



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Elektros energijos generatorių, naudojančių
polivinilfluoridines (PVDF) plėveles, patikimumo tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Povilas Bendinskas

Projekto autorius

Prof. Vytautas Markevičius

Vadovas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Elektros energijos generatorių, naudojančių
polivinilfluoridines (PVDF) plėveles, patikimumo tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Elektronikos inžinerija (6211EX012)

Povilas Bendinskas

Projekto autorius

Prof. Vytautas Markevičius

Vadovas

Doc. Darius Kybartas

Recenzentas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Povilas Bendinskas

Elektros energijos generatorių, naudojančių polivinilfluoridines (PVDF) plėveles, patikimumo tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdamas kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasis 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;
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalintas iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Povilas Bendinskas

Patvirtinta elektroniniu būdu

Bendinskas, Povilas. Elektros energijos generatorių, naudojančių polivinilfluoridines (PVDF) plėveles, patikimumo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. Vytautas Markevičius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Elektronikos inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: pjezoelektrinis generatorius, polivinilfluoridinė (PVDF) plėvelė, pjezoelektrinių generatorių patikimumo tyrimas.

Kaunas, 2022. 52 p.

Santrauka

Baigiamojo magistro projekto tikslas – ištirti skirtingų konstrukcijų pjezoelektrinių generatorių, naudojančių PVDF plėveles patikimumą, šalčio ir karščio kameroje, esant skirtingoms eksploatacinėms sąlygoms.

Pirmoje magistro baigiamojo projekto dalyje apžvelgiamos ir palyginamos pjezoelektrinės medžiagos, naudojamos pjezoelektriniuose generatoriuose, apžvelgiama bendra pjezoelektrinio generatoriaus struktūra. Pateikiama tiriamo gembės tipo pjezoelektrinio generatoriaus struktūros analizė, PVDF plėvelių jungimo būdai. Apžvelgiama naudojama pjezoelektrinių generatorių ilgaamžiškumo tyrimų metodika.

Antroje magistro baigiamojo projekto dalyje eksperimentiškai tiriami pjezoelektriniai generatoriai, turintys poliesterines ir plienines šerdis, vario – nikelio, aliuminio metalizavimo PVDF plėveles. Pjezoelektriniai generatoriai yra veikiami cikliniu terminiu ir mechaniniu poveikiu. Analizuojamas ir vertinamas termociklavimo poveikis pjezoelektrinių generatorių konstrukcijos stabilumui, elektriniams PVDF plėvelės parametrams – generuojamos įtampos, elektrinės talpos tarp šerdies ir PVDF plėvelės elektrodo pokyčiui, metalizuoto paviršiaus varžai. Aptariami ir siūlomi konstrukcijos tobulinimo būdai.

Trečiojo magistro baigiamojo projekto dalyje eksperimentiškai tiriami polipropileningę šerdį turintys pjezoelektriniai generatoriai su aliuminio padengimo polivinilfluoridine (PVDF) plėvele, generatorius pradžioje veikiant tik terminiu cikliniu poveikiu. Sekančiame etape pjezoelektriniai generatoriai yra veikiami terminiu ir mechaniniu cikliniu poveikiu. Analizuojamas termociklavimo poveikis pjezoelektrinių generatorių išėjimo įtampai, elektrinės talpos, mechaninio kokybės faktoriaus bei rezonansinio dažnio pokyčiams.

Bendinskas, Povilas. Reliability Study of Electric Generators Using Polyvinyl Fluoride (PVDF) Films. Master's Final Degree Project / supervisor prof. Vytautas Markevičius; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electronics Engineering, Engineering Sciences.

Keywords: piezoelectric generator, polyvinyl fluoride PVDF film, reliability study of piezoelectric generators.

Kaunas, 2022. 52 p.

Summary

The aim of the final master's project is to investigate the reliability of piezoelectric generators of different designs using PVDF films in a cold and heat chamber under different operating conditions.

The first part of the master's thesis reviews and compares the piezoelectric materials used in piezoelectric generators and reviews the general structure of the piezoelectric generator. The analysis of the structure of the investigated beam type piezoelectric generator and the methods of PVDF film connection are presented. The methodology used for the longevity testing of piezoelectric generators is reviewed.

In the second part of the master 's final project, piezoelectric generators with polyester and steel cores, copper - nickel, aluminum metallization PVDF films are experimentally investigated. Piezoelectric generators are subjected to cyclic thermal and mechanical effects. The effect of thermocycling on the structural stability of piezoelectric generators, the electrical parameters of the PVDF film - the generated voltage, the change of the electric capacitance between the core and the PVDF film electrode, the resistance of the metallized surface are analyzed and evaluated. Ways to improve the structure are discussed and suggested.

In the third part of the master 's final project, piezoelectric generators with a polypropylene core and an aluminum-coated polyvinyl fluoride PVDF film are experimentally investigated, the generators initially acting only by thermal cycling. In the next stage, the piezoelectric generators are subjected to thermal and mechanical cyclic effects. The effect of thermocycling on the output voltage of piezoelectric generators, electrical capacitance, mechanical quality factors and resonant frequency changes are analyzed.

Turinys

Santrumpų ir terminų sąrašas	7
Įvadas	8
1. Literatūros analizė.....	9
1.1. Pjezoelektrinės medžiagos naudojamos elektros energijos generatoriuose	9
1.1.1. Pjezoelektriniai efektai	9
1.1.2. Pjezoelektrinio keitiklio poliarizavimas	10
1.1.3. Pjezoelektrinių medžiagų savybės ir rūšys.....	11
1.2. Pjezoelektriniai generatoriai ir patikimumo tyrimų metodai.....	12
1.2.1. Pjezoelektrinio generatoriaus struktūra	12
1.2.2. Pjezoelektrinių keitiklių virpėjimo modos	13
1.2.3. Rezonansinis pjezoelektrinių generatorių dažnis	14
1.2.4. Gembės tipo pjezoelektrinio elektros energijos generatoriaus struktūra, sluoksnių jungimo būdai.....	15
1.2.5. Pjezoelektrinių elektros energijos generatorių ilgaamžiškumo tyrimų metodai	17
2. Pjezoelektrinių energijos generatorių su poliesterio (PET) ir plieninėmis šerdimis patikimumo tyrimas	19
2.1. Eksperimentinio tyrimo stendo projektavimas	19
2.1.1. Tiriamojo objekto ir eksperimentinio tyrimo struktūra	19
2.2. Pjezoelektrinių elektros energijos generatorių patikimumo tyrimo eiga.....	22
2.2.1. Temperatūros profilis, tyrimo eiga	22
2.2.2. Pradiniai tiriamų objektų parametrai	23
2.3. PET ir plieninę šerdį turinčių pjezoelektrinių generatorių ilgaamžiškumo tyrimo rezultatų analizė.....	24
2.3.1. Pjezoelektrinių generatorių $U_{iš}$ pokytis.....	24
2.3.2. Pjezoelektrinio generatoriaus elektrinės talpos tarp šerdies ir PVDF plėvelės elektrodo paviršinės varžos pokytis.....	30
3. Pjezoelektrinių generatorių su polipropileninėmis (PP) šerdimis patikimumo tyrimas.....	36
3.1. Pjezoelektrinių generatorių su polipropileninėmis (PP) šerdimis patikimumo tyrimas, veikiant cikliniu terminiu poveikiu	36
3.1.1. Temperatūros profilis, tyrimo eiga	36
3.1.2. Tiriamųjų objektų parametrai	38
3.2. Pjezoelektrinių generatorių su polipropileninėmis PP šerdimis ilgaamžiškumo tyrimo rezultatų analizė.....	40
3.2.1. Pjezoelektrinių generatorių f_{rez} , elektrinės talpos ir mechaninės kokybės faktoriaus pokytis.....	40
3.3. Pjezoelektrinių generatorių su 500 μ m polipropileninėmis (PP) šerdimis patikimumo tyrimas, veikiant cikliniu terminiu ir mechaniniu poveikiu	44
3.3.1. Tyrimo objektai, tyrimo eiga, pradiniai tiriamųjų objektų parametrai.....	44
3.3.2. Pjezoelektrinių generatorių $U_{iš}$, f_{rez} , elektrinės talpos ir mechaninio kokybės faktoriaus pokytis.....	45
3.3.3. Plastikinę šerdį turinčių pjezoelektrinių generatorių išėjimo įtampos kitimo tendencijos palyginimas.....	48
Išvados	50
Literatūros sąrašas	51

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

PZT – švino cirkonato titanatas;

PMN-PT – švino magnio niobatas-švino titanatas;

PVDF – polivinilidenfluoridas (polivinilfluoridas);

PP – polipropilenas;

PET – polietileno tereftalatas (poliesteris);

F_{rez} – rezonansinis dažnis;

$U_{\text{iš}}$ – išėjimo įtampa;

SMP – spausdintinio montažo plokštė;

Q – mechaninės kokybės faktorius.

Įvadas

Spartėjant klimato kaitai yra stengiamasi persiorientuoti iš nykstančių, neigiamą poveikį gamtai, žmonių sveikatai darančių iškastinių energijos šaltinių gavybos ir panaudojimo į tvarią, ekologišką, bei nuolat atsinaujinančią energiją. Pasitelkiant tobulėjančias aukštąsias technologijas, ieškoma efektyvių būdų kaip atsinaujinančią energiją gauti ne vien iš saulės ar vandens, bet kartu ir iš kitų šaltinių, pavyzdžiui, mechaninių virpesių. Įvairūs pramonėje ir buityje naudojami įrenginiai generuoja mechaninius virpesius, kurie gali būti paversti elektros energija, panaudojant elektromagnetinę indukciją ar pjezoelektrines medžiagas: pjezokeramiką, pjezoelektrinę putą ar metalizuotas polivinilfluoridines (PVDF) plėveles. Nebrangi PVDF plėvelių gamyba, mechaninis atsparumas ir pjezoelektrinės savybės leidžia pritaikyti jas elektros energijos gavyboje, kurti kompaktiškus vibracijų energijos generatorius, kurie gali būti panaudojami, kaip atsarginis energijos šaltinis bevielių jutiklių maitinimui arba pilnai pakeisti įtaiso ar jutiklio maitinimui naudojamas, iškastinius resursus eikvojančias baterijas ir akumuliatorius. Vienas iš veiksnių, lemiančių didesnę pjezoelektrinių elektros energijos generatorių efektyvumą, yra įtaiso ilgaamžiškumas, kuriam įtaką daro cikliniai temperatūriniai ir mechaniniai poveikiai. Dėl to, svarbu suprasti, kokį poveikį pjezoelektrinių generatorių konstrukcijai, eksploatacijai, PVDF plėvelėms daro skirtingos generatorių eksploatacinės sąlygos.

Baigiamajame projekte apžvelgiamos pjezoelektrinės medžiagos naudojamos elektros energijos generavimui, jų mechaninės ir pjezoelektrinės savybės. Apžvelgiamos gembės tipo pjezoelektrinių generatorių konstrukcijos, generatoriaus veikimo principai, tiriamas ir analizuojamas įvairių eksploatacinių sąlygų poveikis skirtingiems pjezoelektriniams generatoriams, naudojantiems PVDF plėveles. Tiriamas termociklavimo poveikis, įvairių pjezoelektrinių generatorių konstrukcijai.

Darbo tikslas – ištirti skirtingų konstrukcijų pjezoelektrinių vibracijų konvertavimo į elektros energiją generatorių ilgaamžiškumą, veikiant skirtingiems temperatūros ir mechaniniams poveikiams.

Tikslui pasiekti iškelti šie uždaviniai:

- Apžvelgti pjezoelektrines medžiagas, išanalizuoti gembės tipo pjezoelektrinio generatoriaus veikimo principus ir pjezoelektrinių generatorių ilgaamžiškumo tyrimo metodus;
- Suprojektuoti tyrimų standą ilgaamžiškumo tyrimui šalčio ir karščio kameroje;
- Atlikti eksperimentinius pjezoelektrinių elektros energijos generatorių patikimumo tyrimus šalčio ir karščio kameroje;
- Išanalizuoti termociklavimo poveikį skirtingų konstrukcijų pjezoelektriniams generatoriams ir skirtingų tipų PVDF plėvelėms.

1. Literatūros analizė

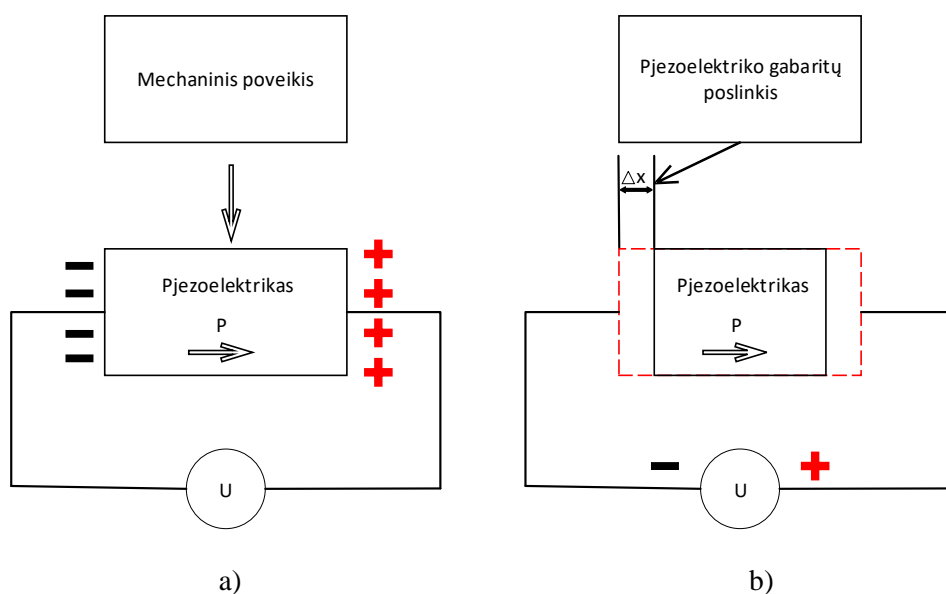
Šiame skyriuje pateikiami tiesioginio ir atvirkštinio pjezoelekto veikimo principai. Skyriuje apžvelgiamos pjezoelektrinių medžiagų rūšys, pjezoelektrikų virpėjimo modos, svarbiausios mechaninės pjezoelektrikų medžiagos savybės reikalingos efektyviam energijos generavimui. Taip pat, skyriuje apžvelgiamos gėmbių tipo pjezoelektrinių elektros generatorių konstrukcijos, polivinilfluoridinių plėvelių sluoksnių jungimo būdai, pjezoelektrinių generatorių ilgaamžiškumo tyrimų metodika.

1.1. Pjezoelektrinės medžiagos naudojamos elektros energijos generatoriuose

Šiame poskyryje pateikiama pjezoelektrinių medžiagų analizė, lyginamos jų pjezoelektrinės ir mechaninės savybės. Aprašomi tiesioginio ir atvirkštinio pjezoelektrinių efektų veikimo principai, pjezoelektrinių keitiklių poliarizavimo krypties svarba. Pateikiama pjezoelektrinių keitiklių elektromechaninė matematinė išraiška, nagrinėjamos medžiagų savybės ir tipai.

1.1.1. Pjezoelektriniai efektai

Platus anizotropinių pjezoelektrinių medžiagų taikymas leidžia plėtoti atsinaujinančios energijos generavimo iš mechaninių virpesių technologijas. Pjezoelektrinės medžiagos naudojamos ne tik elektros energijai generuoti, tačiau ir įvairiuose jutikliuose ar pjezovarikliuose, panaudojant tiesioginį ir atvirkštinį pjezoelekto. Elektros energijos generavimas paremtas tiesioginiu efektu, tačiau išnaudojant tiesioginį pjezoelektrinį efektą, pasireiškia ir atvirkštinis pjezoelekto. Tiesioginio ir atvirkštinio pjezoelektrinio efekto veikimo principo iliustracija pateikta 1.1 pav.

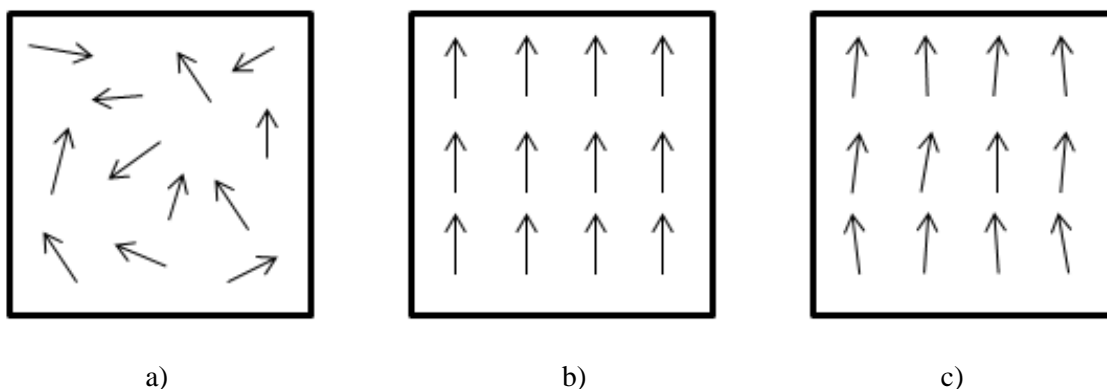


1.1 pav. Tiesioginis pjezoelektrinis efektas (a) ir atvirkštinis pjezoelektrinis efektas (b)

Pjezoelektrinę medžiagą veikiant mechaniniam poveikiui, iki šiol buvę neutralūs dipoliai, įgauna teigiamą arba neigiamą krūvį ir išsidėsto priešingose kristalo pusėse. Dėl šios priežasties ant metalinių elektrodų atsiranda potencialų skirtumas. Atvirkštinis pjezoelekto pasireiškia, kai medžiagą veikiant išorine įtampa, pjezoelektrikas deformuojasi, kinta jo gabaritai.

1.1.2. Pjezoelektrinio keitiklio poliarizavimas

Daugumoje pjezoelektrinių medžiagų (PVDF, PZT keramika, pjezoelektrinė puta) pjezoeftas pasireiškia tik po poliarizacijos. Pjezoelektriko generuojama elektros energija yra tuo didesnė, kuo stipresnis yra pjezoeftas (vertinamas pjezomoduliu). Po pagaminimo chaotiškai, atsitiktine kryptimi išsidėstę ir orientuoti elektriniai dipoliai poliarizavimo metu įgauna kryptį [1]. Jeigu elektriniai dipoliai yra orientuoti atsitiktine tvarka, veikiant mechaniniam poveikiui, tiesioginis pjezoelektrinis efektas gali būti nereikšmingas. Pjezoelektriko elektrinių dipolių išsidėstymas prieš poliarizavimą, poliarizavimo metu ir po poliarizavimo pateikiamas 1.2 pav.



1.2 pav. Dipolių išsidėstymas prieš poliarizavimą (a) dipolių kryptis poliarizavimo metu (b) dipolių išsidėstymas po poliarizavimo proceso (c) [1]

Poliarizavimo metu, pjezoelektrikas yra veikiamas aukštos įtampos elektriniu lauku, pagal kurio veikimo kryptį išsidėsto chaotiškai orientuoti dipoliai. Po poliarizavimo dipolių orientavimosi kryptis lieka daugmaž vienoda, o krypties nuokrypiai atsiranda dėl medžiagos struktūros nevienodumo. Pjezoelektriko dipoliai vėl išsidėsto chaotiškai (depolarizuojasi), pjezoelektriką įkaitinus iki Kiuri temperatūros. Matematiškai pjezoelektrinio keitiklio elektromechanines savybes galima išreikšti [2] per elektrinio lauko indukcijos (1) bei Huko dėsnio (2) formules, sudarant kelių išraiškų sistemą (3):

$$D = \varepsilon E, \quad (1)$$

čia D – elektrinio lauko indukcija (T), ε – dielektrinė konstanta, E – elektrinis lauko stipris ($\frac{V}{M}$).

$$S = sT, \quad (2)$$

čia S – mechaniniai įtempiai (Pa), s – tamprumas ($\frac{S}{N}$), T – mechaninis poveikis.

$$\begin{cases} D = d_t T + \varepsilon^T E \\ S = s^e T + d_t E \end{cases} \quad (3)$$

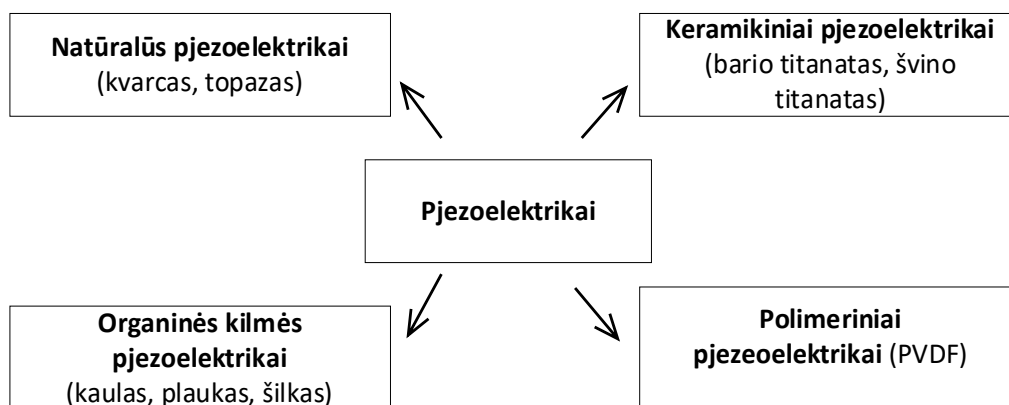
čia D – elektrinio lauko indukcija (T), ε^T – dielektrinės skvarbos matrica, E – elektrinis lauko stipris ($\frac{V}{M}$), S – mechaniniai įtempiai (Pa), s – tamprumo matrica, T – mechaninis poveikis, d_t – pjezoelektrinio koeficiento matrica.

Lygčių sistemos lygtys rodo, jog pjezoelektriko medžiagoje susidarę mechaniniai įtempiai bei elektrinio lauko indukcija tiesiškai priklauso nuo elektrinio lauko stiprio bei medžiagą veikiančio mechaninio poveikio. Skaičiuojant pjezoelektriko generuojamą įtampą dėl mechaninio poveikio,

naudojamas įtampos koeficientas (pjezomodulis). Įtampos koeficientas yra lygus pjezoelektriko generuojamo elektrinio lauko bei mechaninio poveikio veikiančio ploto vienetą santykiui.

1.1.3. Pjezoelektrinių medžiagų savybės ir rūšys

Geros pjezoelektrinės savybės, platus pjezoelektrikų pasirinkimas leidžia pjezoelektrikus plačiai panaudoti įvairiose srityse. Pjezoelektrikai yra skirtingi ir priklauso keturioms skirtingoms pjezoelektrikų grupėms: natūralūs, keramikiniai, polimeriniai ir organinės kilmės pjezoelektrikai. Gamtoje egzistuoja natūralūs anizotropiniai dielektrikai tokie kaip kvarcas, topazas ar organinės medžiagos kaip šilkas, medis, kaulas [3]. Pjezoelektrikų rūšys pateiktos 1.3 pav.



1.3 pav. Pjezoelektrikų rūšys

Elektros energijos gavybai naudojamos keramikinės ir polimerinės pjezoelektrinės medžiagos turi didelį energijos ir galios tankį. Generatoriaus veikimui užtikrinti nereikia naudoti išorinių įtampos šaltinių, keramikiniai pjezoelektriniai keitikliai gali būti lengvai formuojami. Polimeriniai pjezoelektriniai keitikliai gaminami nesudėtingai, todėl gamybos kaštai dažnai būna nedideli kaip ir generatoriaus gabaritai. Pjezoelektrikų Kiuri (temperatūra, kurioje prarandamos pjezoelektrinės savybės) temperatūra yra pakankamai aukšta, dėl to medžiagas galima naudoti, iki +80 °C temperatūros aplinkoje [4], [5]. Tačiau tokių pjezoelektrinių medžiagų vibracijų generuojama galia nėra didelė ir siekia nuo kelių μW iki mW , kai kurie pjezoelektrikai yra trapūs ir brangūs.

