



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Energijos generatorius, erdvėje laisvu vibrosmūginio režimu judančiam kūnui

Baigiamasis magistro projektas

Egidijus Stasytis
Projekto autorius

Prof. Rimvydas Gaidys
Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Energijos generatorius, erdvėje laisvu vibrosmūginu režimu judančiam kūnui

Baigiamasis magistro projektas
Mechanikos inžinerija (6211EX009)

Egidijus Stasytis
Projekto autorius

Prof. Rimvydas Gaidys
Vadovas

Recenzentas
doc. dr. Kęstutis Pilkauskas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Egidijus Stasytis

Energijos generatorius, erdvėje laisvu vibrosmūginiu režimu judančiam kūnui

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, *Egidijaus Stasyčio*, baigiamasis projektas tema „*Energijos generatorius, erdvėje laisvu vibrosmūginiu režimu judančiam kūnui*“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(Vardas, Pavardė įrašomi ranka)

(parašas)



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Studijų programa – MECHANIKOS INŽINERIJA 6211EX009

Magistrantūros studijų baigiamojo projekto užduotis

Studentui(-ei) – Egidijui Stasyčiui

1. Baigiamojo projekto tema –

Energijos generatorius, erdvėje laisvu vibrosmūginiu režimu judančiam kūnui

(Lietuvių kalba)

Energy Harvester for a Free Body Moving in Space at Vibro Shock Mode

(Anglų kalba)

2. Baigiamojo projekto tikslas ir uždaviniai –

Baigiamojo projekto tikslas – Sukurti ir iširti elektros energijos generatorių erdvėje laisvu vibrosmūginiu režimu judančiam kūnui.

Uždaviniai – atlikti elektros energijos generatorių naudojančių mechaninių virpesių energiją literatūros apžvalgą; sukurti generatoriaus koncepcinį modelį; atlikti generatoriaus dinamikos analizę; eksperimentiškai nustatyti smūginio kontakto slopinimą ir standumą; optimizuoti generatoriaus sistemą; nustatyti generatoriaus išėjimo įtampą bei galią.

3. Pradiniai baigiamojo projekto duomenys –

Kūno laisvo judesio erdvėje dėsnis (greitis, trajektorija, pagreitis)

4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos –

Generuoja elektros energiją vibrosmūginiame režime; gali judėti erdvėje nevaržomai;

Projekto autorius

Egidijus Stasytis

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Baigiamojo projekto vadovas

prof. Rimvydas Gaidys

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Krypties studijų programos vadovas

doc, dr. Kęstutis Pilkauskas

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Stasytis, Egidijus. Energijos generatorius, erdvėje laisvu vibrosmūginio režimu judančiam kūnui. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. Rimvydas Gaidys; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų sritis (studijų krypties grupė), studijų kryptis: Technologijos mokslai, Mechanikos inžinerija
Reikšminiai žodžiai: energijos generatorius, vibrosmūgis, pjezoelektrinis, dinamika, laisvas kūnas.

Kaunas, 2020. 55 p.

Santrauka

Darbe atlikta elektros energijos generatorių naudojančių mechaninių virpesių energiją literatūros apžvalgą. Sukurtas generatoriaus koncepcinį modelį naudojantis PVDF bimorfines plėveles kaip elektrą generuojančius elementus. Atlikta generatoriaus dinaminė analizė įvertinant veikiančias jėgas. Dinamika aprašyta diferencialinėmis lygtimis, kurios naudojant Runge ir Kuto metodą *Matlab* aplinkoje išspręstos. Eksperimentiškai nustatyti smūginio kontakto slopinimas ir standumas. Generatorius optimizuotas dirbti esant 40 Hz smūginiam žadinimui. Nustatyta išėjimo galios bei įtampos priklausomybė nuo laiko. Pateikiamos darbo išvados.

Stasytis, Egidijus. Energy Harvester for a Free Body Moving in Space at Vibro Shock Mode Project / supervisor prof. Rimvydas Gaidys; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study area (study field group), study field: Technological Sciences, Mechanical Engineering

Key words: energy harvester, vibro shock, piezoelectric, dynamics, free body.

Kaunas, 2020. 55 p.

Summary

A review of the literature on energy harvesters using mechanical ambient energy was performed. Conceptual energy harvester model using PVDF bimorph films as electricity generating elements was developed. Dynamic analysis of the generator was performed by evaluating the acting forces. The dynamics are described by differential equations, which are solved in *Matlab* using the Rung and Kut method. Experimental determination of impact contact damping and stiffness was performed. The generator is optimized to operate at 40 Hz shock excitation. The time dependence of the output power and voltage was determined. The conclusions of the work was presented.

