką.
3. Atlikti tyrimus, vieno termoelektrinio elemento generuojamos atviros elektros įtampos nustatymui ir esant skirtingoms aplinkos temperatūroms nustatyti elemento efektyvumą.
4. Statistiškai apdoroti tyrimo metu gautus rezultatus.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

1. Tyrimo atlikimo temperatūrų diapazonas: nuo -15°C iki 15°C

2. Sukurtas termogeneratorius turi atiduoti nuo 1V elektros įtampos iki 6V.

4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Netaikoma

Projekto autorius	Justas Leonavičius <i>(Vardas, Pavardė)</i>	2026-02-18 <i>(Data)</i>
Projekto vadovas	Rolandas Makaras <i>(Vardas, Pavardė)</i>	2026-02-18 <i>(Data)</i>
Krypties studijų programų vadovas	Artūras Keršys <i>(Vardas, Pavardė)</i>	2026-02-18 <i>(Data)</i>

Leonavičius, Justas. Termogeneratoriaus automobiliui kūrimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Rolandas Makaras; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Transporto inžinerija (E12), Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: termoelektrinis generatorius, temperatūrų skirtumas, generuojama elektros įtampa, standartinė paklaida, pasikliautinas intervalas, santykinė paklaida.

Kaunas, 2026. 50 p.

Santrauka

Šiame darbe nagrinėjamas ir tiriamas termoelektrinio generatoriaus elementas, nustatoma atviros elektros grandinės įtampos priklausomybė nuo temperatūrų skirtumo, atliekamas tyrimas, kurio metu nustatoma generuojama įtampa, esant skirtingoms aplinkos temperatūroms. Atsižvelgiant į klimato kaitą, vis dažniau bandoma pritaikyti įvairiausių sistemų, kurios prarastą energiją paverstų į naudingą, viena iš tokių sistemų yra termoelektrinis generatorius. Termoelektrinis generatorius šiluminę energiją paverčia elektros energija. Buvo atlikta literatūros ir straipsnių analizė termoelektrinių generatorių sandarai ir veikimo principams nustatyti, bei išanalizuota jau darytų tyrimų stendų sandara. Taip pat įvertinta, kad svarbus aspektas yra geras kontakto užtikrinimas. Atsižvelgus į jau darytus tyrimus buvo sudarytos principinės schemos, kurių pagalba buvo sukonstruotas termoelektrinio generatoriaus stendas. Su stendu buvo atlikti eksperimentiniai bandymai ir nustatyta, kad generuojama atviros elektros grandinės įtampa nuo temperatūrų skirtumo tarp šaltosios ir karštosios dalies, kinta tiesiškai. Maksimali vidutinė vertė siekė 2,13 V. Kiti tyrimai atlikti generuojamos įtampos nustatymui esant skirtingoms lauko temperatūroms. Buvo atlikti tyrimai kintant lauko temperatūrai nuo -15°C iki 15°C kas 5°C . Sudaryti užmiesčio ir miesto maršrutai. Pagamintas termoelektrinis generatorius, kuris buvo aušinamas oru, dėl šios priežasties aušinimui darė įtaką aplinkos temperatūra. Tiek stende, montuojamame termogeneratoriuje buvo įmontuotos termoporos, kurių pagalba buvo matuojama temperatūra šaltojoje ir karštojoje termoelektrinio elemento pusėse. Atliekant eksperimentus skirtingomis lauko temperatūromis, automobilio variklis buvo pašildomas iki darbinės temperatūros ir atitinkamai pašildoma išmetimo sistema. Sušilus šiems komponentams buvo atliekami eksperimentai tiek su vidurinio išmetamųjų dujų bakelio termoelektriniu generatoriumi, tiek su galinio bakelio termoelektriniu generatoriumi. Buvo fiksuojamos temperatūros ir generuojama įtampa. Gauti rezultatai buvo suvesti į „Excel“ programinę įrangą. Iš gautų rezultatų buvo pastebėta, kad kai aplinkos temperatūra buvo žemesnė nei -5°C automobilio išmetimo sistema taip pat geriau aušinasi ir Seebeck'o efektas šiek tiek yra mažesnis. Taip pat pastebėta, kad miesto režimu dažnai sustojant generuojama įtampa labiau svyruoja, dėl šios priežasties didesnė standartinė ir santykinė paklaida nei fiksuotuose rezultatuose užmiesčio režime. Gauti rezultatai buvo apdoroti statistiškai, paskaičiuotos kiekvieno eksperimento vidutinės reikšmės (nuo 1,19 V iki 2,74 V), standartinės paklaidos (nuo $\pm 0,017$ V iki $\pm 0,089$ V), santykinės paklaidos (nuo 0,59 % iki 3,26 %) ir 95 % pasikliautieji intervalai ($\pm 0,009$ V iki $\pm 0,058$ V). Taip pat pastebėta, kad didėjant aplinkos temperatūrai, generuojama atviros elektros grandinės įtampa mažėja, taip atsitinka dėl blogesnio aušinimo t.y. dėl šiltesnės aplinkos temperatūros. Eksperimentai buvo atliekami tik su vienu termoelektriniu elementu.

Leonavičius, Justas. Development and Research of a Thermogenerator for a Vehicle. Masters's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. Rolandas Makaras; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Transport Engineering (E12), Engineering Science.

Keywords: thermoelectric generator, temperature difference, generated electrical voltage, standard error, confidence interval, relative error.

Kaunas, 2026. 50 p.

Summary

This work examines and studies the element of a thermoelectric generator, determines the dependence of the open circuit voltage on the temperature difference, a study is carried out during which the voltage is determined at ambient temperatures. Considering the climate, when it is increasingly common to try to adapt various systems that would convert the lost energy into usefulness, one of such systems is a thermoelectric generator. A thermoelectric generator converts thermal energy into electrical energy. An analysis of literature and articles was carried out to determine the structure and operating principles of thermoelectric generators, and the structure of the already conducted research stands was analysed. It is also assessed that an important aspect is ensuring good contact. Considering the already conducted research, principal diagrams were drawn up with the help of which a thermoelectric generator stand was constructed. Experimental tests were carried out with the stand, and it was found that the generated open circuit voltage varies linearly from the temperature difference between the cold and hot parts. The maximum average value reached 2.13 V. Other studies were carried out to determine the generated voltage at high outdoor temperatures. The tests were conducted when the outside temperature was from -15°C to 15°C every 5°C . Country and city routes were created. A thermoelectric generator was manufactured that was cooled by air, for this reason it is influenced by the ambient temperature. Thermocouples were installed in both the stand and the mounted thermogenerator, with the help of which the temperature was measured on the cold and hot sides of the thermoelectric element. When conducting experiments at the available outside temperatures, the car engine was heated to operating temperature, and the exhaust system was heated accordingly. With these components warmed up, experiments were conducted with both the thermoelectric generator of the middle exhaust gas tank and the thermoelectric generator of the rear tank. Temperatures were recorded and voltage was generated. The results obtained were entered into „Excel” software. From the results obtained, it was observed that when the ambient temperature was lower than -5°C , the car exhaust system also cools better and the Seebeck effect is somewhat smaller. It was also observed that in the city mode, the voltage generated during frequent stops fluctuates more due to this larger standard error and relative than in the fixed results in the country mode. The obtained results were statistically processed and the average values of each experiment (from 1.19 V to 2.74 V), standard errors (from ± 0.017 V to ± 0.089 V), relative errors (from 0.59 % to 3.26 %) and 95 % confidence intervals (from ± 0.009 V to ± 0.058 V) were calculated. It was also observed that the lowest ambient temperature generates an open circuit voltage, this happens due to worse cooling, i.e. due to warmer ambient temperature. The experiments were carried out with only one thermoelectric element.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Literatūros apžvalga	12
1.1. Termoelektrinis generatorius.....	12
1.2. Termoelektrinio generatoriaus efektyvumas	13
1.3. Egzistuojančių sistemų analizė.....	20
2. Tiriama metodika	22
2.1. Tyrimo objektai	22
2.2. Naudoti prietaisai.....	23
2.3. Tyrimo metodika	26
2.3.1. Tyrimo pirmasis etapas.....	26
2.3.2. Tyrimo antrasis etapas	29
3. Tyrimo rezultatai.....	33
3.1. Įtampos priklausomybės nuo temperatūrų skirtumo nustatymas	33
3.2. Automobilyje įmontuotų termoelektrinių generatorių rezultatai.....	34
3.2.1. Galinio bakelio termoelektrinio generatoriaus rezultatai	34
3.2.2. Vidurinio bakelio termoelektrinio generatoriaus rezultatai.....	40
Išvados	47
Literatūros sąrašas	48
Priedai.....	51
1 priedas. Proceedings of 13th International Young Researchers Conference INDUSTRIAL ENGINEERING 2026 „Research on the Dependence of the Voltage Generated by a Thermoelectric Element“	51

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Termoelektrinio generatoriaus TEG specifikacija.....	22
2 lentelė. Termoelektrinio generatoriaus TEG specifikacija.....	22
3 lentelė. Termoporos „Plawee“ su LED ekranu specifikacija.....	23
4 lentelė. Įtampos reguliatoriaus „Buck-Boost“ su LED ekranu specifikacija.....	24
5 lentelė. Įtampos maitinimo bloko „WANPTEK“ su LED ekranu specifikacija.....	25
6 lentelė. Universalaus multimetrom „Orangjo VC505“ specifikacija.....	25
7 lentelė. Termopastos „nedis“ specifikacija	26
8 lentelė. Galinio bakelio termoelektrinio generatoriaus generuojamos įtampos vidurkiai ir paklaidos (užmiestis)	36
9 lentelė. Galinio bakelio termoelektrinio generatoriaus generuojamos įtampos vidurkiai ir paklaidos (miestas)	39
10 lentelė. Vidurinio bakelio termoelektrinio generatoriaus generuojamos įtampos vidurkiai ir paklaidos (užmiestis)	42
11 lentelė. Vidurinio bakelio termoelektrinio generatoriaus generuojamos įtampos vidurkiai ir paklaidos (miestas)	45

Paveikslų sąrašas

1 pav. Tipinio dyzelinio automobilio išmetimo sistemoje temperatūros pasiskirstymas.....	12
2 pav. Termoelektrinio generatoriaus (TEG) veikimo principinė schema.....	13
3 pav. Eksperimentinis stendas	14
4 pav. Tyrimo metu sumodeliuotas cilindro formos termoelektrinis modulis.....	15
5 pav. Termoelektrinio generatoriaus (TEG) galios priklausomybė nuo TEG elementų porų skaičiaus	15
6 pav. 3D modelis TEC-TEG modulio COMSOL programinėje įrangoje	16
7 pav. Medžiagų savybės naudojamos COMSOL programoje.....	16
8 pav. Termoelektrinio generatoriaus charakteristinės kreivės.....	17
9 pav. Termogeneratoriaus vidinės varžos (R_i) nuo temperatūros skirtumo priklausomybė (ΔT) ...	18
10 pav. Termoelektrinio generatoriaus (TEG) galios priklausomybė nuo temperatūros skirtumo...	18
11 pav. Tyrimo metu naudotos įrangos schema.....	19
12 pav. Parametrų priklausomybė nuo prispaudimo slėgio	19
13 pav. „BMW“ automobilio pirmasis TEG prototipas.....	20
14 pav. „BMW“ automobilio antrasis TEG prototipas	20
15 pav. „Ford Lincoln MKT“ TEG prototipas.....	21
16 pav. Termoelektrinis generatorius TEG.....	22
17 pav. Eksperimento metu sukurto TEG montavimo vietos	23
18 pav. Termopora „Plawee“ su LED ekranu.....	23
19 pav. Įtampos reguliatorius „Buck-Boost“ su LED ekranu.....	24
20 pav. Įtampos maitinimo blokas „WANPTEK“ su LED ekranu.....	24
21 pav. Universalus multimetras „Orangjo VC505“	25
22 pav. Termopasta „nedis“	25
23 pav. Principinė elektros grandinės schema	26
24 pav. Termoelektrinio generatoriaus aušinimo principinė schema.....	27
25 pav. Termoelektrinio generatoriaus bloko principinė schema	27
26 pav. Termoelektrinio generatoriaus tiriamasis stendas	28
27 pav. Termoelektrinio generatoriaus tiriamojo stendo sandara	28
28 pav. Termoelektrinio generatoriaus bloko principinė schema	29
29 pav. Termoelektrinis generatorius ant automobilio išmetamųjų dujų galinio bakelio.....	29
30 pav. Termoelektrinis generatorius ant automobilio išmetamųjų dujų vidurinio bakelio	30
31 pav. Užmiesčio maršrutas Panevėžiukas - Raudondvaris [36]	30
32 pav. Miesto maršrutas Raudondvario plento „MOKI-VEŽI“ - KTU studentų miestelis	31
33 pav. Termoelektrinio generatoriaus stendo generuojamos atviros grandinės vidutinių įtampų tyrimo rezultatai.....	33
34 pav. Galinio bakelio termoelektrinio generatoriaus generuojamos įtampos rezultatai esant skirtingoms aplinkos temperatūroms užmiesčio režime.....	35
35 pav. Galinio bakelio termoelektrinio generatoriaus temperatūrų skirtumo rezultatai esant skirtingoms aplinkos temperatūroms užmiesčio režime.....	35
36 pav. Galinio bakelio termoelektrinio generatoriaus generuojamos įtampos vidurkiai esant skirtingoms aplinkos temperatūroms užmiesčio režime.....	37
37 pav. Galinio bakelio termoelektrinio generatoriaus generuojamos įtampos rezultatai esant skirtingoms aplinkos temperatūroms miesto režime	38

38 pav. Galinio bakelio termoelektrinio generatoriaus temperatūrų skirtumo rezultatai esant skirtingoms aplinkos temperatūroms miesto režime	38
39 pav. Galinio bakelio termoelektrinio generatoriaus generuojamos įtampos vidurkiai esant skirtingoms aplinkos temperatūroms miesto režime	40
40 pav. Vidurinio bakelio termoelektrinio generatoriaus generuojamos įtampos rezultatai esant skirtingoms aplinkos temperatūroms užmiesčio režime.....	41
41 pav. Galinio bakelio termoelektrinio generatoriaus temperatūrų skirtumo rezultatai esant skirtingoms aplinkos temperatūroms užmiesčio režime.....	42
42 pav. Vidurinio bakelio termoelektrinio generatoriaus generuojamos įtampos vidurkiai esant skirtingoms aplinkos temperatūroms užmiesčio režime.....	43
43 pav. Vidurinio bakelio termoelektrinio generatoriaus generuojamos įtampos rezultatai esant skirtingoms aplinkos temperatūroms miesto režime	44
44 pav. Vidurinio bakelio termoelektrinio generatoriaus temperatūrų skirtumo rezultatai esant skirtingoms aplinkos temperatūroms miesto režime	44
45 pav. Galinio bakelio termoelektrinio generatoriaus generuojamos atviros grandinės įtampos vidurkiai esant skirtingoms aplinkos temperatūroms miesto režime.....	46

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

TEG – termoelektrinis generatorius;

Terminai:

Seebeck efektas – uždaroje elektros grandinėje atsirandanti elektrovara ir srovė, dėl nuosekliai sujungtų 2 skirtingų laidininkų (puslaidininkų), kurių lietimosi temperatūra nevienoda.

Puslaidininkis – medžiaga, kurios elektrinis laidis kambario temperatūroje mažesnis nei metalų ir didesnis nei dielektrikų.

Pletier efektas – šilumos energijos išsiskyrimas ar sugėrimas veikiant elektros srovei, termiškai vienalytėje sistemoje, sudarytoje iš dviejų metalų, puslaidininkų, metalo ir puslaidininkio.

Termopasta – tiršta arba klampi medžiaga, užtikrinanti aušinimą tarp dviejų komponentų (aušintuvas ir procesorius).

Išmetamųjų dujų recirkuliacija (EGR) – variklio taršos mažinimo sistema, kuri dalį išmetamųjų dujų nukreipia į siurbimo kolektorių ir vėliau patenka į degimo kamerą.

Ivadas

Termoelektrinis generatorius – tai įrenginys, kuris iš šiluminės energijos generuoja elektrinę energiją. Elektros energija gaunama tiesiogiai iš temperatūrų skirtumo, pasinaudojant termoelektriniu efektu. Termoelektriniai generatoriai yra montuojami kaip papildoma įranga gauti elektros energiją iš šilumos energijos automobilių išmetamųjų dujų sistemose, pramoninėse krosnyse, taip pat yra naudojami kosmoso zonuose kaip energijos gavimui ir prietaisuose, kuriuos nešioja žmogus, pavyzdžiui – laikrodžiui.

Termoelektrinis generatorius dažniausiai yra naudojamas kaip antrinis elektros energijos šaltinis. Taip gaunama, kad pagrindiniui energijos šaltiniui tenka mažiau apkrovos, pavyzdžiui automobilio generatoriui, kuris yra sukamas diržine pavara nuo vidaus degimo variklio. Taip sumažinamos vidaus degimo variklio degalų sąnaudos ir padidinamas vidaus degimo variklio naudingumo koeficientas, nes automobiliuose šiluminė energija išvaistoma į aplinką. Vidaus degimo varikliuose, tokiuose kaip dyzeliniuose ir „Otto“, šilumos praradimas siekia 45-35 % [1][2]. Dėl šių priežasčių didėja ir klimato kaitos tikimybė.

Šiame darbe yra analizuojama jau esančių termoelektrinių generatorių panaudojimo būdai ir daromi tyrimai. Suprojektuotas ir pagamintas termoelektrinio generatoriaus standas. Atliktas eksperimentas, kurioje automobilio išmetamųjų dujų sistemos vietoje būtų geriausiai montuoti termogeneratorių, kad jis veiktų efektyviausiu režimu ir nustatoma aplinkos temperatūros įtaka termoelektriniui generatoriui.

Tikslas – sukurti termoelektrinį generatorių automobiliams ir ištirti efektyviausią montavimo vietą.

Uždaviniai:

1. Atlikti literatūrinę analizę susijusią su termoelektrinio generatoriaus veikimu ir sandara.
2. Parengti stendo ir montuojamo termoelektrinio generatoriaus tyrimų metodiką.
3. Atlikti tyrimus, vieno termoelektrinio elemento generuojamos atviros elektros įtampos nustatymui ir esant skirtingoms aplinkos temperatūroms nustatyti elemento efektyvumą.
4. Statistiškai apdoroti tyrimo metu gautus rezultatus.

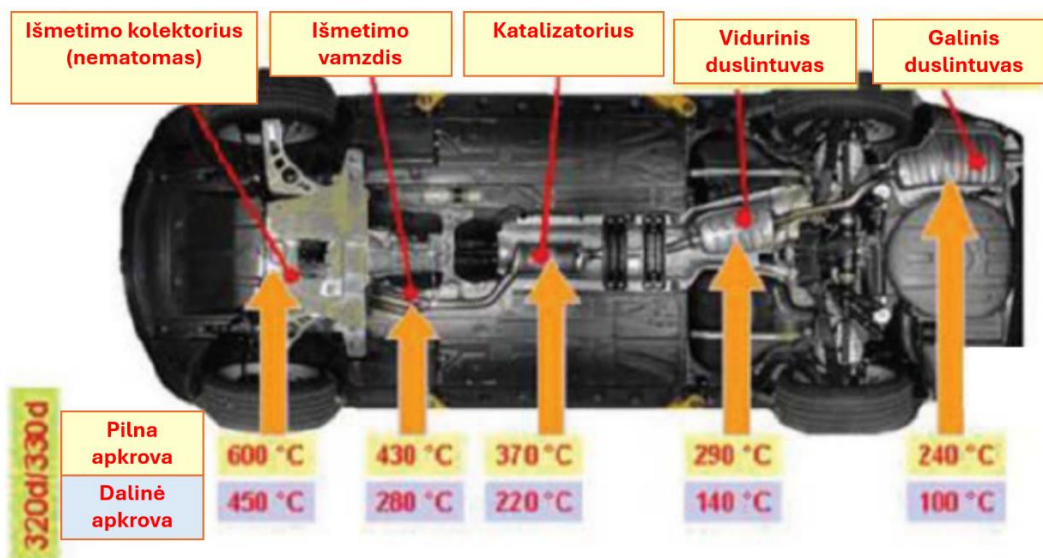
1. Literatūros apžvalga

Prieš atliekant tiriamąją dalį ir tyrimo metodikos sudarymą atliekama literatūrinė analizė kurioje apžvelgiami jau daryti tyrimai ir egzistuojančių sistemų analizė.

1.1. Termoelektrinis generatorius

Termoelektrinis generatorius (TEG) – tai elektros energijos generatorius, kuris sudarytas iš puslaidininkių. Pats veikimo principas pagrįstas Seebeck'o efektu, kuris teigia, kad kai dvi skirtingos medžiagos sudaro elektros grandinę, sąlyčio taške yra gaunamos skirtingos temperatūros, dėl šios priežasties atsiranda elektrinė įtampa. Laisvųjų krūvininkų elektronų ar skylių judėjimas atsiranda dėl temperatūros skirtumo, krūvininkai pradeda judėti nuo karštesnės srities į šaltesnę taip sudarydamos elektros energiją [1]. Dėl šios priežasties TEG montuojamas prie šilumos šaltinių tokių kaip: automobilių išmetamųjų dujų vamzdžių, šiluminių katilų, medicinos prietaisuose, laikrodžiuose ir kt. [3].

Termoelektrinių generatorių pritaikymas automobiliuose nėra sudėtingas, didžiausią problemą sudaro termoelektrinių generatorių paviršių kontaktas ir aušinimas. Termoelektrinius generatorius transporto priemonėse galima montuoti vidaus degimo variklio aušinimo sistemoje, kurios temperatūra siekia 90–95 °C arba prie išmetamųjų dujų sistemos, kurios temperatūra prie kolektoriaus siekia 600–800 °C priklausomai nuo variklio apkrovos ir variklio tipo (dyzeliniuose varikliuose išmetamųjų dujų temperatūra mažesnė nei Otto varikliuose) [3]. 1 paveiksle matomas temperatūrų pasiskirstymas dyzelinio automobilio išmetimo sistemoje – karščiausia yra prie variklio kolektoriaus, šalčiausia prie galinio garso slopintuvo.