Elektros energiją generuojant iš mechaninių virpesių, naudojant pjezoelektrikus ir stengiantis gauti, kuo didesnę generatoriaus efektyvumą, svarbiausia atsižvelgti į keletą pjezoelektrinių parametrų: dielektrinę konstantą ϵ/ϵ_0 , pjezoelektrinį krūvio modulį d_{mn} , elektromechaninį koeficientą k . Pjezoelektrinis krūvio modulis parodo santykį tarp tam tikram ploto vienetu generuoto elektros krūvio bei medžiagą veikiančios jėgos. Elektromechaninis koeficientas - santykį tarp mechaninės energijos, veikiančios pjezoelektriką, ir generuojamos elektros energijos. Šie parametrai turėtų būti, kuo didesnės vertės, kaip ir dielektrinė medžiagos konstanta, lemianti, jog pjezoelektrinė medžiaga turės mažesnę impedansą, kadangi jos talpa bus didesnė [6]. Taip pat svarbu atsižvelgti ir į mechaninius parametrus: takumo ribą σ_y tamprumo ribą σ_e , mechaninį kokybės faktorių Q_m .

Pjezoelektrikas, naudojamas elektros energijai generuoti, pasirenkamas atsižvelgiant į tai, kokia bus mechaninė generatoriaus konstrukcija, kokio tipo bus išorinis mechaninis poveikis. Dažnai elektros energijai generuoti naudojamos - PZT pjezokeramikos (švino pagrindu) ir polivinilfluoridinės (PVDF) plėvelės bei rečiau naudojamos PMN-PT keramikos pjezoelektrinių ir mechaninių savybių palyginimas pateikiamas 1 lentelėje [5].

1 lentelė. Keramikinių PZT, PMN-PT pjezoelektrikų bei polivinilfluoridinių PVDF plėvelių mechaninių savybių palyginimas [5]

Medžiagos savybė	PZT	PVDF	PMN-PT
Pjezoelektrinis modulis(d_{31}), 10^{-12} C/N	320	20	420
Pjezoelektrinis modulis (d_{33}), 10^{-12} C/N	650	30	850
Dielektrinė konstanta, ϵ/ϵ_0	3800	12	3760
Takumo riba, 10^{10} N/m ²	5.0	0.3	0.83
Tamprumo riba, 10^7 N/m ²	2.0	5.2	8.3
Elektromechaninis koeficientas (k_{31}), CV/Nm	0.44	0.11	0.65
Elektromechaninis koeficientas (k_{33}), CV/Nm	0.75	0.16	0.88

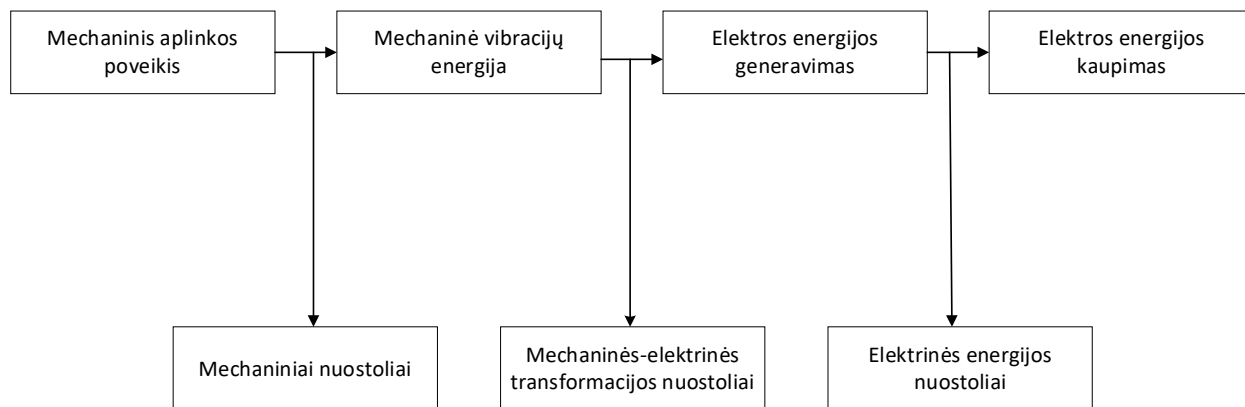
Iš lentelėje pateiktų pjezoelektrikų savybių, galima pastebėti, kad polivinilfluoridinės plėvelės pjezoelektrinės savybės yra prastesnės, lyginant su pjezokeramikinėmis medžiagomis, tačiau PVDF plėvelė yra plastiška, nėra trapi, tamprumo riba yra didesnė nei plačiai naudojamos PZT keramikos. Tai reiškia, jog plėvelė gali atlaikyti didesnės amplitudės ciklinius arba impulsinius mechaninius poveikius ją naudojant gembinių konstrukcijų tipo vibracijų generatoriuose. Didesnių amplitudžių išoriniai mechaniniai poveikiai, deformuojantys pjezoelektriką, sukuria didesnę generatoriaus generuojamą galią. Dėl aukšto pjezoelektrinio modulio, paprastesnės gamybos ir mažų gamybos kaštų keramikiniai PZT ir PMN-PT pjezoelektrikai yra plačiai panaudojami, tačiau keramika yra trapi, nepritaikoma ten, kur reikia lankstumo. Monokristalinės PMN-PT keramikos pjezoelektrinės savybės geriausios, tačiau ši keramika yra trapi, keramikos kaina yra didelė.

1.2. Pjezoelektriniai generatoriai ir patikimumo tyrimų metodai

Šiame poskyryje nagrinėjama pjezoelektrinių medžiagų virpėjimų modų, pjezoelektrinio keitiklio savojo virpėjimo rezonansinio dažnio įtaka energijos generavimui. Pateikiama rezonansinio dažnio priklausomybės nuo įvairių veiksnių analizė. Pateikiami, baigiamajame darbe tiriamo gembės tipo pjezoelektrinio vibracijų generatoriaus konstrukcijos, polivinilfluoridinių PVDF plėvelių jungimo būdai, aptariami metodai, naudojami atliekant pjezoelektrinių generatorių ilgaamžiškumo tyrimus.

1.2.1. Pjezoelektrinio generatoriaus struktūra

Elektros energija iš išorinio mechaninio virpesio veikiančio pjezoelektrinį generatorių gaunama panaudojant tiesioginį pjezoelektrinį efektą. Mechaninis poveikis veikia tam tikros konstrukcijos pjezoelektrinį generatorių, kuris keičia mechaninę energiją į elektrinę, tuomet ji yra kaupiama elektros energijos kaupimo grandyne [7]. Elektros energijos generavimo iš mechaninių virpesių energijos veikimo principinė schema pateikta 1.4 pav.

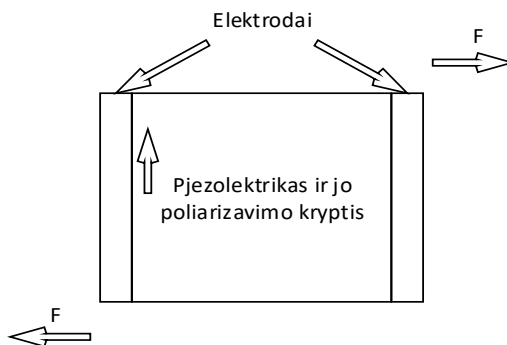


1.4 pav. Elektros energijos generavimo iš mechaninės energijos veikimo principas

Vykstant elektros energijos keitimui iš mechaninės energijos, generatoriaus efektyvumą mažina kelių tipų nuostoliai: mechaniniai nuostoliai, mechaninės – elektrinės transformacijos ir elektrinės energijos nuostoliai. Mechaniniai nuostoliai atsiranda dėl konstrukcijų nuovargio, senėjimo, generatoriaus konstrukcijos gamybai naudojamos medžiagos, mechaninių savybių. Mechaninės – elektrinės energijos transformacijos nuostoliai išauga esant nesuderintam pjezoelektrinio keitiklio bei išorinio harmoninio mechaninio poveikio impedansams – savasis pjezoelektrinio keitiklio rezonansinis dažnis nesutampa su išorinio poveikio dažniu. Be to, transformacijos nuostoliams įtaką daro pjezoelektriko virpėjimo moda, elektromechaninis koeficientas k . Elektrinės energijos nuostolius lemia elektros energijos kaupimo grandynų efektyvumas.

1.2.2. Pjezoelektrinių keitiklių virpėjimo modos

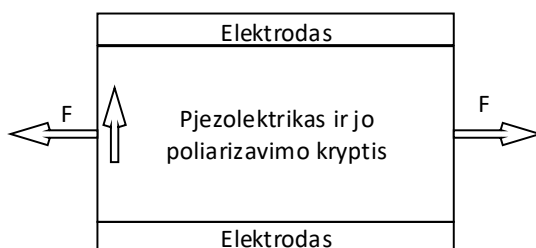
Norint, jog elektros energija būtų išgaunama, kuo efektyviau, pjezoelektrinės medžiagos turi virpėti tam tikra moda. Keletas pjezoelektrinių modų yra: kirpimo - d_{15} , skersinė- d_{31} , kai poveikis yra lygiagretus poliarizavimo kryptčiai, išilginė - d_{33} , kai mechaninio poveikio krypttis yra statmena poliarizavimo kryptčiai [8]. Pjezoelektriniuose mechaninių virpesių generatoriuose dažniausiai naudojamos d_{31} bei d_{33} modos. Gaminant mechaninių virpesių generatorius, pjezoelektrinės medžiagos moda parenkama atsižvelgiant į keitiklį veikiančios deformacijos tipą: jei poveikis yra kirpimo tipo, kai kūno skerspjūviai pasilenka vienas kito atžvilgiu, tuomet pasirenkamas aktyvus d_{15} pjezomodulio veikimo režimas. D_{15} moduje virpantis keitiklis ir elektrodų pozicija pavaizduota 1.5 pav.



1.5 pav. d_{15} virpėjimo moda veikiantis pjezoelektrikas

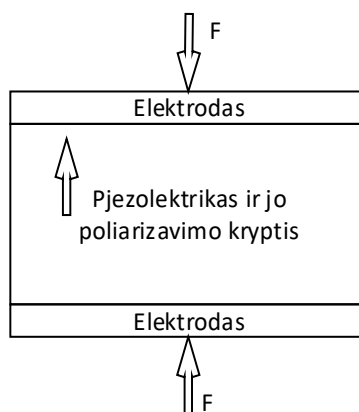
Pjezoelektrikui veikiant d_{15} moda, jėga veikianti pjezoelektriką yra statmena poliarizavimo kryptčiai, pjezoelektrikas traukiamas už priešinių kampų yra glamžomas. D_{15} moda yra rečiausiai naudojama

moda, kadangi ją naudojant sudėtingėja pjezoelektrinio virpesių generatoriaus gamyba, elektrodų padengimas, tvirtinimas. Taip pat, pjezoelektriko, veikiančio d15 modeje, išėjimo galia yra mažesnė nei pjezoelektriko, veikiančio kitose modose [9]. Tokioje modeje dirbantis nekeramikinis pjezoelektrikas energijai generuoti, galėtų būti panaudojamas pritvirtinant jį ant įvairių mechanizmų besisukančių dalių: ašių, velenų. Jeigu kūną veikia lenkimo jėga, o kūno ašis kreivėja nuo jį veikiančio lenkimo, tuomet pjezoelektrikas generatoriuje yra naudojamas d31 moda. D31 moda virpantis pjezoelektrikas su elektrodų pozicija ir veikiančių jėgų kryptimi pateikiamas 1.6 pav.



1.6 pav. d31 moda veikiantis pjezoelektrikas

Tokia moda veikiantis pjezoelektrinis keitiklis yra efektyviausias, kai yra lankstomas. Šia moda, pjezoelektrinę medžiagą veikianti jėga yra statmena poliarizacijos kryptiai. Tokioje modeje funkcionuojantis pjezoelektrinis keitiklis, pvz., polivinilfluoridinė (PVDF) plėvelė labiausiai tiktų naudoti vibracijų generatoriuose, turinčiuose gembinę mechaninę konstrukciją arba ant įvairių lankstomų paviršių, pavyzdžiui, drabužių. Jeigu kūną veikia tempimo ir gniuždymo deformacija, kai kūno ilgis kinta nuo jį veikiančios ašinės jėgos, tuomet pjezoelektrikas generatoriuje yra naudojamas d33 moda. D33 moda virpantis pjezoelektrikas su elektrodų pozicija ir veikiančių jėgų kryptimi pateikiamas 1.7 pav.



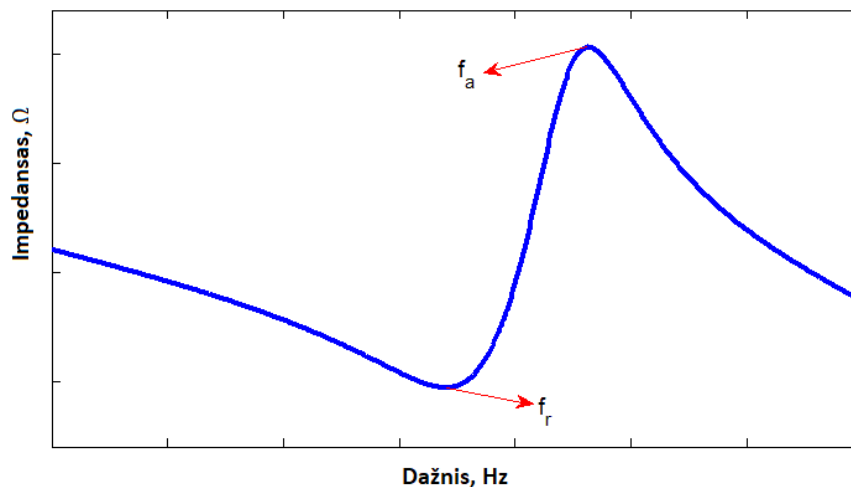
1.7 pav. d33 moda virpantis pjezoelektrikas

D33 moda dirbančios pjezoelektrinės medžiagos poliarizavimo kryptis yra lygiagreti pjezoelektriką veikiančiai išorinei deformacijai. Tokia moda dirbanti pjezoelektrinė medžiaga dirba efektyviausiai, kai yra gniuždoma. Dažniausiai d33 moda dirbantis pjezoelektrikas galėtų būti pjezoelektrinė puta arba pjezokeramika.

1.2.3. Rezonansinis pjezoelektrinių generatorių dažnis

Pjezoelektrinių generatorių efektyvumas priklauso ne tik nuo generatoriaus gamyboje naudojamų medžiagų ar pjezoelektrinių savybių, bet nuo konstrukcijos ir savojo išorinių mechaninių virpesių

virpėjimo dažnio. Pjezolektrikas esantis sistemoje generuojančioje ir kaupiančioje elektros energiją efektyviausiai elektros energiją generuoja, kai virpa sistemos rezonansiniu dažniu. Impedanso priklausomybės nuo dažnio pobūdis pateiktas 1.8 pav.



1.8 pav. Pjezoelektriko gembės impedanso priklausomybė nuo dažnio [10]

Iš grafiko galima pastebėti, jog pjezoelektrinės medžiagos, naudojamos elektros energijos generatoriuose efektyviausiai veikia prie rezonansinio dažnio, kur pjezoelektriko impedansas yra mažiausias ir pasiekiamas didžiausias energiją generuojančios ir kaupiančios elektrinės sistemos efektyvumas. Tai yra ir vienas didžiausių pjezoelektrinių generatorių trūkumų, kadangi praktiškai funkcionuojančio pjezoelektrinio generatoriaus virpesius sužadinanti išorinė energija yra pasiskirsčiusi plačiame dažnių spektre [11]. Rezonansinį dažnį galima reguliuoti keičiant pjezoelektrinės medžiagos gabaritus, tipą, naudojamos mechaninės generatoriaus konstrukciją, jos standumą. Jeigu generatoriaus konstrukcija gembinė, tai rezonansinis dažnis priklauso nuo gembės šerdies medžiagos, mechaninio gembės šerdies nuovargio. Rezonansinį dažnį galima reguliuoti keičiant gembės ilgį, naudojamo svarelį masę, tvirtinimo taško konstrukciją ir temperatūrą. Elektros energijos generavimui naudojamos PVDF plėvelės dažniausiai būna panaudojamos gembinėse mechaninėse konstrukcijose dėl savo mechaninio atsparumo bei lankstumo. Gembinės konstrukcijos vibracijų generatoriaus rezonansinis dažnis yra apskaičiuojamas pagal 4 formulę [4].

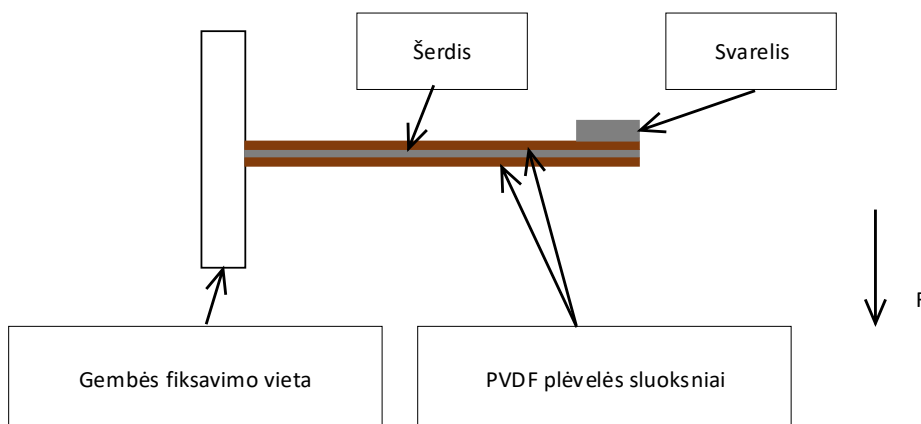
$$f_r = \sqrt{\frac{Ywh^3}{4l^3m}}, \quad (4)$$

čia Y – šerdies Jungo modulis (10^9 N/m²), w – gembės plotis (m), h – gembės aukštis (m), l – gembės ilgis (m), m – svarelį masė (kg).

1.2.4. Gembės tipo pjezoelektrinio elektros energijos generatoriaus struktūra, sluoksnių jungimo būdai

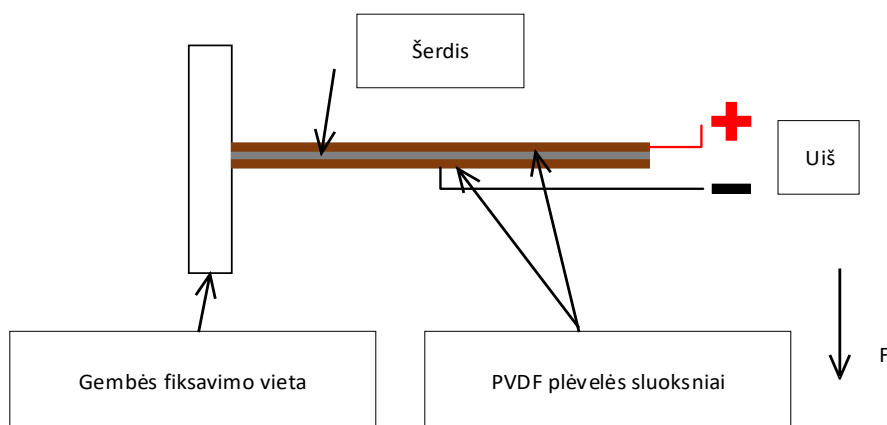
Pjezoelektrinis elektros generatorius sudarytas iš dviejų dalių: elektromechaninės sistemos ir elektros energijos kaupimo grandyno [12]. Elektromechaninė dalis projektuojama atsižvelgiant į tai, kokia bus jo apkrova, kokie yra didžiausi leistini generatoriaus gabaritai, kokioje aplinkoje dirbs pjezoelektrinis generatorius. Pagal tai yra parenkama energijos generatoriaus mechaninė konstrukcija, kuri gali būti labai įvairi. Vieni dažniausiai naudojamų pjezoelektrinių generatorių, tai gembės tipo pjezoelektriniai generatoriai, kai pjezolektrikas yra tvirtinamas ant gembės šerdies ir yra lankstomas. Plėveliniai

pjezoelektrikai ant šerdies gali būti klijuojami vienas ant kito, sluoksniais. Geros polivinilfluoridinių (PVDF) plėvelių mechaninės ir pjezoelektrinės savybės leidžia jas patogiai panaudoti gėmbių tipo mechaninėse konstrukcijose, PVDF plėvelei veikiant d31 moda. Gėmbės tipo elektromechaninio generatoriaus struktūra pateikiama 1.9 pav.



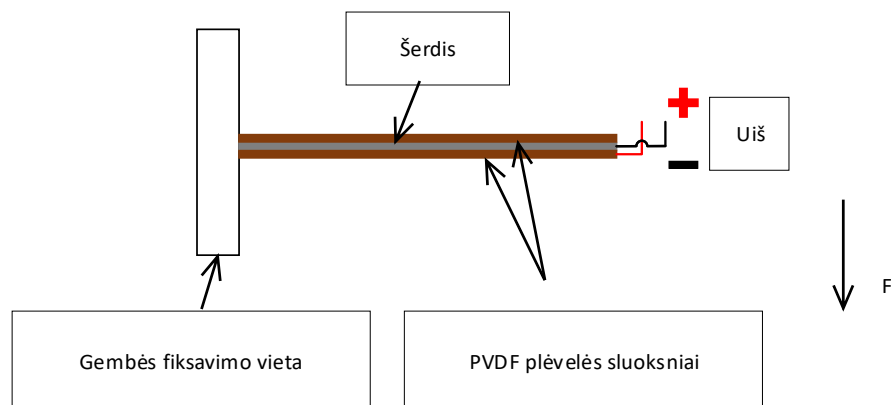
1.9 pav. Gėmbės tipo mechaninių virpesių generatoriaus struktūra

Naudojant tokią gėmbės konstrukciją yra naudojama elektrai laidži arba nelaidži šerdis, parenkama atsižvelgiant į šerdies Jungo modulį ir tamprumo ribą. Renkantis šerdį, siekiama, jog šerdis, kuo labiau deformuotųsi nesulūždama, kad PVDF plėvelėje susidarytų, kuo didesni paviršiaus įtempiai. Naudojant nelaidžią šerdį, pavyzdžiui, plastiką, ant šerdies paviršiaus turi būti sukuriamas elektrinis kontaktas, panaudojant įvairius laidininkus (varį, aliuminį, auksą) ir jų užnešimo ar klijavimo metodus. Ant abiejų pjezoelektrinės gėmbės šerdies pusių yra užklijuojama ir sujungiama PVDF plėvelė taip, kad jos poliarizavimo kryptys nebūtų priešinės. Sutapus plėvelių poliarizavimo kryptims, plėvelių generuojama įtampa susisumuoja. Mechaniniais virpesiais veikiant gėmbę, vienas sluoksnis yra lenkiamas, o kitas gniuždomas, didžiausi įtempiai susidaro gėmbės tvirtinimo taške [13]. Polivinilfluoridinės (PVDF) plėvelės sluoksniai gali būti jungiami nuosekliai arba lygiagrečiai. PVDF plėvelės jungimas nuosekliai pateikiamas 1.10 pav.



1.10 pav. Nuoseklus pjezoelektrinės PVDF plėvelės sluoksnių jungimo būdas

Nuoseklus pjezoelektrinės plėvelės jungimas leistų pasiekti didžiausią išėjimo galią, esant didelėms apkrovos varžoms bei aukštiems vibracijų dažniams [14]. PVDF plėvelės jungimas lygiagrečiu būdu pateikiamas 1.11 pav.



1.11 pav. Lygiagretus pjezoelektrinės PVDF plėvelės sluoksnių jungimo būdas

Lygiagretus PVDF plėvelių jungimas yra efektyviausias ir didžiausią galią duodantis esant vidutiniams mechaninių virpesių dažniams bei vidutinėms apkrovoms. Gembės konstrukcijos mechaninių virpesių generatoriaus, bendra generuojama galia priklauso nuo inertinės masės, didžiausio poslinkio, rezonansinio dažnio ir generatorių veikiančio išorinio poveikio amplitudės [1]. Generuojamos galios matematinė išraiška pateikiama 5 formulėje.

$$P = 4\pi^3 m f_r^3 y Z_{max}, \quad (5)$$

čia m – masė (kg), f_r^3 – rezonansinis dažnis (Hz), y – mechaninių virpesių amplitudė (m), Z_{max} – didžiausias poslinkis (m).