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Įvadas.....	12
1. Literatūros apžvalga	13
1.1 Mechaninių virpesių energija	13
1.1.1 Elektromagnetinė indukcija bei generatoriai	14
1.1.2 Elektrostatinė indukcija bei generatoriai	16
1.1.3 Pjezoelektrinis reiškinys bei generatoriai	17
1.2 Medžiagos pasižyminčios pjezoelektriniu reiškiniu.....	19
1.2.1 Monokristalai.....	19
1.2.2 Keramika	20
1.2.3 Polimerai.....	21
1.3 Gembiniai pjezoelektriniai generatoriai	21
1.3.1 Gembinio pjezoelektrinio generatoriaus baigtinių elementų matematinis modelis	22
1.3.2 Gembės geometrijos optimizavimas.....	24
1.4 Generuojamos elektros energijos valdymas	25
1.5 Literatūros apžvalgos išvados.....	29
2. Generatoriaus kūrimas bei tyrimas	30
2.1 Generatoriaus dinaminė analizė	30
2.1.1 Pirmas etapas – generatoriaus pradinis judesys	30
2.1.2. Antras etapas – netiesinis kontaktas su kliūtimi.....	33
2.1.3. Trečias etapas – atsakas į kontaktą.....	34
2.2 Eksperimentinis pagrindo slopinimo bei standumo verčių nustatymas.....	34
2.3 Generatoriaus optimizavimas žadinimo dažniui	41
2.4 Generuojančio elemento parinkimas bei tyrimas	42
2.5 Generatoriaus išėjimo įtampos bei galios tyrimas.....	45
Išvados	47
Literatūra	48
1 Priedas. Matlab programos kodas	51

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė Virpesių šaltinių dažniai bei amplitudiniai pagreičiai [2,3]	19
1.2 lentelė Pjezoelektrinių medžiagų konstantos bei Kiuri temperatūros [14]	21
2.1 lentelė Eksperimento ir skaičiavimo rezultatai	39
2.2 lentelė PVDF plokštelės modos	43
2.3 lentelė Tyrimo rezultatai	46

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Elektrinių prietaisų energijos suvartojimo spektras [1].....	13
1.2 pav. Elektromagnetinės indukcijos generatoriaus schema [4].....	14
1.3 pav. Jūros bangų energijos generatorius [5].....	14
1.4 pav. Besisukančio elektromagnetinės indukcijos generatoriaus schema [5]	15
1.5 pav. Elektrostatinis generatorius[7]	16
1.6 pav. Standartiniai elektrostatinio generatoriaus neturinio elektreto darbo ciklai [7]	16
1.7 pav. Krūviu suvaržytas ciklas [7].....	16
1.8 pav. Tiesioginis ir atvirkštinis pjezoelektrinis reiškinys [8]	17
1.9 pav. Koordinačių sistema reikalinga nusakyti mechanines deformacijas ir indukuotą elektros įtampą pjezoelektrinėje medžiagoje [10].....	18
1.10 pav. Pjezoelektrinių medžiagų poliarizavimas [13].....	20
1.11 pav. Unimorfis a) ir bimorfis b) pjezoelektrinis generatoriai [16].....	22
1.12 pav. Stačiakampės a) trapecinės b) bei trikampės c) gembės deformacijų pasiskirstymas ilgyje [14]	25
1.13 pav. Galios valdiklis [14]	26
1.14 pav. Diodų tiltelis [21]	26
1.15 pav. Parallel-SSHI grandinė [22]	27
1.16 pav. Parallel-SSHI: temperatūros, poslinkių, įtampos ir srovės banginės formos [22].....	27
1.17 pav. SSHI serijos grandinė [22]	28
1.18 pav. SSHI serijos grandinė: temperatūros, poslinkių, įtampos ir srovės banginės formos [22]	28
1.19 pav. Konceptinio pjezoelektrinio generatoriaus modelis: 1 – spyruoklės, 2 – korpusas, 3 – generuojantys elementai, 4 – laikiklis	29
2.1 pav. Kūną veikiančios jėgos[3]	30
2.2 pav. Virpesių generatoriaus skaičiuojamoji schema	31
2.3 pav. Baigtinių elementų modelis.....	32
2.4 pav. Baigtinių elementų modelis kontakto su kliūtimi metu	33
2.5 pav. Eksperimentinė schema: 1 – tyrimo objektas, 2 – mob. telefonas <i>Huawei honor 20</i> , 3 – trinkelė.....	35
2.6 pav. Eksperimento objektas: 1 – gumuotas žiedas, 2 – spyruoklė, 3 – seisminė masė.....	35
2.7 pav. Eksperimento įrašo kalibravimas. Čia A – seisminės masės padėtis, B – korpuso padėtis. 36	
2.8 pav. Korpuso poslinkiai $y_1(t)$	36
2.9 pav. Seisminės masės poslinkiai $y_2(t)$	36
2.10 pav. Seisminės masės poslinkiai $y_1(t)-y_2(t)$	37
2.11 pav. Transformuoti seisminės masės poslinkiai $y_1(t)-y_2(t)$ trunkantys 0.351s.....	37
2.12 pav. Seisminės masės virpesiai korpuso atžvilgiu $y_2(t)$	38
2.13 pav. Generatoriaus poslinkiai $y_1(t)$ gauti eksperimentiškai bei skaitiniu metodu.....	39
2.14 pav. Uždavinio pavyzdžio iliustracija	40
2.15 pav. Generatoriaus judėjimo trajektorija.....	40
2.16 pav. Seisminės masės poslinkiai korpuso (kamuolio) atžvilgiu priklausomybė nuo laiko: raudona – poslinkiai horizontalia kryptimi, mėlyna – poslinkiai vertikalia kryptimi	40
2.17 pav. Korpuso poslinkiai vertikalia kryptimi	41
2.18 pav. Seisminės masės poslinkių korpuso atžvilgiu priklausomybė nuo laiko, $t=1,15$ s	41
2.19 pav. Pjezoelektrinės plokštelės schema	42