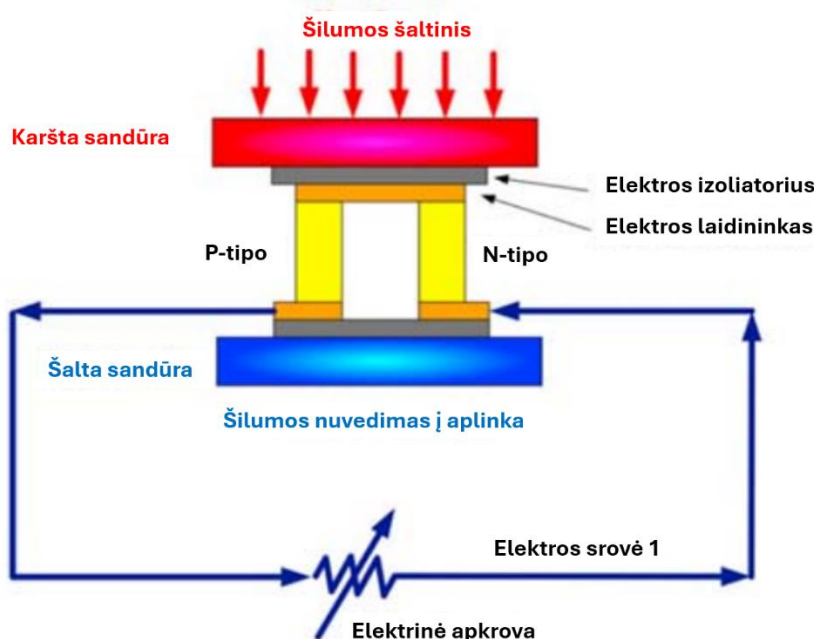


1 pav. Tipinio dyzelinio automobilio išmetimo sistemoje temperatūros pasiskirstymas [4]

Pačiuose termoelektriniuose generatoriuose naudojami dviejų tipų puslaidininkiai: n-tipo ir p-tipo. N-tipo puslaidininkyje elektronai yra krūvininkai, o p-tipo – skylės. Puslaidininkiai parenkami taip, kad termoelektrinis generatorius veiktų efektyviai. Kad būtų įvykdyta ši sąlyga, renkant puslaidininkių medžiagas, atsižvelgiama į gerą medžiagos elektros laidumą ir medžiagos šilumos laidumas turėtų būti prastas (temperatūrų skirtumas būtų kuo didesnis). Dažnai TEG naudojamos

puslaidininkų medžiagos yra bismuto telūridas (Bi_2Te_3), švino telūridas (PbTe), silicio ir germanio junginiai (Si-Ge). Patys puslaidininkiai sujungiami taip, kad būtų galima išgauti nuolatinę elektros srovę. [5][6][7]

Principinėje schemoje pateikta supaprastinta termoelektrinio generatoriaus sandara ir veikimo principas (žr. 2 pav.). Schemoje pavaizduotas TEG sudarytas iš p-tipo ir n-tipo puslaidininkių, elektros izoliatoriaus ir elektros laidininko. Kai karštoji TEG plokštelės pusė kaitinama, o šaltoji vėsinama, gaunamas krūvių judėjimas tarp puslaidininkių, taip atsiranda elektros srovė, kuri teka per elektros grandinės apkrovą.



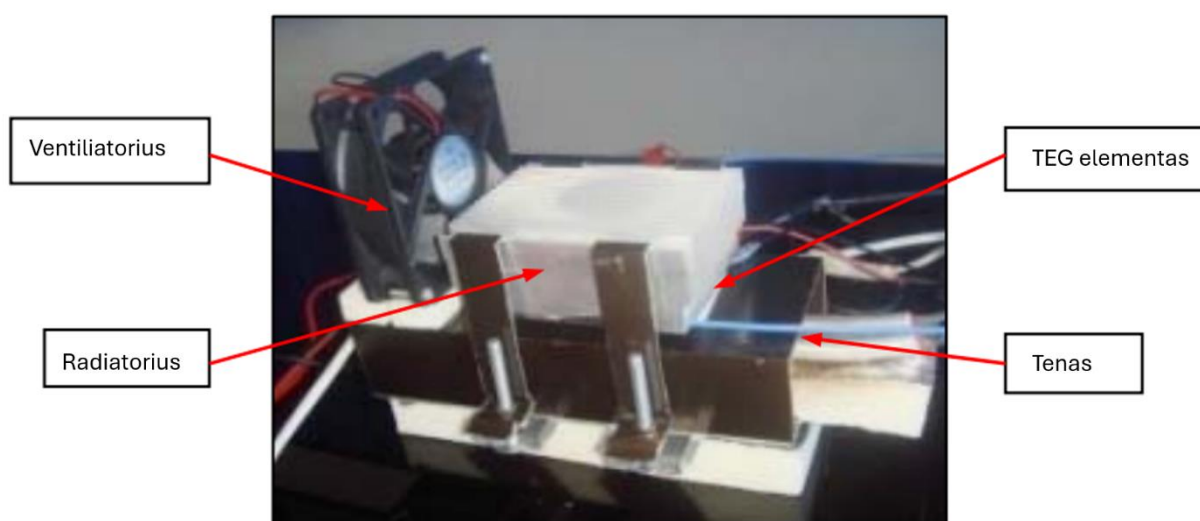
2 pav. Termoelektrinio generatoriaus (TEG) veikimo principinė schema [5]

Pirmos kartos termoelektriniai generatoriai turėjo 4–6 % naudingumo koeficientą, antros kartos – 11–15 % naudingumo koeficientą, trečios kartos termoelektrinių generatorių naudingumo koeficientas yra didesnis nei 15 %. Tam įtakos turi puslaidininkių medžiagų tobulinimas ir medžiagos struktūros keitimas [8].

1.2. Termoelektrinio generatoriaus efektyvumas

Termoelektrinis generatorius dažnai naudojamas kaip pagalbinis elektros šaltinis, kuris padidina mechanizmo energetinį efektyvumą. Dauguma eksperimentų daroma su vidaus degimo variklį turinčiais automobiliais, prie kurių išmetamųjų dujų vamzdžių yra montuojami šie termogeneratoriai [5]. Taip pat šie elektros energijos generatoriai neturi jokių judančių detalių ir yra patikimi, neteršia aplinkos, lyginant su įprastiniais automobilio diržiniais generatoriais [9]. Moksliniuose tyrimuose yra pateikta, kad naudojant aušinimo skystį kaip šilumos energijos šaltinį, termoelektrinio modulio efektyvumas siekė 2,1 % [10]. Taip pat buvo atliktas tyrimas, kurio metu buvo nustatyta, kiek termogeneratorius padidina automobilio vidaus degimo variklio efektyvumą. Tyrimo metu buvo naudojami iš Bi_2Te_3 puslaidininkio pagaminti termogeneratoriai, kurie buvo pritaikyti prie lengvojo krovinio transporto išmetamųjų dujų vamzdžio ir pasiektas rezultatas buvo 1–2 %, efektyvumas priklausė nuo vidaus degimo variklio sūkių skaičiaus [11].

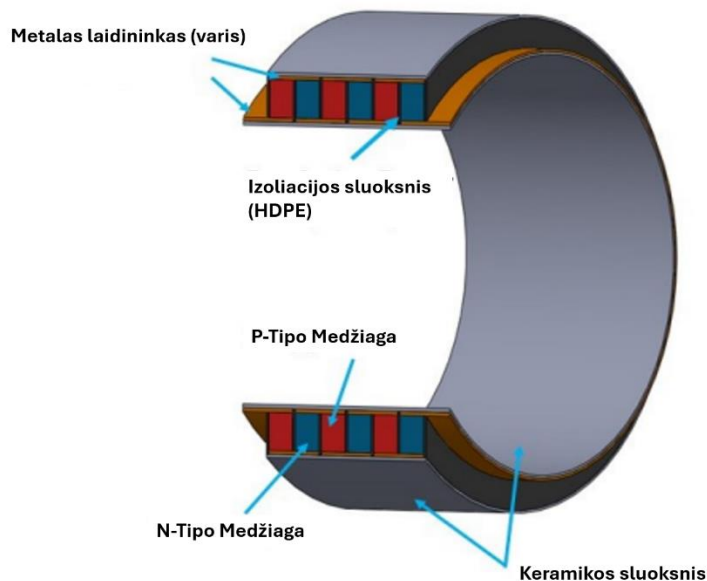
Taip pat atlikti tyrimai techninėms savybėms ir galimybės pritaikyti termoelektrinį modulį automobiliams. Atliekant tyrimą buvo sukurtas standas (žr. 3 pav.), kuris imitavo automobilio išmetamųjų dujų vamzdžio sąlygas ir termoelektrinio modulio kitoje pusėje buvo pritvirtintas šilumos nukreipimas. Jis aušinamas ventiliatoriumi, taip sudarydamas termoelektriniame modulyje skirtingas temperatūras. Šio tyrimo metu buvo keičiama ventiliatoriaus įtampa nuo kurios priklausė ventiliatoriaus apsisukimų skaičius, dėl to gerėjo termoelektrinio modulio aušinimas. Taigi, kai gerėjo modulio aušinimas buvo pasiektas didesnis temperatūrų skirtumas tarp modulio plokštelės plokštumų, dėl to buvo generuojama didesnė elektrinė galia, kuri siekė 72,4 mW, įtampa siekė 658 mV, o elektros srovė siekė 110 mA esant temperatūros skirtumui 42 °C [12].



3 pav. Eksperimentinis standas [12]

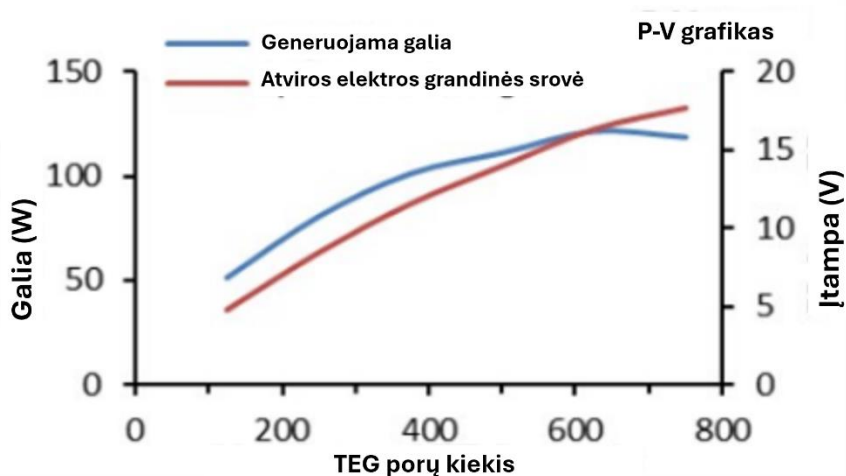
Kaip ir kiekvienas novatoriškas išradimas, taip ir termoelektriniai generatoriai, nėra tobuli. Siekiant išgauti didesnę termoelektrinio generatoriaus efektyvumą, ieškomos geresnės medžiagos, kurių nanostruktūra mažintų šilumos laidumą, taip pagerinant termoelektrinį našumą [13][14][15][16]. Taip pat tobulinant medžiagas pastebėta, kad padidinus šiluminio ir vėsinimo kontakto plotą ir sumažinus pačio termoelektrinio modulio aukštį, žymiai pagerėjo elektros energijos gavimas iš elemento. Galima teigti, kad turint įvairių formų termoelektrinius modulius, jų pritaikomumas bus platesnis [17][18]. Apžvelgiant formas, pavyzdžiui, apvalius termoelektrinius modulius, jų pritaikomumas labiau matomas su apvaliais korpusais, tokiais kaip vamzdžiais, to dėl galima teigti, kad būtų galima naudoti išmetamųjų dujų sistemose esančius vamzdžius ar garso slopinimo bakelius, nes šios formos elementai gali sumažinti šiluminio kontakto varžą dėl geometrijos ant ko yra įtaisytas elementas [19]. Turimo apvalaus elemento suderinamumas su šilumos šaltiniais yra didesnis, lyginant su plokščiais termoelektrinio generatoriaus elementais. Šis termoelektrinis elementas buvo sumodeliuotas kompiuterine programine įranga *COMSOL 5.5*, taip pat atliktos šiluminės ir elektrinės imitacijos, naudojant baigtinių elementų metodą. Šios imitacijos metu buvo palaikomos pastovios sąlygos, termoelektriniai elementai buvo vienodi, taip pat buvo daroma prielaida, kad termoelektrinių elementų medžiagų šiluminės ir elektrinės savybės išliko pastovios priklausomai nuo temperatūros pokyčio.

Programine įranga sumodeliuotas termoelektrinis modulis (žr. 4 pav.), kuris sudarytas iš: cilindro formos p-tipo ir n-tipo puslaidininkių, kurių poros yra atskirtos izoliacine medžiaga, šaltos ir karštos plokštumos pusės padengtos vario ir keramikos užvalkalais. Šio modelio vidinis cilindro plotas yra šildomas, o išorinis – aušinamas.



4 pav. Tyrimo metu sumodeliuotas cilindro formos termoelektrinis modulis [20]

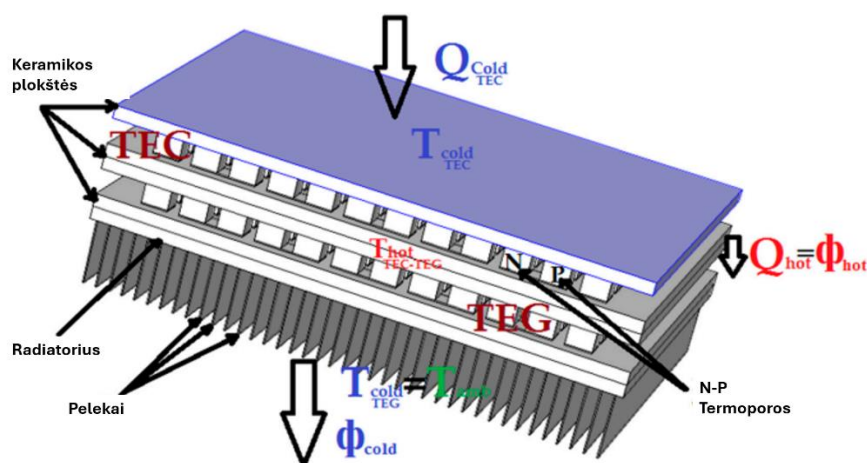
Atlikus tyrimą, gauti rezultatai parodė, kad kuo didesnis temperatūrų skirtumas tarp šaltosios ir karštosios pusės, tuo termoelektrinis elementas generuoja didesnę galią, todėl ir didesnę elektros srovę. Taip pat šis temperatūros skirtumas ir veikia termoelektrinio elemento efektyvumą – kuo didesnis temperatūrų skirtumas, tuo didesnis ir elemento efektyvumas. Taip pat norint išgauti didesnę galią ir įtampą galima didinti ir elementų kiekį, taip išgaunant didesnę šiluminės energijos panaudojimą [20]. Eksperimento metu maksimaliai buvo gauta 121,63 W su 625 TTEG elemento poromis, kaip iš paveikslo (žr. 5 pav.) matoma toliau didinant porų skaičių, galia išlieka tokia pati arba mažėja. Taip vyksta dėl to, kad paskutiniai TTEG elementai nepasiekia didelio temperatūrų skirtumo dėl jau atvėsusių išmetamųjų dujų [20].



5 pav. Termoelektrinio generatoriaus (TEG) galios priklausomybė nuo TEG elementų porų skaičiaus [20]

TTEG elementai yra efektyvesni ir kompaktiškesni nei plokšti TEG dėl savo kontaktų ploto skirtumo, dydžio. Taip pat TTEG lengviau pritaikomi nei paprasti plokšti TEG elementai. Įvertinant, kad šiuos TTEG būtų galima naudoti viduje transporto priemonės išmetamųjų dujų sistemoje, šiame straipsnyje neįvertinama pilna termoelektrinio generatoriaus masė ir dujų pralaidumas. Dėl mažų vamzdžių, kurie yra viduje pačiame išmetamųjų dujų vamzdyje, sudarytų dujų srauto stabdymą, dėl kurio vidaus degimo variklis galėtų neefektyviai dirbti ir nesudarytų tinkamų sąlygų veikti šiems TTEG generatoriams.

Yra ir daugiau galimybių termoelektrinių generatorių aušinti ne tik oro srautu ar skystiniu aušinimu. Viena iš alternatyvių aušinimo būdų yra termoelektrinis aušintuvas (TEC). Khaled'o T., Youtong'o Z. ir Xiao-long'o M. tyrime yra pateikiamas termoelektrinio generatoriaus ir aušintuvo teorinis modelis, kuris pateiktas kompiuterinėje programoje *COMSOL* ir atliktas eksperimentinis tyrimas. Šiame tyrime termoelektrinio generatoriaus dalinę aušinimo paskirtį atlieka TEC, kurio veikimo principas yra pagrįstas Peltier efektu. Peltier efektas – kai elektros srovė teka per p-tipo ir n-tipo puslaidininkius ir šis elektros srovės tekėjimas sukelia šilumos perdavimą nuo plokštelės vienos pusės į kitą, taip gaunama šaltaji pusė ir karštoji pusė [21]. Tyrimo metu buvo sujungtos nuosekliai TEC ir TEG plokštelės, TEC karštoji pusė buvo jungiama su TEG karštąja (žr. 6 pav.). Taip sujungus išgaunama iš TEC šiluma, kuri bus perduodama TEG ir termoelektrinis generatorius generuos elektros srovę.



6 pav. 3D modelis TEC-TEG modulio *COMSOL* programinėje įrangoje [22]

Pačiame tyrime ir kompiuteriniame modelyje buvo naudojami tie patys elementai, TEC ir TEG gabaritiniai matmenys buvo 40,1x40,1x4 ir šie elementai turėjo 60 porų p-tipo ir n-tipo puslaidininkių [21]. Elementuose naudojamų medžiagų savybės pateiktos 7 paveiksle.

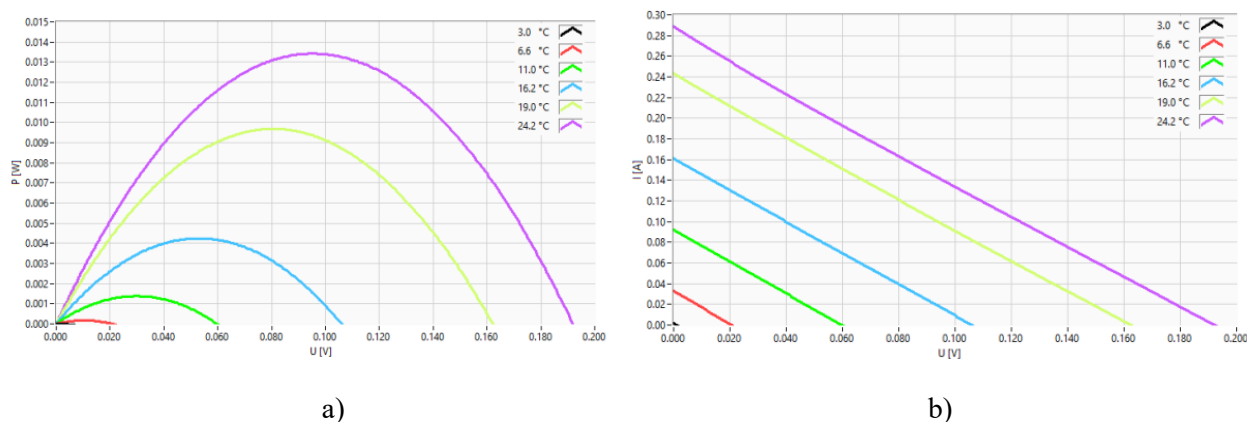
Medžiaga	Savybės	Šilumos talpa Cp (J/kg*K)	Tankis (kg/m ³)	Seebeck koeficientas (V/K)	Elektros laidumas (S/m)	Šilumos laidumas (W/m*K)
P-n termopora (Bi ₂ Te ₃)		154	7700	±S(T)	σ(T)	K(T)
Laidininkai (Varis)		385	8960	/	5.998 × 10 ⁷	400
Keramikinės plokštės (Volframas)		132	17,800	/	/	175

7 pav. Medžiagų savybės naudojamos *COMSOL* programoje [22]

Eksperimentų metu buvo nustatyta, kad *COSMOL* teorinės imitacijos temperatūros buvo pasiektos skirtingos nei eksperimento metu, bet matoma panaši priklausomybė nuo įtampos didinimo TEC modulyje ir temperatūros kilimo. Atlikus eksperimentą pastebėta, kad eksperimento metu buvo gautas šiek tiek didesnis elektrinis potencialas nei imitacijos metu, taip pat pastebėta, kad tyrimo metu temperatūros skirtumas tarp TEG plokštelės pusių buvo tiesiogiai proporcingas TEC įėjimo įtampai, kai didžiausias temperatūros skirtumas siekė 17 K ir 23 K, o įėjimo įtampa siekė 5 V [22].

Prieš naudojimą termogeneratoriai pirmiausiai ištiriami eksperimentiškai, nustatoma, kokią galią gali generuoti generatorius, tai yra atliekami eksperimentai nustatyti termogeneratoriaus savybėms. Tai buvo atlikta Petru Andrian'o C., Daniel'o Tudor'o C. ir kt. eksperimentiniame tyrime. Tyrime sumodeliuojamas eksperimentinis stendas, kurį sudaro TEG plokštelės, kurios priklįuojamos prie aliuminių plokštelių, kurios skirtos aušinimui ir šilumos nukreipimui. Plokštelėse įmontuotos termoporos, kurios skirtos stebėti TEG plokštelės temperatūras tiek karštoje pusėje, tiek vėsinaamoje pusėje. Aušinimas vyksta skysčiu, kurio temperatūra yra palaikoma vienoda, naudojant vandens pompą. Temperatūra priklauso nuo aušinimo skysčio cirkuliavimo greičio. Karštojoje pusėje pritaistas termoelektrinis modulis, kuris valdomas nuolatine elektros srove, didinant srovę, didėja generuojama elektrinė šiluma [23].

Tyrimo metu buvo gautos termoelektrinio generatoriaus charakteristinės kreivės (žr. 8 pav.). Galios nuo įtampos charakteristinė kreivė gauta parabolės pavidalo, o elektros srovės nuo įtampos kreivės gautos tiesinio pavidalo. Iš rezultatų matoma, kad turint didesnę temperatūros skirtumą, galima išgauti didesnę elektrinę galią. Taip pat atkreiptas dėmesys, kad didėjant įtampai, mažėja elektros srovė.