Nesudėtinga konstrukcija ir gamyba, didelis pjezoelektrinės PVDF plėvelės atsparumas lankstymui, galimybė paprastai derinti pjezoelektrinių gembės tipo generatorių rezonansinį dažnį, keičiant laisvajame gale pritvirtintą masę, turi didelį potencialą praktiniam panaudojimui. Praktiškai, gembės tipo pjezoelektriniai generatoriai gali būti naudojami įvairiose transporto priemonėse ir kituose motoriniuose įtaisuose.

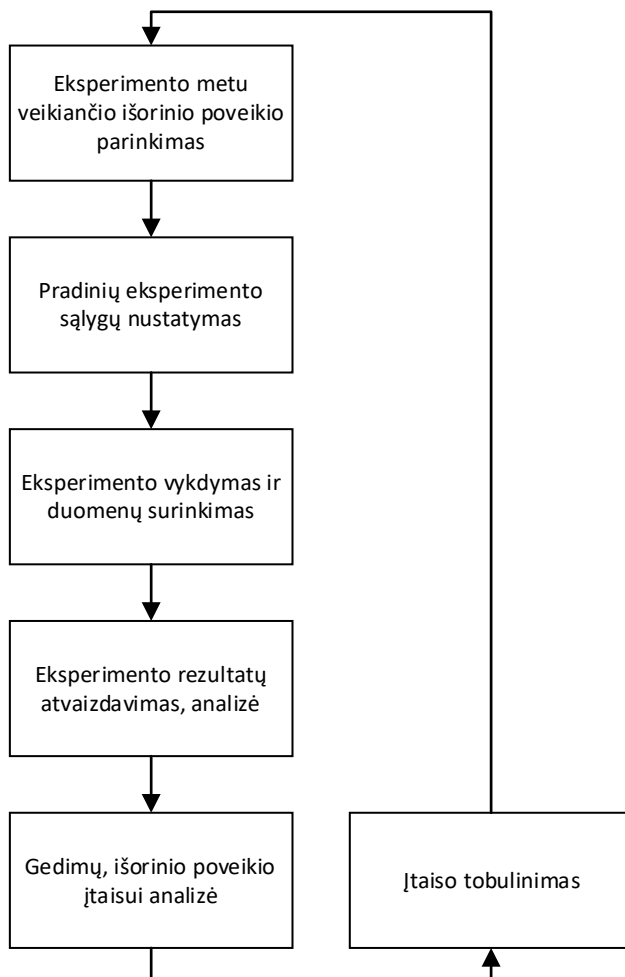
1.2.5. Pjezoelektrinių elektros energijos generatorių ilgaamžiškumo tyrimų metodai

Pjezoelektrinių elektros energijos generatorių ilgaamžiškumas yra svarbus didinant praktinį šių įtaisų pritaikomumą rinkoje. Įtaiso, dirbančio tam tikromis sąlygomis, patikimumo vertinimui atliekami ilgaamžiškumo tyrimai. Siekiant sutrumpinti laiką nuo įtaiso vystymo fazės iki patekimo į rinką, identifikuoti poveikį pjezoelektrinių generatorių konstrukcijos nuovargiui, naudojamos įvairios metodikos, leidžiančios pagreitintai įvertinti įtaiso patikimumą. Atliktuose pjezoelektrinių gembės tipo elektros energijos generatorių, naudojančių skirtingas pjezoelektrines medžiagas ilgaamžiškumo tyrimuose, vertinamas ciklinio aplinkos temperatūros pokyčio ir mechaninio poveikio įtaka pjezoelektrinių generatorių elektrinėms ir mechaninėms savybėms [18][19]. Stebimas poveikis generatorių konstrukcijai, vertinamas mechaninis nuovargis, sukeltis pakitimus vidinėse medžiagų struktūrose, dėl ko mažėja generatorių efektyvumas, vyksta įvairių parametru degradacija. Pjezoelektrinių generatorių ilgaamžiškumo tyrimai naudojami sukelti jau žinomus arba identifikuoti ir įvertinti galimus naujus tam tikro gaminio gedimus ar parametru degradavimą, siekiant patobulinti generatorių konstrukciją.

Pjezoelektrinių elektros energijos generatorių ilgaamžiškumas tiriamas bandinius veikiant įvairiais išorinių poveikių tipais [16][17]:

- Elektros energijos generatorių sendinant, jam esant patalpintam šalčio ir karščio kameroje, pastovioje temperatūroje, tam tikrą laiką;
- Termocikluojant elektros energijos generatorius pagal tam tikrą temperatūrinį profilį, tam tikrą ciklų skaičių;
- Cikliniu išoriniu mechaniniu poveikiu arba impulsu;
- Temperatūros pokyčio ir išorinio ciklinio mechaninio poveikio kombinacija.

Pjezoelektriniai elektros energijos generatorius veikiantys cikliniai temperatūriniai poveikiai kuriami šalčio ir karščio kameroje. Cikliniai mechaniniai virpesiai, kuriami naudojant įvairias elektromechanines pavaras, magnetines sistemas. Pjezoelektrinių generatorių tyrimai vykdomi pagal bendrąjį patikimumo tyrimų vykdymo algoritmą. Bendrasis pjezoelektrinių generatorių ilgaamžiškumą tyrimo vykdymo algoritmas pateiktas 1.10 pav.



1.10 pav. Bendrasis patikimumo tyrimo eigos algoritmas

Prieš atliekant eksperimentinį tyrimą, parenkamas išorinis poveikis, atsižvelgiant į darbinės pjezoelektrinių generatorių veikimo sąlygas. Parenkami ilgaamžiškumo tyrimo objektai, jų konfigūracijos, bandinių skaičius, kitos eksperimento sąlygos.

2. Pjezoelektrinių energijos generatorių su poliesterio (PET) ir plieninėmis šerdimis patikimumo tyrimas

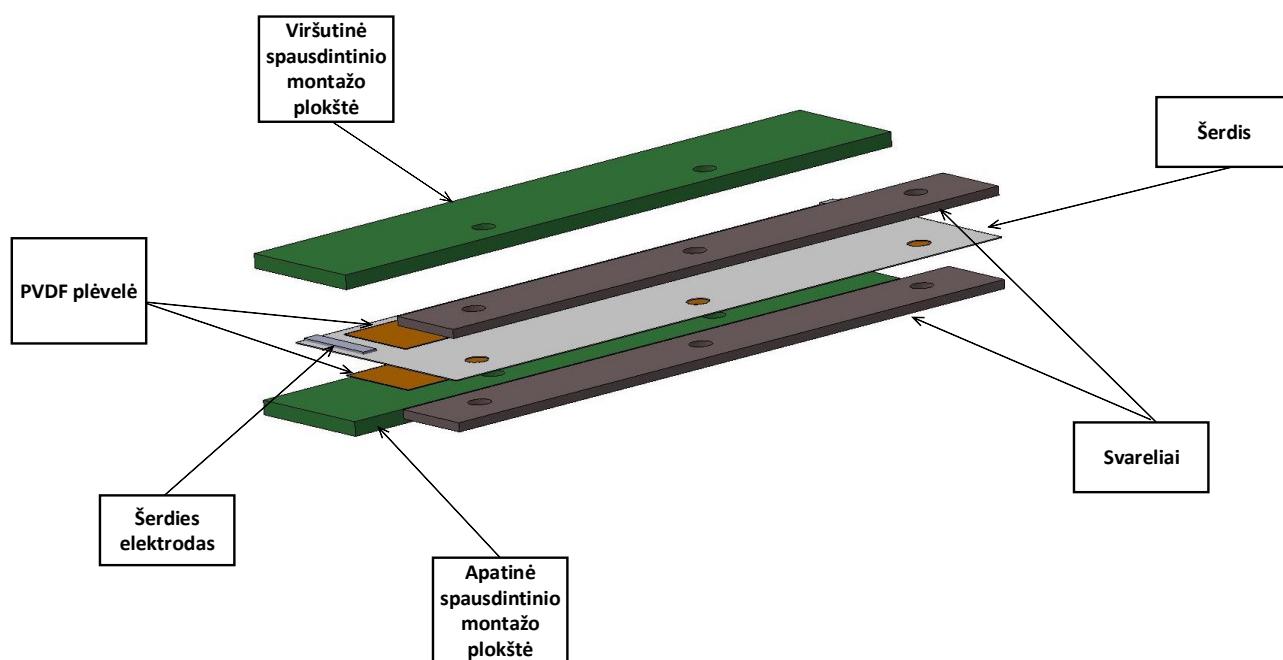
Šiame skyriuje pateikiama eksperimentinių tyrimų stendo struktūrinė schema, konstrukcijos modelis. Skyriuje apžvelgiama eksperimentiniuose tyrimuose naudojama aparatinė įranga, pateikiami aparatinės įrangos pasirinkimo argumentai. Skyriuje pateikiama PET ir plieninę šerdį turinčių gembės tipo pjezoelektrinių generatorių ilgaamžiškumo tyrimo eiga, pateikiami pjezoelektrinių gembės tipo PVDF generatorių parametrai, tiriamųjų objektų konstrukcija. Apdorojami, atvaizduojami ir analizuojami gauti pjezoelektrinių generatorių patikimumo tyrimo rezultatai.

2.1. Eksperimentinio tyrimo stendo projektavimas

Šiame poskyryje pateikiama tiriamojo objekto konstrukcija. Apžvelgiama eksperimentinio pjezoelektrinių generatorių ilgaamžiškumo tyrimo stendo struktūra. Apžvelgiama eksperimentiniame tyrime naudojama įranga.

2.1.1. Tiriamojo objekto ir eksperimentinio tyrimo struktūra

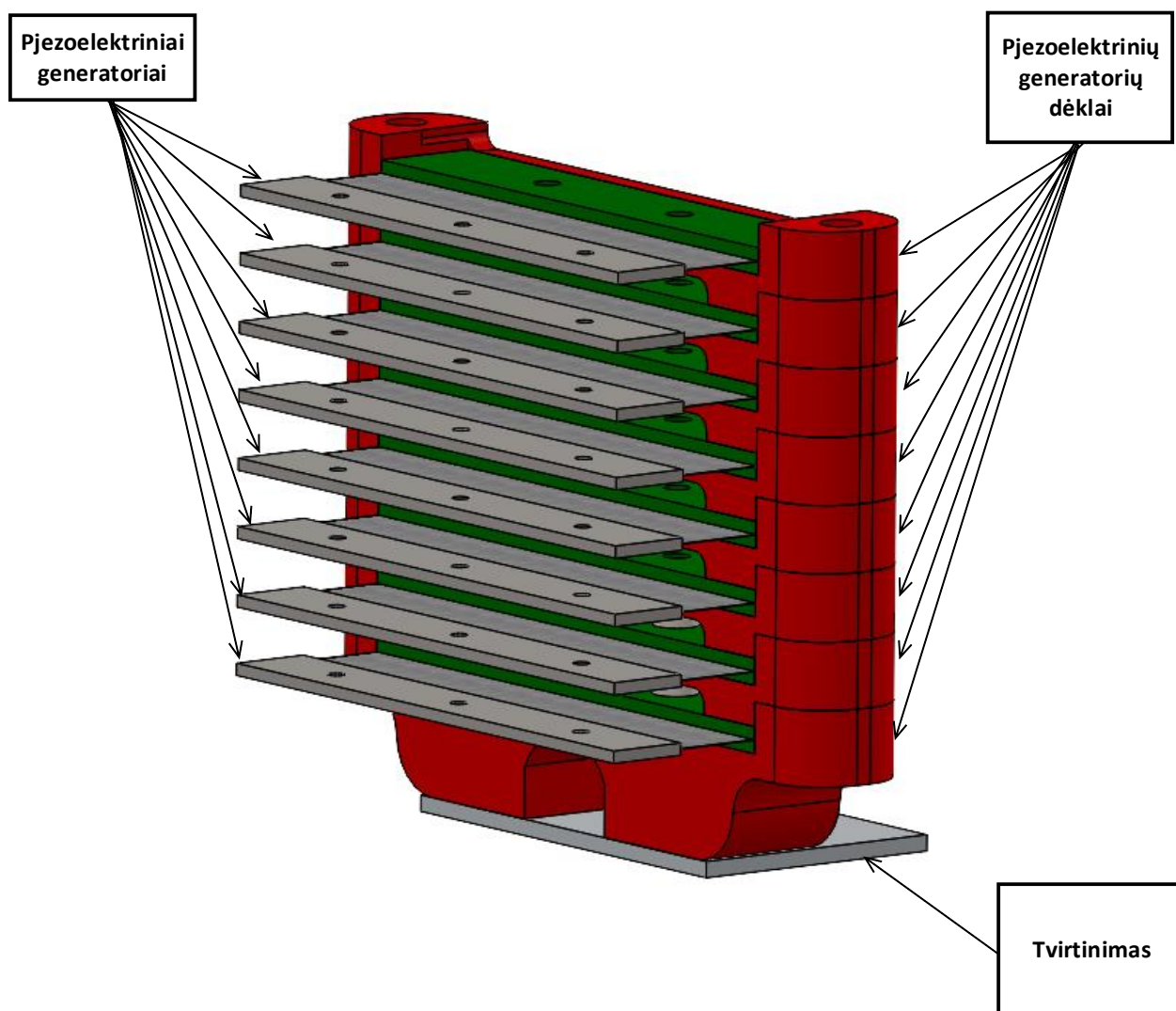
Ilgaamžiškumo tyrimų metu tiriamas pjezoelektrinis generatorius, kuris yra sudarytas iš kelių konstrukcinių dalių: plieninės arba plastikinės PET šerdies su laidžiais elektros srovei kliais užklijuota metalizuota PVDF plėvele. Pjezoelektrinio elektros energijos generatoriaus konstrukcijos 3D modelis pateikiamas 2.1 pav.



2.1 pav. Mechaninė pjezoelektrinio generatoriaus konstrukcija

Plėvelė klijuojama iš abiejų šerdies pusių ir yra jungiama lygiagrečiai, taip, kad poliarizavimo kryptis sutaptų. Esant plastikinei šerdžiai klijuojami variniai elektrodai. Šerdis tvirtinama tarp dviejų spausdintinio montažo plokščių su paviršiniais elektrodais. Spausdintinio montažo plokštės, tarpusavyje sutvirtinamos 3 mm diametro varžtais. Įprastai, laisvajame pjezoelektrinių elektros energijos generatorių gale tvirtinamas svarelis, atsižvelgiant į darbinės generatoriaus sąlygas – rezonansinį elektrinio generatoriaus virpėjimo dažnį. Pjezoelektriniai generatoriai tvirtinami

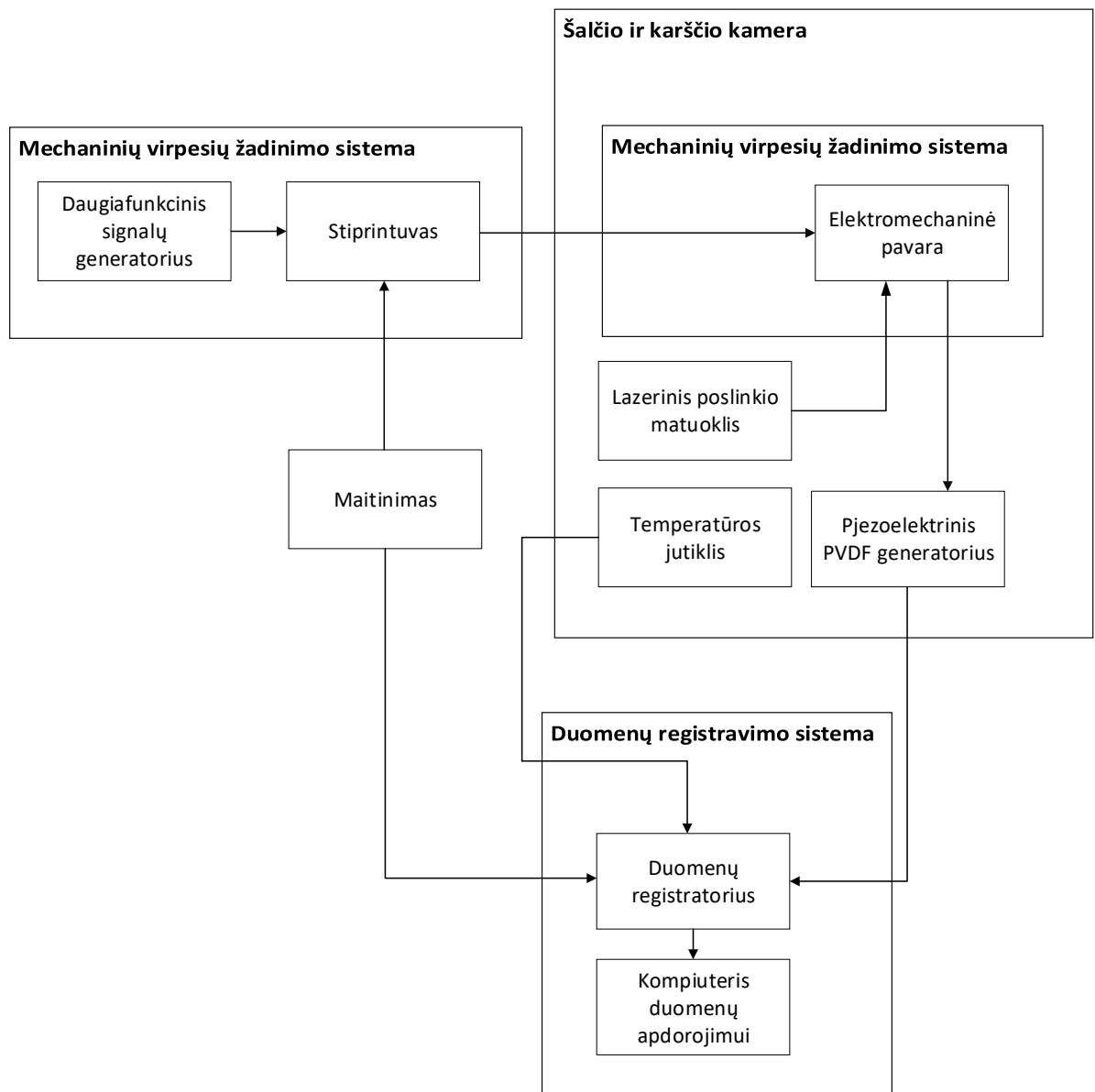
kasetėse, kasetės sutvirtinamos tarpusavyje. Pjezoelektrinių elektros energijos generatorių tvirtinimas kasetėse pateikiamas 2.2 pav.



2.2 pav. Pjezoelektrinių generatorių tvirtinimo dėkluose 3D modelis

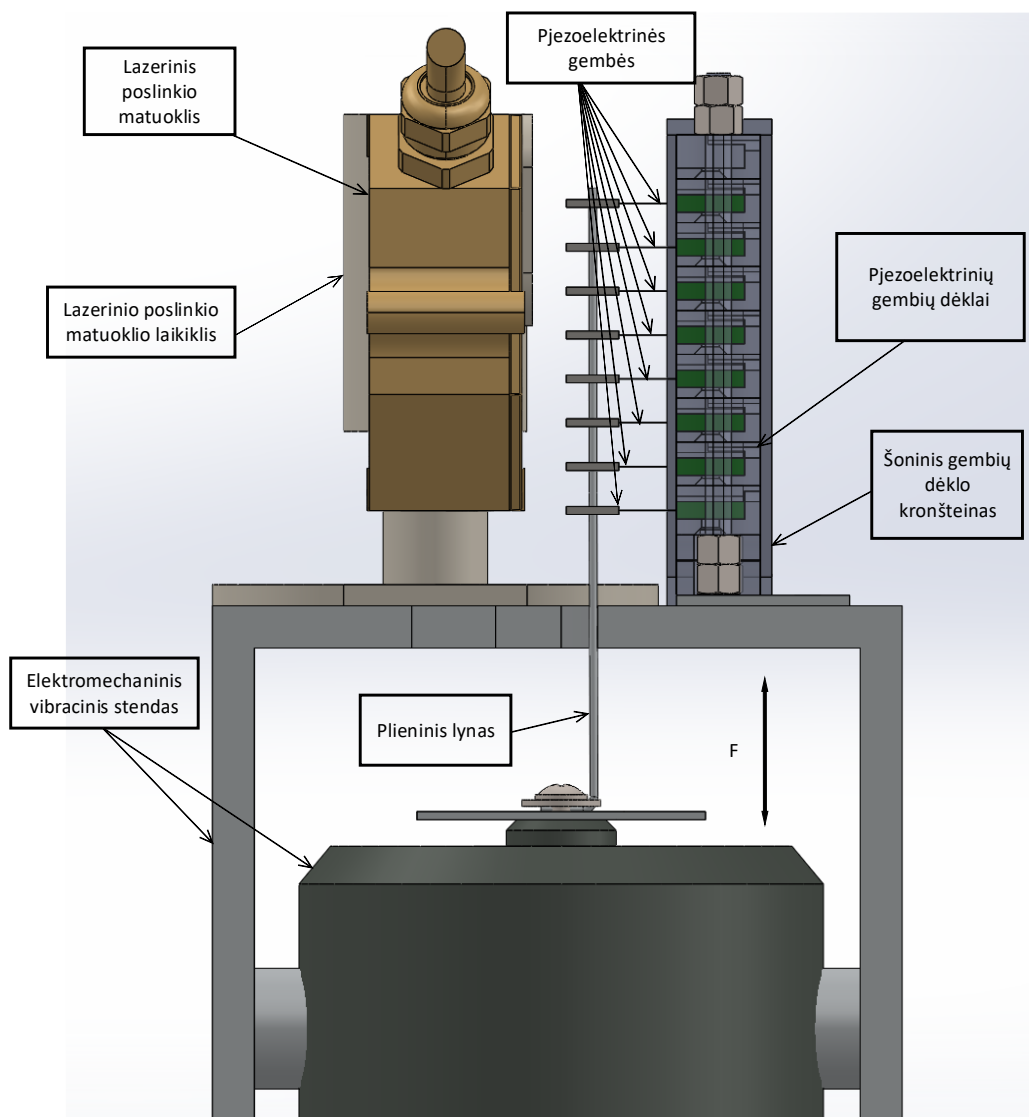
Pjezoelektrinių PVDF generatorių ilgaamžiškumo tyrimams atlikti, projektuojamas eksperimentinis tyrimų stendas. Eksperimentinis tyrimų stendas yra sudarytas iš tyrimų objekto – pjezoelektrinio energijos generatoriaus ir kelių atskirų sistemų – mechaninių virpesių žadinimo bei duomenų registravimo sistemų. Dalis mechaninių virpesių žadinimo sistemos yra talpinama kameros išorėje, kita dalis - šalčio ir karščio kameroje. Duomenų surinkimo sistema montuojama kameros išorėje. Mechaninių virpesių žadinimo sistemoje esančio generatoriaus sustiprintas harmoninis signalas žadina elektromechaninio vibracinio stendo virpesius. Vibracinio stendo harmoniniai svyravimai tempia surištus tarpusavyje pjezoelektrinių generatorių galus, plieniniu 1.5 mm diametro lynu, nustatyta svyravimų amplitudė. Lazeriniu poslinkio matuokliu matuojama vibracinio stendo mechaninio virpesio amplitudė. Amplitudės matavimas vietoj gembės svyravimų pagreičio matavimo, leidžia, eksperimento eigoje išvengti išorinio elektromechaninio vibracinio stendo generuojamų virpesių dažnio derinimo, jog šis sutaptų su PVDF generatoriaus savuoju rezonansiniu dažniu. Savasis rezonansinis generatoriaus dažnis gali kisti dėl PVDF plėvelės senėjimo, pjezoelektrinio generatoriaus ir tvirtinimo nuovargio. Vibracinio stendo virpesių amplitudės matavimams naudojamas „Micro – Epsilon“ lazerinis poslinkio matuoklis, galintis matuoti iki 300

mm atstumu ir užtikrinantis 0.03 μm matavimo skyrą bei gamintojo suteikiamos programinės įrangos pagalba duomenis atvaizduojantis grafiškai [18]. Užregistruotos termociklavimo kameros temperatūros ir pjezoelektrinių gėmbių išėjimo įtampos duomenys matuojami duomenų registruojimais. Eksperimentinių tyrimų stendo struktūrinė schema pateikiama 2.3 pav.