2.20 pav. Generuojamos įtampos bei išėjimo galios priklausomybė nuo elektrinės apkrovos, kai žadinimo dažnis 39Hz	44
2.21 pav. Generuojamos įtampos bei išėjimo galios priklausomybė nuo žadinimo dažnio, kai apkrova 2 MΩ.....	44
2.22 pav. Tyrime naudojamas modelis: 1 – PVDF plokštelės, 2 – seisminė masė m_2	45
2.23 pav. Kinematinio plokštelės žadinimo horizontalios ašies kryptimi priklausomybė nuo laiko	45
2.24 pav. Kinematinio plokštelės žadinimo vertikalios ašies kryptimi priklausomybė nuo laiko	45

Įvadas

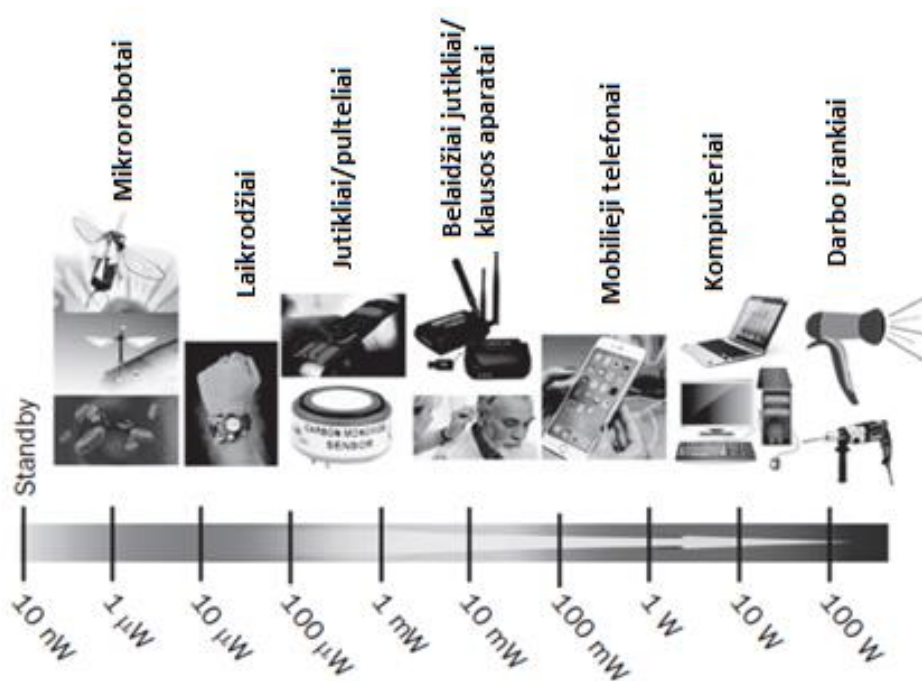
Aplinkos energijos generatoriai turi potencialą pakeisti galvaninius elementus kaip energijos šaltiniai pasižymintys praktiškumu, ypač kai sudėtinga arba neįmanoma pakeisi maitinimo elemento. Tradiciniai elektrocheminiai galvaniniai elementai bei kuro tiekimo sistemos ribotos: baterijos eksploataavimo trukmės, kuro tiekimo bei svorio. Pažanga elektronikos bei jutiklių technologijoje stabiliai mažina įvairių prietaisų elektros energijos suvartojimą, aplinkos energijos generatoriai tampa pajėgūs aprūpinti elektros energija įvairius prietaisus. Atlikus literatūros analizę pastebėta, kad šiandien visas dėmesys telkiamas į mikroelektromechaninius elektros generatorius absorbuojančius vibrosmūginių virpesių energiją.

Baigiamojo projekto tikslas – Sukurti ir ištirti elektros energijos generatorių erdvėje laisvu vibrosmūginiu režimu judančiam kūnui. Uždaviniai – atlikti elektros energijos generatorių naudojančius mechaninių virpesių energiją literatūros apžvalgą; sukurti generatoriaus koncepcinį modelį; atlikti generatoriaus dinamikos analizę; eksperimentiškai nustatyti smūginio kontakto slopinimą ir standumą; optimizuoti generatoriaus sistemą bei elementus; nustatyti generatoriaus išėjimo įtampos bei galios priklausomybę nuo laiko. Tikslui įgyvendinti naudota mokslinio pobūdžio literatūra bei skaitiniai inžineriniai metodai, *Matlab*, *Comsol*, *Tracker* programinė įranga.