8 pav. Termoelektrinio generatoriaus charakteristinės kreivės:

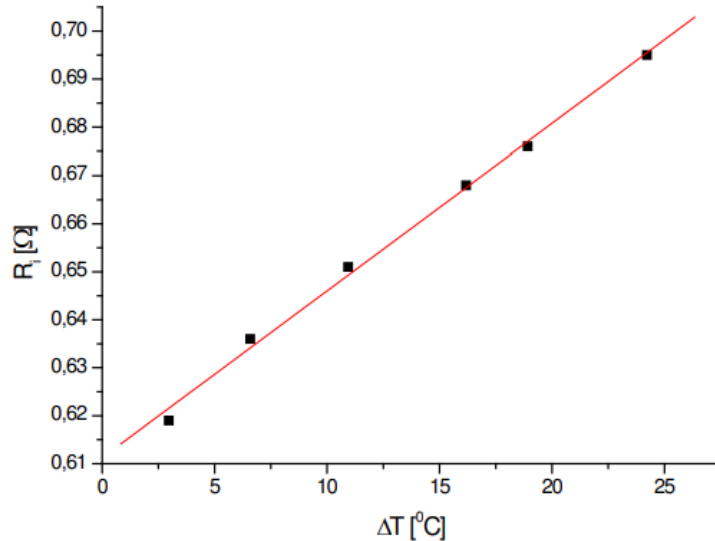
- a) termoelektrinio generatoriaus galios nuo įtampos charakteristinės kreivės;
- b) termoelektrinio generatoriaus srovės nuo įtampos charakteristinės kreivės [23]

Taip pat šiame tyrime apskaičiuotas Seebeck'o koeficientas, kuris siekė 10,75 mV/°C [23]. Šis koeficientas apskaičiuotas pagal formulę [24]:

$$S = \frac{V_{oc}}{T_h - T_c} \quad (1.2.1)$$

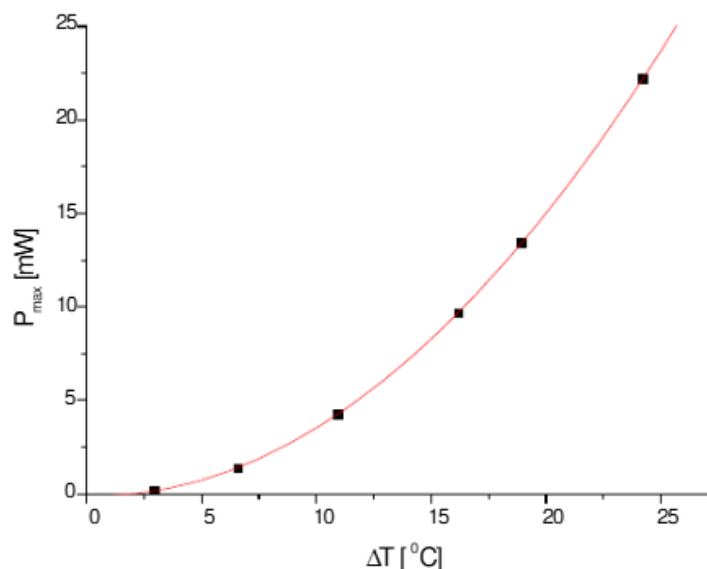
čia V_{oc} – įtampa be apkrovos (V); T_h – temperatūra karštoje pusėje (°C); T_c – temperatūra aušinamoje pusėje (°C).

Taip pat gauta TEG vidinės varžos priklausomybė nuo temperatūros skirtumo (žr. 9 pav.), kuri yra tiesinė priklausomybė. Didėjant temperatūros skirtumui tarp TEG karštosios ir aušinamos plokštelių pusių, vidinė varža didėja [23].



9 pav. Termogeneratoriaus vidinės varžos (R_i) nuo temperatūros skirtumo priklausomybė (ΔT) [23]

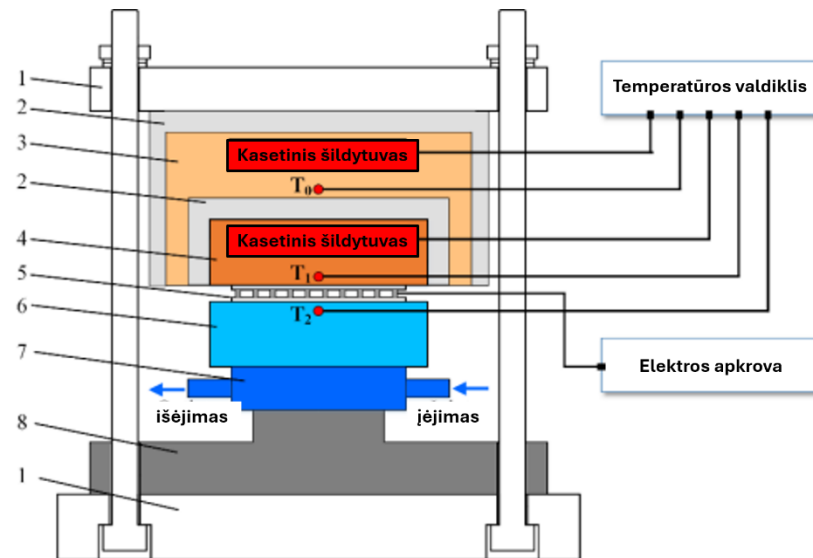
10 paveiksle pavaizduota gautų rezultatų galios priklausomybė nuo temperatūros skirtumo. Kaip ir pirmajame eksperimente matoma ta pati tendencija – kuo didesnis temperatūrų skirtumas, tuo didesnė TEG galia. [4]



10 pav. Termoelektrinio generatoriaus (TEG) galios priklausomybė nuo temperatūros skirtumo [23]

Panašiu principu Haitao W. ir Qiang‘as F. atliko eksperimentą su termogeneratoriumi, tik šio tyrimo esmė – termogeneratorius veikia skirtingose šilumos laidumo ribose, taip pat yra didinamas prispaudimas prie TEG ir tikrinamas šilumos laidumas. Šio tyrimo metu buvo išmatuota TEG išėjimo

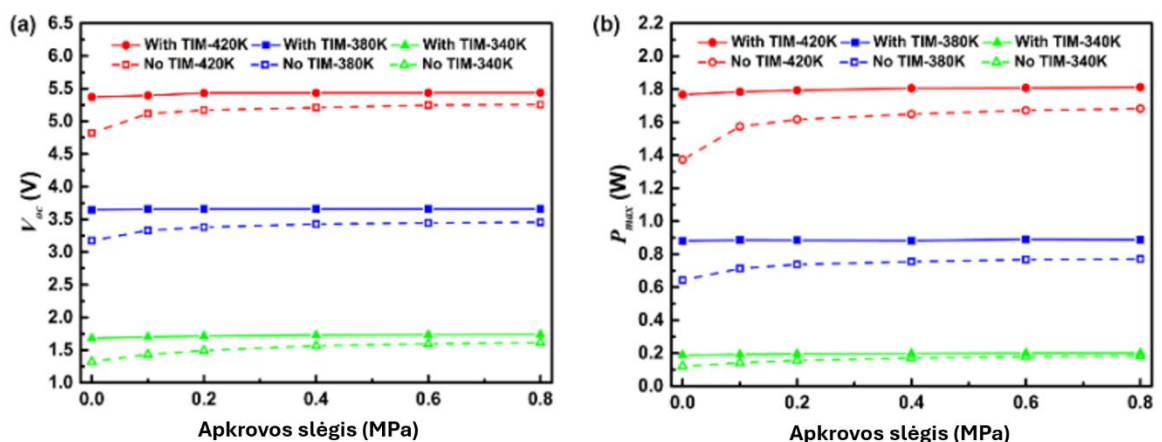
įtampa ir galia pastoviomis temperatūros sąlygomis, vėliau buvo atlikti tyrimai kaip veikia prispaudimo slėgis šilumos laidumą. Tyrimo įrangos principinė schema pateikta 11 paveiksle.



11 pav. Tyrimo metu naudotos įrangos schema: 1) slėgio apkrovimo laikiklis; 2) termoizoliacinė medžiaga; 3) apsauginis šildytuvo blokas; 4) pirminis šildytuvo blokas; 5) termoelektrinis generatoriaus modulis; 6) aušinimo blokas; 7) aušintuvo blokas; 8) slėgio jutiklis [25]

Tyrimo metu buvo gauta įtampos nuo elektros srovės priklausomybė, kuri buvo tiesiniu pavidalu, o galios nuo elektros srovės priklausomybė buvo gauta parabolės pavidalo. Taip pat gauta, kad didinant temperatūrų skirtumą, didėja galia.

Kitos tyrimo dalies rezultatai gauti tokie, kad turint termoizoliacinę medžiagą, TEG įtampa padidėja 2 % ir didėjant prispaudimo slėgiui įtampa išlieka vienoda arba mažai kinta (žr. 12 pav.). Bet atliekant tą patį eksperimentą, tik be izoliacinės medžiagos, didėjant prispaudimo slėgiui didėja ir įtampa. Tai galėjo lemti geresnis šilumos nukreipimas. Tokiu pačiu principu kinta ir TEG galios priklausomybė nuo prispaudimo slėgio.



12 pav. Parametrų priklausomybė nuo prispaudimo slėgio:

- a) įtampos priklausomybė nuo prispaudimo slėgio;
- b) galios priklausomybė nuo prispaudimo slėgio [25]

Galima teigti, kad šilumos laidumas priklauso ir nuo termoizoliacinės medžiagos, ir nuo įtaisų prispaudimo prie termoelektrinio generatoriaus [25].

1.3. Egzistuojančių sistemų analizė

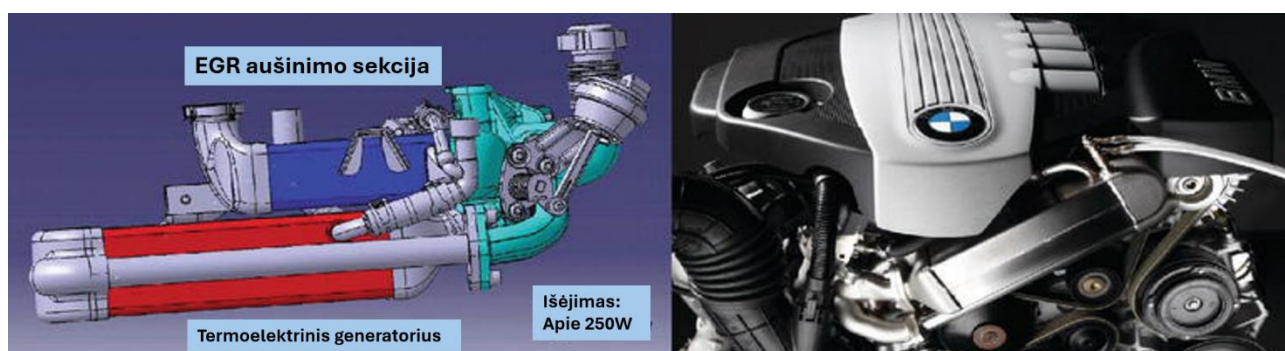
Tobulinant automobilius ir atsižvelgiant į energijos taupymus, „BMW“, „Honda“ ir kt. markių automobilių gamintojai taip pat tobulino termoelektrinių generatorių komponentus ir juos pritaikė automobiliuose. Gamintojai didžiąją dalį dėmesio skyrė į dujų išmetimo sistemoje atsirandančią šilumos energijos praradimą. Dėl šios priežasties TEG elementų tobulinimui buvo skirta daug dėmesio dėl naujos sistemos svorio ir dydžio. „BMW“ automobilio gamintojo naudojami TEG elementų veikimo principas yra pagrįstas Seebeck'o efektu, kai tarp dviejų sujungtų puslaidininkių temperatūros skirtumų atsiranda elektros srovė. [26]

Pirmasis TEG prototipas „BMW“ automobiliuose integruotas į dujų išmetimo sistemą. Šis buvo pademonstruotas visuomenėje 2008 m. ir prototipas tiekė maksimaliai 200 W galią. Šis prototipas buvo įmontuotas į 5 serijos „BMW“ automobilį, kuris turėjo V8 4,0 l darbinio tūrio dyzelinį variklį. Buvo pasirinktas skystinis generatoriaus aušinimas. Montavimo vieta parodyta 13 paveiksle. [26]



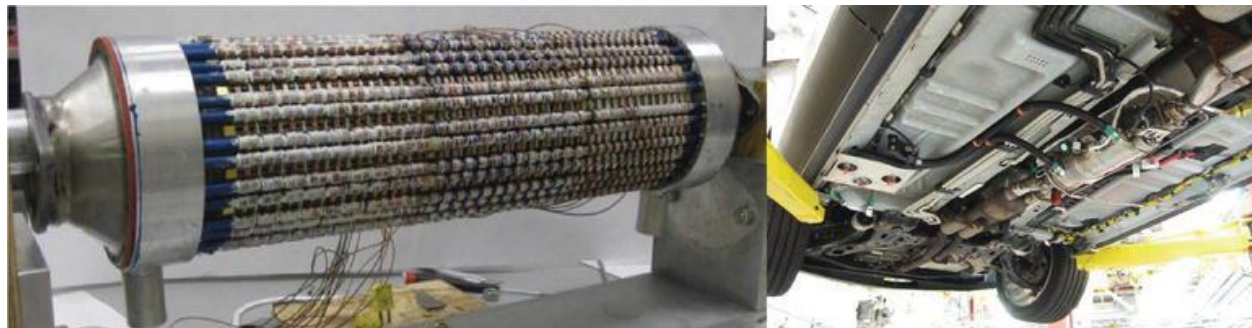
13 pav. „BMW“ automobilio pirmasis TEG prototipas [27]

2009 m. šios markės automobilių gamintojas išleido dar vieną prototipą, kurio maksimali generuojama galia siekė 250 W ir buvo montuojama ne išmetimo sistemoje, o išmetamųjų dujų recirkuliacijos sistemos radiatoriuje. Gamintojas teigė, kad ši sistema sumažina 2 % CO₂ išmetamąsias dujas ir degalų sąnaudas (žr. 14 pav.).



14 pav. „BMW“ automobilio antrasis TEG prototipas [26]

„Ford“ ir kiti gamintojai, kaip ir „BMW“ automobilių gamintojas siekė užtikrinti mažesnius išmetamųjų dujų rodiklius ir degalų sąnaudas. „Ford“ automobilių gamintojas pristatė termoelektrinį generatorių, kurio galia siekė 350 W. Šis TEG buvo įmontuotas į „Ford Lincoln MKT“ ir buvo atlikti bandymai pagal US06 važiavimo ciklą, o vidutinė generuojama galia siekė 180 W. Ši sumontuota sistema matoma paveiksle 15. [26][28]



15 pav. „Ford Lincoln MKT“ TEG prototipas [26]

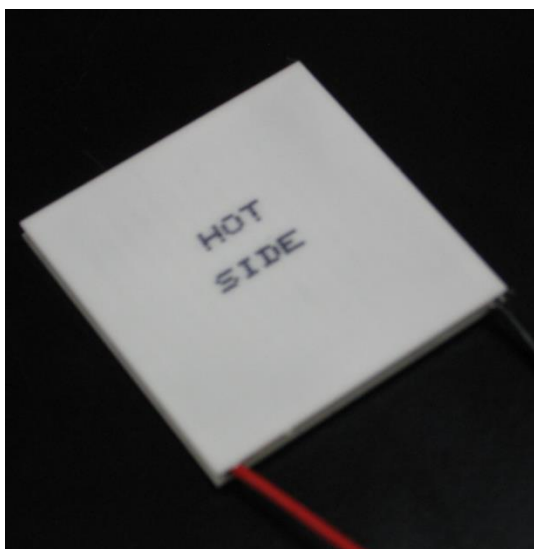
Automobilių komponentų gamintojas „Faurecia“ taip pat turėjo termoelektrinio generatoriaus prototipą, kuris buvo kompaktiškas ir lengvai montuojamas. Šią TEG sistemą buvo galima montuoti arti variklio, kad būtų gaunama maksimali šiluminė energija. „Faurecia“ teigė, kad ši sistema gali sumažinti degalų sąnaudas iki 7 %. [28]

2. Tiriama metodika

Prieš atliekant tyrimą buvo surasta tyrimo objekto specifikacija ir išanalizuotas pats objektas. Taip pat buvo surasta naudotų prietaisų specifikacijos ir aprašomos. Sudaroma tyrimo metodika t.y. kaip atliekamas tyrimas.

2.1. Tyrimo objektai

Tyrimui atlikti buvo pasirinktas termoelektrinis generatorius TEG (16 pav.)



16 pav. Termoelektrinis generatorius TEG [29]

Šio elemento specifikacija pateikta 1 lentelėje.

1 lentelė. Termoelektrinio generatoriaus TEG specifikacija [29]

Parametras	Reikšmė
Karštos pusės Maksimali temperatūra (°C)	300
Šaltos pusės Maksimali temperatūra (°C)	-30
Maksimali atviros grandinės įtampa (V)	10,7
Maksimali išėjimo įtampa (V)	5,3
Maksimali išėjimo srovė (A)	1
Šiluminės skvarbos intensyvumas (Wcm^{-2})	9,5

Šis termoelektrinis generatorius buvo įtaisytas į parodomąjį standą ir primontuotas prie automobilio išmetimo bakelio tikrinant efektyviausią termoelektrinio generatoriaus poziciją automobilyje.

Tyrimui atlikti buvo naudotas dyzelinis automobilis kurio variklio specifikacija pateikta 2 lentelėje.

2 lentelė. Termoelektrinio generatoriaus TEG specifikacija [30]

Parametras	Reikšmė
Variklio tūris (cm ³)	1968
Variklio galia (kW)	103
Maksimalus variklio sukimo momentas (Nm)	320
Degalų tipas	Dyzelinas

Prie šio automobilio išmetamųjų dujų sistemos bakelių buvo pritvirtinti termoelektriniai generatoriai. Dalis išmetamosios sistemos pavaizduota 17 paveiksle ir raudonomis rodyklėmis pažymėta termoelektrinių generatorių montavimo vietos.



17 pav. Eksperimento metu sukurtos TEG montavimo vietos [31]

Naudotame automobilyje išmetimo sistema turi du garso slopinimo bakelius ir dujų katalizatorių kuris įmontuotas arti variklio.

2.2. Naudoti prietaisai

Tyrimo metu buvo nustatinėjama karštosios ir šaltosios dalies temperatūros su „Plawee“ termoporomis, kurios prikomplektuojamos su LED ekranu temperatūrai rodyti (žr. 18 pav.). Kadangi bus atliekami keli tyrimai, šios termoporos bus naudojamos abejais atvejais.



18 pav. Termopora „Plawee“ su LED ekranu [32]

Šios termoporos specifikacija pateikta 3 lentelėje.

3 lentelė. Termoporos „Plawee“ su LED ekranu specifikacija [32]

Parametras	Reikšmė
Matavimo ribos	-30 – 300 °C
Atsinaujinimo dažnis	4 kartai per sekundę
Matavimo tikslumas	±0,3 °C
Maitinimo įtampa	12 V
Termoporos tipas	K

Kiekvienu tyrimo metu buvo naudojama 2 vienetai šių prietaisų, kad būtų palengvintas tyrimo procesas, tai yra nereikėtų tyrimo metu vis keisti termoporos pozicijos tarp karštosios ir šaltosios termoelektrinio generatoriaus pusių.

Stende buvo naudojamas vienas įtampos reguliatorius „Buck-Boost“ (žr. 19 pav.), kurio pagalba buvo keičiama termoelektriniame generatoriuje (kaitinamasis elementas) įtampa ir dėl šios priežasties keitėsi temperatūra.



19 pav. Įtampos reguliatorius „Buck-Boost“ su LED ekranu [33]

Šio įtampos reguliatoriaus specifikacija pateikta 4 lentelėje.

4 lentelė. Įtampos reguliatoriaus „Buck-Boost“ su LED ekranu specifikacija [33]

Parametras	Reikšmė
Įėjimo įtampos ribos	0,5 – 30 V
Išėjimo įtampos ribos	0,5 – 30 V
Įtampos ir srovės rodymo paklaida	0,01 V ir 0,01 A

Stendo elektrinei grandinei užmaitinti buvo naudojamas laboratorinis nuolatinės įtampos maitinimo blokas „WANPTEK“ (žr. 20 pav.). Šis tyrimo metu atstojo elektros maitinimo šaltinį.



20 pav. Įtampos maitinimo blokas „WANPTEK“ su LED ekranu [34]

Šio nuolatinės įtampos maitinimo bloko specifikacija pateikta 5 lentelėje.

5 lentelė. Įtampos maitinimo bloko „WANPTEK“ su LED ekranu specifikacija [34]

Parametras	Reikšmė
Maksimali atiduodama įtampa	30 V
Maksimali atiduodama srovė	10 A
Įtampos ir srovės rodymo paklaida	0,1 V ir 0,01 A

Kiekvieno tyrimo metu generuojamai įtampai matuoti buvo naudojamas universalus multimetras „Orangjo VC505“ (žr. 21 pav.).



21 pav. Universalus multimetras „Orangjo VC505“ [35]

Multimetro specifikacija pateikta 6 lentelėje.

6 lentelė. Universalaus multimetro „Orangjo VC505“ specifikacija [35]

Parametras	Reikšmė
Nuolatinės įtampos matavimo ribos	0-1000 V
Kintamos įtampos matavimo ribos	0-750 V
Nuolatinės srovės matavimo ribos	0-20 A
Kintamos srovės matavimo ribos	0-20 A
Varžos matavimo ribos	0-200 MΩ
Talpos matavimo ribos	0-200 μF
Atsinaujinimo dažnis	2 kartai per sekundę
Naudojimo temperatūra	0 - 40°C

Ant termoelektrinio generatoriaus plokštelių pusių buvo naudojama termopasta „nedis“ (žr. 22 pav.), kuri pagerina šilumos perdavimą iš vieno elemento į kitą, taip pagerinamas kontaktas su kitu paviršiumi.



22 pav. Termopasta „nedis“ [36]

Šios naudotos termopastos specifikacija pateikta 7 lentelėje.

7 lentelė. Termopastos „*nedis*“ specifikacija [36]

Parametras	Reikšmė
Šiluminis laidumas	4,63 W/mk
Temperatūros diapazonas	-30 – 300 °C

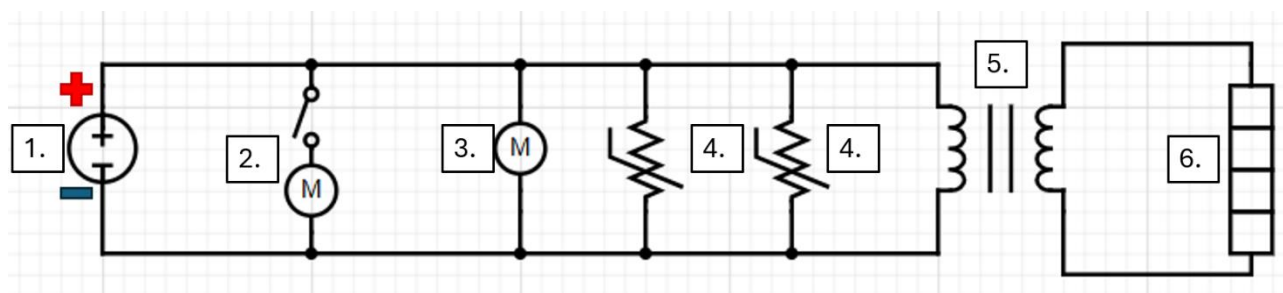
Kaip ir apžvelgtų tyrimų buvo pastebėta, kad reikalingas geras kontaktas tarp termoelektrinio generatoriaus paviršių, dėl šių priežasčių naudojama termopasta.