2.3 pav. Eksperimentinių tyrimų stendo struktūrinė schema

„Solidworks“ programine įranga sukurtas pjezoelektrinių gėmbių dėklų, lazerinio matuoklio tvirtinimo bei vibracinio stendo 3D modelis pateikiamas 2.4 pav.



2.4 pav. Pjezelektrinių gėbių dėklo, lazerinio matuoklio tvirtinimo bei vibracinio stendo 3D modelis

Tarpas tarp gėbių – 8 mm. Šalčio ir karščio kameros temperatūra matuojama naudojant temperatūros jutiklį. Pjezelektrinių gėbių išėjimo įtampos U_{is} ir temperatūros vertės matuojamos duomenų registratoriumi, duomenys apdorojimui ir atvaizdavimui perduodami į kompiuterį.

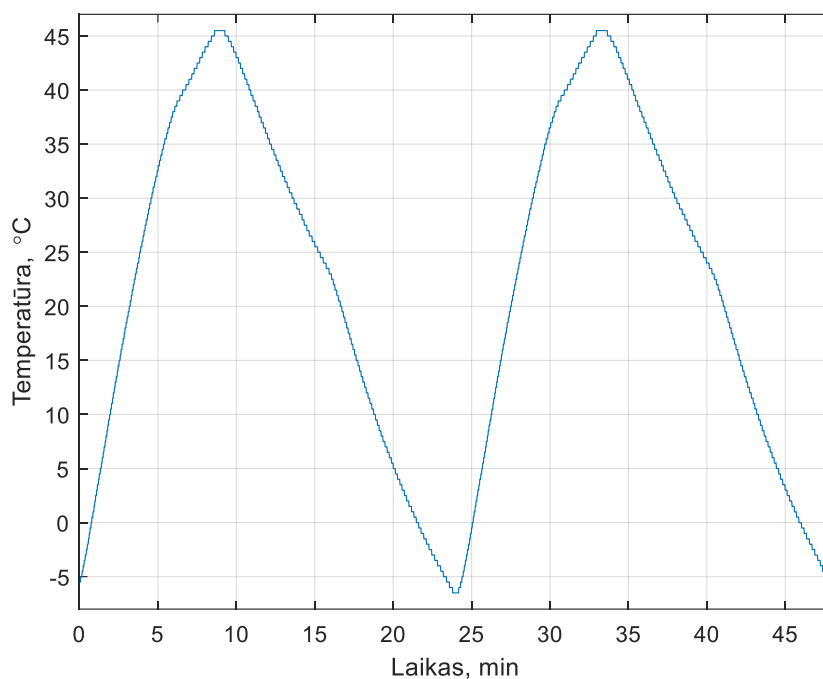
2.2. Pjezelektrinių elektros energijos generatorių patikimumo tyrimo eiga

Šiame poskyryje pateikiamos pjezelektrinių elektros energijos generatorių ilgaamžiškumo tyrimo sąlygos. Pateikiamas temperatūrinio profilio grafikas, tiriamų pjezelektrinių generatorių mechaniniai parametrai, išmatuotos pradinės elektrinės talpos vertės.

2.2.1. Temperatūros profilis, tyrimo eiga

Eksperimentinis tyrimas atliekamas siekiant išsiaiškinti potencialius pjezelektrinio generatoriaus gedimus, galinčius atsirasti įtaiso eksploataavimo metu dėl konstrukcijos nuovargio, atsirandančio nuo ciklinio temperatūros ir mechaninio poveikio. Tyrimo metu vertinami elektrinių dydžių: pjezelektrinių elektros energijos generatorių išėjimo įtampos, elektrinės talpos pokyčiai, generatorių laisvuosius galus virpinant pastovia 1 mm amplitude, 50 Hz dažniu. Eksperimentiniam tyrimui parenkamas temperatūros profilis, atsižvelgiant į galimus aplinkos temperatūros pokyčius, galutinį

gaminį naudojant normaliomis darbinėmis sąlygomis. Šalčio ir karščio kameros temperatūra kinta nuo $-5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Eksperimente naudojamo temperatūrinio profilio du ciklai pateikti 2.5 pav.



2.5 pav. Termociklavimo šalčio ir karščio kameroje temperatūros profilis

Vieno ciklo metu, temperatūra nuo $-5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, per 8 min. pasiekia aukščiausią tašką – $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, toliau, per 16 min. mažėja iki $-5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Eksperimento metu atlikti 1125 temperatūros kitimo ciklai, trunkantys po 24 min.

2.2.2. Pradiniai tiriamų objektų parametrai

Eksperimento metu buvo tiriami 6 pjezoelektriniai generatoriai. Trijų pjezoelektrinių generatorių šerdys yra pagamintos iš $560\text{ }\mu\text{m}$ storio poliesterio (PET), o kitų trijų – iš $80\text{ }\mu\text{m}$ plieno lakštų. Generatorių gamyboje naudojamos dviejų skirtingų metalizavimų PVDF plėvelės. PET šerdį turintys pjezoelektriniai generatoriai naudoja vario-nikelio padengimą turinčias plėveles, o plieninę šerdį – aliuminio padengimą turinčias plėveles. Plėvelės priklijuotos prie šerdies vienodais, elastingais, laidžiais dviejų komponentų klijais. Visų pjezoelektrinių elektros energijos generatorių ilgis ir plotis vienodi ($74 \times 26\text{ mm}$). Detalūs tiriamųjų objektų parametrai pateikiami 2 lentelėje.

2 lentelė. Eksperimento metu tiriamų pjezoelektrinių generatorių parametrai

Pjezoelektrinio generatorius nr.	PVDF elektrodų medžiaga	Šerdies medžiaga	Pjezoelektrinio generatoriaus ilgis ir plotis, mm	Šerdies storis, μm	Pjezoelektrinės medžiagos storis, nm
1	Varis-nikelis	PET	74x26	560	50
2	Varis-nikelis	PET	74x26	560	50
3	Varis-nikelis	PET	74x26	560	50
4	Aliuminis	Plienas	74x26	80	30
5	Aliuminis	Plienas	74x26	80	30
6	Aliuminis	Plienas	74x26	80	30

Tyrimų metu pastoviai matuojamos pjezoelektrinių generatorių nuolatinės išėjimo įtampos U_{is} vertės, elektromechaninio virpesių generatoriaus virpėjimo amplitudė, momentinė šalčio ir karščio kameros temperatūra. Gauti duomenys atvaizduoti laikiniuose grafikuose, apskaičiuojamos vidutinės U_{is} vertės, jų pokyčiai eksperimento eigoje.

Prieš tyrimą buvo išmatuotos pjezoelektrinių generatorių PVDF plėvelės elektrinės talpos vertės tarp šerdies elektrodo ir apatinio bei viršutinio plėvelės elektrodo. Elektrinės talpos matavimas atliekamas tam, jog būtų galima įvertinti pjezoelektrinės plėvelės ir šerdies elektrodo jungiančio abiejų sluoksnių plėvelės klijavimo kokybę. Idealiu atveju, talpa po klijavimo turėtų nesiskirti nuo talpos vertės tarp PVDF plėvelės viršutinio ir apatinio sluoksnių. Po sluoksnių klijavimo talpa turėtų būti tarp 3.2 nF – 3.9 nF. Matavimai atliekami naudojant laboratorinį LCR matuoklį. Pjezoelektrinių generatorių talpos tarp šerdies ir plėvelės elektrodų pateikiamos 3 lentelėje.

3 lentelė. Pjezoelektrinių generatorių talpos tarp šerdies elektrodo ir PVDF plėvelių elektrodų

Generatoriaus nr.	Talpa tarp šerdies ir apatinio sluoksnio, nF	Talpa tarp šerdies ir viršutinio sluoksnio, nF
1	3.61	3.46
2	3.65	3.54
3	3.45	3.48
4	3.71	3.61
5	3.57	3.52
6	3.14	3.3

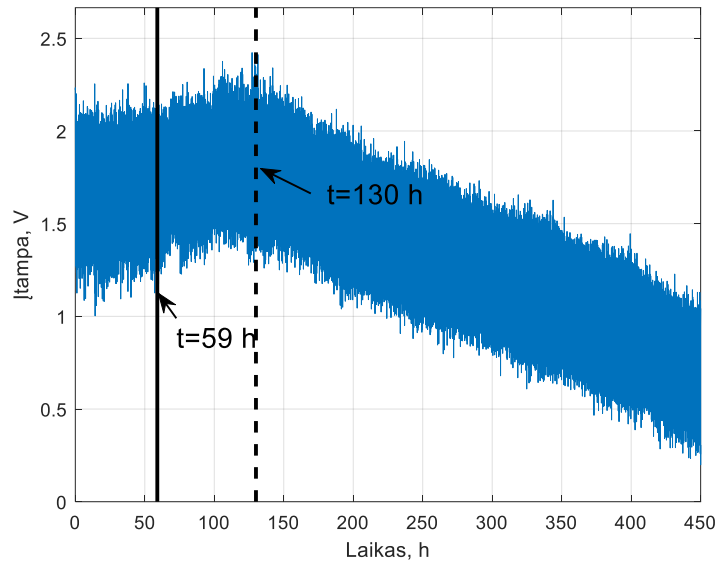
Pagal išmatuotas talpas nustatyta, kad pradiniu momentu pjezoelektrinių generatorių elektrodų ir šerdies elektrodų sujungimas yra geros kokybės. Elektrinės talpos verčių skirtumai atsiranda dėl to, jog pjezoelektriniai generatoriai yra gaminti rankiniu būdu, todėl talpų verčių skirtumui įtaką gali padaryti gamybos metu atsiradę netikslumai – PVDF juostelių pjaustymo paklaidos, šerdies paruošimas klijavimui, šerdies suspaudimas klijuojant.

2.3. PET ir plieninę šerdį turinčių pjezoelektrinių generatorių ilgaamžiškumo tyrimo rezultatų analizė

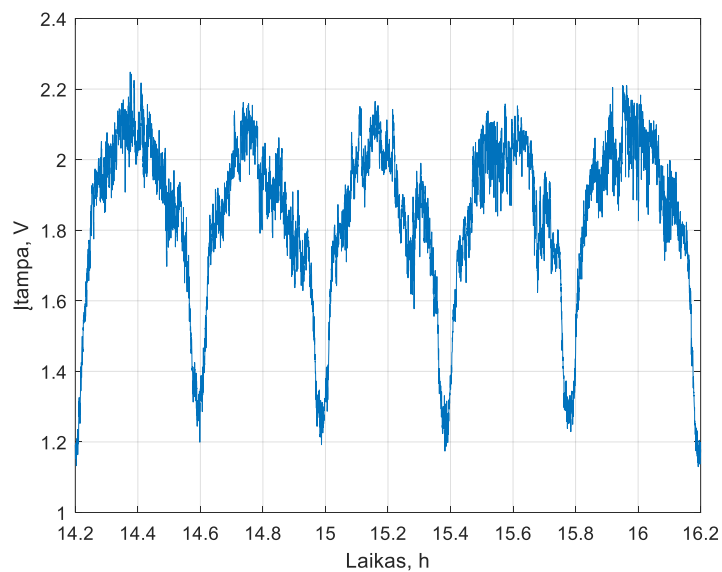
Šiame poskyryje apžvelgiami elektrinių dydžių pokyčiai po eksperimentinio tyrimo. Aptariamas termociklavimo poveikis tiriamiems poliesterio (PET) ir plieninę šerdį turintiems generatoriams, PVDF plėvelei.

2.3.1. Pjezoelektrinių generatorių U_{is} pokytis

Gavus tyrimo rezultatus, įtampų duomenys apdoroti ir atvaizduoti laikinėje ašyje. Pjezoelektrinio generatoriaus nr. 1 išėjimo įtampos U_{is} priklausomybė nuo temperatūros ir veikimo laiko pateikiama 2.6 pav.



a)

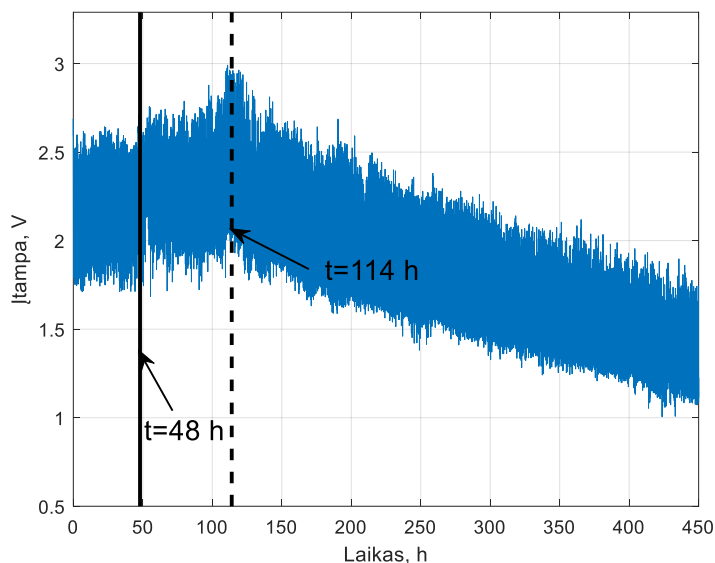


b)

2.6 pav. Pjezoelektrinio generatoriaus nr.1 $U_{i\dot{s}}$ priklausomybė nuo temperatūros ir veikimo laiko (a) ir $U_{i\dot{s}}$ priklausomybė nuo temperatūros ir veikimo laiko 14.2 h ir 16.2 h laiko ruože (b)

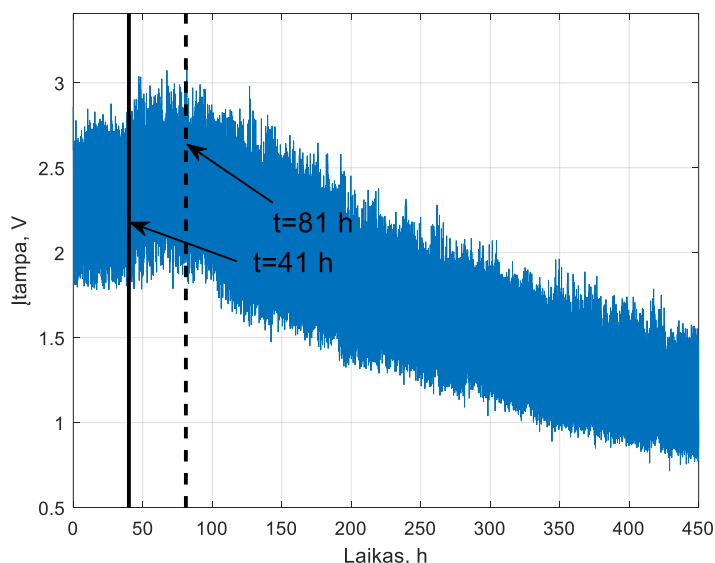
Iš pjezoelektrinio generatoriaus nr. 1 $U_{i\dot{s}}$ priklausomybės nuo laiko grafiko galime pastebėti, jog išėjimo įtampa stipriai priklauso nuo temperatūros. Didėjant temperatūrai, mažėja pjezoelektrinio generatoriaus standumas, dėl ko labiau deformuojama pjezoelektrinė PVDF plėvelė, generuojama didesnė įtampa. Iki $t = 59$ h, maksimali ir minimali generatoriaus išėjimo įtampa beveik stabili, o vidutinė $U_{i\dot{s}} = 1.64$ V. Po $t = 59$ h, pjezoelektrinio generatoriaus generuojamos išėjimo įtampos minimumas ir maksimumas pradeda didėti. Po $t = 130$ h, generuojama įtampa tolygiai mažėja dėl atsirandančio konstrukcijos nuovargio. Pjezoelektrinis generatorius nr. 1 su PET šerdimi generavo įtampą iki pat tyrimo pabaigos, pabaigoje vidutinė $U_{i\dot{s}} = 0.68$ V. Procentinis generuojamos įtampos sumažėjimas lyginant išėjimo įtampos vertę buvusią tyrimo pradžioje ir esančią pabaigoje lygus 61

% . Pjezoelektrinio generatoriaus nr. 2 išėjimo įtampos U_{is} priklausomybė nuo eksperimento trukmės pateikiama 2.7 pav.



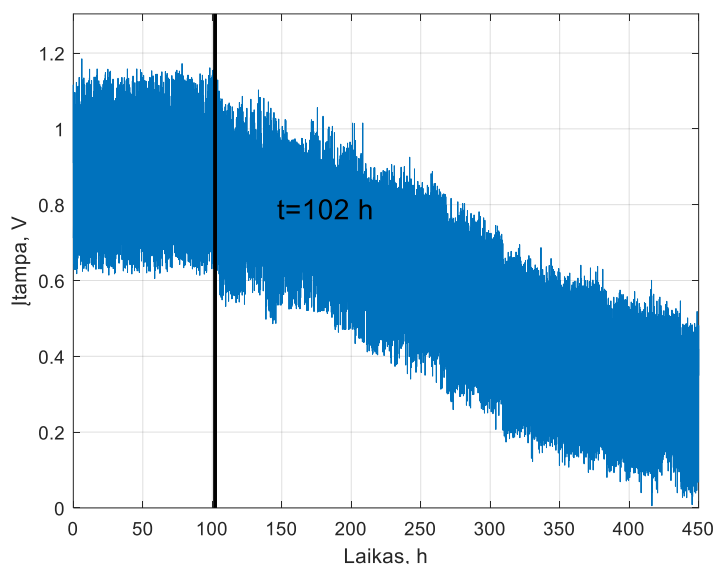
2.7 pav. Pjezoelektrinio generatoriaus nr.2 išėjimo įtampos grafiko priklausomybė nuo temperatūros ir veikimo laiko

Pjezoelektrinio generatoriaus nr. 2 U_{is} priklausomybės nuo laiko grafiko matomas panašus reiškinys kaip ir nr.1 pjezoelektriniame generatoriuje. Matoma, išėjimo įtampos priklausomybė nuo temperatūros. Iki $t=48$ h, generuojama įtampa yra tolygi (vidutinė $U_{is}=2.26$ V), tačiau toliau pradeda didėti. Generuojamos išėjimo įtampos vertė didėja iki $t=114$ h, toliau pradeda mažėti. Tyrimo pabaigoje, pjezoelektrinis generatorius generuoja vidutinę įtampą lygią $U_{is}=1.45$ V. Generuojamos išėjimo įtampos vertė tyrimo pabaigoje, sumažėjo 36 %. Pjezoelektrinis generatorius veikia iki pat tyrimo pabaigos. Pjezoelektrinio generatoriaus nr. 3 išėjimo įtampos U_{is} priklausomybė nuo eksperimento trukmės pateikiama 2.8 pav.



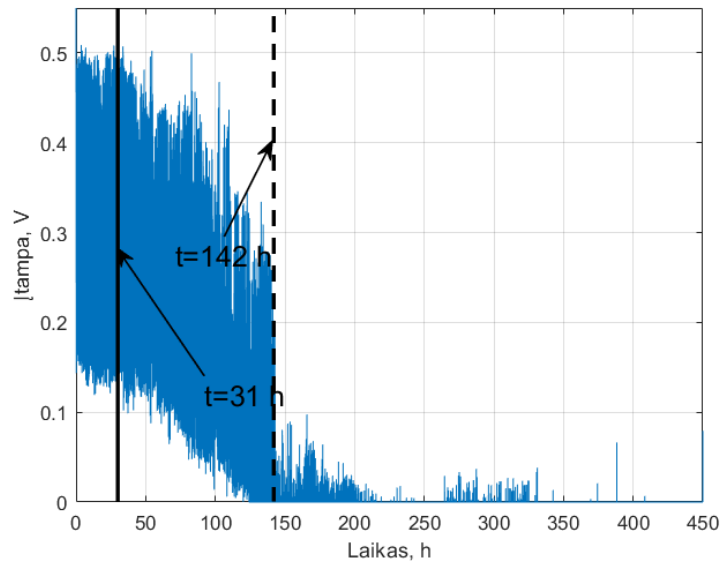
2.8 pav. Pjezoelektrinio generatoriaus nr.3 išėjimo įtampos grafiko priklausomybė nuo temperatūros ir veikimo laiko

Iš pjezoelektrinio generatoriaus nr. 3 U_{is} priklausomybės nuo laiko grafiko galime pastebėti, jog iki $t = 41$ h, generuojama įtampa yra pastovi kaip ir prieš tai buvusių pjezoelektrinių generatorių (vidutinė $U_{is} = 2.31$ V), tačiau toliau didėja iki $t = 81$ h, kol vėl pradeda mažėti. Išėjimo įtampa tyrimo pabaigoje $U_{is} = 1.24$ V. Procentinis generuojamos įtampos sumažėjimas lyginant buvusią vertę tyrimo pradžioje ir esančią pabaigoje lygus 46 %. Generatorius generuoja įtampą iki pat eksperimento pabaigos. Apžvelgus trijų PET šerdį turinčių pjezoelektrinių generatorių tyrimo rezultatus, galime teigti, kad plastikinę šerdį turinčių pjezoelektrinių generatorių išėjimo įtampa priklauso nuo temperatūros. Pradžioje, plastikinę šerdį turinčių pjezoelektrinių generatorių išėjimo įtampa būna tolygi, kol pradeda didėti iki tam tikro laiko. Vėliau, išėjimo įtampa mažėja dėl PVDF plėvelės degradacijos. Generuojama išėjimo įtampa padidėja dėl besikaupiančių mikro įtrūkimų pjezoelektrinio generatoriaus šerdyje ir laminatė, dėl kurių didėja plastikinę šerdį turinčio generatoriaus laisvojo galo atsilenkimo amplitudė, o šerdis vis labiau deformuoja PVDF plėvelę. Metalinę šerdį turinčio generatoriaus nr. 4 išėjimo įtampos U_{is} priklausomybė nuo eksperimento trukmės pateikiama 2.9 pav.



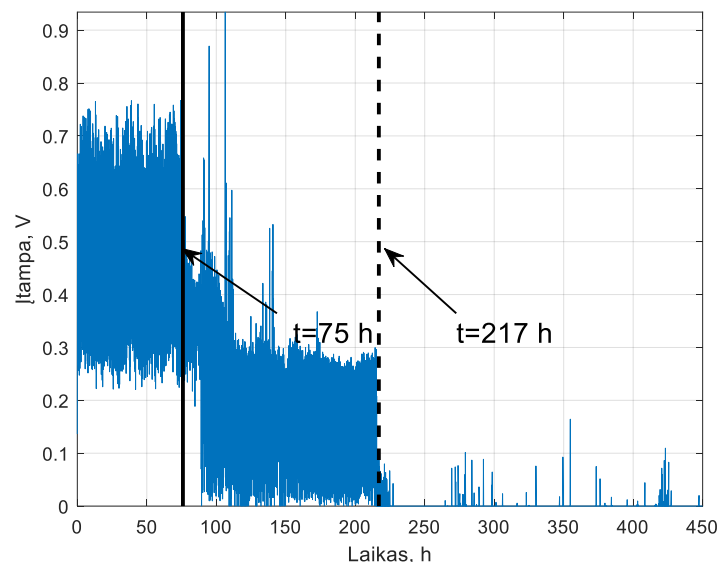
2.9 pav. Pjezoelektrinio generatoriaus nr. 4 išėjimo įtampos grafiko priklausomybė nuo temperatūros ir veikimo laiko

Iš pjezoelektrinio generatoriaus nr. 4 U_{is} priklausomybės nuo laiko grafiko matoma, jog plieninę šerdį turinčio pjezoelektrinio generatoriaus išėjimo įtampa yra beveik stabili iki $t = 102$ h (vidutinė $U_{is} = 0.93$ V), kol pradeda mažėti. Išėjimo įtampa priklauso nuo kintančios temperatūros, kaip ir plastikinę šerdį turinčių pjezoelektrinių generatorių. Generuojamos įtampos vertė tyrimo eigoje sumažėjo 74 %, pabaigoje lygi $U_{is} = 0.34$ V. Generatorius veikia iki pat tyrimo pabaigos. Pjezoelektrinio generatoriaus nr. 5 išėjimo įtampos U_{is} priklausomybė nuo eksperimento trukmės pateikiama 2.10 pav.