1. Literatūros apžvalga

1.1 Mechaninių virpesių energija

Inovatyvios puslaidininkių gamybos technologijos per pastaruosius kelis dešimtmečius paskatino smulkios elektronikos raidą. Šiuolaikinė elektronika daug funkcionesnė bei suvartoja mažiau elektros energijos, gabaritiniai matmenys taip pat sumažėjo. Suvartojamos energijos spektras pavaizduotas 1.1 pav., pateikia energijos poreikį nuo nano-, mikroelektronikos iki makroelektronikos sistemų. Daugelis tokių prietaisų ilgą laiką gali dirbti naudodami vien baterijos energiją. Pasitaiko atvejų kai prietaisai montuojami vietose kur sudėtinga dirbti ar pasiekti žmogui, todėl baterijų pakeitimas komplikuoatas. Tokioje situacijoje atsiskleidžia aplinkos energijos surinkimo potencialas, siekiant maitinti prietaisą elektros energija, tuo labiau kai smulkioji elektronika dažniausiai vos μW ar mW galios. Taip pat dažnu atveju reikalinga, kad prietaisai dirbtų tiek lauke, tiek viduje, neatsižvelgiant į oro sąlygas. Dėl šios priežasties mechaniniai virpesiai bei žmogaus kūno judesiai tampa patraukliais energijos šaltiniais smulkiajai elektronikai. [1,2]



1.1 pav. Elektrinių prietaisų energijos suvartojimo spektras [1]

Mechaninę energiją, kurią objekto padėties bei judesio galima paversti į elektros, šilumos ar kitą energiją pasitelkiant įvairias medžiagas ar prietaisus. Pavyzdžiui, sugeneruotos elektros energijos kiekis aprašomas formule:

$$E_{elec} = \eta_{elec} \cdot \eta_{conv} \cdot \eta_{abs} \cdot E_{source}; \quad (1)$$

čia η_{abs} – sistemos absorbuota mechaninė energija, η_{conv} absorbuotos energijos dalis, kuri paversta į elektros energiją, η_{elec} – elektrinio naudingumo koeficientas, E_{source} – aplinkos energija [1].

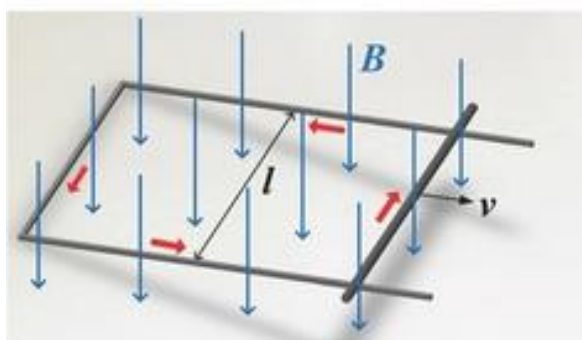
Yra keletas būdų mechaninių virpesių mechaninę energiją paversti į elektros energiją: elektromagnetinė indukcija, elektrostatinė indukcija bei pjezoelektrinis reiškinys. [3]

1.1.1 Elektromagnetinė indukcija bei generatoriai

Elektromagnetinės indukcijos generatoriai pagrįsti fundamentaliu elektromagnetinės indukcijos fenomenu, kuris pavaizduotas 1.2 pav. Kai elektrai laidas strypelis su uždara elektros grandine, judėdamas kerta magnetinės indukcijos linijas, generuojamas elektrodinaminis potencialas išilgai laidaus strypelio:

$$E = B \cdot l \cdot v; \quad (2)$$

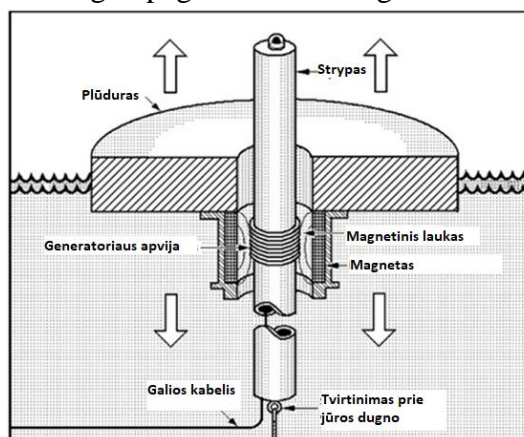
čia B – magnetinio srauto tankis, l – laidaus strypelio ilgis ir v – strypelio kertančio magnetinio lauko linijas, greitis.



1.2 pav. Elektromagnetinės indukcijos generatoriaus schema [4]

Elektromagnetinės indukcijos generatoriai gali generuoti indukuotą įtampą kaip įtampos šaltiniai. Magnetinio srauto tankis priklauso nuo medžiagos savybių. Generuojama įtampa – nuo laidaus strypelio ilgio, kuris nulemia generatoriaus matmenis. Strypelio greitis priklauso nuo mechaninės energijos [4].

Jūros bangų elektros generatorius sukurtas inžinerijos profesorės dr. Annette von Jouanne Oregono universitete pagrįstas elektromagnetine indukcija, pavaizduotas 1.3 pav. Didžiulis žiedas, kylantis aukštyn ir žemyn dėl jūros bangavimo, primena geltoną gelbėjimosi ratą, užmautą ant cilindrinio strypo. Strypas gerai pritvirtintas prie jūros dugno, turi varinę ritę ir išlaiko vertikalią poziciją jūros dugno atžvilgiu. Plūduras turi nuolatinį magnetą, kuris judėdamas strypo apvijoje, sukuria įtampą. Pasak profesorės, toks generatorius gali pagaminti 10 kW galios.