2.3. Tyrimo metodika

Prieš atliekant tyrimą termogeneratoriaus įtampos priklausomybei nuo temperatūrų skirtumo buvo sukonstruotas stendas, kurio pagalba nustatyta šių parametru priklausomybė. Konstruojant stendą buvo sudarytos principinės pajungimo schemos kurios paaiškina veikimo principą. Antroji tyrimo dalyje buvo nustatomi praktiškai pritaikant vieną termogeneratorių automobilyje.

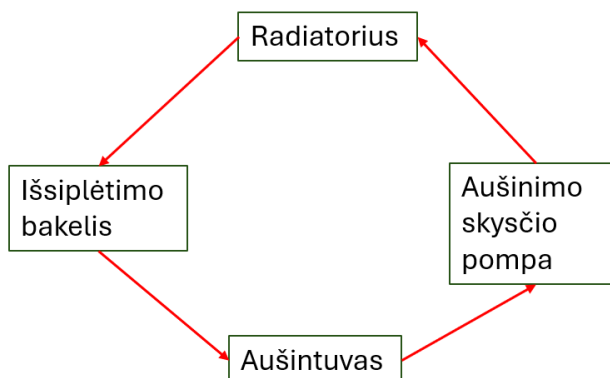
2.3.1. Tyrimo pirmasis etapas

Konstruojant stendą buvo sudarytos elektros grandinės, aušinimo ir pačio termoelektrinis generatoriaus principinės schemos. Sudarant elektrinę schemą nuspręsta visus elektrinius elementus sujungti lygiagrečiai kad būtų užtikrinta 12 V įtampa elektros grandinėje, tik iš įtampos reguliatoriaus į kaitinamąjį elementą (šiuo atveju naudojamas tas pats termoelektrinis generatorius) sujungti nuosekliai (žr. 23 pav.) [37].



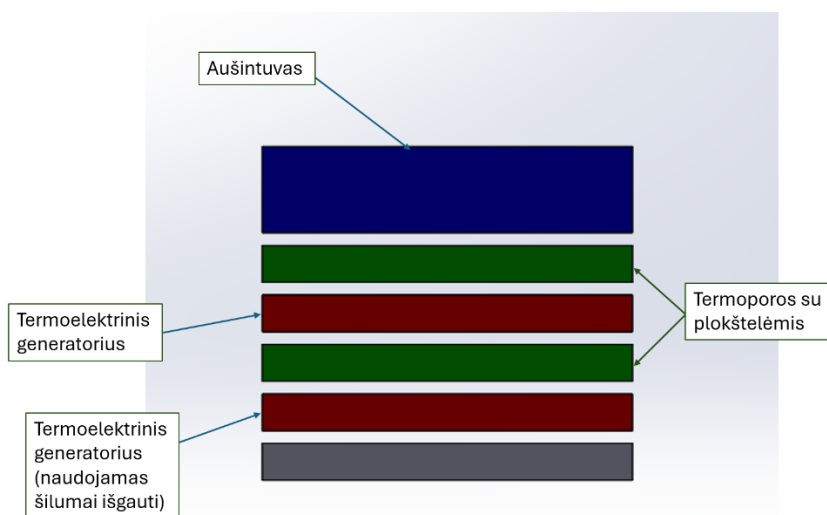
23 pav. Principinė elektros grandinės schema: 1. Nuolatinės elektros srovės šaltinis; 2. Ventilatorius su jungikliu; 3. Aušinimo skysčio pompa; 4. Termoporos; 5. Įtampos reguliatorius (transformatorius); 6. Kaitinimo elementas (termoelektrinio generatoriaus plokštelė arba tenas)

Sudarant aušinimo principinę schemą buvo pasirinkta paprastas sistemos principas: aušintuvas, aušinimo skysčio pompa, radiatorius, išsiplėtimo bakelis. Kaip ir išvardinta aušinimo skystis varinėjamas sistemoje ratu pro šiuos elementus aušinimo skysčio pompos pagalba (žr. 24 pav.).



24 pav. Termoelektrinio generatoriaus aušinimo principinė schema

Turint šias dvi elektrinę ir aušinimo principines schemas buvo sudaryta ir pačio termogeneratoriaus principinė schema kuri sudaryta iš aušintuvo kuris aušina termogeneratoriaus šaltąją dalį ir šios dalies temperatūra matuojama su „Plawee“ termopora. Pati termogeneratoriaus plokštelė kuri kaitinama su tokios pačios specifikacijos plokštele. Kaitinamojoje generatoriaus pusėje taip pat įmontuota termopora karštosios pusės temperatūrai nustatyti. Tarp šių visų paviršių buvo naudojama „nedis“ termopasta kuri užtikrina geresnį kontaktą ir šilumos nukreipimą į kūnus. Ši principinė schema pavaizduota 25 paveiksle.



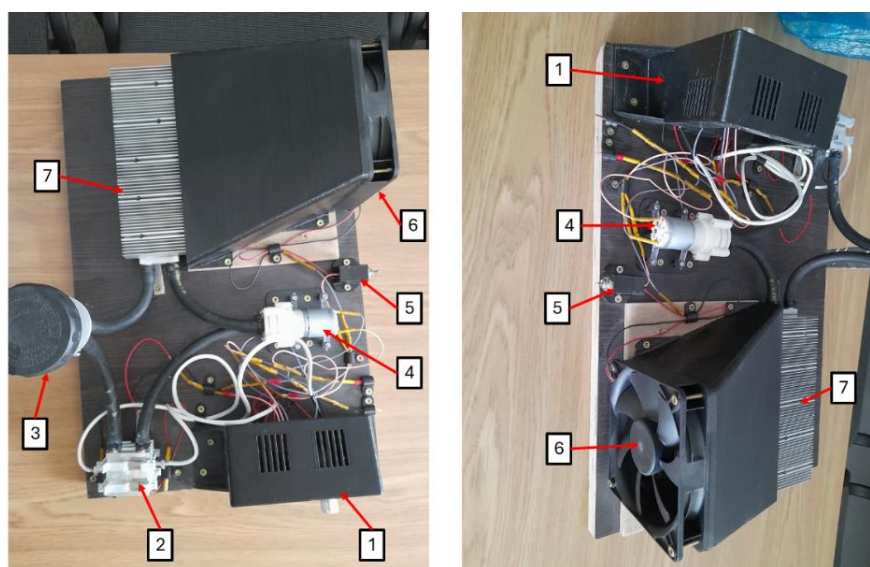
25 pav. Termoelektrinio generatoriaus bloko principinė schema

Turint principines schemas buvo sukonstruotas stendas (žr. 26 pav.).



26 pav. Termoelektrinio generatoriaus tiriamasis stendas

Taip pat šio stendo sandara pavaizduota paveiksle 27.

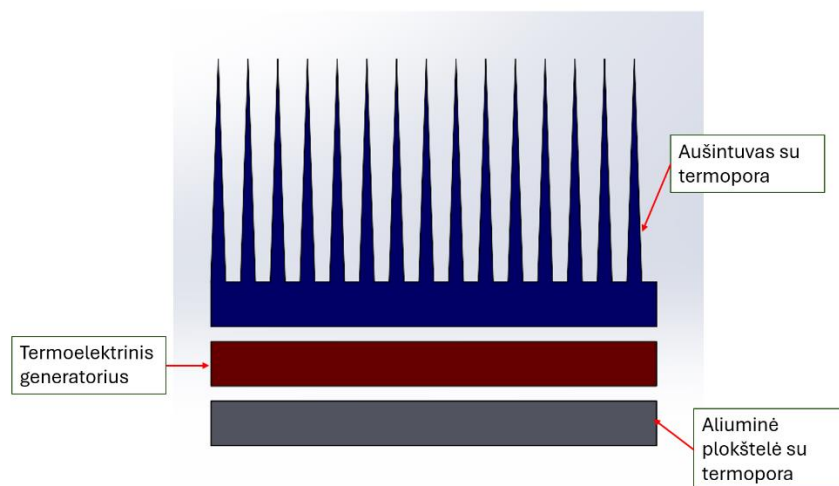


27 pav. Termoelektrinio generatoriaus tiriamojo stendo sandara: 1. Įtampos ir temperatūrų stebėjimo panelė; 2. Termoelektrinio generatoriaus blokas; 3. Aušinimo skysčio bakelis; 4. Aušinimo skysčio pompa; 5. Ventiliatoriaus jungiklis; 6. Ventiliatorius; 7. Radiatorius

Šio stendo pagalba buvo užtikrinama aušinimo vienoda temperatūra ir atliekamas tyrimas generuojamos įtampos dydžio priklausomybė nuo temperatūrų skirtumo tarp termogeneratoriaus plokštelės pusių nustatymui. Tyrimo metu buvo didinama kaitinamo elemento įtampa nuo 0 V iki 10,5 V, taip didinant kaitinama temperatūra nuo 0°C iki 70°C. Duomenys fiksuojami didinant kaitinamojo elemento įtampa kas 1 V. Eksperimentas buvo atliekamas 3 kartus, tokiu pačiu eiliškumu. Turint duomenis, kompiuterine įranga „Excel“ buvo apdoroti rezultatai.

2.3.2. Tyrimo antrasis etapas

Prieš atliekant antrojo tyrimo etapą buvo sudaryta termogeneratoriaus principinė schema. Šis termoelektrinis generatorius buvo aušinamas oru ir montuojamas ant automobilio išmetamųjų dujų sistemos bakelių. Pati termoelektrinį generatorių sudarė aliumininis aušintuvas (radiatorius), kuriame įmontuota „Palwee“ termopora, kuri naudojama šaltosios pusės temperatūrai nustatyti ir aliumininė plokštelė su termopora karštosios dalies temperatūros nustatymui (žr. 28 pav.).



28 pav. Termoelektrinio generatoriaus bloko principinė schema

Pagal principinę schema buvo pagamintas termoelektrinio generatoriaus blokas tarp kontaktinių paviršių dėl geresnio kontakto ir šilumos laidumo buvo naudojama termopasta „nedis“. Termoelektrinis generatorius buvo įmontuotas prie išmetamųjų dujų sistemos galinio bakelio metalinės juostos pagalba ir taip pat naudojant „nedis“ termopasta geresniam šilumos nukreipimui į karštąją pusę (žr. 29 pav.).



29 pav. Termoelektrinis generatorius ant automobilio išmetamųjų dujų galinio bakelio

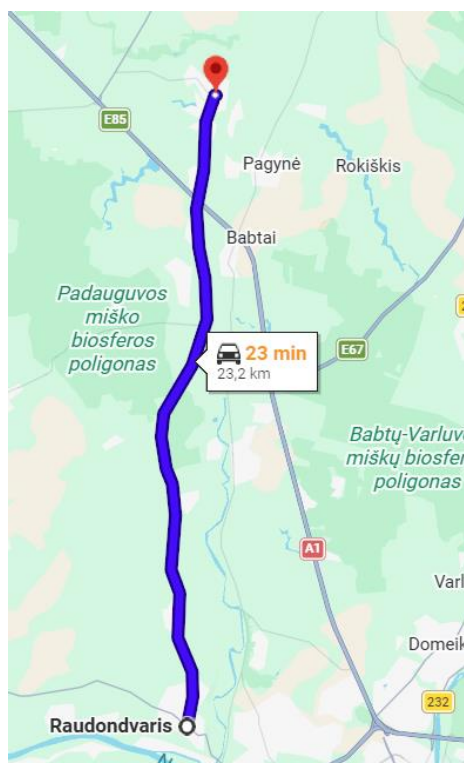
Sekantis termoelektrinio generatoriaus blokas buvo įmontuotas prie vidurinio išmetamųjų dujų sistemos bakelio. Buvo žinoma kad temperatūra yra didesnė apie 20 – 40 °C, dėl šios priežasties buvo naudojami didesni aušintuvai šiame termoelektrinio generatoriaus bloke (žr. 30 pav.).



30 pav. Termoelektrinis generatorius ant automobilio išmetamųjų dujų vidurinio bakelio

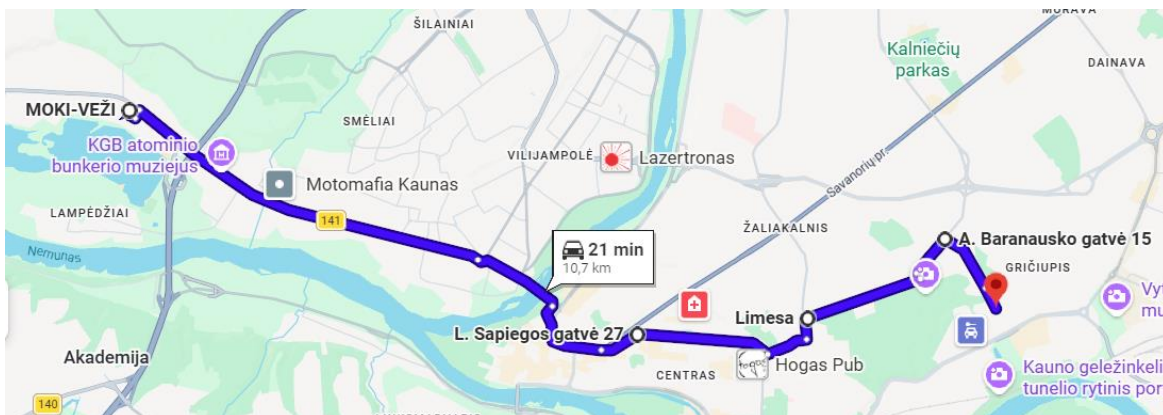
Patogiam generuojamos įtampos matavimui ir temperatūrų fiksavimui buvo praversti laidai į automobilio saloną.

Tyrimas buvo atliekamas prie temperatūrų -15 °C iki 15 °C kas 5 °C. Taip buvo atlikti 7 matavimai. Matavimai atlikti užmiesčio sąlygomis ir miesto sąlygomis. Visi tyrimo matavimai buvo atlikti kai automobilio variklio temperatūra siekė darbinę temperatūrą 95 °C, taip užtikrinamos vienodos sąlygos matavimams atlikti. Užmiesčio maršrutas pasirinktas 23 km ilgio šį ruožą automobilio greitis siekė 70 km/h (žr. 31 pav.). Duomenys fiksuojami kas 120 s.



31 pav. Užmiesčio maršrutas Panevėžiukas - Raudondvaris [38]

Miesto režime buvo pasirinktas maršrutas 10,7 km ilgio ir tyrimo metu buvo fiksuojami duomenys kas 84 s (žr. 32 pav.). Visi tyrimo matavimai buvo atlikti kai automobilio variklio temperatūra siekė darbinę temperatūrą 95 °C, taip užtikrinamos vienodos sąlygos matavimams atlikti. Miesto režime automobilio greitis neviršijo 50 km/h.



32 pav. Miesto maršrutas Raudondvario plento „MOKI-VEŽI“ - KTU studentų miestelis [38]

Matavimai buvo atlikti tokia eile pirmiausiai užmiesčio režimas vėliau miesto režimas.

Gauti duomenys apdoroti statistiškai programine įranga „Excel“. Statistiškai apdorojant buvo paskaičiuoti standartiniai nuokrypiai, pasikliautinumo intervalai ir santykinės paklaidos. Apskaičiuot standartinę paklaidą – buvo apskaičiuoti aritmetiniai vidurkiai generuojamos elektros įtampos, standartinis nuokrypis [39]:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i \quad (2.3.2.1)$$

čia \bar{q} – aritmetinis vidurkis; n – eksperimentų kiekis; q_i – gautos vertės.

Standartinio nuokrypio formulė:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}{n-1}} \quad (2.3.2.2)$$

čia s – eksperimentinė standartinis nuokrypis.

Standartinės paklaidos formulė:

$$u_q = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.3.2.3)$$

čia u_q – standartinė neapibrėžtis (paklaida).

Pasikliautinas intervalas (95 %) pagal Studento kriterijų buvo paskaičiuotas naudojant formulę:

$$u_s = t_{0,975,n-1} * \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.3.2.4)$$

čia u_s – pasikliautina neapibrėžtis (paklaida 95 %); $t_{0,975,n-1}$ – kritinė reikšmė pagal Studento kriterijų.

Santykinė paklaida paskaičiuota pagal formulę:

$$u_r = \frac{u_q}{\bar{q}} * 100\% \quad (2.3.2.5)$$

čia u_r – santykinė neapibrėžtis.

Atlikus statistinę analizę buvo nuspręsta ar rezultatai statistiškai patikimi. Įvertinus gamintojo pateiktus parametrus ir gautus realius parametrus buvo paskaičiuota koks maksimalus plokštelių kiekis gali būti naudojamas ant kiekvieno išmetamųjų dujų bakelių ir paskaičiuota kiek šie termoelektriniai generatoriai galėtų generuoti elektros galios.

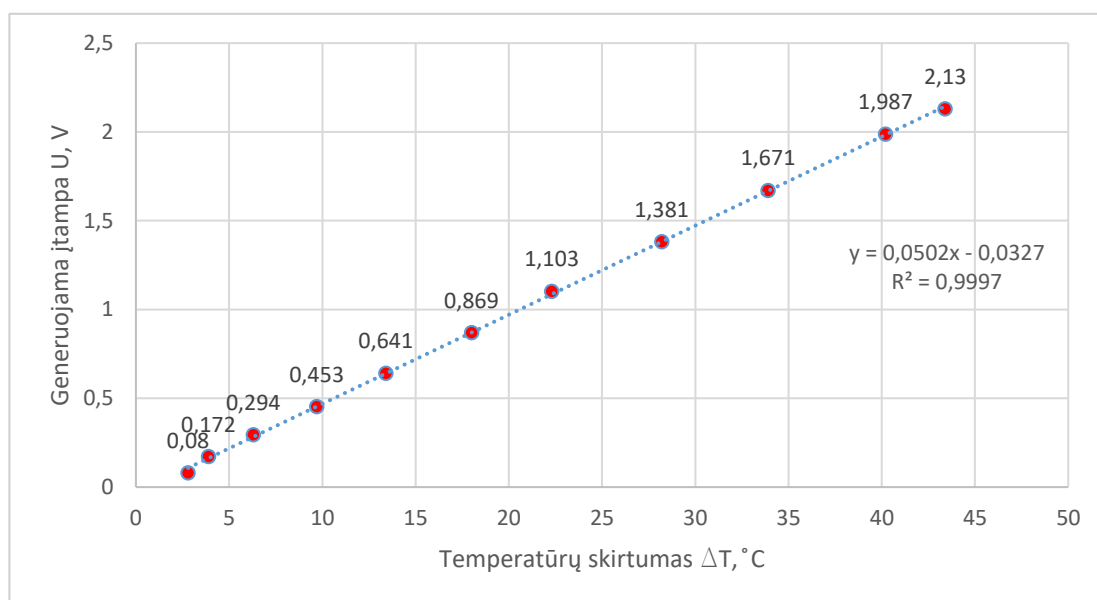
3. Tyrimo rezultatai

Įtampos priklausomybės nuo temperatūrų skirtumo tyrimas atliktas kai kambario temperatūra 18,5 °C. Rezultatai suvedami į „Excel“ programinę įrangą kurioje rezultatai apdoroti statistiškai.

Antroje tyrimo dalyje automobilio pastovus greitis užmiestyje 70 km/h. Mieste neviršijamas 50 km/h. Naudojama viena termoelektrinio generatoriaus plokštelė ant kiekvieno išmetamųjų dujų bakelių.

3.1. Įtampos priklausomybės nuo temperatūrų skirtumo nustatymas

Su sukonstruotu stendu buvo atliktas tyrimas, kurio metu buvo nustatyta tiesinė priklausomybė – didėjant temperatūrų skirtumui tarp šaltosios ir karštosios TEG plokštelės pusių, didėja tiesiškai generuojama elektros įtampa. Tyrimo metu buvo gauta šaltosios dalies maksimali temperatūra – 25,9 °C, o tuo tarpu karštosios dalies – 69,3 °C. Dėl šių temperatūrų skirtumo buvo generuojama 2,13 V atviros grandinės vidutinės elektros įtampos. Gautas Seebeck'o koeficientas yra -0,049 V/°C. Lyginant gautus rezultatus su jau atliktu panašiu tyrimu metu „Performance evaluation of the thermoelectric generator“ kurio autoriai Cotfas P. A., Cotfas D. T., Machidon'as O. M. ir Ciulavu Cristina esant apie 25 °C skirtumui buvo generuojama apie 0,25 V elektros įtampos [23], o Seebeck'o koeficientas siekė vos 10,45 mV/°C. Taip pat Cotfas P.A. ir kitų autorių tyrime buvo gauta tiesinė priklausomybė generuojamos įtampos (atviros grandinės) nuo temperatūrų skirtumo (tarp karštosios ir šaltosios termoelektrinio generatoriaus pusių). „Excel“ programine įranga buvo gauta, kad rezultatai atitinka teorinį tiesinį modelį, gautas tiesinis modelis $y = 0,0502x - 0,0327$ ir determinacijos koeficientas kuris gautas 0,9997. Toks aukštas determinacijos koeficientas rodo, kad rezultatai yra išsidėstę glaudžiai aplink gautą tiesinį modelį. Tai pat atliekant tyrimą reikšmės svyravo labai mažai $\pm 0,05$ V dėl šios priežasties galima teigti, kad rezultatai yra gan patikimi nes nėra didelių trikdžių.



33 pav. Termoelektrinio generatoriaus stendo generuojamos atviros grandinės vidutinių įtampų tyrimo rezultatai

Tyrimo metu buvo bandoma pritaikyti taškines termoporas taip panaikinant aliumines plokšteles karštoje ir šaltoje dalyje, bet bandymo metu pastebėta, kad kaitinimo metu šaltojoje dalyje temperatūra kilo lygiagrečiai su karštosios dalies temperatūra ir generuojama temperatūra nesiekė

0,05 V, o temperatūrų skirtumas visą laiką liko tas pats – apie 4°C. Galima teigti, kad kaitinant tiesiogiai TEG elemento karštąją dalį kaista ir šaltoji dalis, dėl to sumažėja ir Seebeck'o efektas, kuris siekė -0,0125 V/°C. Seebeck'o koeficiente esantis minuso ženklas rodo elektros įtampos kryptį.