2.10 pav. Pjezoelektrinio generatoriaus nr.5 išėjimo įtampos grafiko priklausomybė nuo temperatūros ir veikimo laiko

Iš pjezoelektrinio generatoriaus nr. 5 $U_{i\dot{s}}$ priklausomybės nuo laiko grafiko galima pastebėti, jog iki $t = 31$ h, generuojama įtampa buvo pastovi ir stabili, vidutiniškai $U_{i\dot{s}} = 0.32$ V. Po $t = 31$ h, pjezoelektrinis generatorius generuojama įtampa pradėjo mažėti, o ties $t = 142$ h, generatorius nustojo veikti. Po tyrimo apžiūrėjus generatorių, pastebėti žymūs mechaniniai PVDF plėvelės pažeidimai (nutrupėjęs metalizavimas, šerdies elektrodo įtrūkimai, paviršiaus korozija, dalinis PVDF plėvelės atsiklijavimas), šerdies pažeidimai ties šerdies lenkimo vieta. Pjezoelektrinio generatoriaus nr. 6 išėjimo įtampos $U_{i\dot{s}}$ priklausomybė nuo eksperimento trukmės pateikiama 2.11 pav.



2.11 pav. Pjezoelektrinio generatoriaus nr.6 išėjimo įtampos grafiko priklausomybė nuo temperatūros ir veikimo laiko

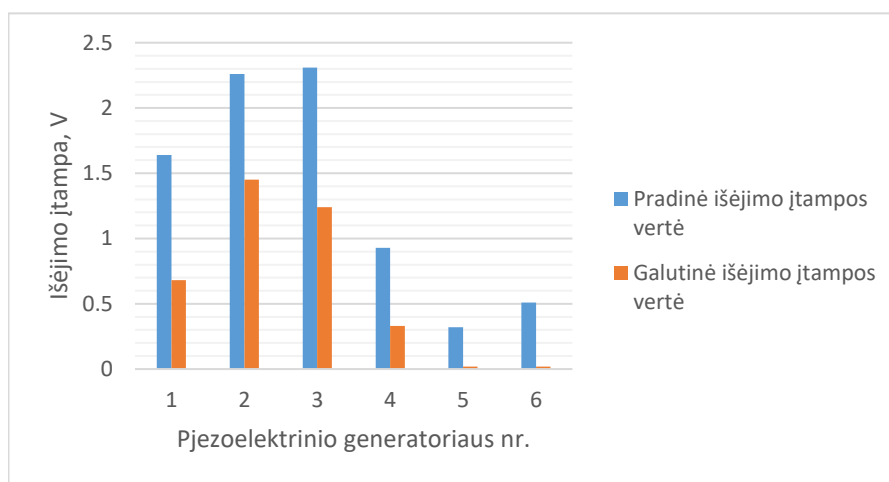
Iš pjezoelektrinio generatoriaus nr. 6 $U_{i\dot{s}}$ priklausomybės nuo laiko grafiko galime pastebėti, jog iki $t = 75$ h, generuojama įtampa buvo stabili, vidutinė $U_{i\dot{s}} = 0.51$ V. Po $t = 75$ h, generuojama įtampa sumažėjo iki vidutinės $U_{i\dot{s}} = 0.18$ V dėl konstrukcijos nuovargio. Generatorius nustojo veikti ne iš

karto, skirtingai nei nr.5 generatorius, po pažeidimo ties $t = 75$ h, PVDF plėvelė turėjo dalinį elektrinį kontaktą (matomi generuojamo signalo iškraipymai), kol ties $t = 217$ h, generatorius nustojo visiškai veikti. Po eksperimento apžiūrėjus tiriamąjį objektą pastebėti tokie patys mechaniniai pažeidimai kaip ir nr. 5 pjezoelektriniame generatoriuje. Pastebimas ryškus išilginis PVDF plėvelės elektrodo trūkis. Detalūs eksperimentinio tyrimo rezultatai pateikiami 4 lentelėje.

4 lentelė. Eksperimentinio tyrimo šalčio ir karščio kameroje rezultatai

Pjezoelektrinio generatorius nr.	U_{is} tyrimo pradžioje, V	U_{is} tyrimo pabaigoje (arba kol generatorius nustojo veikti), V	Procentinis U_{is} sumažėjimas, %	Generatoriaus veikimo trukmė, h
1	1.64	0.68	61	450
2	2.26	1.45	36	450
3	2.31	1.24	46	450
4	0.93	0.34	74	450
5	0.32	0	100	142
6	0.51	0	100	217

Tiriamų pjezoelektrinių generatorių įtampos sumažėjimas eksperimento pabaigoje pateikiamas 2.12 pav.



2.12 pav. Procentinis pjezoelektrinių generatorių procentinis įtampos sumažėjimas

Apdorojus eksperimento rezultatus, nustatyta, kad visą tyrimo vykdymo laiką, pjezoelektriniai generatoriai su plastikinėmis šerdimis veikė, o pjezoelektriniai generatoriai nr. 5 ir nr. 6 su plieninėmis 80 μ m šerdimis nustojo veikti anksčiau nei baigėsi tyrimas (atitinkamai $t = 142$ h ir $t = 217$ h).

Išanalizavus rezultatus nustatyta, kad pjezoelektrinių generatorių su plastikinėmis PET šerdimis ir vario – nikelio padengimą turinčiomis PVDF plėvelėmis, generuojama įtampa tyrimo pradžioje yra didesnė ~3.5 karto lyginant su plieninę šerdį ir aliuminio plėvelę turinčiais pjezoelektriniais generatoriais. Didesnė išėjimo įtampa gaunama dėl PET medžiagos mechaninių savybių, kuomet elastingesnė medžiaga išsilenkdama labiau deformuoja pjezoelektrinę PVDF plėvelę nei standesnis plienas. Nustatyta, kad ciklinio mechaninio poveikio veikiami plieno šerdį turintys pjezoelektriniai generatoriai yra mažiau patvarūs nei plastikinę šerdį turintys generatoriai, kadangi du iš trijų

plieninę šerdį turinčių pjezoelektrinių generatorių nustojo veikti dėl šerdies trūkio sukkelto plėvelės atsiklijavimo ir PVDF plėvelės metalizavimo pažeidimo. Patikimumo tyrimo eigoje nei vienas iš PET šerdį turinčių pjezoelektrinių generatorių nepatyrė plastiškos deformacijos, o plastikinę šerdį turinčių pjezoelektrinių generatorių įtampas sumažėjimas tyrimo eigoje yra mažesnis.

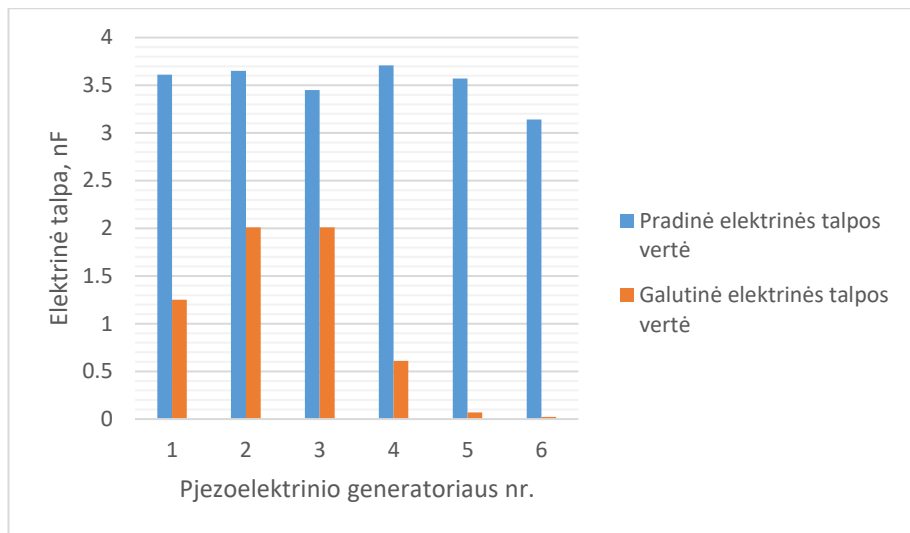
2.3.2. Pjezoelektrinio generatoriaus elektrinės talpos tarp šerdies ir PVDF plėvelės elektrodo paviršinės varžos pokytis

Atlikus patikimumo tyrimą, pakartotinai išmatuotos pjezoelektrinių generatorių su skirtingomis šerdimis elektrinės talpos, tarp šerdies ir PVDF plėvelių viršutinio bei apatinio sluoksnių. Pjezoelektrinių generatorių elektrinių talpų įverčiai pateikiami 5 lentelėje.

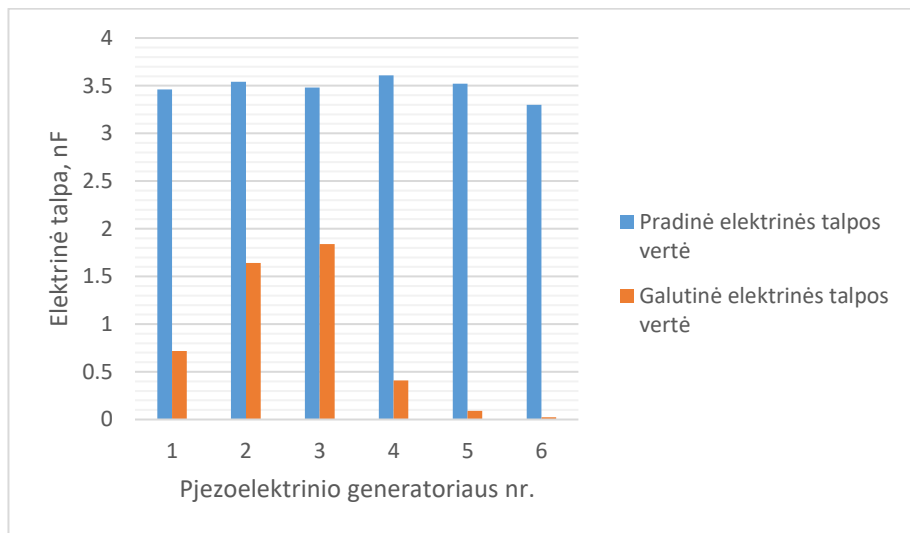
5 lentelė. Pjezoelektrinių generatorių talpos tarp šerdies elektrodo ir PVDF plėvelių elektrodų po eksperimentinio tyrimo

Pjezoelektrinio generatoriaus nr.	Elektrinė talpa tarp šerdies ir apatinio sluoksnio, nF	Elektrinė talpa tarp šerdies ir viršutinio sluoksnio, nF	Elektrinės talpos tarp šerdies ir apatinio sluoksnio elektrinės talpos pokytis, %	Elektrinės talpos tarp šerdies ir viršutinio sluoksnio elektrinės talpos pokytis, %
1	1.25	0.72	65.4	79.2
2	2.01	1.64	44.9	53.7
3	2.01	1.84	41.7	47.1
4	0.61	0.41	83.6	88.6
5	0.07	0.09	98.0	97.4
6	-	-	100	100

Iš rezultatų matoma, kad visų tirtų generatorių elektrinė talpa dėl ciklinio temperatūrinio ir mechaninio poveikio sumažėjo. Grafiškai atvaizduotas pjezoelektrinių generatorių apatinio ir viršutinio PVDF plėvelės sluoksnio pokytis pateikiamas 2.13 pav.



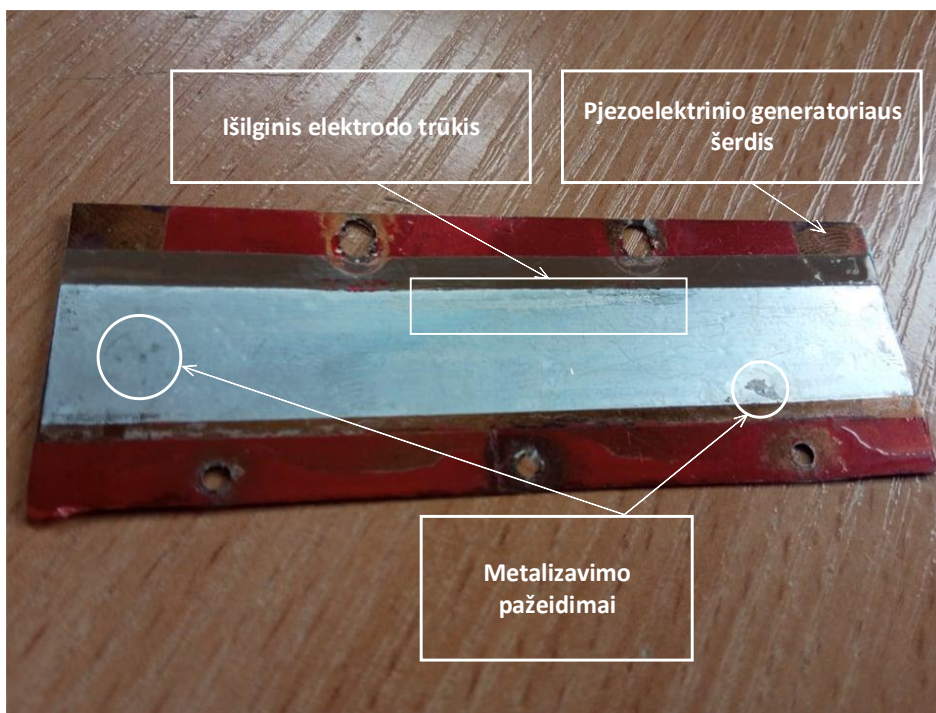
a)



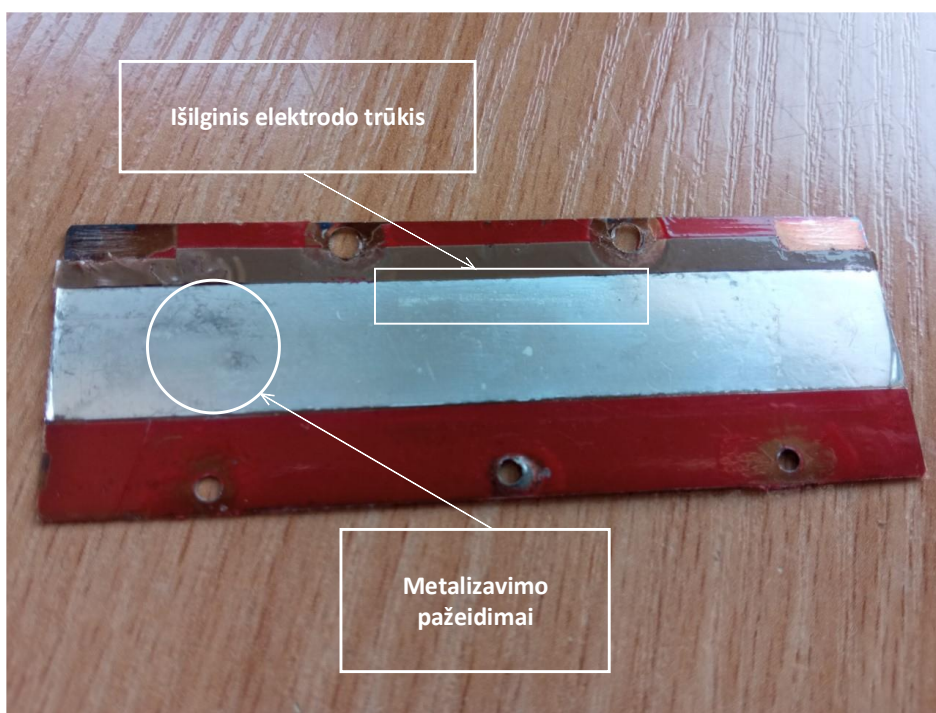
b)

2.13 pav. Apatinio sluoksnio (a) viršutinio (b) elektrinės talpos pokytis po termociklavimo šalčio ir karščio kameroje

Po tyrimo išmatuotos vertės parodo, kad visų pjezoelektrinių generatorių elektrinės talpos sumažėjo. Pjezoelektrinių generatorių nr. 1 – nr. 3 talpa tarp šerdies elektrodo ir apatinio sluoksnio sumažėjo nuo 41.7 % iki 65.4 %, šerdies elektrodo ir viršutinio sluoksnio nuo 47.1 % iki 79.2 %. Mažiausias talpų sumažėjimas išmatuojamas nr. 3 generatoriuje. Didžiausi talpos pokyčiai iš visų pjezoelektrinių generatorių išmatuoti nr. 5 – nr. 6 pjezoelektriniuose generatoriuose. Tyrimo pabaigoje pastebimas 97.4 % ir 98.0 % elektrinės talpos sumažėjimas tarp šerdies elektrodo ir apatinio bei viršutinio nr. 5 generatoriaus sluoksnio. Nr. 6 generatoriuje elektrinės talpos sumažėjimas lygus 100 % abiejuose sluoksniuose, kadangi talpa tyrimo pabaigoje neišmatuojama. Šie generatoriai nustojo veikti tyrimo eigoje (atitinkamai ties $t = 142$ h ir $t = 217$ h). Pjezoelektrinių generatorių su aliuminio padengimo PVDF plėvele ir metaline šerdimi vaizdas po tyrimo pateikiamas 2.14 pav.



a)

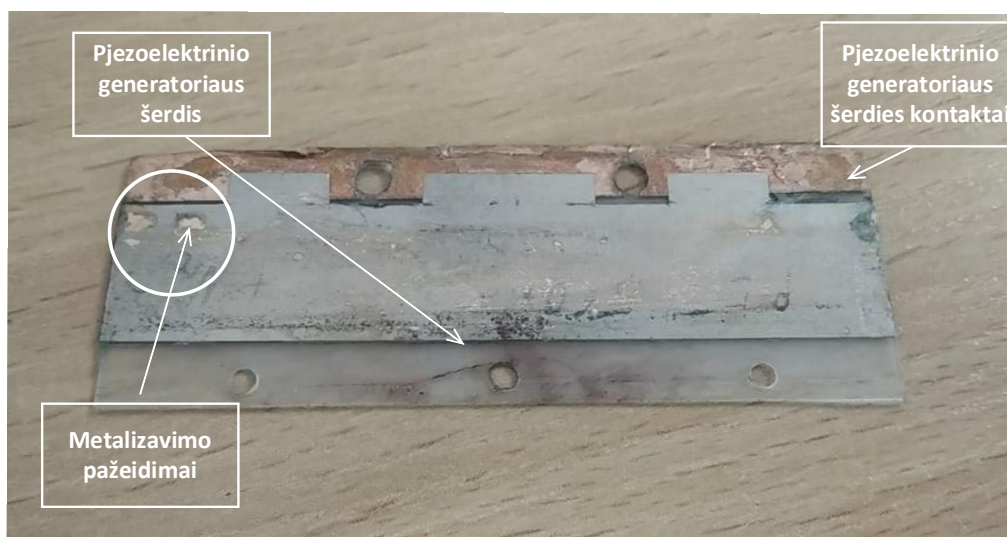


b)

2.14 pav. Pjezoelektrinis generatorius nr. 4 (a) ir nr. 6 (b) su plienine šerdimi ir aliuminio padengimo PVDF plėvele

Vizualiai įvertinus tiriamuosius objektus, aiškiai matoma, jog ciklinė terminė ir mechaninė apkrova sąlygojo ženklus mechaninius pažeidimus plieninę šerdį ir aliuminio padengimo PVDF plėvelės, naudojančiuose pjezoelektriniuose generatoriuose.

PVDF plėvelės pažeidimai matomi ir plastikinę šerdį bei vario – nikelio padengimą turinčiuose pjezoelektriniuose generatoriuose. Pjezoelektrinio generatoriaus nr. 3 su PET šerdimi vaizdas pateikiamas 2.15 pav.

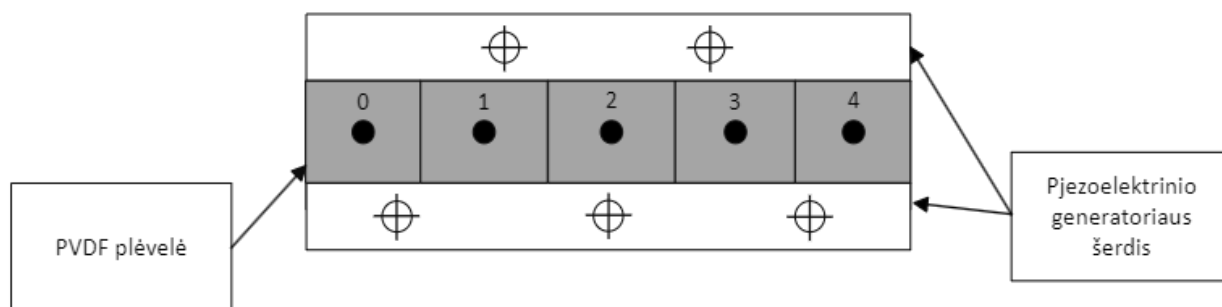


2.15 pav. Pjezoelektrinio generatoriaus nr. 3 su plastikine PET šerdimi ir vario – nikelio padengimo PVDF plėvele

Įvertinus pjezoelektrinius generatorius su plastikine šerdimi ir vario – nikelio padengimo plėvele nustatyta, kad paviršius taip pat yra paveiktas termociklavimo bei matoma keletas vietų su visišku padengimo nudilimu. Nustatyta, kad dėl išorinių ciklinių mechaninių ir terminių poveikių pjezoelektrinės PVDF plėvelės padengimas pradeda trupėti ir aižėti. Vizualiai įvertinus visus generatorius, pastebima bendra metalizavimo nutrupėjimo, korozijos, metalizavimo įtrūkimų tendencija. Dėl šių priežasčių pjezoelektrinė PVDF plėvelė dalinai arba visiškai prarado elektrinį sujungimą su SMP paviršiaus elektrodais. Minėti reiškiniai ryškiausiai matomi, anksčiau tyrimo laiko pabaigos nustojusių veikti, plieninę šerdį turinčiuose pjezoelektriniuose generatoriuose.

Sumažėjusi elektrinė talpa taip pat rodo, kad abiejų tipų generatoriuose vyksta PVDF plėvelės atsiklijavimas. Abiejų tipų generatoriuose, vizualiai matomas pjezoelektrinės PVDF plėvelės dalinis atsiklijavimas nuo šerdies dėl ciklinio poveikio ir klijavimo metu atsiradusių oro ertmių tarp PVDF plėvelės ir šerdies paviršiaus. Tiek plastikinę, tiek metalinę šerdį turinčiuose pjezoelektriniuose generatoriuose matomi išilginiai elektrodų nudilimai vietose, kur yra šerdį tarpusavyje suspaudžiančių spausdintinio montažo plokštelių kraštas. PVDF plėvelės išilginiai nudilimai atsirado dėl PVDF plėvelės mechaninio kontakto, sukeliančio trintį, su spausdintinio montažo plokštės kraštu, esant maksimaliam šerdies atsilenkimui į vieną iš laisvojo galo judėjimo trajektorijos pusių.

Siekiant papildomai įvertinti ilgaamžiškumo tyrimo pažeidimus pjezoelektrinei PVDF plėvelei, tyrimo pabaigoje buvo atlikti paviršiaus PVDF plėvelės varžos matavimai. Pjezoelektrinių generatorių PVDF plėvelės paviršiaus varžos matavimo struktūra pateikiama 2.16 pav.



2.16 pav. Pjezoelektrinio generatoriaus su PVDF plėvele paviršiaus elektrodo varžos matavimo metodika

Matavimai atliekami tarp pradinio 0 taško ir tolygių kitų 4 taškų, išdėstytų išilgai pjezoelektrinės PVDF plėvelės esančiuose metalizavimo ploteliuose. Pjezoelektrinės 10 mm pločio ir 74 mm ilgio pjezoelektrinės PVDF plėvelės, nepriklausomai nuo padengimo tipo, paviršinio elektrodo varža, prieš atliekant pjezoelektrinių generatorių patikimumo tyrimus, tarp 0 ir 4 taškų neviršina 50 Ω . Detalus paviršinės PVDF plėvelės elektrodų varžos, 0 taško atžvilgiu, matavimo rezultatai pateikiami 6 lentelėje.