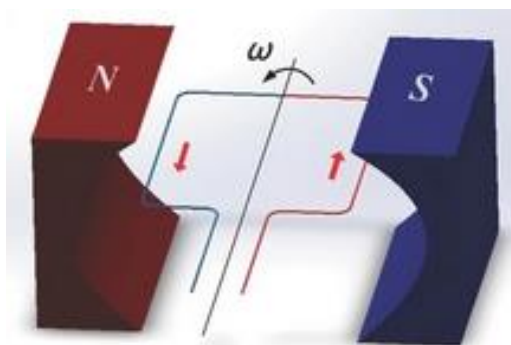
1.3 pav. Jūros bangų energijos generatorius [5]

Tokie generatoriai jungiami į grandinę, o jų generuojama energija nuvedama laidais jūros dugnu. Mokslininkai teigia, kad tokia technologija pranašesnė už vėjo ar saulės energijos generatorius, nes dirba 24 h per parą. Taip pat jūros bangų energija 50 kartų didesnė nei vėjo [5].

Besisukančio elektromagnetinės indukcijos generatoriaus schema pavaizduota 1.4 pav. Generatorius sudarytas iš poros magnetų bei ričių lokalizuotų magnetiniame lauke. Kai ritė sukasi apie centrinę ašį, magnetinis srautas kertantis ritę kinta. Besisukančio generatoriaus išėjimo įtampa kinta kaip sinusoidė, kurios maksimali vertė užrašoma:

$$E_m = n \cdot B \cdot S \cdot \omega; \quad (3)$$

čia n – ritės apvijų skaičius, S – rėmelio kontūro plotis, ω – kampinis greitis.



1.4 pav. Besisukančio elektromagnetinės indukcijos generatoriaus schema [5]

Kaip ir generatoriaus su slankiojančiu strypeliu, besisukančio generatoriaus išėjimo įtampa priklauso nuo magnetinio srauto tankio. Esant didesniai rėmelio kontūro ploiui generuojama didesnė įtampa, kas nulemia generatoriaus matmenis. Ritės apvijų skaičius priklauso nuo konstrukcijos.

Bendroji generatoriaus lygtis:

$$E = n \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t}; \quad (4)$$

čia n – apvijų skaičius ir $\Delta\phi/\Delta t$ – magnetinio srauto kiekvienoje apvijoje kitimo greitis [4].

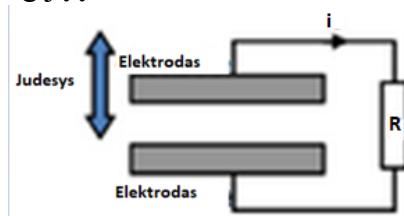
Vienas iš elektromagnetinių generatorių privalumų, kitaip nei elektrostatių, generatoriams nereikalingas išorinis el. energijos šaltinis. Generatoriai geba dirbti kaip kintamos arba nuolatinės el. srovės generatoriai, antru atveju reikalingi keli papildomi komponentai.

Trūkumas – kai kuriais atvejais elektromagnetiniai generatoriai, kaip elektros šaltiniai, tampa nenaudingi arba pavojingi. Pavyzdžiui, jei reikalingas energijos šaltinis su reguliuojama el. srove, abu tiek nuolatinės, tiek kintamos srovės generatoriai turėtų veikti nekintančiu greičiu. Taip pat nuolatinės srovės generatoriaus srovė teka viena kryptimi, ji nėra pastovaus dydžio. Galios reguliavimui reikalinga baterija, induktorius, kondensatorius arba diodai. Kadangi generatoriai naudoja elektromagnetinį lauką, šis laukas gali būti pavojingas kai kuriems žmonėms naudojamiems jautriems medicininiams prietaisams, tokius kaip širdies stiprintuvai. Tos pačios elektromagnetinės bangos gali trikdyti kitų elektronikos prietaisų veiklą, pavyzdžiui, mob. telefonų ar kompiuterių. Taip pat generatoriai išskiria šilumą [6].

1.1.2 Elektrostatinė indukcija bei generatoriai

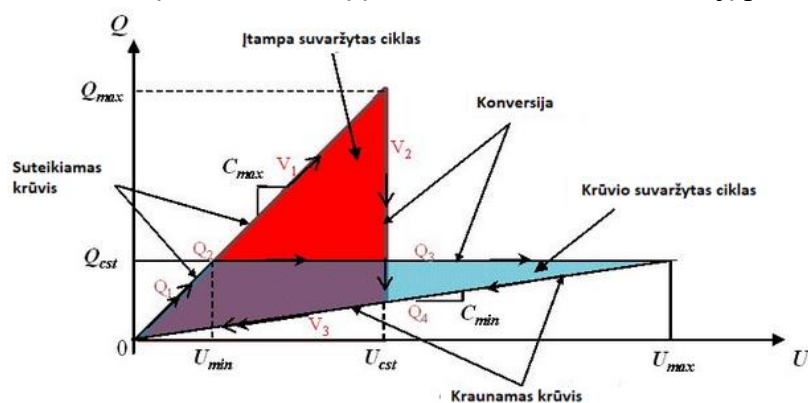
Elektrostatiniai generatoriai – talpinės struktūros pagaminti iš dviejų plokštelių, atskirtų oro, vakuumo ar bet kokio dielektriko (žr. 1.5 pav.). Santykinis judėjimas tarp plokštelių sukuria elektrinės talpos bei krūvių kitimą. Šiuos įtaisus galima suskirstyti į dvi kategorijas:

- Elektrostatiniai generatoriai, neturintys elektreto, dirbantys kondensatoriaus įkrovimo ir iškrovimo ciklais.
- Elektrostatiniai generatoriai, turintys elektretą, suteikia elektretams galimybę tiesiogiai konvertuoti mechaninę energiją į elektros.