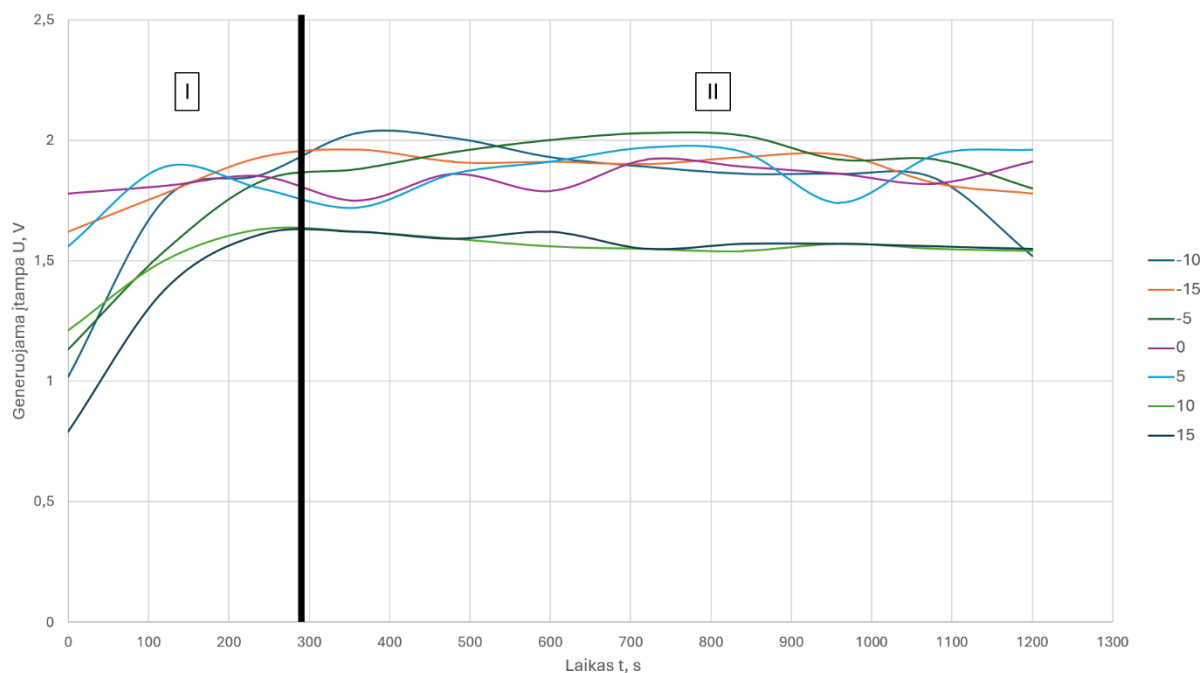
3.2. Automobilyje įmontuotų termoelektrinių generatorių rezultatai

Termoelektriniai generatoriai buvo įmontuoti prie galinio ir vidurinio išmetamųjų dujų bakelių. Tyrimai buvo atliekami nuo -15°C iki 15°C, kas 5°C (7 tyrimai). Kiekvienu tyrimo metu buvo stebiami galinis ir vidurinis termoelektriniai generatoriai ir fiksuojami duomenys. Prieš atliekant tyrimus buvo pašildomas variklis iki darbinės temperatūros, pasiekus šią temperatūrą pradeda važiuoti ir pasiekus reikiamą greitį (mieste – 50 km/h, užmiestyje – 70 km/h) buvo pradėti fiksuoti duomenys.

3.2.1. Galinio bakelio termoelektrinio generatoriaus rezultatai

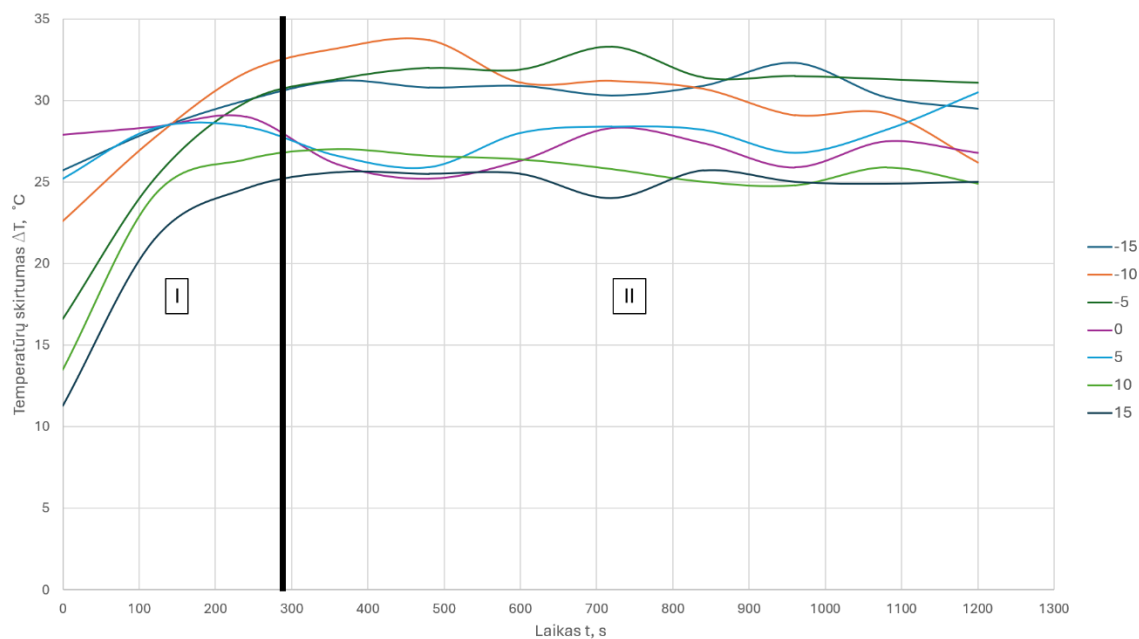
Atliekant tyrimą buvo pastebėta, kad galinio išmetamųjų dujų bakelio termoelektrinis generatorius generavo didesnę atviros grandinės elektros įtampą esant šaltesnėms aplinkos temperatūroms tiek miesto sąlygomis, tiek užmiesčio sąlygomis. Gauti rezultatai suvesti į „Excel“ programinę įrangą ir pavaizduoti grafiškai. Užmiesčio režimo rezultatai pateikti 34 paveiksle kuriame pateikta, kaip bėgant laikui kito generuojama įtampa, o 35 paveiksle pavaizduota, kaip kito temperatūrų skirtumas tarp šiltosios ir karštosios dalies.

Iš generuojamos įtampos rezultatų yra matoma (žr. 34 pav.), kad pirmi fiksuoti duomenys tyrimų metu buvo mažesnių reikšmių (1 dalyje grafiko), nei visų likusių tyrimų metu (2 dalis grafiko). Taip galėjo atsitikti dėl dar vis sušilusio aušintuvo nuo išmetamųjų dujų sistemos. Laikui bėgant galima teigti kad, aušintuvas buvo atvėsintas iki pastovios temperatūros. Mažiausia generuojama elektros įtampa buvo fiksuota esant 15°C aplinkos temperatūroje, kuri siekė 1,55 V neskaitant pradinių fiksuotų verčių kurių mažiausia reikšmė – 0,79 V. Didžiausia generuojama elektros įtampa buvo fiksuota esant -10°C aplinkos temperatūrai, vertė siekė – 2,03 V. Tai rodo, kad kai aplinkos temperatūra yra žemesnė nei 0°C užtikrinamas geresnis termoelektrinio generatoriaus aušinimas. Esant -15°C aplinkos temperatūrai pastabėta, kad automobilio išmetimo sistema taip pat geriau aušinasi ir karštosios dalies temperatūra yra žemesnė, nei kai aplinkos temperatūra yra -10°C.



34 pav. Galinio bakelio termoelektrinio generatoriaus generuojamos įtampos rezultatai esant skirtingoms aplinkos temperatūroms užmiesčio režime: I dalis – bakelio išilimo laikotarpis; II dalis – pasiekta bakelio pastovi temperatūra

35 paveiksle pateiktas tyrimų metu gautas temperatūrų skirtumo tarp karštosios ir šaltosios dalies kitimas eksperimento metu. Iš gautų rezultatų galima teigti kad, didžiausias temperatūrų skirtumas – 33,7°C fiksuotas esant -10°C aplinkos temperatūrai. Mažiausias temperatūrų skirtumas – 24°C fiksuotas esant 15°C aplinkos temperatūrai, nevertinant pradinių 4 fiksuotų reikšmių (1 dalis grafiko). Pastebėta kad, esant -15°C aplinkos temperatūrai skirtumas taip pat sumažėjo, kaip ir generuojama įtampa. Šio sumažėjimo priežastis – labiau aušinama išmetamųjų dujų sistema.



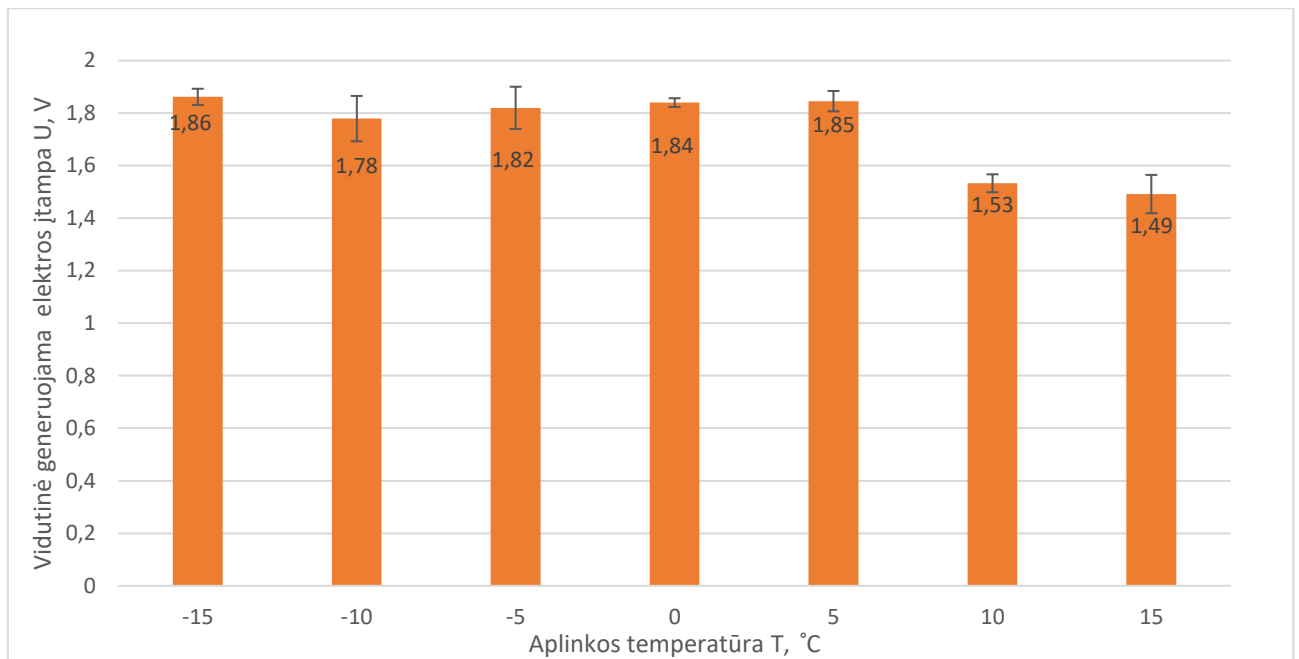
35 pav. Galinio bakelio termoelektrinio generatoriaus temperatūrų skirtumo rezultatai esant skirtingoms aplinkos temperatūroms užmiesčio režime: I dalis – bakelio išilimo laikotarpis; II dalis – pasiekta bakelio pastovi temperatūra

Gauti rezultatai buvo apdoroti statistiškai „Excel“ programine įranga. Vidurkiai ir paklaidos pateikti 8 lentelėje. Su gautais rezultatais atlikus statistinius skaičiavimus buvo gauta, kad didžiausia generuojama vidutinė elektros įtampos reikšmė siekė 1,86 V, o pasikliautinas 95 % intervalas sudaro $\pm 0,021$ V. Galima teigti, kad tikroji įtampos reikšmė su 95 % patikimumu yra $1,86 \pm 0,021$ V. Šio rezultato santykinė paklaida siekė 1,11 %. Apibendrinant visus gautus šiuos rezultatus galima teigti, kad 95 % intervalai yra ganėtinai maži ir užtikrina gerą rezultatų pakartojamumą, o santykinės paklaidos svyruoja nuo 0,6 % iki 3,28 %, tai rodo gerą rezultatų tikslumą neviršija 5 %, bet turi nedidelių nuokrypių (triukšmų).[40]

8 lentelė. Galinio bakelio termoelektrinio generatoriaus generuojamos įtampos vidurkiai ir paklaidos (užmiestis)

Aplinkos temperatūra, °C	Atviros elektros grandinės įtampos vidurkis, V	Atviros elektros grandinės įtampos standartinė paklaida	Pasikliautinas intervalas vidutinės generuojamos elektros grandinės (95 %)	Santykinė paklaida, %	Seebeck koeficientas V/°C
-15	1,86	0,031	$\pm 0,021$	1,11	-0,062
-10	1,78	0,086	$\pm 0,058$	3,26	-0,060
-5	1,82	0,081	$\pm 0,054$	2,97	-0,062
0	1,84	0,017	$\pm 0,011$	0,60	-0,068
5	1,85	0,039	$\pm 0,026$	1,41	-0,067
10	1,53	0,034	$\pm 0,023$	1,50	-0,064
15	1,49	0,073	$\pm 0,049$	3,28	-0,064

Taip pat šie duomenys pavaizduoti grafiškai (vidurkiai ir standartinės paklaidos) (1 pav.). Iš gautų vidurkių ir standartinių paklaidų galima teigti kad, didžiausia vidutinė generuojama elektros įtampa siekė 1,86 V esant -15 °C aplinkos temperatūrai, tyrimo paklaida siekė $\pm 0,031$ V. Mažiausia vidutinė generuojama įtampa siekė 1,49 V esant 15 °C aplinkos temperatūros, tyrimo paklaida siekė $\pm 0,073$ V. Iš gautų vidutinių verčių galima teigti kad, prie automobilio išmetamųjų dujų galinio bakelio įmontuotas termoelektrinis generatorius efektyviausiai generavo užmiestis režime, kai lauko temperatūra siekė 0 °C, nes gautas Seebeck'o koeficientas siekė -0,068 V/°C. Mažesnės Seebeck'o koeficientų vertės buvo gautos, kai aplinkos temperatūra buvo žemesnė už 0 °C. Tai rodo galinio termoelektrinio generatoriaus efektyvumas geresnis užmiestis režime, kai aplinkos temperatūra didesnė nei -5 °C. Remiantis gautais rezultatais nustatyta, kad didėjant aplinkos temperatūrai termoelektrinis generatorius generuoja mažesnę įtampą.

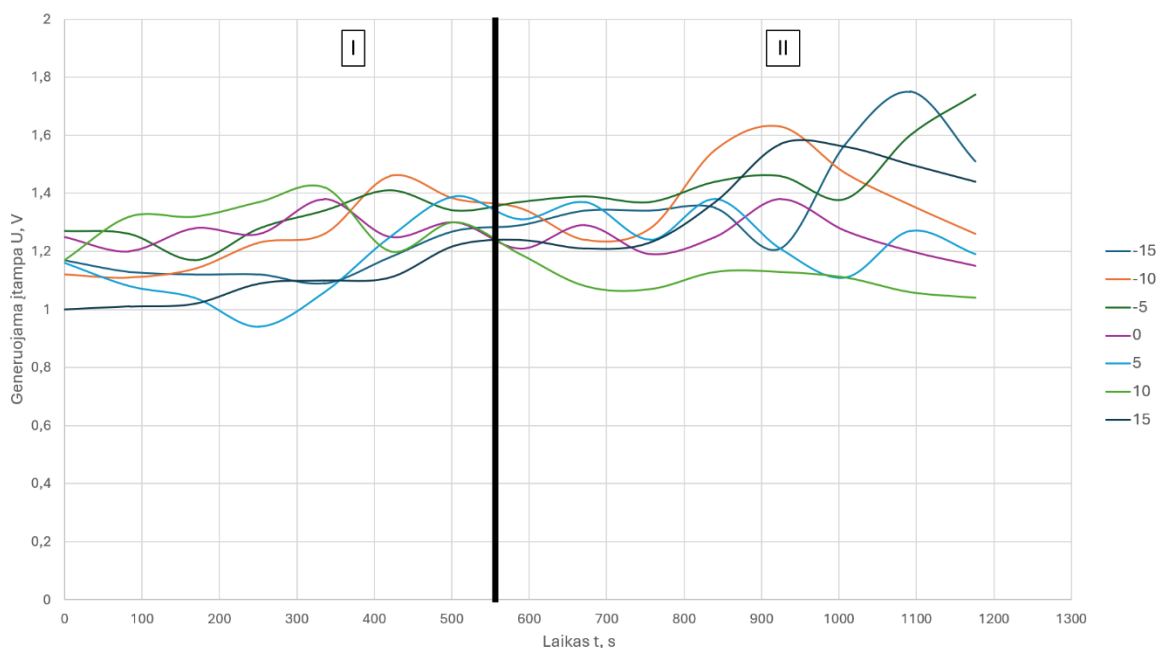


36 pav. Galinio bakelio termoelektrinio generatoriaus generuojamos įtampos vidurkiai esant skirtingoms aplinkos temperatūroms užmiesto režime

Miesto sąlygomis gauti rezultatai yra šiek tiek mažesni nei užmiestyje gauti. Taip yra dėl to, kad vidutinis automobilio greitis tyrimo metu buvo mažesnis nei užmiestyje, miesto režime greitis apie 50 km/h.

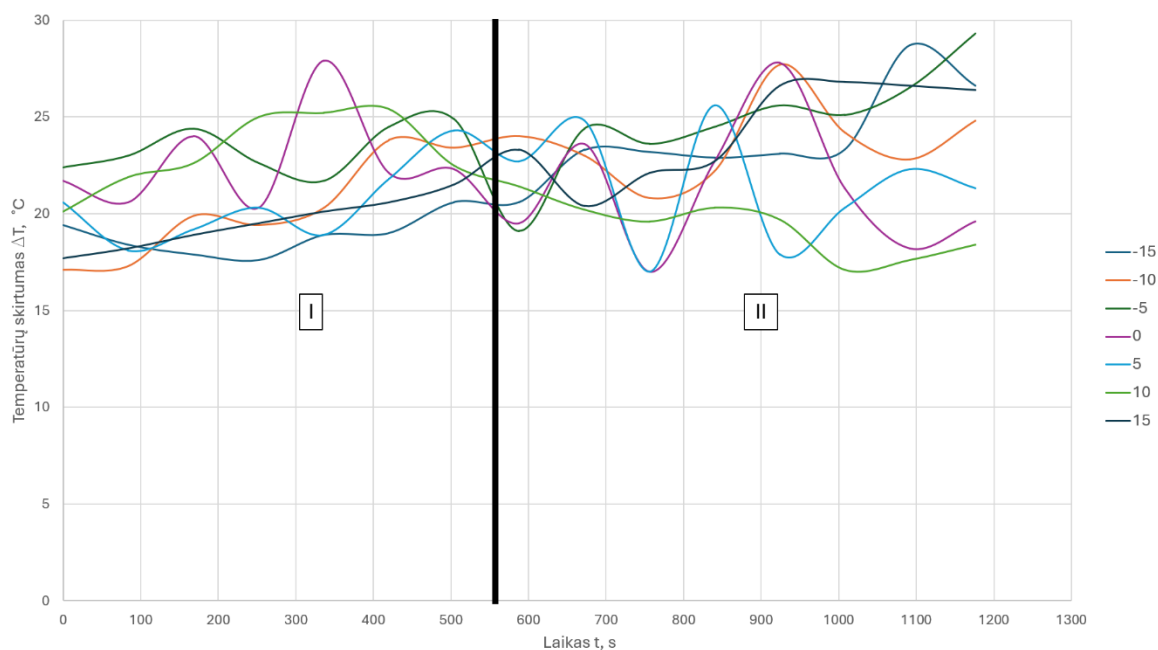
Gauti rezultatai suvesti į „Excel“ programinę įrangą ir pavaizduoti grafiškai. Miesto režimo rezultatai pateikti 37 paveiksle kuriame pateikta kaip kito generuojama įtampa bėgant laikui, o 38 paveiksle pavaizduota kaip kito temperatūrų skirtumas tarp šiltosios ir karštosios dalies laikui bėgant.

Iš 37 paveikslo generuojamos įtampos rezultatų yra matoma kad, fiksuojamos vertės labai svyravo kiekvieno tyrimo metu. Taip galėjo atsitikti dėl sustojimų prie šviesoforų kurių metu buvo neaušinamas pakankamai aušintuvas ir šaltosios dalies reikšmės buvo fiksuotos didesnės, dėl to ir generuojama įtampa buvo mažesnė. I dalyje grafiko dažni automobilio sustojimai, o II dalyje reti automobilio sustojimai. Mažiausia generuojama įtampos vertė buvo fiksuota esant 5°C aplinkos temperatūrai, kuri siekė 0,94 V. Didžiausia generuojama įtampa buvo fiksuota esant -15°C aplinkos temperatūrai, vertė siekė 1,75 V. Tai rodo, kad kai aplinkos temperatūra yra žemesnė nei 0°C užtikrinamas geresnis galinio termoelektrinio generatoriaus aušinimas miesto režime, bet miesto režime ir svarbus aušinimo užtikrinimas, nes pastebėta, kad greičio mažinimas darė įtaką aušinimo pablogėjimui.



37 pav. Galinio bakelio termoelektrinio generatoriaus generuojamos įtampos rezultatai esant skirtingoms aplinkos temperatūroms miesto režime: I dalis – dažni automobilio sustojimai; II dalis – reti automobilio sustojimai

Paveiksle 38 pateikta temperatūrų skirtumas tarp karštosios ir šaltosios dalies tyrimų metu. Iš gautų rezultatų galima teigti, kad didžiausias temperatūrų skirtumas $29,3^{\circ}\text{C}$ fiksuotas kai aplinkos temperatūra siekė -5°C . Mažiausias temperatūrų skirtumas $17,1^{\circ}\text{C}$ fiksuotas, kai aplinkos temperatūra siekė 10°C . Pastebėta, kad temperatūrų skirtumas priklauso nuo automobilio judėjimo greičio mieste, sustojimų skaičių prie šviesoforų ar praleidžiant pėsčiuosius per perėja. Šie svyravimai matomi pikais tiek tyrime esant 5°C aplinkos temperatūros, tiek esant 0°C .