6 lentelė. Paviršiaus varžos matavimų rezultatai (0 taško atžvilgiu)

Gembės nr.	Pjezoelektrinės PVDF plėvelės padengimo tipas	PVDF plėvelės sluoksnis	Paviršiaus varža tarp 0 ir kitų taškų, k Ω			
			1	2	3	4
1	Varis - nikelis	Viršutinis	1.1	2.0	14.9	16.4
		Apatinis	4.3	5.6	12.6	18.2
2	Varis - nikelis	Viršutinis	2.4	3.5	7.2	14.6
		Apatinis	2	3	4	10
3	Varis - nikelis	Viršutinis	2.2	10.2	12.3	15.2
		Apatinis	3.4	9.8	12.6	16.7
4	Aliuminis	Viršutinis	1.2	2.3	3.3	4.1
		Apatinis	0.7	2	2.1	2.7
5	Aliuminis	Viršutinis	-	-	-	-
		Apatinis	1.2	2.1	2.5	3.6
6	Aliuminis	Viršutinis	2.5	5.1	7	8.1
		Apatinis	-	-	-	-

Iš paviršiaus varžos matavimo rezultatų matoma, kad visų pjezoelektrinių elektros energijos generatorių pjezoelektrinių PVDF plėvelių paviršiaus varža padidėjo, matuojant išilgai PVDF plėvelės. Didžiausias elektrodo varžos padidėjimas išmatuojamas vario – nikelio padengimo PVDF plėvelę turinčiame pjezoelektriniame generatoriuje nr. 1. Generatoriaus PVDF plėvelės varža tarp 0 ir 4 taško padidėjo iki 16.4 k Ω viršutiniame sluoksnyje ir 18.2 k Ω apatiniame sluoksnyje. Pjezoelektrinio generatoriaus nr. 2 paviršiaus varža padidėjo – iki 10 k Ω apatiniame ir 14.6 k Ω viršutiniame sluoksniuose, o pjezoelektrinio generatoriaus nr.3 – iki 16.7 k Ω apatiniame ir 15.2 k Ω viršutiniame sluoksniuose. Mažiausias vario-nikelio plėvelės elektrodo varžos padidėjimas išmatuojamas mažiausią procentinę įtampos sumažėjimą turinčiame pjezoelektriniame generatoriuje, o didžiausias – didžiausią. Pjezoelektriniame generatoriuje nr. 4, naudojančiame aliuminio

padengimo PVDF plėvelę, matomas varžos didėjimas tarp 0 ir kitų taškų. Tarp 0 ir 4 taško, išmatuojama 4.1 k Ω apatiniame ir 2.7 k Ω viršutiniame sluoksnyje varža. Nr.5 generatoriuje išmatuojama varža apatiniame sluoksnyje (3.6 k Ω), o nr. 6 generatoriuje, varža neišmatuojama apatiniame sluoksnyje, tačiau viršutiniame – 8.1 k Ω . Sluoksniuose, kuriuose varža neišmatuojama, ji neišmatuojama ne tik 0 taško atžvilgiu, bet ir tarp kitų taškų. Lyginant pjezoelektrinių PVDF plėvelių elektrodų varžų pokyčius nustatyta, kad didžiausias paviršiaus varžos padidėjimas yra vario – nikelio padengimą turinčiose plėvelėse. Plėvelių paviršiaus varža padidėjo dėl PVDF plėvelės degradacijos, įtrūkimų, matomų paviršiaus korozijos židinių.

Įvertinus termociklavimo poveikį pjezoelektrinių generatorių PVDF plėvelėmis, siūloma tobulinti pjezoelektrinių generatorių konstrukciją ir gamybos metodus. Termociklavimo įtaka naujai pagamintuose pjezoelektriniuose generatoriuose gali būti sumažinama tobulinant generatoriaus konstrukciją: šerdį laminuojant papildomais apsauginiais sluoksniais, PVDF plėvelę padengiant apsaugine purškiamą dangą. Apsauginė danga, leistų padidinti pjezoelektrinių generatorių atsparumą temperatūros, drėgmės poveikiui, apsaugotų PVDF plėvelę nuo korozijos. Be to, patartina vėlesniuose gaminiuose siūloma pritaikyti naują klijavimo metodiką – pjezoelektrinio generatoriaus šerdies vakuumavimą klijavimo metu, tam jog PVDF plėvelė prieš klijuojamo paviršiaus būtų prispausta tolygiai ir būtų išvengta oro ertmių tarp PVDF plėvelės ir šerdies paviršiaus.

3. Pjezoelektrinių generatorių su polipropileninėmis (PP) šerdimis patikimumo tyrimas

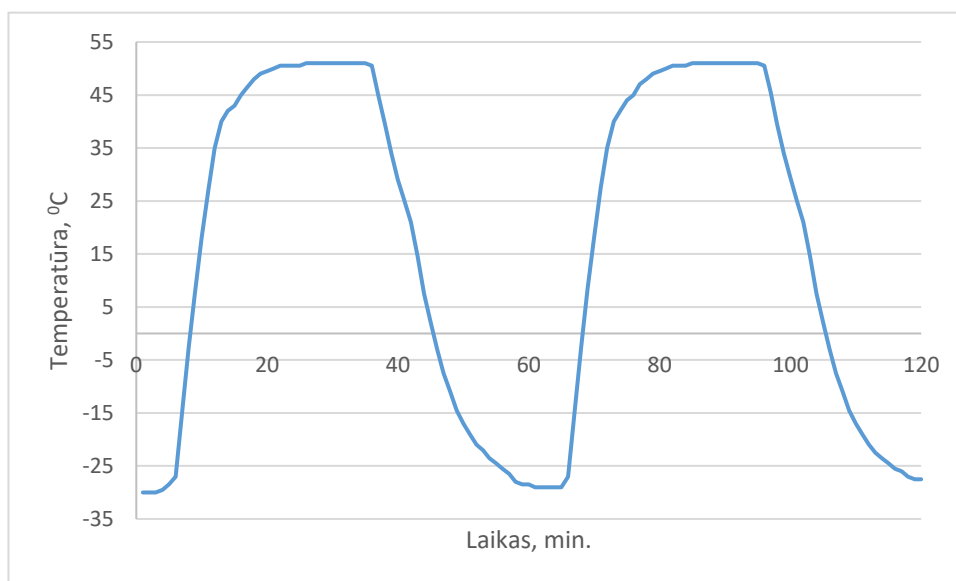
Šiame skyriuje pateikiama pjezoelektrinių generatorių su PP šerdimis, naudojančių PVDF plėvelės ilgaamžiškumo tyrimo eiga. Pateikiami pjezoelektrinių generatorių pradiniai parametrai, analizuojami ir grafiškai atvaizduojami mechaninių ir elektrinių parametru: rezonansinio dažnio, elektrinės talpos, mechaninės kokybės pokyčiai.

3.1. Pjezoelektrinių generatorių su polipropileninėmis (PP) šerdimis patikimumo tyrimas, veikiant cikliniu terminiu poveikiu

Šiame poskyryje pateikiami pjezoelektrinių generatorių su PP šerdimis pradiniai parametrai, pateikiamas patikimumo tyrime naudojamas temperatūros profilis. Apžvelgiama tyrimo eiga, analizuojami ir grafiškai atvaizduojami eksperimento rezultatai.

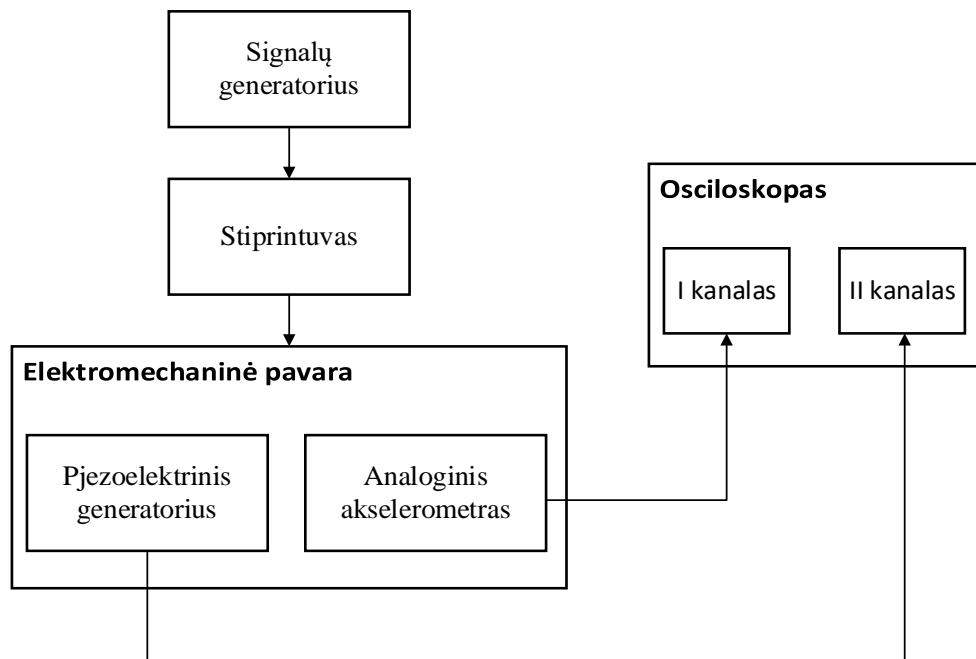
3.1.1. Temperatūros profilis, tyrimo eiga

Eksperimentinis tyrimas atliekamas siekiant įvertinti tik temperatūros pokyčio (be mechaninio poveikio) daromą įtaką pjezoelektrinių generatorių su PP šerdimis elektrinėms ir mechaninėms savybėms. Termociklavimui tyrimo objektai yra patalpinami šalčio ir karščio kameroje 4 savaites. Temperatūros profilis parenkamas atsižvelgiant į pjezoelektrinių generatorių darbo režimą eksploatacijos metu ateityje. Naudojamas profilis pateikiamas 3.1 pav.



3.1 pav. Temperatūros profilis naudojamas šalčio ir karščio kameroje

Temperatūra kinta nuo $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ pastoviai maišant orą kameros viduje. Pasiekus mažiausią arba aukščiausią temperatūrą, ji išlaikoma ~ 20 min. Vienas temperatūros kitimo ciklas trunka apie 1 val., bendras vykdyto tyrimo laikas - 672 val. Tyrimo eigoje atliekami matavimai tyrimo pradžioje ir pabaigoje, taip pat, tarpiniai matavimai, kas 7 paras, (viso, matavimai buvo atlikti 5 kartus). Matavimai buvo atliekami, išimant pjezoelektrinius generatorius iš šalčio ir karščio kameros bei palaukus, kol pjezoelektrinių generatorių temperatūra susivienodins su kambario temperatūra. Matavimo sistemos struktūra pateikiama 3.2 pav.



3.2 pav. Matavimo sistemos struktūra

Pjezoelektrinis generatorius tvirtinamas ant elektromechaninės pavaros, kuri yra valdoma sustiprintu, iš signalų generatoriaus paduodamu, pjezoelektrinio generatoriaus virpėjimą sužadinančiu sinusiniu signalu. Pjezoelektrinio generatoriaus išėjimo signalas matuojamas I osciloscopo kanalu, o akselerometro signalas – II kanalu. Sužadinančio signalo dažnis parenkamas pagal rezonansinį pjezoelektrinio generatoriaus dažnį, o išėjimo amplitudė sureguliuojama taip, jog ties rezonansiniu dažniu pjezoelektrinis generatorius būtų veikiamas 1 g pagreičiu.

Tyrimo metu išmatuota generuojama įtampa, elektrinė talpa tarp plėvelės ir šerdies elektrodų, rezonansinis pjezoelektrinių generatorių virpėjimo dažnis. Matavimai atliekami apkrovus generatorių $R_{\text{apkr}} = 630 \text{ k}\Omega$.

Papildomam pjezoelektrinių generatorių konstrukcijos nuovargio įvertinimui, apskaičiuojamas mechaninės kokybės faktorius. Mechaninis kokybės faktorius (Q) leidžia įvertinti ciklinio poveikio įtaką pjezoelektrinių generatorių standumui, darbinei dažnių juostai. Esant didesniai kokybės faktoriui, o pjezoelektriniam generatoriui dirbant rezonansiniu dažniu, rezonansinės kreivės amplitudė yra didesnė, energijos virsmo nuostoliai mažesni, tačiau darbinė dažnių juosta sumažėja. Tam tikruose praktiniuose pritaikymuose, tai gali turėti privalumų, pvz., žinant tikslų, nedaug kintantį pjezoelektrinį generatorių veikiančio išorinio poveikio dažnį. Tačiau, dažnai naudojami mažesnės mechaninės kokybės generatoriai, nes aplinkos išorinio poveikio dažnių spektras būna plačiajuostis.

Pjezoelektrinio generatoriaus kokybės faktorius apskaičiuojamas pagal 6 formulę.

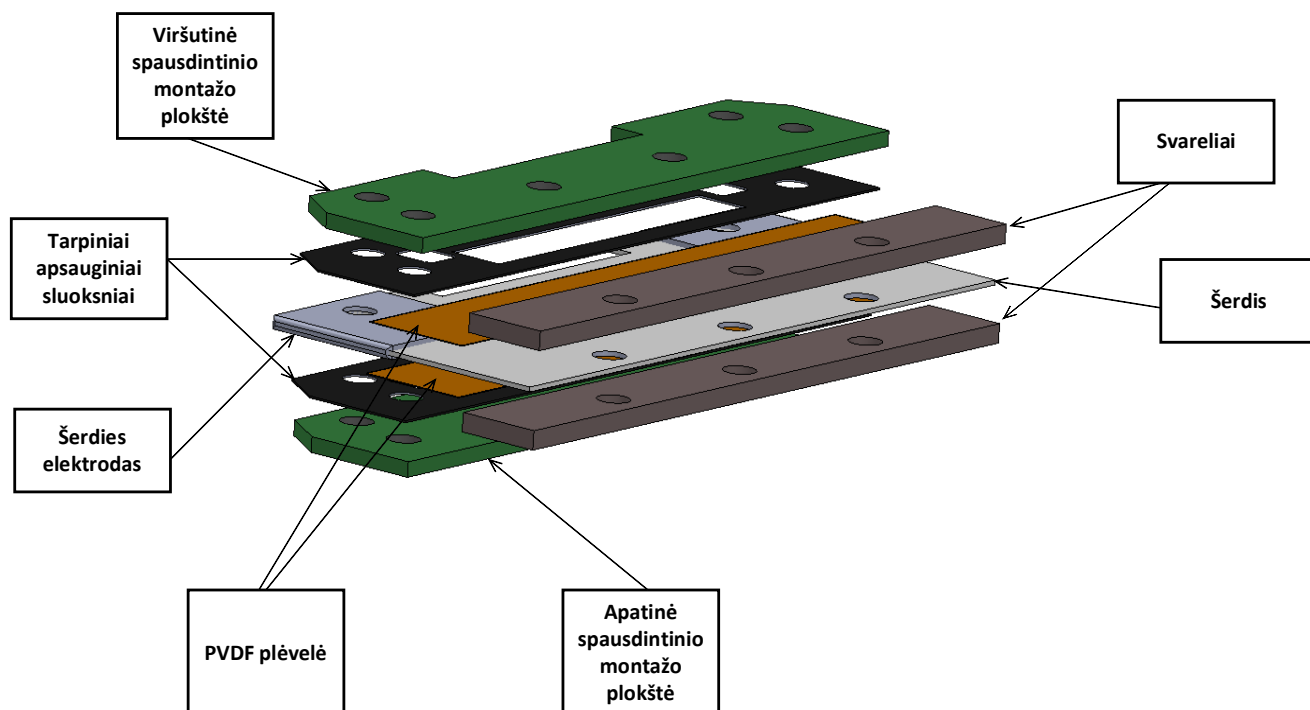
$$Q = \frac{f_r^2}{f_2 - f_1}, \quad (6)$$

čia Q - kokybės faktorius, f_r - rezonansinis dažnis (Hz), f_1 – dažnių juostos pločio pradžios dažnis (Hz), f_2 – dažnių juostos pločio pabaigos dažnis (Hz).

Pjezoelektrinio generatoriaus kokybės faktorius priklauso nuo pjezoelektrinio generatoriaus rezonansinio dažnio ir dažnių juostos pločio santykio. Dažnių juosta matuojama ties -3 dB generuojamos įtampos amplitudės riba.

3.1.2. Tiriamųjų objektų parametrai

Antrajame ilgaamžiškumo tyrime ištirta 10 pjezoelektrinių generatorių su PP šerdimis. PP šerdi turinčių pjezoelektrinių generatorių konstrukcija buvo patobulinta atsižvelgiant į pirmojo ilgaamžiškumo tyrimo metu atliktą termociklavimo poveikio generatoriams analizę. Tiriamų pjezoelektrinių generatorių su PP šerdimi struktūra pateikiama 3.3 pav.



3.3 pav. Pjezoelektrinių generatorių su PP šerdimi struktūra

Tiriamų pjezoelektrinių generatorių šerdys išpjaunamos lazeriu iš PP lakštų. Šerdis paviršius prieš klijavimą nuriebalinamas. Pjezoelektrinė PVDF juostelė priklijuojama tokiais pačiais, kaip pirmame tyrime naudotais, dviejų komponentų laidžiais elektros srovei klijais. Pjezoelektrinio generatoriaus šerdis klijuojant nespaudžiama, kaip pirminėje konstrukcijoje, bet vakuumuojama. Tokiu būdu yra užtikrinama, jog tarp PVDF juostelės ir šerdis paviršiaus neliktų ertmių su oro likučiais, bloginančiais laminato klijavimo kokybę, o PVDF juostelė tolygiai prispaustų prie šerdis paviršiaus. Toliau, šerdis padengiama komerciškai prieinama SMP apsaugine danga. Iš abiejų šerdžių pusių uždedami tarpiniai apsauginiai sluoksniai, neleidžiantys pjezoelektrinei plėvelei dilti į spausdintinio montažo plokštės kraštą, atsilenkimo metu. Pagaminti tiriami pjezoelektriniai elektros energijos generatoriai su PP šerdimi pateikiami 3.4 pav.



3.4 pav. Pjezoelektriniai elektros energijos generatoriai su 500 μm ir 800 μm polipropileninėmis (PP) šerdimis

Penki pjezoelektriniai generatoriai (LF-500PP1 - 5) yra pagaminti naudojant 500 μm storio PP lakšto šerdis, o kiti 5 pjezoelektriniai generatoriai (LF-800PP1 - 5) naudojant 800 μm storio PP šerdis. Visų pjezoelektrinių generatorių gabaritai vienodi (74 x 26 mm). Generatorių gamyboje naudojamos pjezoelektrinės juostelės plotis – 13 mm. Pjezoelektrinės plėvelė padengta aliuminiu, padengimo storis – 30 nm. Ant laisvųjų galų tvirtinami vienodos masės svareliai. Detalūs pradiniai pjezoelektrinių generatorių elektriniai ir mechaniniai parametrai pateikiami 7 lentelėje.

7 lentelė. Tiriamųjų pjezoelektrinių generatorių su 500 μm polipropileninėmis (PP) šerdimis pradiniai parametrai

Pjezoelektrinio generatoriaus nr.	Šerdies storis, μm	Išėjimo įtampa Uiš, V	Rezonansinis dažnis fr, Hz	Kokybės faktorius Q	Elektrinės talpos tarp šerdies ir PVDF plėvelės, nF
LF-500PP-1	500	25.12	37.5	2.92	3.69
LF-500PP-2	500	26.08	34.8	2.82	3.33
LF-500PP-3	500	22.88	38.7	3.21	3.86
LF-500PP-4	500	11.54	33.2	2.89	2.84
LF-500PP-5	500	12.24	40.2	3.16	3.69
LF-800PP-1	800	15.96	72.2	2.81	3.81
LF-800PP-2	800	12.24	73.4	3.10	3.87
LF-800PP-3	800	13.81	75.4	2.94	3.48
LF-800PP-4	800	15.96	74.1	3.08	3.33
LF-800PP-5	800	4.79	72.7	3.02	2.68

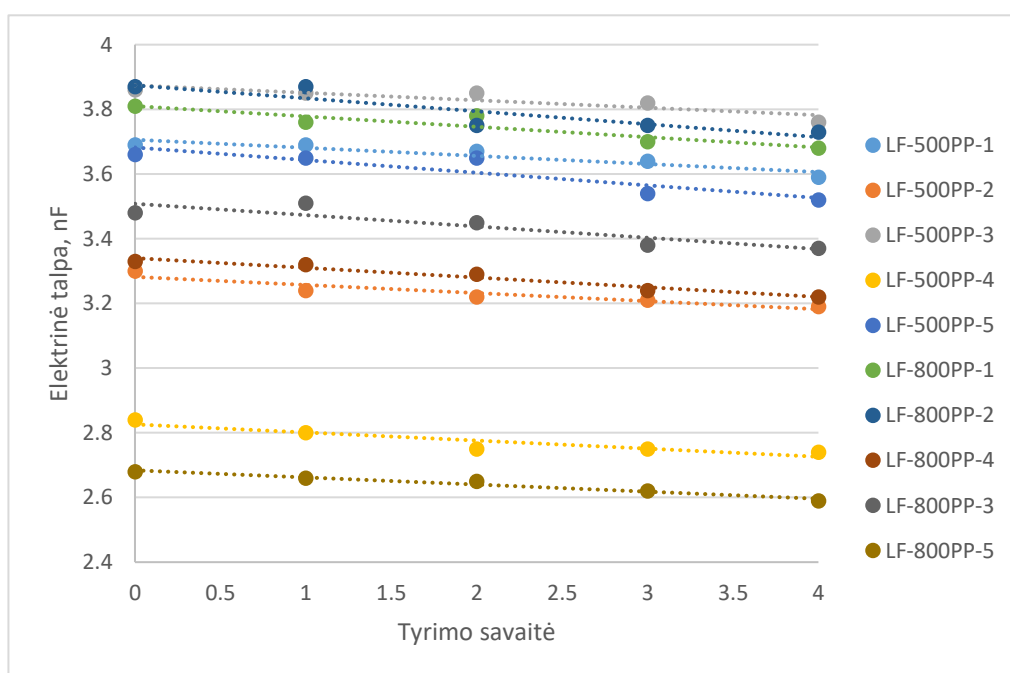
Analizuojant išmatuotų elektrinių talpų vertes galima pastebėti, kad LF-500PP-4 ir LF-800PP-5 elektrinės talpos nuo kitų pagamintų pjezoelektrinių generatorių skiriasi ir yra mažesnės nei 3 nF (talpa tarp tinkamai priklijuoto elektrodo prie plėvelės yra tarp 3.2 nF – 3.9 nF). Tai reiškia, jog šių dviejų pjezoelektrinių generatorių šerdžių susiklijavimo kokybė prastesnė nei kitų pjezoelektrinių generatorių.

3.2. Pjezoelektrinių generatorių su polipropileninėmis PP šerdimis ilgaamžiškumo tyrimo rezultatų analizė

Šiame poskyryje pateikiami ir analizuojami elektrinių dydžių pokyčiai, pjezoelektrinius generatorius 4 savaites veikiant tik cikliniam temperatūriniam poveikiu. Analizuojamas aplinkos sąlygų pokyčio poveikis pjezoelektrinių generatorių su PP šerdimis ir aliuminio padengimo PVDF plėvele konstrukcijai. Analizuojamas rezonansinio dažnio, elektrinės talpos tarp šerdies ir PVDF plėvelės elektrodo, kokybės faktoriaus, išėjimo įtampos pokytis.

3.2.1. Pjezoelektrinių generatorių f_{rez} , elektrinės talpos ir mechaninės kokybės faktoriaus pokytis

Apdorojus gautus eksperimentinio ilgaamžiškumo tyrimo rezultatus, gauti rezultatai atvaizduojami laiko ašyje. Pjezoelektrinių generatorių elektrinės talpos tarp šerdies ir plėvelės elektrodų talpos pokyčio grafikas pateikiamas 3.5 pav.