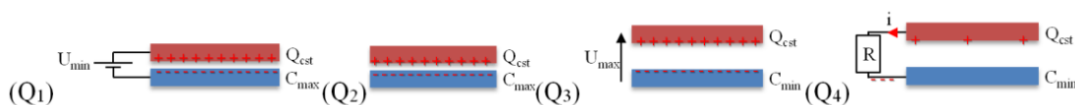
1.5 pav. Elektrostatinis generatorius[7]

Elektrostatiniai generatoriai, neturintys elektreto (žr. 1.6 pav.) – pasyvios struktūros, reikalaujantys energijos ciklo mechaninės energijos konvertavimui į elektros. Dažniausiai aptinkami ciklai – krūvio ir įtampos suvaržyti ciklai. Abu ciklai prasideda kai kondensatorių elektrinė talpa maksimali. Tuo momentu dėl išorinio šaltinio į kondensatorių įleidžiamas krūvis, siekiant jį poliarizuoti.



1.6 pav. Standartiniai elektrostatinio generatoriaus neturinčio elektreto darbo ciklai [7]

Krūvio suvaržytas ciklas (žr. 1.7 pav.) lengviau įgyvendinamas elektrostatinių generatorių. Ciklas prasideda pasiekus maksimalią $C_{max}(QI)$ vertę. Esant šiai padėčiai, dėl išorinio polerizatoriaus, struktūra įkraunama elektrostatiniu krūviu: elektrinis krūvis Q_{cst} sukaupiamas kondensatoriuje esant U_{min} . El. grandinė atidaroma (Q_2). Struktūra mechaniškai juda į padėtį kur el. talpa mažiausia (Q_3). Kadangi el. talpai C mažėjant krūvis išlieka pastovus, įtampa U tarp kondensatoriaus plokštelių išauga. Kai talpa pasiekia minimumą (C_{min}), įvyksta elektrinė iškrova.



1.7 pav. Krūviu suvaržytas ciklas [7]

Pilnutinė sugeneruota elektros energija kiekvieno ciklo metu aprašoma formule:

$$E_Q = \frac{1}{2} Q_{cst}^2 \left(\frac{1}{C_{min}} - \frac{1}{C_{max}} \right). \quad (5)$$

Elektrostatiniai generatoriai turintys elektretą labai panašūs į tuos kurie jo neturi. Pagrindinis skirtumas, kad pridėtinis elektreto sluoksnis ant vienos ar abiejų kondensatoriaus plokštelių jas poliarizuoja. Elektretas – dielektrinė medžiaga, kuri yra beveik visam laikui poliarizuota, gali išlaikyti krūvį ištisus metus [7].

Elektrostatinių generatorių privalumai:

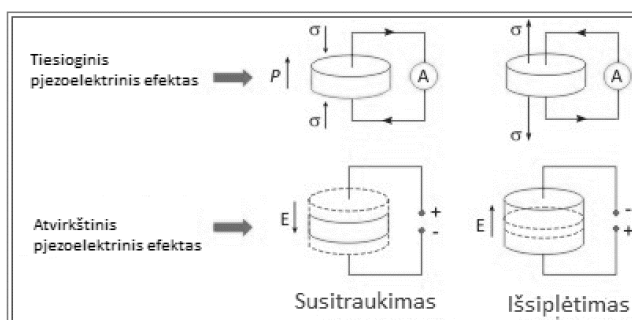
- aukšta generuojama įtampa;
- nebrangi generatorių gamyba;
- galima pasiekti aukštą keitimo koeficientą;
- lengva sumažinti energijos keitimo koeficientą;
- mažinant matmenis didėja kondensatoriaus talpa;

Elektrostatinių generatorių trūkumai:

- maža el. talpa;
- jautrūs šalutinės el. talpoms;
- valdymo tolerancija μm eilės;
- nėra tiesioginio mechaninės energijos vertimo į elektrą.

1.1.3 Pjezoelektrinis reiškinys bei generatoriai

Pjezoelektrinis reiškinys būdingas pjezoelektrinėms medžiagoms. Medžiagą deformuojant, ant jos elektrodų atsiranda elektros krūvis – tiesioginis pjezoelektrinis reiškinys (žr. 1.8 pav.). Veikiant elektros laukui, medžiagos deformuojasi – atvirkštinis pjezoelektrinis reiškinys.