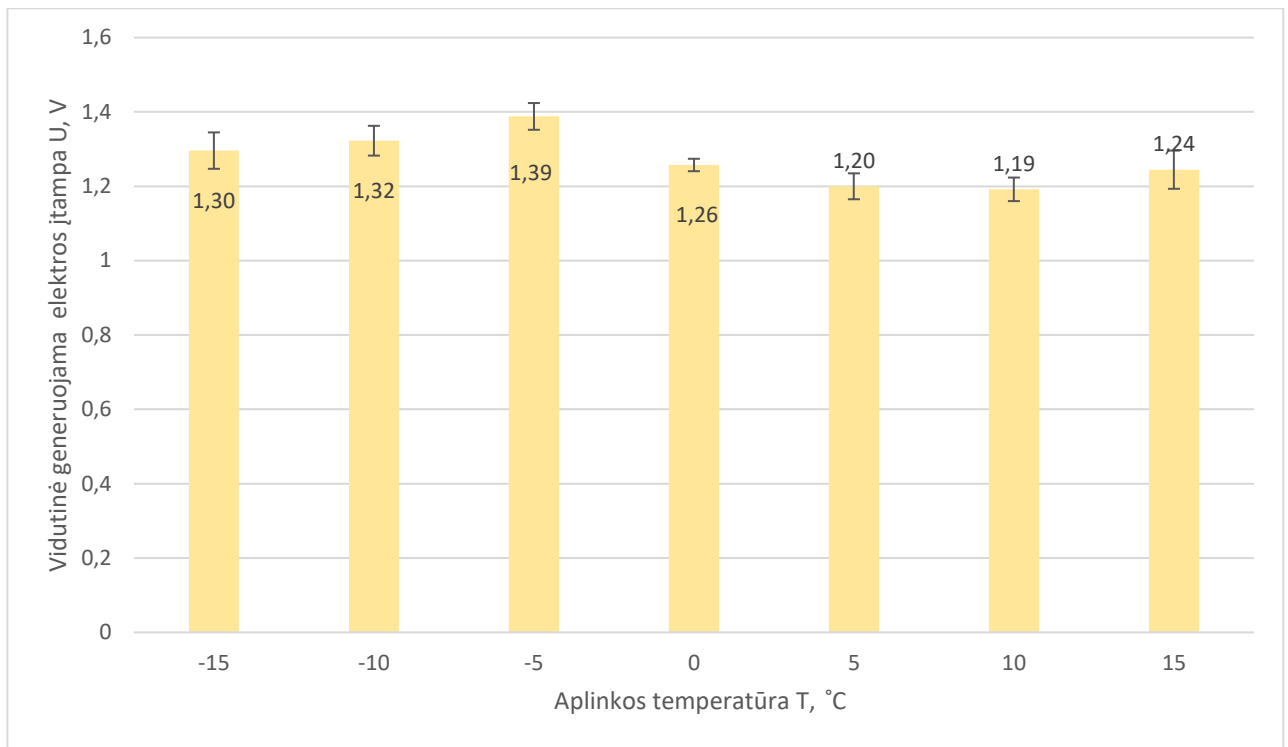
38 pav. Galinio bakelio termoelektrinio generatoriaus temperatūrų skirtumo rezultatai esant skirtingoms aplinkos temperatūroms miesto režime: I dalis – dažni automobilio sustojimai; II dalis – reti automobilio sustojimai

Gauti rezultatai buvo apdoroti statistiškai „Excel“ programine įranga. Vidurkiai ir paklaidos pateikti 9 lentelėje. Su gautais rezultatais atlikus statistinius skaičiavimus buvo gauta, kad didžiausia generuojama vidutinė elektros įtampos reikšmė miesto režimu siekė 1,39 V, o pasikliautinas 95 % intervalas sudaro $\pm 0,020$. Galima teigti, kad tikroji įtampos reikšmė su 95 % patikimumu yra $1,39 \pm 0,02$ V. Šio rezultato santykinė paklaida siekė 1,44 %. Apibendrinant visus gautus šiuos rezultatus galima teigti, kad 95 % intervalai yra gan maži ir užtikrina gera rezultatų pakartojamumą (rezultatų pasikliautinų intervalai neviršijo 0,05), o santykinės paklaidos svyruoja nuo 0,74 % iki 2,29 %, tai rodo gerą rezultatų tikslumą neviršija 5 %, bet turi nedidelių nuokrypių (triukšmų).

9 lentelė. Galinio bakelio termoelektrinio generatoriaus generuojamos įtampos vidurkiai ir paklaidos (miestas)

Aplinkos temperatūra, °C	Atviros elektros grandinės įtampos vidurkis, V	Atviros elektros grandinės įtampos standartinė paklaida	Pasikliautinas intervalas vidutinės generuojamos elektros grandinės (95 %)	Santykinė paklaida, %	Seebeck koeficientas, V/°C
-15	1,30	0,049	$\pm 0,027$	2,09 %	-0,060
-10	1,32	0,04	$\pm 0,022$	1,68 %	-0,060
-5	1,39	0,036	$\pm 0,020$	1,44 %	-0,058
0	1,26	0,017	$\pm 0,009$	0,74 %	-0,058
5	1,2	0,035	$\pm 0,019$	1,61 %	-0,057
10	1,19	0,032	$\pm 0,018$	1,47 %	-0,057
15	1,24	0,051	$\pm 0,028$	2,29 %	-0,056

Taip pat šie duomenys pavaizduoti grafiškai (vidurkiai ir standartinės paklaidos) (39 pav.). Iš gautų vidurkių ir standartinių paklaidų galima teigti kad, didžiausia vidutinė generuojama elektros įtampa siekė 1,39 V esant -5°C aplinkos temperatūrai, tyrimo paklaida siekė $\pm 0,036$ V. Mažiausia vidutinė generuojama įtampa siekė 1,19 V esant 10°C aplinkos temperatūros, tyrimo paklaida siekė $\pm 0,032$ V. Iš gautų vidutinių verčių galima teigti kad, prie automobilio išmetamųjų dujų galinio bakelio įmontuotas termoelektrinis generatorius efektyviausiai generavo miesto režime, kai lauko temperatūra siekė -10°C ir -15°C , nes gautas Seebeck'o koeficientas siekė $-0,06$ V/°C. Mažesnės Seebeck'o koeficientų vertės buvo gautos, kai aplinkos temperatūra buvo aukštesnė už -5°C . Tai rodo galinio termoelektrinio generatoriaus efektyvumas geresnis miesto režime, kai aplinkos temperatūra didesnė nei -5°C . Remiantis gautais rezultatais nustatyta, kad didėjant aplinkos temperatūrai termoelektrinis generatorius generuoja mažesnę įtampą. Iš 39 paveikslo matyti, kad generuojamos vidutinės įtampos vertės mažėja didėjant aplinkos temperatūrai.



39 pav. Galinio bakelio termoelektrinio generatoriaus generuojamos įtampos vidurkiai esant skirtingoms aplinkos temperatūroms miesto režime

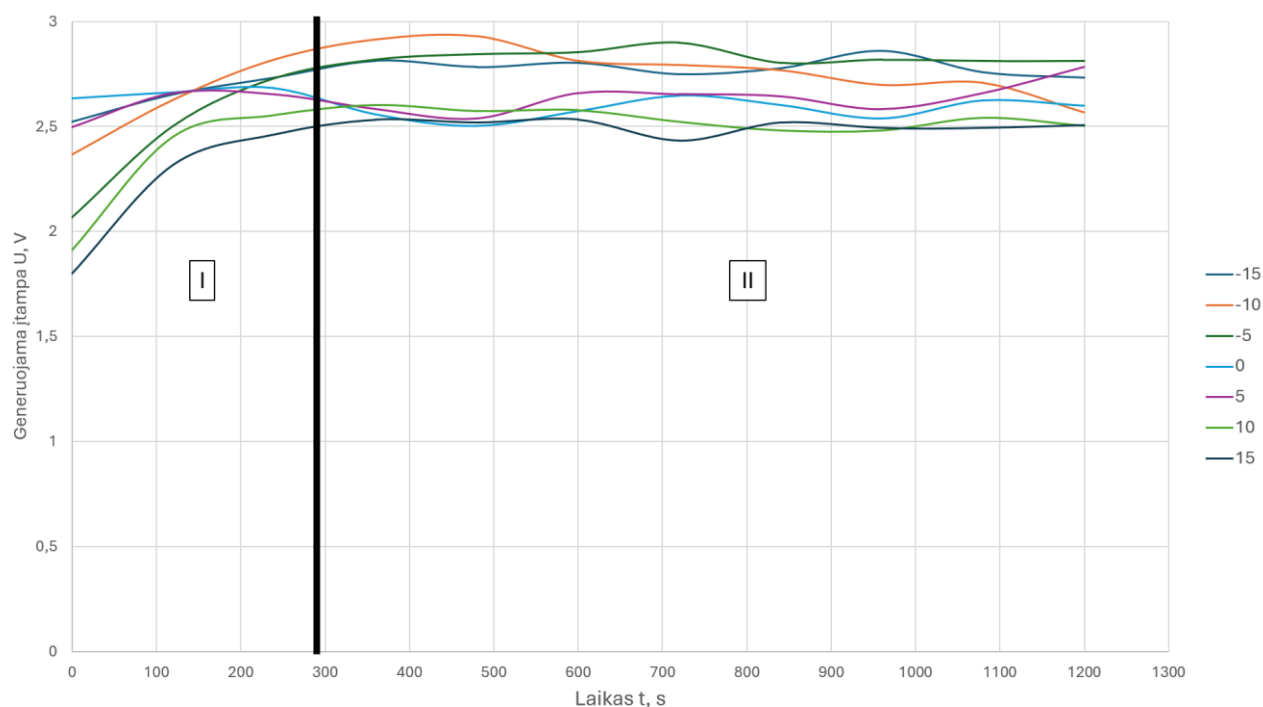
Gautus rezultatus lyginant su jau darytu tyrimu „Exhaust heat harvesting of automotive engine using thermoelectric generation technology“ kurį atliko Md. Asaduzzaman‘as ir kiti buvo gauta, generuojama atviros grandinės įtampa 21 V, bet šiame tyrime buvo naudojami 6 termoelektriniai elementai (TEG) ir naudojamos aukštesnės temperatūros, bei tyrimas atliktas stende (kur užtikrinamos stabilios aušinimo sąlygos) [41]. O atlikto tyrimo metu buvo naudojamas vienas termoelektrinis elementas su kuriuo buvo pasiekta atviros grandinės generuojama elektros įtampa 2,03 V užmiesčio režime kur buvo pastovus automobilio greitis 70 km/h. Eksperimentų sąlygos yra skirtingos. Taip pat pagal gautas vidutines vertes galima teigti, kad didėjant aplinkos temperatūrai mažėja generuojama elektros įtampa, taip atsitinka dėl blogesnio termoelektrinio generatoriaus aušinimo.

3.2.2. Vidurinio bakelio termoelektrinio generatoriaus rezultatai

Vidurinio išmetamųjų dujų bakelio termoelektrinio generatoriaus rezultatai buvo fiksuojami taip pat kaip ir galinio bakelio termoelektrinio generatoriaus. Pastebėta, kad vidurinis bakelis įšilo labiau ir temperatūra buvo didesnė, nei galinio išmetamųjų dujų bakelio (~20 – 40 °C). Taip pat kaip ir vidurinio bakelio rezultatų fiksavime taip ir šiame gauti rezultatai suvesti į „Excel“ programine įranga ir pavaizduoti grafiškai. Užmiesčio režimo rezultatai pateikti 40 paveiksle kuriame pateikta kaip kito generuojama įtampa bėgant laikui, o paveiksle 41 pavaizduota kaip kito temperatūrų skirtumas tarp šiltosios ir karštosios dalies laikui bėgant.

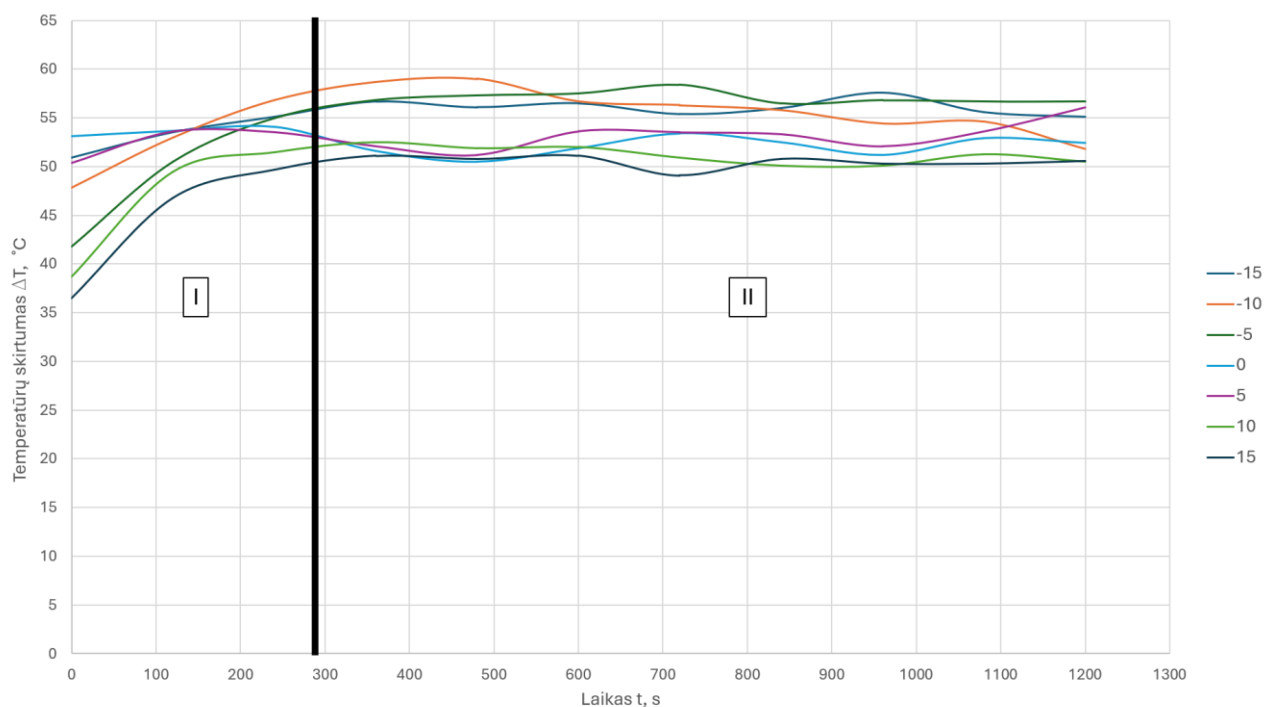
Iš generuojamos įtampos rezultatų yra matoma (žr. 40 pav.), kad pirmi fiksuoti duomenys tyrimų metu buvo mažesnių reikšmių (1 dalyje grafiko), nei visų likusių tyrimų metu (2 dalis grafiko). Taip galėjo atsitikti dėl dar vis sušilusio aušintuvo nuo išmetamųjų dujų sistemos. Laikui bėgant galima teigti kad, aušintuvas buvo atvėsintas iki pastovios temperatūros, kaip ir įvyko su galiniu termoelektriniu generatoriumi. Mažiausia generuojama elektros įtampos vertė buvo fiksuota esant

15 °C aplinkos temperatūroje, kuri siekė 2,43 V neskaitant pradinių fiksuotų verčių kurių mažiausia reikšmė – 1,8 V. Didžiausia generuojama elektros įtampa buvo fiksuota esant -10°C aplinkos temperatūrai, vertė siekė – 2,91 V. Tai rodo, kad kai aplinkos temperatūra yra žemesnė nei 0°C užtikrinamas geresnis termoelektrinio generatoriaus aušinimas.



40 pav. Vidurinio bakelio termoelektrinio generatoriaus generuojamos įtampos rezultatai esant skirtingoms aplinkos temperatūroms užmiesčio režime: I dalis – bakelio įšilimo laikotarpis; II dalis – pasiekta bakelio pastovi temperatūra

41 paveiksle pateiktas tyrimų metu gautas temperatūrų skirtumas tarp karštosios ir šaltosios dalies kitimas eksperimento metu. Iš gautų rezultatų galima teigti kad, didžiausias temperatūrų skirtumas – 59°C fiksuotas esant -10°C aplinkos temperatūrai. Mažiausias temperatūrų skirtumas – 49,1°C fiksuotas esant 15°C aplinkos temperatūrai, nevertinant pradinių fiksuotų reikšmių tai yra, I dalis grafiko. Pastebėta kad, esant žemesnei nei 0°C aplinkos temperatūrų skirtumas yra didesnis nei kai aplinkos temperatūra yra didesnė nei 0°C.



41 pav. Galinio bakelio termoelektrinio generatoriaus temperatūrų skirtumo rezultatai esant skirtingoms aplinkos temperatūroms užmiestio režime: I dalis – bakelio įšilimo laikotarpis; II dalis – pasiekta bakelio pastovi temperatūra

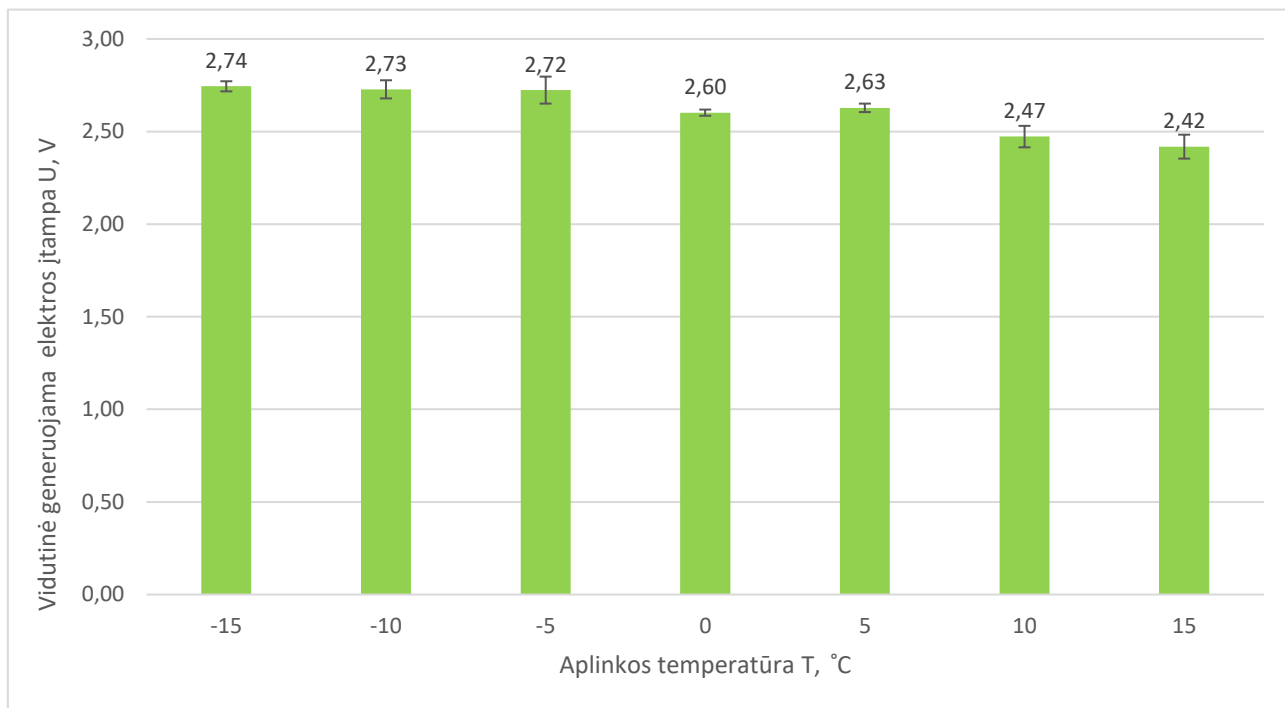
Gauti rezultatai buvo apdoroti statistiškai „Excel“ programine įranga. Vidurkiai ir paklaidos pateikti 10 lentelėje. Su gautais rezultatais atlikus statistinius skaičiavimus buvo gauta, kad didžiausia generuojama vidutinė elektros įtampos reikšmė siekė 2,74 V, o pasikliautinas 95 % intervalas sudaro $\pm 0,018$ V. Galima teigti, kad tikroji įtampos reikšmė su 95 % patikimumu yra $2,74 \pm 0,018$ V. Šio rezultato santykinė paklaida siekė 0,67 %. Apibendrinant visus gautus šiuos rezultatus galima teigti, kad 95 % intervalai yra gan maži ir užtikrina gera rezultatų pakartojamumą, o santykinės paklaidos svyruoja nuo 0,43 % iki 1,8 %, tai rodo gerą rezultatų tikslumą neviršija 5 %, bet turi labai mažų nuokrypių.

10 lentelė. Vidurinio bakelio termoelektrinio generatoriaus generuojamos įtampos vidurkiai ir paklaidos (užmiestis)

Aplinkos temp., °C	Atviros elektros grandinės įtampos vidurkis, V	Atviros elektros grandinės įtampos standartinė paklaida	Pasikliautinas intervalas vidutinės generuojamos elektros grandinės (95 %)	Santykinė paklaida, %	Seebeck koeficientas V/°C
-15	2,74	0,027	$\pm 0,018$	0,67	-0,0496
-10	2,73	0,049	$\pm 0,033$	1,21	-0,0496
-5	2,72	0,073	$\pm 0,049$	1,80	-0,0496
0	2,6	0,017	$\pm 0,011$	0,43	-0,0496
5	2,63	0,023	$\pm 0,015$	0,59	-0,0496
10	2,47	0,058	$\pm 0,039$	1,58	-0,0495
15	2,42	0,065	$\pm 0,043$	1,80	-0,0495

Taip pat šie duomenys pavaizduoti grafiškai (vidurkiai ir standartinės paklaidos) (42 pav.). Iš gautų vidurkių ir standartinių paklaidų galima teigti kad, didžiausia vidutinė generuojama elektros įtampa

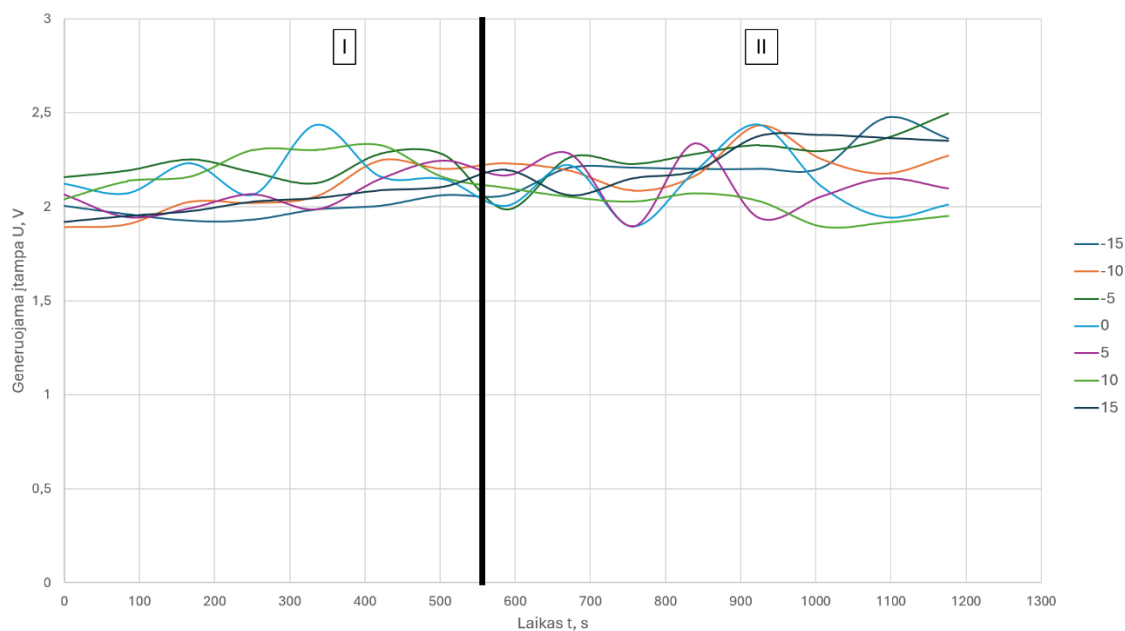
siekė 2,74 V esant $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ aplinkos temperatūrai, tyrimo paklaida siekė $\pm 0,027\text{ V}$. Mažiausia vidutinė generuojama įtampa siekė 2,42 V esant $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ aplinkos temperatūros, tyrimo paklaida siekė $\pm 0,065\text{ V}$. Iš gautų vidutinių verčių galima teigti kad, prie automobilio išmetamųjų dujų vidurinio bakelio įmontuotas termoelektrinis generatorius efektyviausiai generavo užmiesčio režime, kai lauko temperatūra siekė $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir mažiau, nes gautas Seebeck'o koeficientas siekė $-0,0496\text{ V}/^{\circ}\text{C}$. Mažesnės Seebeck'o koeficientų vertės buvo gautos, kai aplinkos temperatūra buvo didesnė už $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tai rodo vidurinio termoelektrinio generatoriaus efektyvumas geresnis užmiesčio režime, kai aplinkos temperatūra žemesnė nei $5\text{ }^{\circ}\text{C}$.