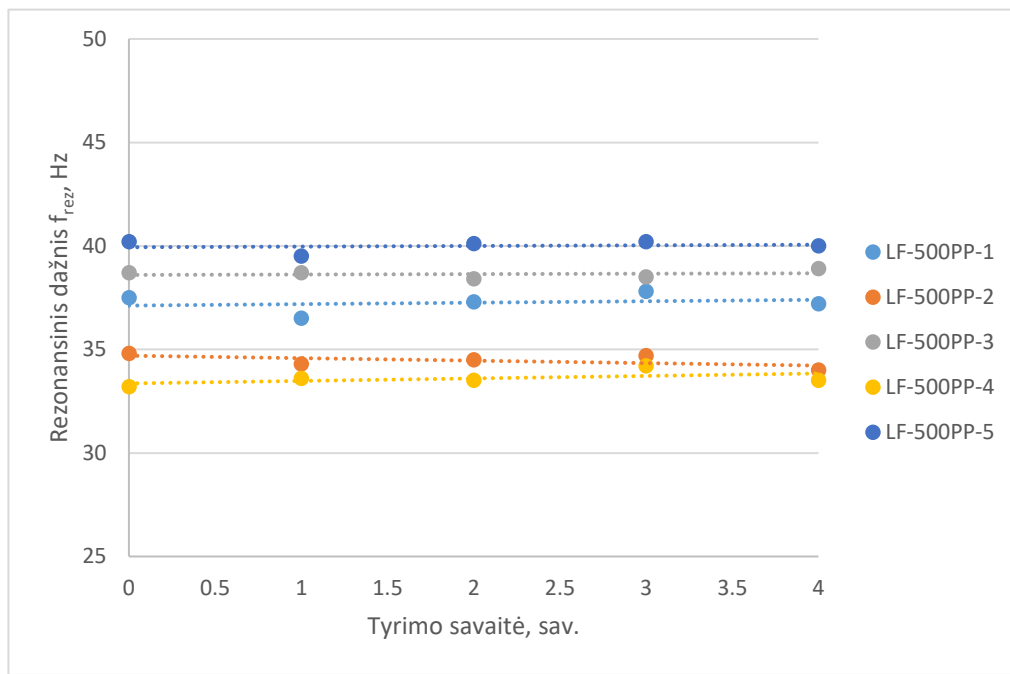


3.5 pav. Tiriamų pjezoelektrinių generatorių su 500 μm ir 800 μm storio PP šerdimis elektrinės talpos pokytis tyrimo eigos metu

Iš grafiko matoma, kad visų pjezoelektrinių generatorių elektrinės talpos tarp šerdies ir PVDF plėvelės elektrodo pokyčio tendencija yra nežymiai mažėjanti. Procentinis elektrinės talpos sumažėjimas tyrimo pabaigoje, lyginant su tyrimo pradžia, nėra žymus, mažiausias procentinis elektrinės talpos sumažėjimas yra ~ 3 %, o didžiausias ~ 4 %. Vidutinis elektrinės talpos sumažėjimas, susumavus visų generatorių elektrinės talpos procentinius pokyčius yra ~ 3 %.

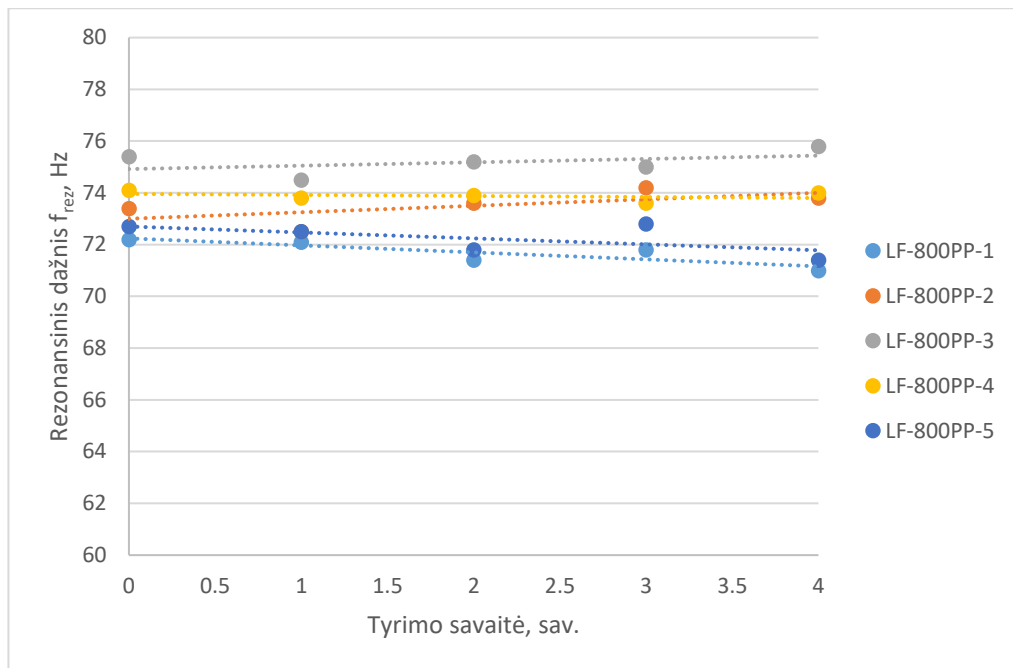
Po tyrimo galima teigti, jog pjezoelektrinius generatorius veikiantis temperatūrinis ciklas be išorinio mechaninio poveikio daro nežymią įtaką pjezoelektrinių generatorių laminato klįjavimo kokybei ir PVDF plėvelės degradacijai.

Tyrime matuojamos pjezoelektrinių generatorių su 500 μm ir 800 μm storio PP šerdimis rezonansinio dažnio pokytis tyrimo eigos metu. Pjezoelektrinių generatorių su 500 μm storio PP šerdimis rezonansinio dažnio pokyčiai tyrimo eigoje pateikiamas 3.6 pav.



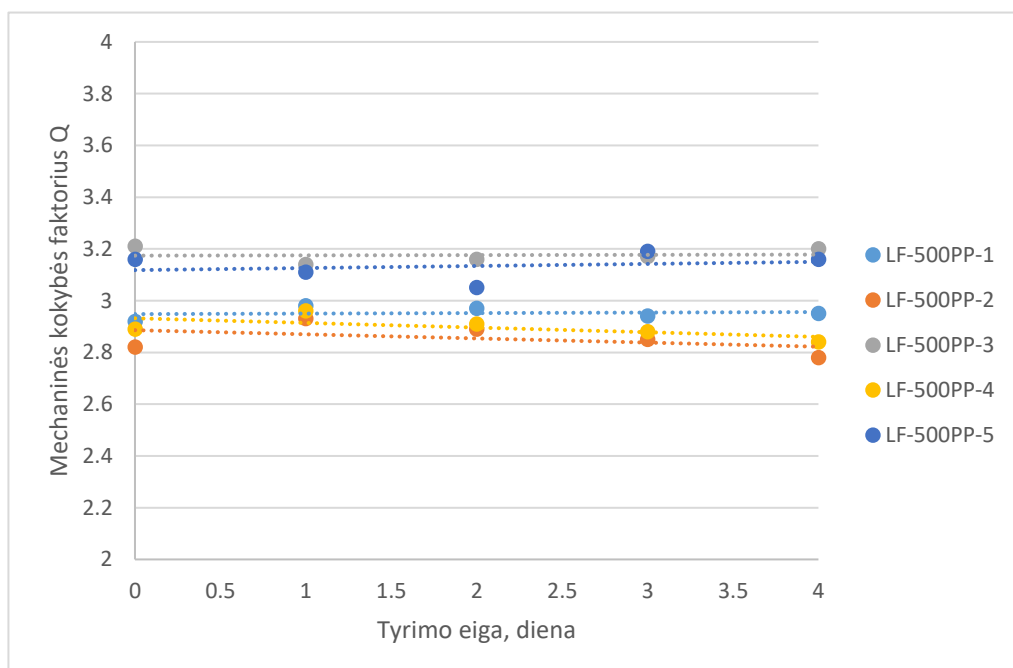
3.6 pav. Pjezoelektrinių generatorių su 500 μm storio PP šerdimis rezonansinio dažnio pokytis tyrimo eigos metu

Rezonansinio dažnio f_{rez} nuokrypis nuo pradinės f_{rez} vertės – iki 1 Hz. Nedaug kintantis rezonansinis dažnis rodo, jog temperatūriniai pokyčiai nuo $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, cikliškai veikiantys generatorius, nesukelia mechaninio nuovargio pjezoelektrinio generatoriaus konstrukcijai. Pjezoelektrinių generatorių su 800 μm storio PP šerdimis rezonansinio dažnio pokyčiai tyrimo eigoje pateikiami 3.7 pav.



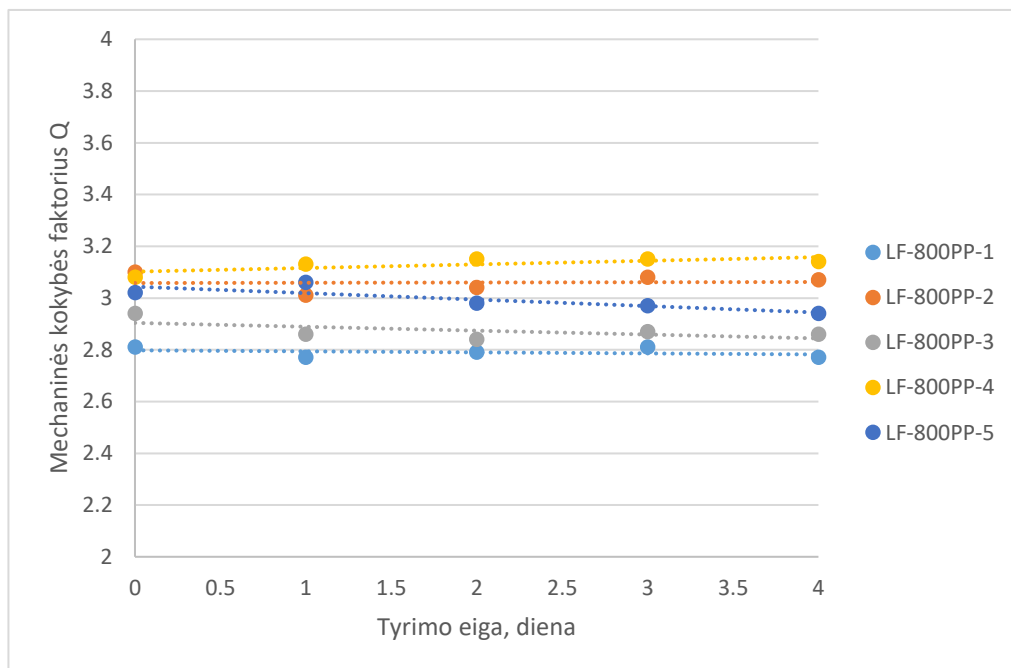
3.7 pav. Pjezoelektrinių generatorių su 800 μm storio PP šerdimis rezonansinio dažnio pokytis tyrimo eigos metu

Pjezoelektrinių generatorių su 800 μm storio PP šerdimis rezonansinis dažnis tyrimo eigoje kinta iki 1.2 Hz. Rezonansinio dažnio pokytis nežymus, kaip ir 500 μm storio šerdį turinčių pjezoelektrinių generatorių, taigi galima teigti, jog temperatūros pokyčiai (be išorinės mechaninės apkrovos) nesukelia pjezoelektrinių generatoriaus šerdies ir pačios konstrukcijos nuovargio. Nežymus pjezoelektrinių generatorių rezonansinio dažnio pokytis atsirado dėl kiekvieno matavimo metu atsirandančių paklaidų, tvirtinant generatorių (skirtingas varžtų įveržimas ir kt.). Pjezoelektrinių generatorių su 500 μm mechaninės kokybės faktoriaus pokytis pateikiamas 3.8 pav.



3.8. Pjezoelektrinių generatorių su 500 μm storio PP šerdimi mechaninės kokybės faktoriaus pokytis

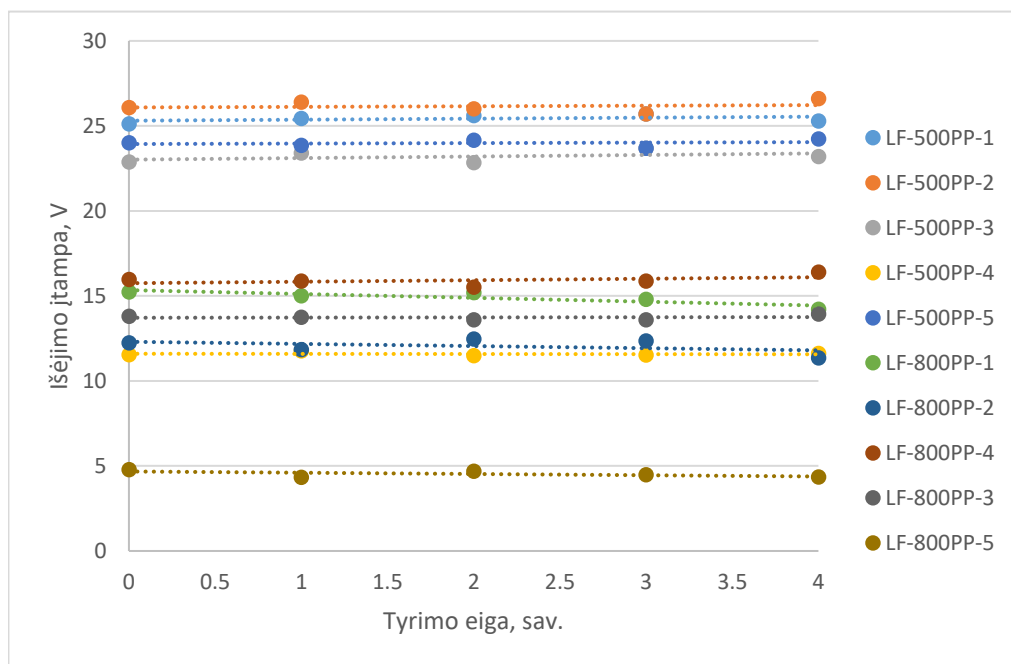
Pjezoelektrinių generatorių su 500 μm storio PP šerdimi mechaninės kokybės faktorius yra pakankamai stabilus. Pjezoelektrinių generatorių su 800 μm storio PP šerdimi mechaninės kokybės faktorius pokytis pateikiamas 3.9 pav.



3.9 pav. Pjezoelektrinių generatorių su 800 μm storio PP šerdimi mechaninės kokybės faktorius pokytis

Pjezoelektrinių generatorių su 800 μm storio PP šerdimi mechaninės kokybės faktorius tyrimo eigoje kinta nežymiai. Po tyrimo galima teigti, kad temperatūrinis ciklinis poveikis nedaro įtakos pjezoelektrinių generatorių su PP šerdimis ir aliuminio plėvele standumui ir dažnių juostos pločiui.

Tyrimo išmatuotos pjezoelektrinių generatorių išėjimo įtampos. Pjezoelektrinių elektrinių generatorių išėjimo įtampas palyginamasis grafikas pateikiamas 3.10 pav.



3.10 pav. Pjezoelektrinių generatorių išėjimo įtampas palyginamasis grafikas

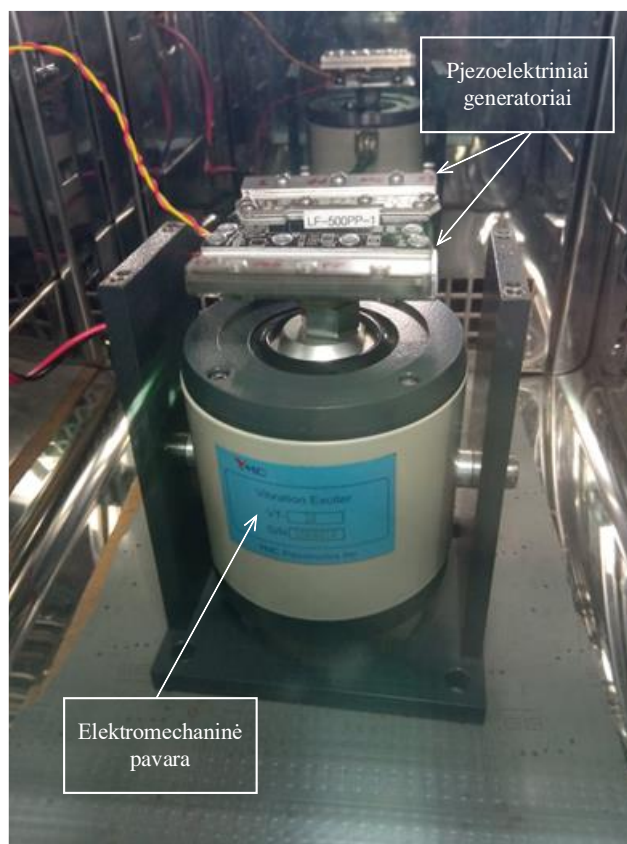
Tyrime atlikti pjezoelektrinių generatorių generuojamos išėjimo įtamos vertės yra stabilios. Tyrime nustatyta, kad tik terminis ciklinis poveikis, nedaro įtakos 500 μm ir 800 μm PP storio šerdį turinčių pjezoelektrinių generatorių išėjimo įtampai. Vizualiai įvertinus pjezoelektrinių generatorių konstrukciją ir PVDF plėveles, temperatūrinio poveikio sukeltų pažeidimų nepastebėta.

3.3. Pjezoelektrinių generatorių su 500 μm polipropileninėmis (PP) šerdimis patikimumo tyrimas, veikiant cikliniu terminiu ir mechaniniu poveikiu

Šiame poskyryje pateikiama pjezoelektrinių generatorių su 500 μm PP šerdimis, naudojančių PVDF plėveles ilgaamžiškumo tyrimo eiga, aprašomas naudotas terminis ir mechaninis pjezoelektrinių generatorių poveikis. Pateikiami pjezoelektrinių generatorių pradiniai parametrai, analizuojami ir grafiškai atvaizduojami mechaninių ir elektrinių parametru: rezonansinio dažnio, elektrinės talpos, kokybės faktoriaus, pokyčiai.

3.3.1. Tyrimo objektai, tyrimo eiga, pradiniai tiriamųjų objektų parametrai

Didelės temperatūrinių svyravimų be išorinio mechaninio poveikio įtakos, pjezoelektrinių generatorių su skirtingo storio šerdimis, elektrinėms ir mechaninėms savybėms nebuvo nustatyta, todėl atliktas trečiasis ilgaamžiškumo tyrimas. Trečiajame tyrime, du pjezoelektriniai generatoriai su 500 μm storio šerdimis yra patalpunami šalčio ir karščio kameroje kartu su elektromechanine pavara ir 30 parų yra veikiami cikliniu temperatūriniu ir mechaniniu poveikiu. Eksperimentinio patikimumo tyrimo standas pateikiamas 3.11 pav.



3.11 pav. Pjezoelektriniai generatoriai su 500 μm storio PP šerdimis šalčio ir karščio kameroje

Tyrimui, iš keturių pjezoelektrinių generatorių (mažiausią elektrinę talpą turintys pjezoelektriniai generatoriai pašalinami), atsitiktinai pasirenkami du pjezoelektriniai generatoriai - LF-500PP-1 ir

LF-500PP-3. Matavimo sistema pjezoelektrinių generatorių parametrų pokyčiams matuoti, sujungiama pagal 3.2 pav. pateiktą struktūrinę schemą. Matavimai atliekami, generatorių apkraunant $R_{apkr} = 630 \text{ k}\Omega$, parametrai matuojami esant 1 g pagreičiui ties rezonansiniu pjezoelektrinių generatorių dažniu. Pjezoelektrinių generatorių mechaninės kokybės faktorius apskaičiuojamas pagal 6 formulę. Pjezoelektrinių generatorių temperatūrinis ir ciklinio mechaninio poveikio profiliai pasirenkami atsižvelgiant, koks bus įtaiso, kuriame bus naudojamas generatorius darbo režimą. Tyrime naudojamas toks pats temperatūrinis šalčio ir karščio kameros profilis, kaip ir antrame patikimumo tyrime, profilis pateikiamas 3.1 pav.

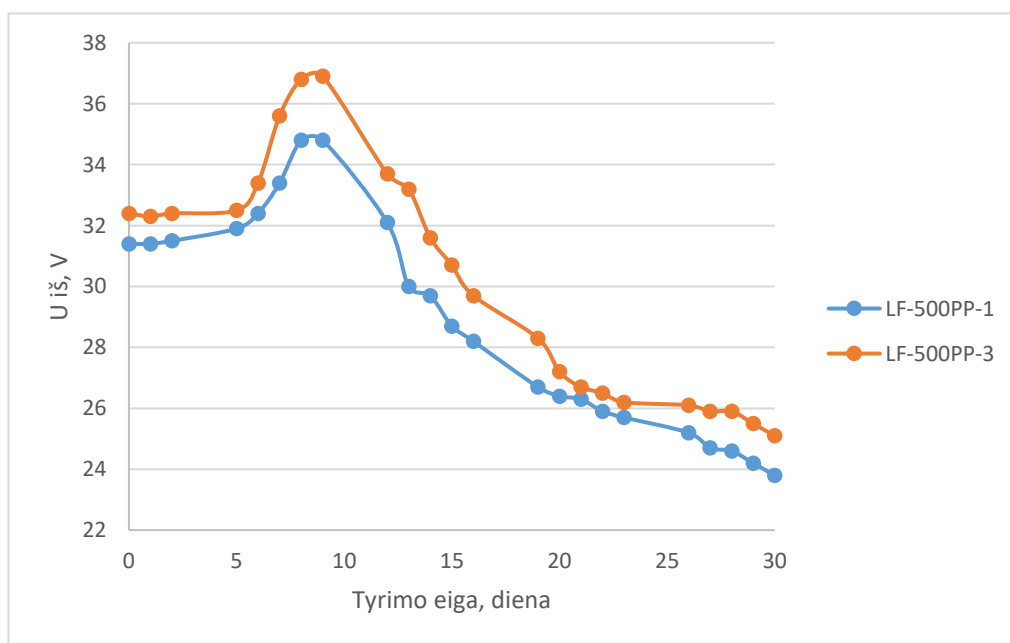
Pjezoelektriniai generatoriai yra veikiami tiesiškai besikeičiančio dažnio vibracijomis ($f = 38 - 43 \text{ Hz}$), dažnio kitimo periodas – 5 s. Dažnio kitimo intervalas apima rezonansinius abiejų pjezoelektrinių generatorių rezonansinius dažnius. Detalūs pradiniai tiriamų pjezoelektrinių generatorių parametrai pateikiami 8 lentelėje.

8 lentelė. Tiriamųjų pjezoelektrinių generatorių su 500 μm polipropileninėmis (PP) šerdimis pradiniai parametrai

Pjezoelektrinio generatorius nr.	Išėjimo įtampa $U_{i\delta}$, V	Rezonansinis dažnis f_r , Hz	Kokybės faktorius Q	Elektrinė talpa tarp šerdies ir PVDF plėvelės elektrodo, nF
LF-500PP-1	31.4	40.6	2.92	3.89
LF-500PP-3	32.4	41.6	3.20	3.78

3.3.2. Pjezoelektrinių generatorių $U_{i\delta}$, f_{rez} , elektrinės talpos ir mechaninio kokybės faktoriaus pokytis

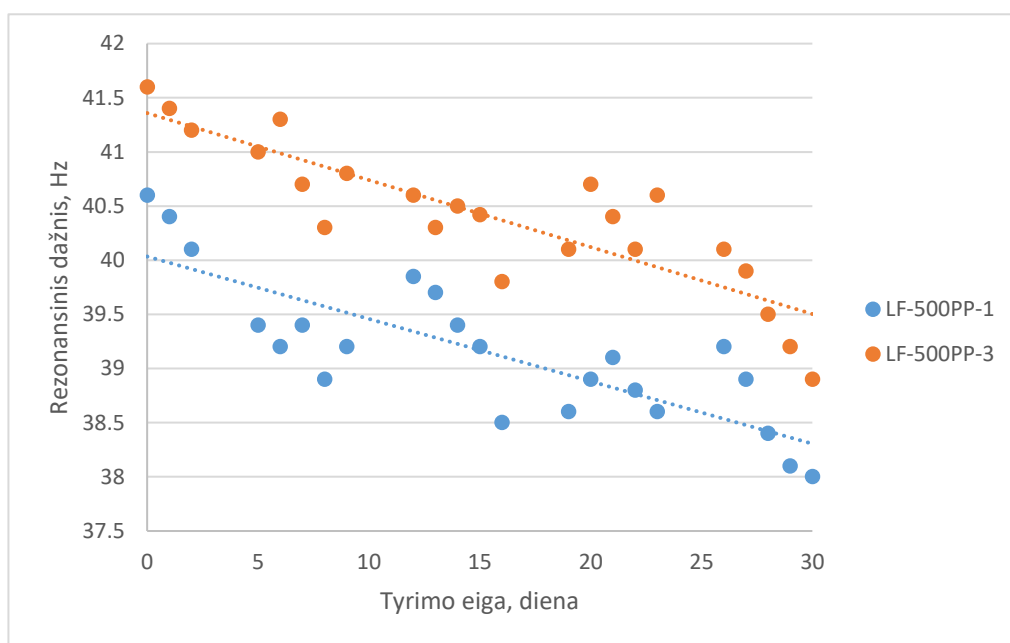
Pjezoelektrinių generatorių patikimumui įvertinti nutarta matuoti išėjimo įtampas, rezonansinio dažnio ir elektrinės talpos pokyčius. Apdoroti pjezoelektrinių generatorių ilgaamžiškumo tyrimo rezultatai atvaizduojami laiko ašyje. Pjezoelektrinių generatorių su PP šerdimis išėjimo įtampas pokytis tyrimo eigoje pateikiamas 3.12 pav.