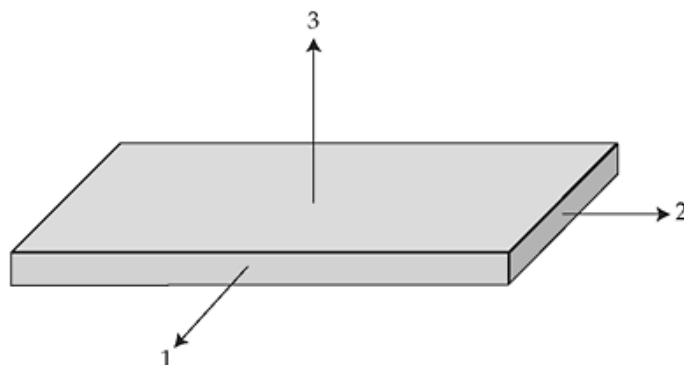
1.8 pav. Tiesioginis ir atvirkštinis pjezoelektrinis reiškinys [8]

Pjezoelektrinės medžiagos gali būti natūraliai poliarizuotos, pvz., kvarcas, arba poliarizuotos dirbtinai veikiant didelio stiprumo statiniu elektros lauku. Taip šiuo metu dažniausiai poliarizuojama inžinerijoje naudojama feroelektrinė keramika (PVDF) [9].

Atsižvelgiant į poliarizavimo procesą, keramikinės medžiagos gali turėti skirtingas pjezoelektrines charakteristikas skirtingomis kryptimis. Konstanta, kuri nusako pjezoelektrines medžiagos savybes

g_{ij} , čia g - įtampos pastovioji. Du indeksai i ir j nusako kryptinę informaciją apie g . Čia i nusako elektrinio lauko kryptį, kai tuo tarpu j nusako mechaninės apkrovos kryptį.

Atsižvelgiant į koordinačių sistemą duotą (žr. 1.9 pav.) konstanta su indeksu 32, pvz., g_{32} nusako g vėtę apkrovai veikiant 2 kryptimi ir įtampa generuojama 3 kryptimi [10].



1.9 pav. Koordinatių sistema reikalinga nusakyti mechanines deformacijas ir indukuotą elektros įtampą pjezoelektrinėje medžiagoje [10]

Pagrindinės konstantos charakterizuojančios pjezoelektrinį reiškinių:

d_{ij} – pjezoelektrinė pastovioji;

$$d_{ij} = \frac{\text{deformacija}}{\text{ją sukėlusio lauko stiprumas}}, M/V; \quad (6)$$

Arba

$$d_{ij} = \frac{\text{el.krūvis ploto vienetui}}{\text{jį sukėlę įtempiai}}, C/N; \quad (7)$$

g_{ij} – įtampos pastovioji, išreiškiama, Vm/N

$$g_{ij} = \frac{d_{ij}}{\varepsilon^T}; \quad (8)$$

$$\kappa_{ij}^2 = \frac{d^2}{s^E \varepsilon^T}; \quad (9)$$

čia κ_{ij} – ryšio koeficientas, nusakantis ryšį tarp mechaninės ir elektros energijos tarpusavio kaitos. s^E – paslankumas, ε^T – dielektrinė skvarba. Koeficientas κ^2 nusako ta kaita gautos energijos santykį su įeities energija [11].

Pjezoelektrinio generatoriaus naudingumo koeficientas ir galia labai priklauso nuo virpesių dažnio, nes pjezoelektrinės medžiagos daugiausiai elektros generuoja rezonansiniame dažnyje. Kai kurių mechaninių virpesių šaltinių dažniai nurodyti 1.1 lentelėje. S. Roundy nustatė, jog kuriant generatorius, naudojančius mechaninių virpesių energiją, turi būti siekiama, kad generatorius dirbtų kuo žemesniame tikriniam dažnyje, nes išėjimo įtampa yra atvirkščiai proporcinga ω , čia ω – tikrinis dažnis. Daugumos mašinų virpesių dažniai darbo metu siekia 100 Hz ir daugiau, kai tuo tarpu žmogaus ar gyvūnu judesiai 1–30 Hz [2].

1.1 lentelė Virpesių šaltinių dažniai bei amplitudiniai pagreičiai [2,3]

Mechaninių virpesių šaltinis	Dažnis (Hz)	Amplitudės pagreitis (m/s ²)
Automobilio prietaisų skydelis	13	3
Virtuvinio trintuvo korpusas	121	6,4
Rūbų džiovykla	121	3,5
ŠVOK sistemos ofisuose	60	0,2-1,5
Automobilio variklio skyrius	200	12
Šaldytuvas	240	0,1
Einantis žmogus	2-3	2-3
3,7kW galios staklių pagrindas	70	10
Durų rėmas po durų uždarymo	125	3
Maža mikrobangų krosnelė	121	2,25
Medinės grindys vaikstant žmonėms	385	1,3
Duonkepė	121	1,03
Laigai (60 x90cm) į triukšmingos gatvės pusę	100	0,7
Nešiojamas kompiuteris dirbant optiniam įrenginiui	75	0,6
Medinio pastato antro aukšto grindys	100	0,2
Skalbimo mašina	109	0,5

Lyginant su elektromagnetiniu bei elektrostatiniu metodu, energijos generavimas pjezoelektrinėmis medžiagomis pasižymi didesne galia bei lankstumu integruojant į sistemą [3].