42 pav. Vidurinio bakelio termoelektrinio generatoriaus generuojamos įtampos vidurkiai esant skirtingoms aplinkos temperatūroms užmiesčio režime

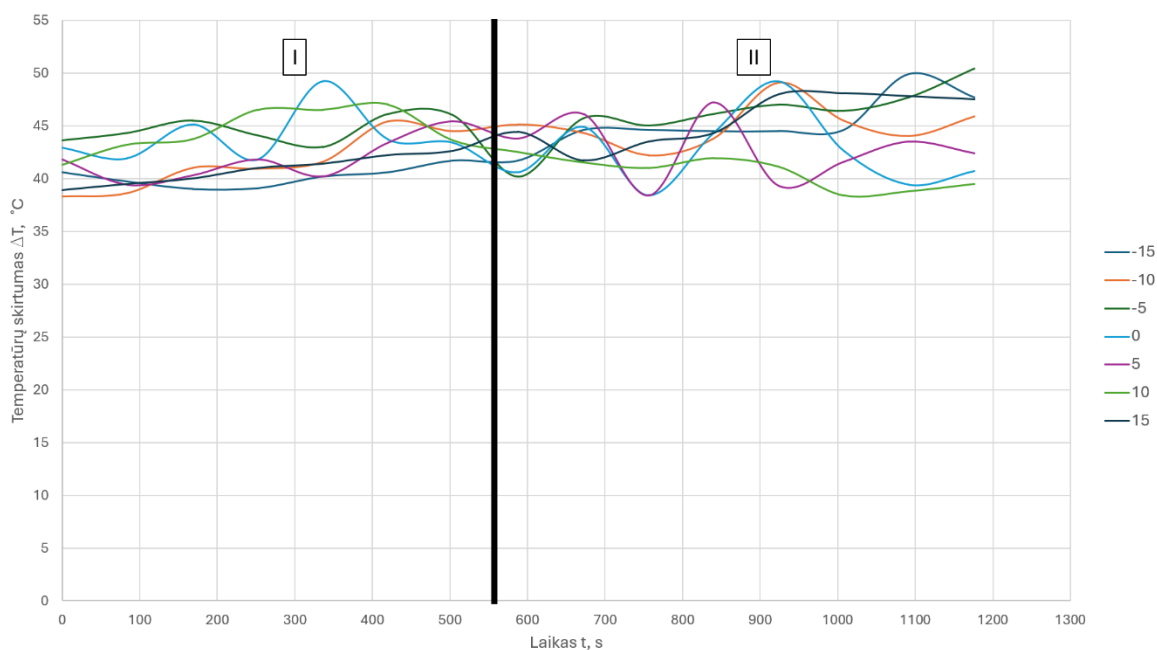
Miesto sąlygomis gauti rezultatai yra mažesni nei užmiestyje gauti. Gauti rezultatai suvesti į „Excel“ programinę įrangą ir pavaizduoti grafiškai. Miesto režimo rezultatai pateikti 43 paveiksle kuriame pateikta kaip kito generuojama įtampa bėgant laikui, o paveiksle 44 pavaizduota kaip kito temperatūrų skirtumas tarp šiltosios ir karštosios dalies laikui bėgant.

Iš 43 paveikslo generuojamos įtampos rezultatų yra matoma kad, fiksuojamos vertės labai svyravo kiekvieno tyrimo metu. Taip galėjo atsitikti dėl sustojimų prie šviesoforų kurių metu buvo neaušinamas pakankamai aušintuvas ir šaltosios dalies reikšmės buvo fiksuotos didesnės, dėl to ir generuojama įtampa buvo mažesnė. Vidurinio bakelio termoelektrinio generatoriaus vertės fiksuotos tuo pačiu momentu kaip ir galinio dėl šios priežasties verčių kitimo tendencija labai panaši tarpusavyje. I dalyje grafiko dažni automobilio sustojimai, o II dalyje reti automobilio sustojimai. Mažiausia generuojama įtampos vertė buvo fiksuota esant $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ aplinkos temperatūrai, kuri siekė 2,02 V. Didžiausia generuojama įtampa buvo fiksuota esant $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ aplinkos temperatūrai, vertė siekė 2,47 V.



43 pav. Vidurinio bakelio termoelektrinio generatoriaus generuojamos įtampos rezultatai esant skirtingoms aplinkos temperatūroms miesto režime: I dalis – dažni automobilio sustojimai; II dalis – reti automobilio sustojimai

Paveiksle 44 pateikta temperatūrų skirtumas tarp karštosios ir šaltosios dalies tyrimų metu. Iš gautų rezultatų galima teigti, kad didžiausias temperatūrų skirtumas $49,9^{\circ}\text{C}$ fiksuotas kai aplinkos temperatūra siekė -15°C . Mažiausias temperatūrų skirtumas $38,4^{\circ}\text{C}$ fiksuotas, kai aplinkos temperatūra siekė 10°C . Pastebėta, kad kaip ir įtampos grafike, antrojoje grafiko dalyje pastebimas didelis svyravimas dėl dažno sustojimų miesto režime.



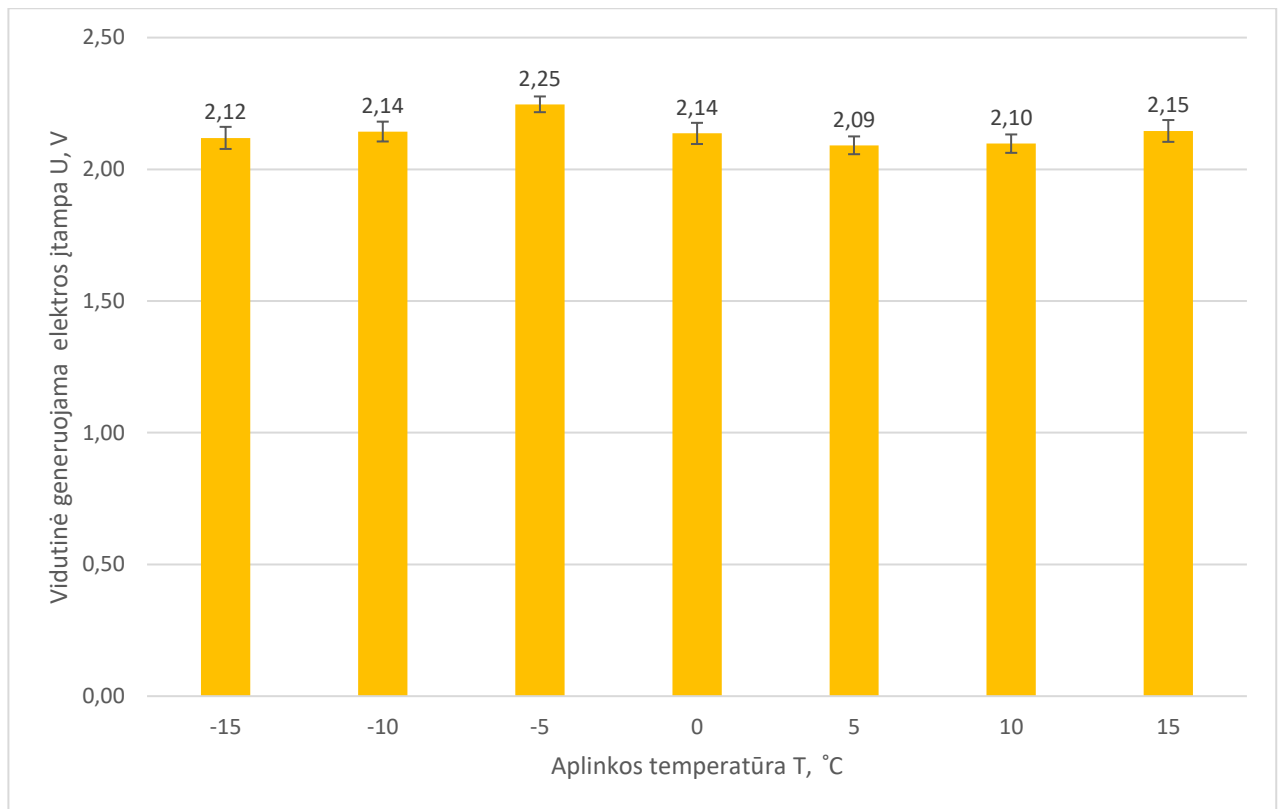
44 pav. Vidurinio bakelio termoelektrinio generatoriaus temperatūrų skirtumo rezultatai esant skirtingoms aplinkos temperatūroms miesto režime: I dalis – dažni automobilio sustojimai; II dalis – reti automobilio sustojimai

Gauti rezultatai buvo apdoroti statistiškai „Excel“ programine įranga. Vidurkiai ir paklaidos pateikti 11 lentelėje. Su gautais rezultatais atlikus statistinius skaičiavimus buvo gauta, kad didžiausia generuojama vidutinė elektros įtampos reikšmė miesto režimu siekė 2,25 V, o pasikliautinas 95 % intervalas sudaro $\pm 0,02$ V. Galima teigti, kad tikroji įtampos reikšmė su 95 % patikimumu yra $2,25 \pm 0,02$ V. Šio rezultato santykinė paklaida siekė 0,89 %. Apibendrinant visus gautus šiuos rezultatus galima teigti, kad 95 % intervalai yra gan maži ir užtikrina gera rezultatų pakartojamumą (rezultatų pasikliautinų intervalai neviršijo 0,05), o santykinės paklaidos svyruoja nuo 0,89 % iki 1,33 %, tai rodo gerą rezultatų tikslumą (neviršija 5 %), bet turi nedidelių nuokrypių (triukšmų).

11 lentelė. Vidurinio bakelio termoelektrinio generatoriaus generuojamos įtampos vidurkiai ir paklaidos (miestas)

Aplinkos temp., °C	Atviros elektros grandinės įtampos vidurkis, V	Atviros elektros grandinės įtampos standartinė paklaida,	Pasikliautinas Intervalas (95 %)	Santykinė paklaida, %	Seebeck koeficientas V/°C
-15	2,12	0,042	$\pm 0,028$	1,33	-0,0494
-10	2,14	0,038	$\pm 0,025$	1,18	-0,0494
-5	2,25	0,030	$\pm 0,020$	0,89	-0,0495
0	2,14	0,040	$\pm 0,027$	1,26	-0,0494
5	2,09	0,034	$\pm 0,023$	1,09	-0,0494
10	2,1	0,035	$\pm 0,023$	1,12	-0,0494
15	2,15	0,041	$\pm 0,028$	1,30	-0,0494

Taip pat šie duomenys pavaizduoti grafiškai (vidurkiai ir standartinės paklaidos) (žr. 45 pav.). Iš gautų vidurkių ir standartinių paklaidų galima teigti kad, didžiausia vidutinė generuojama elektros įtampa siekė 2,25 V esant -5°C aplinkos temperatūrai, tyrimo paklaida siekė $\pm 0,03$ V. Mažiausia vidutinė generuojama įtampa siekė 2,09 V esant 5°C aplinkos temperatūros, tyrimo paklaida siekė $\pm 0,034$ V. Iš gautų vidutinių verčių galima teigti kad, prie automobilio išmetamųjų dujų galinio bakelio įmontuotas termoelektrinis generatorius efektyviausiai generavo miesto režime, kai lauko temperatūra siekė -5°C , nes gautas Seebeck'o koeficientas siekė $-0,0495$ V/°C. Šiek tiek mažesnės Seebeck'o koeficientų vertės buvo gautos, kai aplinkos temperatūra buvo tiek aukštesnė tiek žemesnė už -5°C . Tai rodo galinio termoelektrinio generatoriaus efektyvumas geresnis miesto režime, kai aplinkos temperatūra yra -5°C . Bet atsižvelgiant į Seebeck'o koeficientą galima teigti, kad termoelektrinis generatorius veikė vienodu efektyvumu visais darytais tyrimais. Iš 39 paveikslo matyti, kad generuojamos vidutinės įtampos vertės mažėja didėjant aplinkos temperatūrai.



45 pav. Vidurinio bakelio termoelektrinio generatoriaus generuojamos atviros grandinės įtampos vidurkiai esant skirtingoms aplinkos temperatūroms miesto režime

Lyginant tarpusavį vidurinio bakelio ir galinio bakelio rezultatus galima teigti, kad galinio bakelio termoelektrinis generatorius veikia efektyviau, nes gauti Seebeck'o koeficientai yra didesni: mieste siekė $-0,067 \text{ V/}^\circ\text{C}$, užmiestyje $-0,06 \text{ V/}^\circ\text{C}$. O tuo tarpu vidurinio bakelio gautas Seebeck'o koeficientai gauti: mieste siekė $-0,0495 \text{ V/}^\circ\text{C}$, užmiestyje $-0,0496 \text{ V/}^\circ\text{C}$. Taip pat pagal gautas vidutines vertes galima teigti, kad didėjant aplinkos temperatūrai mažėja generuojama elektros įtampa, taip atsitinka dėl blogesnio termoelektrinio generatoriaus aušinimo.

Išvados

1. Atlikta išsami straipsnių ir literatūros analizė, kurios metu buvo nustatytas termoelektrinio elemento veikimo principas bei svarbiausi montavimo aspektai. Pagrindiniai montavimo aspektai, kurie užtikrina gerą termoelektrinio elemento veikimą yra tokie kaip: termopasta tarp lietimosi paviršių, geras prispaudimas, kuris užtikrintų kontaktą tarp paviršių ir užtikrinamas geras aušinimas dėl didesnio temperatūrų skirtumo tarp termoelektrinio elemento pusių.
2. Sukurtas termoelektrinis stendas ištirti įtampos priklausomybę nuo temperatūrų skirtumo. Taip pat buvo sudarytos principinės schemos ir eksperimento su automobilio išmetimo sistema metodika: parengti eksperimento maršrutai, greitis užmiestyje 70 km/h ir mieste 50 km/h, duomenų fiksavimo laikai.
3. Atlikus eksperimentinius bandymus buvo nustatyta, kad stendo maksimali vidutinė generuojama atviros grandinės įtampa siekė 2,13 V, standartinė paklaida $\pm 0,05$ V. Automobilio bandymai atlikti esant lauko temperatūrai nuo -15 iki 15. Maksimali generuojama atviros grandinės vidutinė įtampa siekė 2,74 V ir standartinė paklaida siekė $\pm 0,027$ V. Šis rezultatas užfiksuotas užmiestyje su vidurinio bakelio termoelektriniu generatoriumi. Norint išgauti didesnę generuojama įtampą reikėtų naudoti daugiau termoelektrinių elementų. Efektyviausiai veikė termoelektrinis generatorius galiniame bakelyje, nes palyginant rezultatus Seebeck'o koeficientas siekė nuo -0,06 V/°C iki -0,067 V/°C galiniame, o viduriniame nuo -0,0494 V/°C iki -0,0497 V/°C. Taip galėjo atsitikti dėl galiniame bakelyje geresnio termogeneratoriaus aušinimo.
4. Gautus rezultatus statistiškai apdorojus „Excel“ programine įranga buvo gauta, kad generuojama atviros grandinės įtampa siekė nuo 1,19 V iki 2,74 V, standartinės paklaidos siekė nuo $\pm 0,017$ V iki $\pm 0,089$ V, santykinės paklaidos siekė nuo 0,59 % iki 3,26 %. Pagal gautus rezultatus matoma, kad didėjant aplinkos temperatūrai mažėja generuojama vidutinė įtampa tiek su viduriniu bakeliu, tiek su galiniu bakeliu. Stende fiksuoti rezultatai kito tiesiškai ir determinacijos koeficientas buvo gautas 0,0997, tai rodo, kad rezultatai yra glaudžiai išsidėstę apie tiesinį modelį $y = 0,0502x - 0,0327$.

Literatūros sąrašas

1. Haidar, J.G., Ghogel, J.I. *Waste heat recovery from the exhaust of low-power diesel engine using thermal electric generators*. In Proc. 20th Int. Conf. Thermoelectrics, Beijing: China; 2001. pp.413– 417. DOI:[10.1109/ICT.2001.979919](https://doi.org/10.1109/ICT.2001.979919) [žiūrėta 2026-02-17].
2. Yao D-J, Yeh K-J, Hsu C-T, Yu B-M, Lee J-S. *Efficient reuse of waste energy*. IEEE Nanotechnology Mag, 3: 2009. pp. 28-33. [žiūrėta 2026-02-17]
3. Dhingra, A.; Kumar, D.; Saini, V. *Thermo Electric Generator*. IRE J. 2018, 1,pp. 158–163. ISSN: 2456-8880 [žiūrėta 2026-02-17].
4. LaGrandeur J, Crane B and Eder A 2005 DEER Conference (Chicago/IL) LaGrandeur, J., Crane, D., Eder, A. 2005. *Vehicle Fuel Economy Improvement through Thermoelectric Waste Heat Recovery*, DEER Conference, 2005, Chicago, IL, USA. [žiūrėta 2026-01-05]. Prieiga per internetą: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f9/2005_deer_crane.pdf [žiūrėta 2026-02-17].
5. Hsiao, Y.Y., Chang, W.C., Chen, S.L. *A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine*. Energy, 2010. pp. 35. 1447-1454. DOI:[10.1016/j.energy.2009.11.030](https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.11.030) [žiūrėta 2026-02-17].
6. Liang, G., Zhou, J. and Huang, Z. *Analytical model of parallel thermoelectric generator*. Applied Energy, pp. 88. 5193-5199. DOI:[10.1016/j.apenergy.2011.07.041](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.07.041) [žiūrėta 2026-02-17].
7. Ragupathi P., Debabrata Barik, Satheesh Kumar S., Abisha Meji M., Seepana Praveenkumar. *Experimental analysis on the thermoelectric effect of various solid-state devices used for direct conversion of thermal energy into electrical energy*. Results in Engineering, vol. 23, 2024, doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102752. Prieiga per internetą: [Experimental analysis on the thermoelectric effect of various solid-state devices used for direct conversion of thermal energy into electrical energy - ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com/journal/Results-in-Engineering) [žiūrėta 2025-02-16].
8. L. D. Zhao, V. P. Dravid and M. G. Kanatzidis, *The panoramic approach to high performance thermoelectrics*, Energy and Environmental Science, vol. 7, 2014 pp. 251-268. DOI:[10.1039/c3ee43099e](https://doi.org/10.1039/c3ee43099e) [žiūrėta 2025-02-16].
9. Niu, X., Yu, J., Wang, S. *Experimental study on low-temperature waste heat thermoelectric generator*. J. of Power Sources, 2009. 188(2): 621-626. DOI:[10.1016/j.jpowsour.2008.12.067](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.12.067) [žiūrėta 2026-02-17].
10. Kim, S., Park, S., Kim, S., Rhi, S.H. *A thermoelectric generator using engine coolant for light-duty internal combustion Engine-Powered Vehicles*. Journal of Electronic Materials. 2011. 40(5): 812-816. DOI:[10.1007/s11664-011-1580-6](https://doi.org/10.1007/s11664-011-1580-6) [žiūrėta 2026-02-17].
11. Thacher, E. F., Helenbrook, B. T., Karri, M. A., Richter, C. J. *Testing of an automobile exhaust thermoelectric generator in a light truck*. Proc. IMechE Vol. 221 Part D: J. Automobile Engineering, 2007. pp. 95-107. DOI:[10.1243/09544070JAUTO51](https://doi.org/10.1243/09544070JAUTO51) [žiūrėta 2026-02-17].
12. Sugiarta N., Sastra Negara P. *Technical Feasibility Evaluation on The Use of A Peltier Thermoelectric Module to Recover Automobile Exhaust Heat*. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 953. 2017. DOI 10.1088/1742-6596/953/1/012090. [žiūrėta 2026-02-17].
13. Kanatzidis, M.G. *Nanostructured Thermoelectrics: The New Paradigm?* Chem. Mater. 2010, 22, 648 DOI:[10.1021/cm902195j](https://doi.org/10.1021/cm902195j) [žiūrėta 2026-02-17].