3.12 pav. Pjezoelektrinių generatorių išėjimo įtampas pokytis tyrimo eigoje

Po pjezoelektrinių generatorių su PP šerdimis patikimumo tyrimo galima teigti, kad ciklinis temperatūrinis ir mechaninis poveikiai sukelia pjezoelektrinio generatoriaus konstrukcijos nuovargį, nes abiejų pjezoelektrinių generatorių su PP šerdimis generuojama įtampa sumažėja dėl PVDF plėvelės nuovargio, mikro – įtrūkimų. Iš pjezoelektrinių generatorių su PP šerdimi ir aliuminio padengimo plėvele tyrimo rezultatų galime pastebėti, kad abu pjezoelektriniai generatoriai LF-500PP-1 ir LF-500PP-3 pirmasias tris paras generuoja beveik pastovią išėjimo įtampą (atitinkamai $U_{i\bar{s}} = 31.4 \text{ V}$ ir $U_{i\bar{s}} = 32.4 \text{ V}$). Toliau, stebimas abiejų pjezoelektrinių generatorių išėjimo įtampos didėjimas. Abiejų pjezoelektrinių generatorių įtampa didėja iki 9 tyrimo paros. Toliau, pjezoelektrinius generatorius termocikluojant, generuojama įtampa pradeda mažėti ir tolygiai mažėja iki pat tyrimo pabaigos. LF-500PP-1 pjezoelektrinio generatoriaus įtampos sumažėjimas – 24 %, o LF-500PP-2 generatoriaus įtampos sumažėjimas – 23 %.

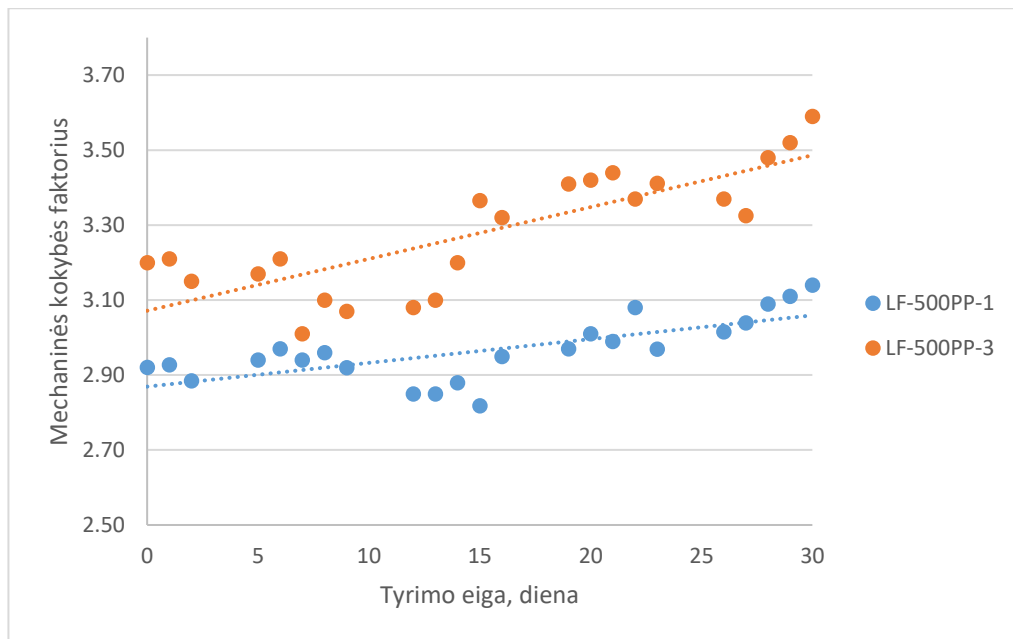
Tyrime matuojamas pjezoelektrinių generatorių su 500 um storio PP šerdimis ir aliuminio padengimo pjezoelektrine plėvele rezonansinio dažnio f_{rez} pokytis. Pjezoelektrinių generatorių rezonansinio dažnio pokytis tyrimo eigoje pateikiamas 3.13 pav.



3.13 pav. Pjezoelektrinių generatorių su PP šerdimis rezonansinio dažnio pokytis tyrimo eigoje

Grafike matomas abiejų pjezoelektrinių generatorių rezonansinio dažnio sumažėjimas tyrimo eigoje. Galutinis pjezoelektrinio generatoriaus LF-500PP-1 rezonansinis dažnis, lyginant su pradine verte sumažėja 2.5 Hz (procentinis sumažėjimas 6 %), o pjezoelektrinio generatoriaus LF-500PP-3 rezonansinis dažnis sumažėja 2.7 Hz (procentinis sumažėjimas 7 %). Rezonansinio dažnio mažėjimas vyksta dėl mažėjančio laminato standumo dėl temperatūrinio ir mechaninio ciklinio poveikio sukulto konstrukcijos nuovargio.

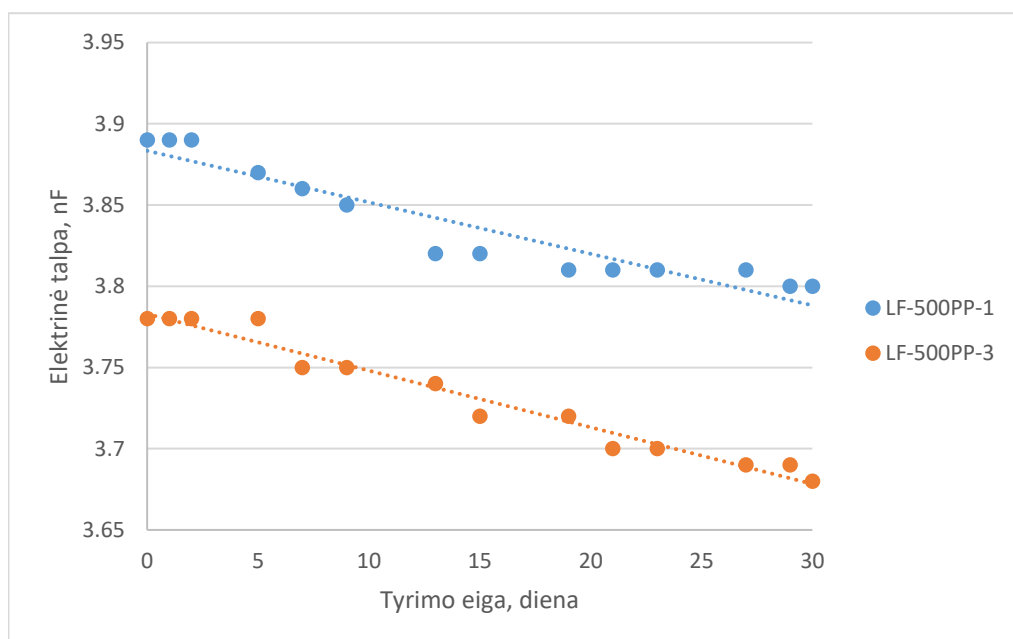
Tyrime atlikti mechaninės kokybės faktoriaus skaičiavimai. Mechaninės kokybės faktoriaus pokytis tyrimo eigoje pateikiamas 3.14 pav.



3.14 pav. Pjezoelektrinių generatorių su PP šerdimis mechaninio kokybės faktoriaus pokytis tyrimo eigoje

Iš kokybės pokyčio grafiko galime pastebėti, kad pjezoelektrinių generatorių su PP šerdimis mechaninės kokybės faktorius didėja tyrimo eigoje. Tyrimo pabaigoje, apskaičiuota abiejų pjezoelektrinių generatorių mechaninio kokybės faktoriaus vertė lyginant su pradine verte yra didesnė. Pjezoelektrinio generatoriaus LF-500PP-1 mechaninės kokybės faktorius tyrimo eigoje padidėjo 8 %, o pjezoelektrinio generatoriaus LF-500PP-3 padidėjo 12 %.

Įvertinus mechaninės kokybės faktorių pokyčius, galima teigti, jog dėl ciklinio mechaninio ir temperatūrinio poveikio, pjezoelektrinių generatorių su PP šerdimi standumas mažėja ir darbinis dažnių juostos plotis mažėja. Pjezoelektrinių generatorių su PP šerdimis elektrinės talpos pokytis 3.15 pav.



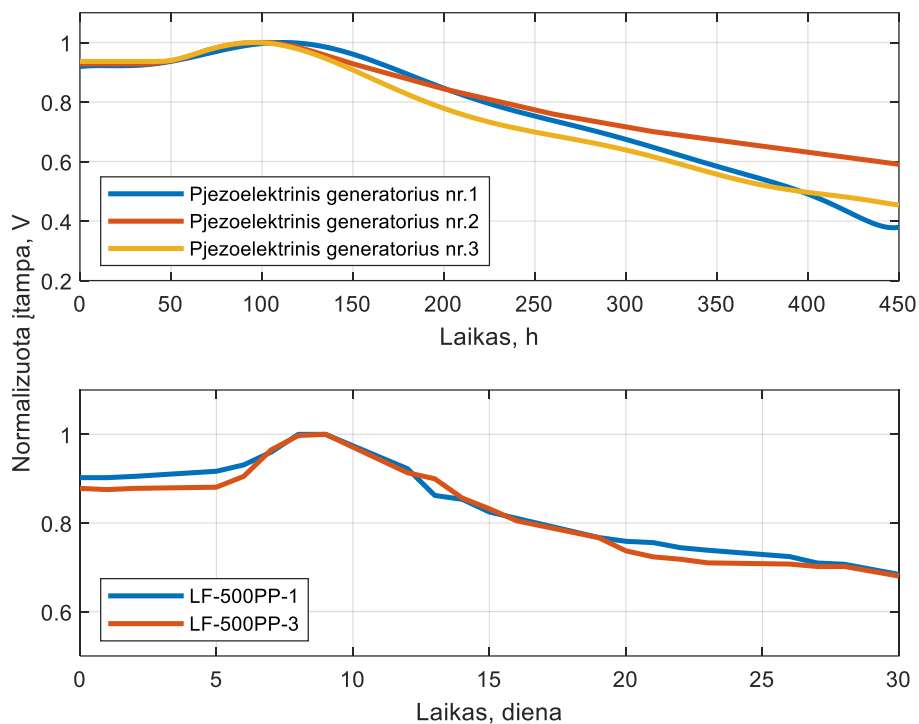
3.15 pav. Pjezoelektrinių generatorių elektrinės talpos pokytis tyrimo eigoje

Iš pjezoelektrinių generatorių elektrinės talpos pokyčio pastebima, kad bendros šerdies elektrodų ir pjezoelektrinių generatorių aliuminio padengimo PVDF plėvelės elektrinės talpos tendencija yra mažėjanti. Pjezoelektrinio generatoriaus LF-500PP-1 elektrinė talpa tyrimo eigoje sumažėja 2 %, o pjezoelektrinio generatoriaus LF-500PP-3 – 3 %. Abiejų pjezoelektrinių generatorių su PP šerdimis ir aliuminio padengimo PVDF plėvele elektrinės talpos tarp šerdies elektrodo ir pjezoelektrinės PVDF plėvelės metalizavimo sumažėjimas panašus. Galima teigti, kad ciklinis temperatūrinis ir mechaninis poveikis daro nedidelę įtaką polivinilfluoridinės PVDF plėvelės elektrinių savybių degradacijai bei prisiklijavimo kokybei prie šerdies ir šerdies elektrodo.

Įvertinus tyrimo rezultatus ir vizualiai apžiūrėjus pjezoelektrinius generatorius, nustatyta, kad ciklinis temperatūrinis ir mechaninis poveikis daro įtaką pjezoelektrinių generatorių su PP šerdimi nuovargiui. Po pjezoelektrinių generatorių su PP šerdimis patikimumo tyrimo, išorinių pjezoelektrinės PVDF plėvelės pažeidimų, pvz., paviršinio plėvelės įtrūkimų, atsiklijavimo, korozijos, kaip PET ir metalinę šerdį turinčiuose pjezoelektriniuose generatoriuose nepastebėta. Taip pat, nepastebėti išoriniai polivinilfluoridinių (PVDF) plėvelių trūkiai ties SMP kraštu, į kurį dildavo pjezoelektrinės PVDF plėvelės metalizavimas, šerdžiai atsilenkiant maksimalia amplitude. Galima teigti, kad po pirmojo tyrimo atlikti konstrukciniai pjezoelektrinių generatorių patobulinimai: šerdies dengimas apsaugine purškiamą danga, šerdies tvirtinimas tarp dviejų plastiko lakštų, tvirtinant laminatą tarp spausdintinio montažo plokščių leidžia padidinti pjezoelektrinių generatorių ilgaamžiškumą. Atlikus tyrimus nustatyta, kad pjezoelektriniai generatoriai su aliuminio padengimo PVDF plėvele ir PP šerdimi pasižymi geromis ilgaamžiškumo savybėmis pjezoelektriniams generatorius veikiant cikliškam temperatūriniam ir tiesiškai kintančio dažnio mechaniniam poveikiui.

3.3.3. Plastikinę šerdį turinčių pjezoelektrinių generatorių išėjimo įtampos kitimo tendencijos palyginimas

Magistro baigiamajame projekte atliktuose pjezoelektrinių elektros energijos generatorių patikimumo tyrimuose, nustatyta, kad plastikinę šerdį turinčių pjezoelektrinių generatorių išėjimo įtampa kinta pagal panašią tendenciją. Išėjimo įtampų kitimo tendencijų palyginimui, visų generatorių išėjimo įtampos normalizuotos, kiekvieno atskiro pjezoelektrinio generatoriaus vidutinės išėjimo įtampos vertės padalinus iš maksimalios generatoriaus išėjimo įtampos vertės. PET ir PP šerdį turinčių pjezoelektrinių generatorių santykinės išėjimo įtampos pokyčio tendencijos palyginamieji grafikai pateikiami 3.16 pav.



3.16 pav. Pjezoelektrinių generatorių išėjimo įtampos pokyčio tendencijos palyginamieji grafikai

Iš pjezoelektrinių generatorių su plastikinėmis šerdimis išėjimo įtampos palyginamųjų grafikų matoma, kad iki tam tikro laiko momento, pjezoelektrinių elektros energijos generatorių su plastikinėmis šerdimis generuojama išėjimo įtampa yra stabili. Bėgant laikui, dirbantis pjezoelektrinis generatorius pradeda generuoti didesnę išėjimo įtampą dėl sumažėjusio šerdies standumo, dėl ko labiau deformuojama PVDF plėvelė. Toliau, pastebimas pjezoelektrinio generatoriaus išėjimo įtampos mažėjimas dėl pjezoelektrinio generatoriaus ir pjezoelektrinės PVDF plėvelės degradacijos. Tolimesni šio reiškinio eksperimentiniai tyrimai ateityje, leistų tiksliau prognozuoti plastikinę šerdį turinčių pjezoelektrinių generatorių išėjimo įtampos pokytį tam tikromis darbinėmis sąlygomis, tiksliau įvertinti pjezoelektrinių generatorių patikimumą.

Išvados

1. Elektros energijos gavybai iš mechaninių virpesių naudojant pjezoelektrinius generatorius gali būti naudojamos įvairios pjezoelektrinės medžiagos: PZT, PMN-PT pjezoelektrinės keramikos, pjezoelektrinės putos bei metalizuotos PVDF plėvelės. Įtaisų senėjimas vyksta greičiausiai, kai vienu metu veikia temperatūros ciklai ir mechaninės vibracijos.
2. Eksperimentinio tyrimo metu nustatyta, kad pjezoelektriniai generatoriai turintys PET šerdį ir PVDF plėvelę, dengtą vario – nikelio padengimu, generuoja ~3.5 karto didesnę išėjimo įtampą nei plieninę šerdį ir aliuminiu dengtą PVDF plėvelę turintys generatoriai.
3. PET šerdį turinčių pjezoelektrinių generatorių išėjimo įtampa eksperimento metu (450 h) sumažėjo 51 % , o plieninę šerdį turinčio pjezoelektrinio generatoriaus išėjimo įtampa sumažėjo 65% (du generatoriai nustojo funkcionuoti nebaigus eksperimento).
4. Visuose generatoriuose stebimas elektrinės talpos tarp šerdies ir PVDF plėvelės elektrodų sumažėjimas dėl PVDF plėvelių degradacijos, plėvelių atsiklijavimo. Taip pat, stebimas PVDF paviršiaus metalizacijos varžos padidėjimas dėl įvairių PVDF pažeidimų (korozijos, nutrupėjimo, išilginių elektrodų trūkių).
5. Išanalizavus temperatūros ir mechaninį poveikį pjezoelektriniams generatoriams, pasiūlyti pjezoelektrinių generatorių ilgaamžiškumo tobulinimo sprendimai: purškiama apsauginė danga PVDF plėvelei, tarpinio plastiko lakšto tarp šerdies ir SMP naudojimas, siekiant išvengti PVDF plėvelės metalizavimo dilimo į SMP kraštą, pjezoelektrinio generatoriaus šerdies atsilenkimo metu.
6. Pjezoelektrinio generatoriaus konstrukcijos pakeitimai (naudojama purškiama apsauginė danga, teflono naudojimas tarp šerdies ir SMP), atsižvelgus į pirmojo tyrimo rezultatus, leidžia sumažinti nuovargio poveikį klijavimo būklei ir PVDF plėvelės degradacijai esant skirtingiems termocikliniams ir mechaniniams poveikiams (elektrinė talpa trečio tyrimo eigoje sumažėjo 2 % - 3 %).
7. Veikiant temperatūriniam ir mechaniniam cikliniam poveikiui, dėl konstrukcijos nuovargio ir poveikio PVDF plėvelei, pjezoelektrinio generatoriaus su PP šerdimi išėjimo įtampa per 4 savaites sumažėja nuo 23 % iki 24 %. Dėl nuovargio mažėja rezonansinis generatorių dažnis (6 % - 7 %), tačiau dėl mažėjančio laminato standumo padidėja mechaninis kokybės faktorius.
8. Eksperimentinių tyrimų metu nustatytas, kol kas literatūroje neaprašytas reiškinys, kai plastikinę šerdį turinčių pjezoelektrinių generatorių generuojama išėjimo įtampa po tam tikro laiko pradeda didėti, o po kurio laiko pradeda mažėti iki visiškos degradacijos. Įtampos padidėjimas siejamas su plastikinės šerdies lankstumo padidėjimu dėl besikaupiančių mikro įtrūkimų, dėl kurių vibracijų metu labiau deformuojama PVDF plėvelė, gembės laisvasis galas atsilenkia didesne amplitude.

Literatūros sąrašas

- [1]. Supratik Datta, „Piezoelectric Energy Harvesting Solutions: A Review“, 2014 [žiūrėta 2022-03-28]. Prieiga per internetą: <https://www.comsol.com/blogs/piezoelectric-materials-crystal-orientation-poling-direction/>
- [2]. A. Čeponis, D. Mažeika, „Pjezoelektrinių Energijos Surinkimo Sistemų Apžvalga“, 2015 [žiūrėta 2022-03-28]. Prieiga per internetą: <https://journals.vgtu.lt/index.php/MLA/article/view/3653>
- [3]. N. Sezer and M. Koç, “A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting,” 2021 [žiūrėta 2022-03-28]. Prieiga per internetą: , <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285520311411>.
- [4]. Corina Covaci, Aurel Contean, „Piezoelectric Energy Harvesting Solutions: A Review“, 2020 [žiūrėta 2020-11-16]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/257786789_A_Review_of_Piezoelectric_Energy_Harvesting_Based_on_Vibration
- [5]. Mahidur Sarker, Azah Mohamed, Ramizi Mohamed, „Vibration Based Piezoelectric Energy Harvesting Utilizing Bridgeless Rectifier Circuit“, 2016 [žiūrėta 2020-11-16]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/311939685_Vibration_Based_Piezoelectric_Energy_Harvesting_Utilizing_Bridgeless_Rectifier_Circuit
- [6]. H. Zhang et al., “Origami-tessellation-based triboelectric nanogenerator for energy harvesting with application in road pavement,” 2020 [žiūrėta 2022-03-28]. Prieiga per internetą: , <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105177>.
- [7]. S. Priya et al., “A Review on Piezoelectric Energy Harvesting: Materials, Methods, and Circuits,” 2019 [žiūrėta 2022-03-16]. Prieiga per internetą: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/ehs-2016-0028/html>
- [8]. S. Sukumaran, S. Chatbouri, D. Rouxel, E. Tisserand, F. Thiebaud, and T. Ben Zineb, “Recent advances in flexible PVDF based piezoelectric polymer devices for energy harvesting applications,” 2021 [žiūrėta 2022-03-25]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/344931313_Recent_advances_in_flexible_PVDF_based_piezoelectric_polymer_devices_for_energy_harvesting_applications
- [9]. W. Tian, Z. Ling, W. Yu, and J. Shi, “A review of MEMS scale piezoelectric energy harvester,” 2018 [žiūrėta 2022-01-16]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/324696017_A_Review_of_MEMS_Scale_Piezoelectric_Energy_Harvester/link/5addd106458515c60f5f73c0/download
- [10]. P. Davari, N. Ghasemi, and F. Zare, “Power converters design and analysis for high power piezoelectric ultrasonic transducers,” 2014 [žiūrėta 2021-01-16]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/265686185_Power_converters_design_and_analysis_for_high_power_piezoelectric_ultrasonic_transducers/link/55420ca00cf24107d392a206/download
- [11]. L. Tang, Y. Yang, and C. K. Soh, “Toward broadband vibration-based energy harvesting,” 2010 [žiūrėta 2021-01-16]. Prieiga per internetą: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1045389X10390249>
- [12]. S. Du et al., “A new electrode design method in piezoelectric vibration energy harvesters to maximize output power,” 2017 [žiūrėta 2021-01-16]. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2017.06.026>

- [13]. S. R. Anton and H. A. Sodano, "A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006)," 2007 [žiūrėta 2021-01-16]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/230901748_A_Review_of_Power_Harvesting_Using_Piezoelectric_Materials_2003-2006/link/55fc34f608ae07629e0996ee/download
- [14]. H. Liu, R. Hua, Y. Lu, Y. Wang, E. Salman, and J. Liang, "Boosting the efficiency of a footstep piezoelectric-stack energy harvester using the synchronized switch technology," 2019 [žiūrėta 2021-01-16]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/330984992_Boosting_the_efficiency_of_a_footstep_piezoelectric-stack_energy_harvester_using_the_synchronized_switch_technology IEC62506. Prieiga per internetą: https://view.elaba.lt/standartai/view?search_from=primo&id=985411
- [15]. Y. C. Kuo, J.-T. Chien, W.-T. Shih, C.-T. Chen, S.-C. Lin, and W.-J. Wu, "The fatigue behavior study of micro piezoelectric energy harvester under different working temperature," 2019 [žiūrėta 2021-01-16]. Prieiga per internetą: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10967/109672H/The-fatigue-behavior-study-of-micro-piezoelectric-energy-harvester-under/10.1117/12.2514427.full?SSO=1>
- [16]. K. Yang, A. Cioncolini, M. R. A. Nabawy, and A. Revell, "Mechanical durability assessment of an energy-harvesting piezoelectric inverted flag," 2022 [žiūrėta 2022-03-28]. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/1/77>
- [17]. M. Peddigari et al., "Characterization of single-crystal macro-fiber composite-based piezoelectric energy harvesters in various temperature and humidity environments," 2022 [žiūrėta 2022-03-16]. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.12.298>.
- [18]. Y. Yu, X. S. Wang, Y. X. Li, and X. Yao, "Fatigue behaviors in PZT ceramics induced by mechanical cyclic load," 2014 [žiūrėta 2021-01-16]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/266800074_Fatigue_Behaviors_in_PZT_Ceramics_Induced_by_Mechanical_Cyclic_Load