14. Vaqueiro, P.; Powell, A.V. *Recent developments in nanostructured materials for high-performance thermoelectrics*. *J. Mater. Chem.* 2010, 20, 9577–9584. DOI:[10.1039/C0JM01193B](https://doi.org/10.1039/C0JM01193B) [žiūrėta 2025-02-18].
15. Mori, T. *Novel principles and nanostructuring methods for enhanced thermoelectrics*. *Small* 2017, 13, 1702013. DOI:[10.1002/sml.201702013](https://doi.org/10.1002/sml.201702013) [žiūrėta 2026-02-18].
16. Mohanraman, R.; Lan, T.-W.; Hsiung, T.-C.; Amada, D.; Lee, P.-C.; Ou, M.-N.; Chen, Y.-Y. *Engineering nanostructural routes for enhancing thermoelectric performance: Bulk to nanoscale*. *Front. Chem.* 2015, 3, 63. <https://doi.org/10.3389/fchem.2015.00063> [žiūrėta 2026-02-18].
17. M Huang, S.; Xu, X. *A regenerative concept for thermoelectric power generation*. *Appl. Energy* 2017, 185, 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.078> [žiūrėta 2026-02-18].
18. Erturun, U.; Erermis, K.; Mossi, K. *Influence of leg sizing and spacing on power generation and thermal stresses of thermoelectric devices*. *Appl. Energy* 2015, 159, 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.112> [žiūrėta 2026-02-18].
19. Shittu, S.; Li, G.; Zhao, X.; Ma, X.; Akhlaghi, Y.G.; Ayodele, E. *High performance and thermal stress analysis of a segmented annular thermoelectric generator*. *Energy Convers. Manag.* 2019, 184, 180–193. DOI:[10.1016/j.enconman.2019.01.064](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.064) [žiūrėta 2026-02-18].
20. Kung-Wen Du ir Chun-I WU. *An Innovative Tubular Thermoelectric Generator (TTEG) for Enhanced Waste Heat Recovery in Industrial and Automotive Applications*. *Appl. Sci.* 2024, 14, 685. <https://doi.org/10.3390/app14020685> [žiūrėta 2026-02-18].
21. Riffat, S.B.; Ma, X. *Thermoelectrics: A review of present and potential applications*. *Appl. Therm. Eng.* 2003, 23, 913–935. DOI:[10.1016/S1359-4311\(03\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00012-7) [žiūrėta 2026-02-19].
22. Khaled T. Youtong Z. ir Xiao-long M. *Modeling and Experimentation of New Thermoelectric Cooler–Thermoelectric Generator Module*. *Energies* 2018, 11(3), 576. <https://doi.org/10.3390/en11030576> [žiūrėta 2026-02-19].
23. Cotfas P. A., Cotfas D. T., Machidon O. M. ir Ciulavu Cristina. *Performance evaluation of the thermoelectric generator*. *A. SCIENTIFIC RESEARCH AND EDUCATION IN THE AIR FORCE*. 2016, 18(1):239-246. DOI:[10.19062/2247-3173.2016.18.1.32](https://doi.org/10.19062/2247-3173.2016.18.1.32) [žiūrėta 2026-02-19].
24. Krupanidhi Y. G., Ramya Y. A. and Sowmya B. *Thermoelectric Generators and the Seebeck Effect*. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2022. 10.30574/wjarr.2022.16.3.1409. Prieiga per internetą: https://wjarr.com/sites/default/files/fulltext_pdf/WJARR-2022-1409 [žiūrėta 2026-02-19].
25. Haitao Wang ir Qiang Fu. *Experimental Evaluation of Thermoelectric Generator Performance under Different Heat Conduction Boundary Conditions*. 2023 *J. Phys.: Conf. Ser.* 2463 012015. 10.1088/1742-6596/2463/1/012015 [žiūrėta 2026-02-19].
26. Bo Li, Kuo Huang ir Yuying Yan. *Thermoelectric Power Generation for Heat Recovery in Automotive Industries*. 2017. 10.5772/intechopen.75467. Prieiga per internetą <https://www.intechopen.com/chapters/60567?com> [žiūrėta 2026-03-23].
27. „openPR“ *Worldwide Public Relations*. Interaktyvus. Prieiga per internetą: <https://www.openpr.com/news/2883984/automotive-thermoelectric-generator-market-size-2023-share> [žiūrėta 2026-03-23].
28. „Forvia“ *Inspiring mobility*. Interaktyvus. Prieiga per internetą: <http://www.faurecia.com/en/news/faurecia-compact-ehrs-celebrates-world-first-new-hyundai-ioniq-hybrid-01032016> [žiūrėta 2026-03-23].

29. „*thermoelectric-generator*“ *termoelektrinių generatorių technologija*. Interaktyvus. Prieiga per internetą: https://thermoelectric-generator.com/wp-content/uploads/2014/04/SpecTEG1-1268-4.3-Thermoelectric-generator.pdf?srltid=AfmBOortNN27HOmLBbYfcg9n_MXyzLHAIBKnWHctaQ9_HHQr03RL8Hl [žiūrėta 2026-02-19].
30. „*ultimate SPECS*“: Interaktyvus. Prieiga per internetą: [https://www.ultimatespecs.com/car-specs/Audi/702/Audi-A4-\(B7\)-20-TDI.html](https://www.ultimatespecs.com/car-specs/Audi/702/Audi-A4-(B7)-20-TDI.html) [žiūrėta 2026-02-19].
31. „*Olx*“ *internetinė automobilių detalių parduotuvė*. Interaktyvus. Prieiga per internetą: <https://www.olx.pl/d/oferta/wydech-tlumik-srodkowy-koncowy-audi-a4-b7-2-0-tdi-140km-CID5-ID19CnjC.html?srltid=AfmBOoqgdbrodXaYoBsbhmpqVotayfER0z8t5bUYpJLZgbibDRURa62d> [žiūrėta 2026-03-23].
32. „*Amazon*“ *Internetinė parduotuvė*. Interaktyvus. Prieiga per internetą: <https://www.amazon.nl/-/en/Industrial-Thermocouple-Thermometer-Temperature-30-800%C2%B0C/dp/B0F4861MZP> [žiūrėta 2026-02-19].
33. „*Amazon*“ *Internetinė parduotuvė*. Interaktyvus. Prieiga per internetą: <https://www.amazon.com/Converter-Regulator-Adjustable-Regulated-Laboratory/dp/B0978T3JKH> [žiūrėta 2026-02-19].
34. „*Amazon*“ *Internetinė parduotuvė*. Interaktyvus. Prieiga per internetą: <https://www.amazon.co.uk/BJTYHT-Laboratory-Adjustable-Stabilized-Regulated/dp/B09X1KS8H1?th=1> [žiūrėta 2026-02-19].
35. „*Anodas*“ *elektronikos komponentų parduotuvė*. Interaktyvus. Prieiga per internetą: <https://www.anodas.lt/universalus-multimetras-orangjo-vc505> [žiūrėta 2026-02-19].
36. „*LEMONA electronics*“ *elektronikos komponentų parduotuvė*. Interaktyvus. Prieiga per internetą: <https://www.lemona.lt/cpu-termo-pasta-sidabrine-iki-300-c-4g-0-01-in-4-63w-mk.html> [žiūrėta 2026-02-19].
37. „*Circuit Diagram*“ *elektrinių schemų sudarymo internetinė programa*. Prieiga per internetą: <https://www.circuit-diagram.org/editor/> [žiūrėta 2026-04-19].
38. „*Google Maps*“ *internetinis žemėlapis*. Interaktyvus. Prieiga per internetą: https://www.google.com/maps/@54.9211738,23.9891375,15424m/data=!3m1!1e3?authuser=0&entry=tту&g_ep=EgoyMDI2MDExMy4wIKXMDSOASAFAQAw%3D%3D [žiūrėta 2026-04-19].
39. VEKTERIS Vladas, KASPARAITIS Albinas, KAUSINIS Saulius, KANAPĖNAS Rimantas. „*Matavimų TEORIJA IR PRAKTIKA*“; Mokomoji knyga. Vilnius: „Žiburio“ leidykla, 2000. 380 p. [žiūrėta 2026-04-26]
40. „*NIST*“ *National institute of standards and technology*. Interaktyvus. Prieiga per internetą: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda3672.htm?utm> [žiūrėta 2026-04-26].
41. Md. Asaduzzaman, Md. Hasan Ali, Nahyan Ahnaf Pratik, Nafisa Lubaba. *Exhaust heat harvesting of automotive engine using thermoelectric generation technology*. Appl. Sci. 2023, 14. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100398> [žiūrėta 2026-04-26].

1 priedas. Proceedings of 13th International Young Researchers Conference INDUSTRIAL ENGINEERING 2026 „Research on the Dependence of the Voltage Generated by a Thermoelectric Element“

*Proceedings of 13th International Young Researchers Conference
INDUSTRIAL ENGINEERING 2026*

Research on the Dependence of the Voltage Generated by a Thermoelectric Element

Justas LEONAVIČIUS*, Rolandas MAKARAS

Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania

** ju.leonavicius@ktu.edu*

Abstract

A large part of the energy is lost through heat, both in boilers and in vehicles. In order to use the heat energy, it was possible to install thermoelectric elements such as Peltier modules. In this work, a thermoelectric generator was created that used a Peltier module. The thermoelectric generator itself was cooled by coolant. During the study, the temperature of hot and cold parts of the Peltier module and the generated electric voltage were monitored. The data was recorded and the dependence of the generated voltage on the temperature difference was obtained as linear, the coefficient of determination reached 99.97 %. The maximum temperature difference was obtained as 69,3 °C, and the generated open circuit voltage was 2,13 V.

Keywords: thermoelectric generator (TEG), Peltier modules, semiconductors, temperature difference.

1. Introduction

Thermoelectric generator is a device that converts heat energy into electricity. Electricity is generated directly from a temperature difference using the thermoelectric effect. Such generators are often used as additional equipment that allows the use of heat energy, for example, in car exhaust systems, industrial furnaces or even space probes. They are also used in wearable devices such as watches. Most often, a thermoelectric generator acts as an auxiliary source of electricity. This reduces the load on the main energy source, for example, a car generator, which is driven by an internal combustion engine through a belt drive. This allows you to reduce fuel consumption and increase engine efficiency, since part of the thermal energy that would normally be lost to the environment is used. In internal combustion engines, such as diesel or Otto type, heat losses can reach about 35-45 % [1, 2]. These losses also increase the negative impact on the environment and the risk of climate change. The aim of the research is to create a thermoelectric generator and investigate how the generated electrical voltage changes as the temperature difference between hot and cold parts changes. To achieve this aim, the following tasks were set: to create a thermoelectric generator and investigate the dependence of the generated voltage on the temperature difference; to study the maximum amount of electrical voltage this stand can generate.

2. Peltier modules and operating principle

Peltier modules are parts of thermoelectric generators that are made of semiconductors. Two types of semiconductors are used in thermoelectric generators: n-type and p-type. In n-type semiconductors, the main carriers are electrons, and in p-type - holes. The materials are selected so that the device operates as efficiently as possible. Therefore, it is important that the semiconductors have high electrical conductivity, but low thermal conductivity because this allows you to maintain higher temperature difference. The most common materials used in the production of TEGs are bismuth telluride (Bi_2Te_3), lead telluride (PbTe) and silicon-germanium alloys (Si-Ge). The semiconductors are connected in a certain way to generate a direct current. [3, 4, 5]

The schematic diagram shows a simplified structure of a thermoelectric generators and its operating principle (Figure 1). It shows that the TEG consists of p-type and n-type semiconductors, an electrical insulator and a conductor. By heating one side of the plate and simultaneously cooling the other, charges begin to move between the semiconductors, which creates an electric current that flows through the connected load.

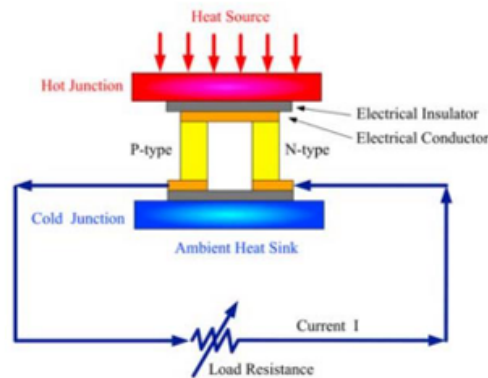


Fig. 1 Schematic diagram of the operation of a thermoelectric generator (TEG) [3]

The efficiency of the first-generation of thermoelectric generators was about 4–6 %, the second-generation – already 11–15 %, and the third-generation devices are characterized by an efficiency of more than 15 %. This improvement is achieved due to the improvement of semiconductor materials and the optimization of their structure. [6]

3. Thermoelectric generator development and research methodology

When drawing up the electrical diagram, it was decided to connect all electrical components in parallel to maintain a voltage of 12 V in the circuit. The exception was made only for the section between the voltage regulator and the heating element - in this case, the same thermoelectric generator used, which is connected in series (Figure 2).

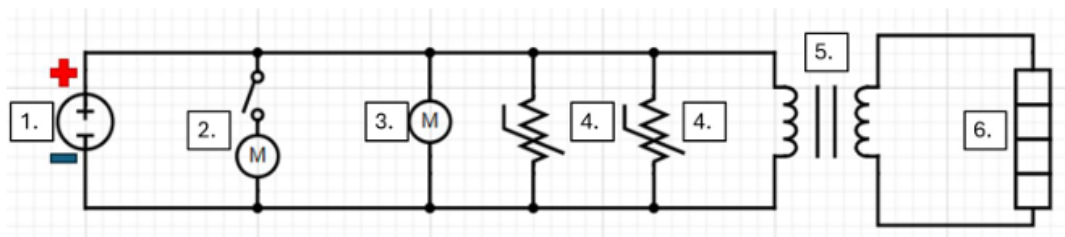


Fig. 2 Basic electrical circuit diagram: 1. DC power source; 2. Fan with switch; 3. Coolant pump; 4. Thermocouples; 5. Voltage regulator (transformer); 6. Heating element (thermoelectric generator plate or heater) [2]

The next step was to draw up a block diagram of the thermoelectric generator. It uses a cooler to cool the cold side of the generator, and the temperature of this part is measured by a thermocouple. The thermoelectric generator itself is heated by another plate of the same specification. The heated side is also equipped with a thermocouple to monitor the temperature

of the hot side. To improve heat transfer and contact between the surfaces, thermal paste is used. This entire system is shown in Figure 3.

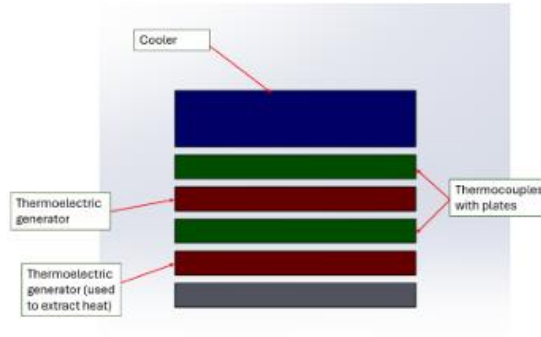


Fig. 3 Schematic diagram of a thermoelectric generator unit

A TEG element was used, the specifications of which are presented in Table 1.

Table 1. TEG element specification [7]

Parameter	Value
Hot Sides Maximum Temperature (°C)	300
Cold side Maximum temperature (°C)	-30
Maximum open circuit voltage (V)	10,7
Maximum output voltage (V)	5,3
Maximum output current (A)	1
Thermal penetration intensity (Wcm ⁻²)	9,5

Based on the schematic diagrams, an experimental stand was constructed, it is shown in Figure 4.

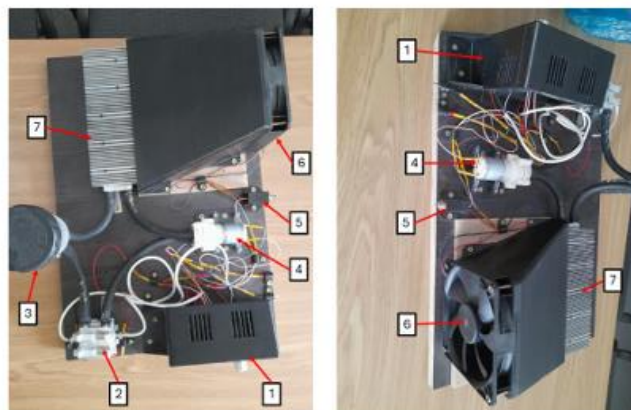


Fig. 4 Thermoelectric generator test bench: 1. instrument panel with voltage regulator; 2. thermoelectric generator unit; 3. coolant tank; 4. coolant pump; 5. fan switch; 6. fan; 7. radiator

Using this experimental stand, a constant cooling temperature was maintained and the dependence of the generated voltage on the temperature difference between the sides of the thermoelectric generator plate was studied. During the experiment, the voltage of the heating element was increased from 0 V to 10,5 V, thereby increasing the temperature from 0 °C to 70 °C. Measurements were performed in steps of 1 V. The study was repeated 3 times. The collected data were subsequently processed using Excel software.

The Seebeck coefficient in the study was calculated using the formula [8]:

$$S = -\frac{\Delta V}{\Delta T}$$

This coefficient indicates how much voltage is generated per unit of temperature.

4. Results

A study was conducted with the constructed stand, during which a linear dependence was established - as the temperature difference between the cold and hot TEG plate sides increases, the generated electric voltage increases linearly. During the study, the maximum temperature of the cold part was obtained - 25,9°C, while the hot part - 69,3°C. Due to these temperature differences, an open-circuit average electric voltage of 2,13 V was generated (open circuit voltage). The result of Seebeck coefficient was -0,049 V/°C. Comparing the obtained results with the already conducted similar study, "Performance evaluation of the thermoelectric generator" by Cotfas P. A., Cotfas D. T., Machidon'as O. M. and Ciulavu Cristina, at a temperature difference of about 25°C, about 0,25 V of open circuit voltage was generated [9], and the Seebeck coefficient was only 10,45 mV/°C. But the study used a different type of thermoelectric element, so the comparative results are slightly different. Also, in the study of Cotfas P.A. and other authors, a linear dependence of the generated voltage (open circuit) on the temperature difference (between the hot and cold sides of the thermoelectric generator) was obtained. Using the Excel software, it was found that the results correspond to the theoretical linear model, the obtained linear model $y=0,0502x-0,0327$ and the coefficient of determination which shows that 99,97% of the generated voltage values explain the obtained linear model. Also, during the study, the values fluctuated very low $\pm 0,05$ V, for this reason it can be stated that the results are quite reliable because there are no significant disturbances.

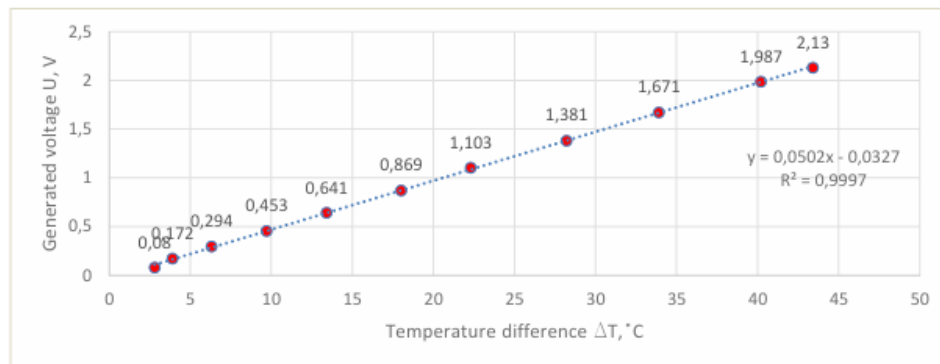


Fig. 5 Thermoelectric generator bench test results

During the study, an attempt was made to apply point thermocouples, thus eliminating the aluminium plates in the hot and cold parts, but during the test it was observed that during heating,

the temperature in the cold part rose in parallel with the temperature of the hot part and the generated temperature did not reach 0,05 V, while the temperature difference remained the same all the time – about 4°C. It can be stated that when directly heating the hot part of the TEG element, the cold part also heats up, which reduces the Seebeck effect, which reached -0,0125 V/°C. The minus sign in the Seebeck coefficient indicates the direction of the electric voltage.

5. Conclusions

The study found that the generated electrical voltage linearly depends on the temperature difference between the hot and cold parts of the Peltier module.

1. The obtained open circuit electrical voltage results corresponded to a 99,97 percent linear model $y=0,0502x-0,0327$. For this reason, it can be stated that the dependence of the voltage on the temperature difference is linear.
2. The maximum generated open circuit average electrical voltage was 2,13 V, when the temperature difference between the sides of the module was 69,3 °C, the measurement values fluctuated by ±0,05 V. The Seebeck coefficient was -0,049 V/°C. To ensure a higher generated voltage, a better heating element would be required.

References

1. Haidar, J.G., Ghogel, J.I. *Waste heat recovery from the exhaust of low-power diesel engine using thermal electric generators*. In Proc. 20th Int. Conf. Thermoelectrics, Beijing: China; 2001. pp.413– 417. Available from: https://www.researchgate.net/publication/3933480_Waste_Heat_Recovery_from_the_Exhaust_of_Low-Power_Diesel_Engine_Using_Thermoelectric_Generators
2. Yao D-J, Yeh K-J, Hsu C-T, Yu B-M, Lee J-S. *Efficient reuse of waste energy*. IEEE Nanotechnology Mag, 3: 2009. pp. 28-33.
3. Sugiarta N., Sastra Negara P. *Technical Feasibility Evaluation on The Use of A Peltier Thermoelectric Module to Recover Automobile Exhaust Heat*. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 953. 2017. DOI 10.1088/1742-6596/953/1/012090. Available from: https://www.researchgate.net/publication/322958833_Technical_Feasibility_Evaluation_on_The_Use_of_A_Peltier_Thermoelectric_Module_to_Recover_Automobile_Exhaust_Heat#read
4. Liang, G., Zhou, J. and Huang, Z. Analytical model of parallel thermoelectric generator. Applied Energy, 2011. pp. 88. 5193-5199. Available from: https://www.researchgate.net/publication/251574188_Analytical_model_of_parallel_thermoelectric_generator
5. Ragupathi P., Debabrata Barik, Satheesh Kumar S., Abisha Meji M., Seepana Praveenkumar. *Experimental analysis on the thermoelectric effect of various solid-state devices used for direct conversion of thermal energy into electrical energy*. Results in Engineering, vol. 23, 2024, doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102752. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024010077?utm>
6. L. D. Zhao, V. P. Dravid and M. G. Kanatzidis, *The panoramic approach to high performance thermoelectrics*, Energy and Environmental Science, vol. 7, 2014 pp. 251-268 DOI:10.1039/c3ee43099e. Available from: https://www.researchgate.net/publication/271382404_The_Panosopic_Approach_to_High_Performance_Thermoelectrics
7. TECTEG. Web site. Available from: <https://tecteg.com/product/teg1-1268-4-3/>
8. Krupanidhi Y. G., Ramya Y. A. and Sowmya B. *Thermoelectric Generators and the Seebeck Effect*. World Journal of Advanced Research and Reviews. 2022. DOI:10.30574/wjarr.2022.16.3.1409. Available from: https://www.researchgate.net/publication/398915665_Thermoelectric_Generators_and_the_Seebeck_Effect
9. Cotfas P. A., Cotfas D. T., Machidon O. M. and Ciulavu Cristina. *Performance evaluation of the thermoelectric generator*. A SCIENTIFIC RESEARCH AND EDUCATION IN THE AIR FORCE. 2016, 18(1):239-246. Available from: https://www.researchgate.net/publication/304562051_PERFORMANCE_EVALUATION_OF_THE_THERMOELECTRIC_GENERATOR