1.2 Medžiagos pasižymintys pjezoelektriniu reiškiniu

Pjezoelektrinės medžiagos skirstomos į tris grupes atsižvelgiant į struktūros charakteristikas: monokristalai, keramika, polimerai.

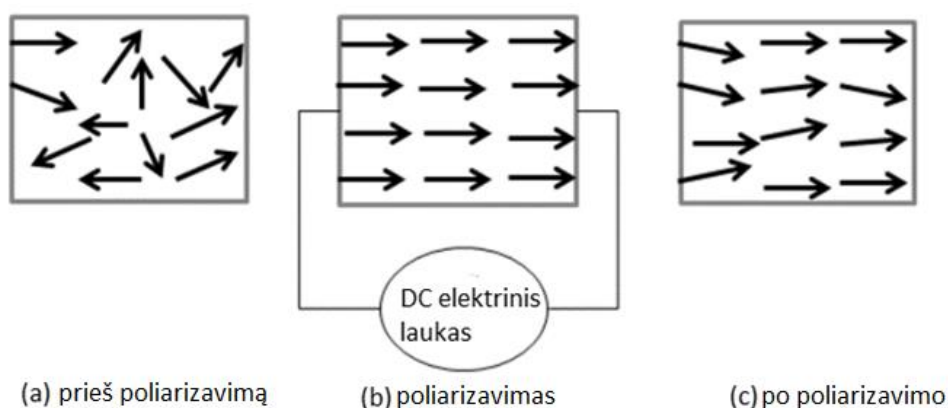
Pjezoelektrinės medžiagos generatoriams negali būti pasirinktos atsižvelgiant vien į koeficientą κ . Monokristalai bei keramika efektyvūs keičiant mechaninių virpesių energiją į elektros ($\kappa=0.7$). Kaip bebūta, šios medžiagos jautresnės senėjimui, mechaniniam poveikiui, trapios bei atlaiko mažesnius lenkimo įtempius. Todėl polimerai tinkamiausi esant didelei lenkimo deformacijai ar tvirtinant ant lenkto paviršiaus, nepaisant $\kappa=0,2$ [3].

1.2.1 Monokristalai

Kad ir kaip plačiai naudojamos pjezoelektrinės keramikos, monokristalai išlaiko savo svarbą būdami stabilūs dažnio osciliatoriais bei paviršiniaisiais akustiniais įtaisais. Populiariausios monokristalinės medžiagos – kvarcas, ličio niobatas (LiNbO_3) ir ličio tantalatas (LiTaO_3). Monokristalai anizotropiniai, pasižymintys skirtingomis medžiagos savybėmis priklausomai nuo kristalo pjūvio bei virpesių žadinimo krypties. Kvarcas stabiliausias natūralus kristalas pasižymintis mechaniniu bei terminiu stabilumu, tūrinė varža didesnė nei 10^4 omų/cm [12].

1.2.2 Keramika

Esant normaliai temperatūrai (20 °C), keramika pasižymi kristaline struktūra, kuri neturi simetrijos ašies (žr. 1.10 pav. a)). Tokioje būsenoje medžiagos dipoliai netvarkingai išsidėstę, elektrinis dipolio momentas ($C \cdot m$) lygus nuliui. Pradėjus keramiką kaitinti iki tam tikros temperatūros, keičiasi jos kristalinė struktūra, kol galiausiai atsiranda simetrijos ašis. Ši temperatūra vadinama Kiuri temperatūra, jai esant dipoliu elektrinis momentas vis dar lygus nuliui. Aušinami dipoliai vėl grįžta į savo netvarkingą padėtį. Patalpinus medžiagą į stiprų elektrinį lauką (žr. 1.10 pav. b)) ir leidus jai vėsti žemiau Kiuri temperatūros, jos dipoliai išlieka išsirikiavę elektrinio lauko kryptimi. Temperatūrai nukritus iki normalios, panaikinus elektrinį lauką, dipoliai vis dar išlaiko savo naują rikiuotę (žr. 1.10 pav. c)). Šis procesas vadinamas poliarizacija – tai procesas priverčiantis atsirasti elektrinį dipolių momentą keramikoje. Normaliomis sąlygomis mikroskopiniai poliarizuotos keramikos dipoliai nebegali grįžti į savo netvarkingą padėtį, todėl ši keramika vadinama nuolatine pjezoelektrine medžiaga. Dipolių momentų nevienodumas keramikos struktūroje nulemia tai, kad deformuojant ant keramikos atsiranda elektrinis krūvis [13].



1.10 pav. Pjezoelektrinių medžiagų poliarizavimas [13]

Keramikos privalumas – Galima gaminti bet kokios formos. Taip pat esant tai pačiai apkrovai keramika generuoja daug daugiau energijos nei kristalai. Pavyzdžiui, bario titanatas $BaTiO_3$ generuoja 140 pC/N, o kvarcas 2 pC/N. Keramika – patvari, atspari tempimui (80 GPa), galima pasirinkti poliarizavimo kryptį [10].

Bario titanatas (BT) $BaTiO_3$ – plačiausiai ištirta ir naudojama feroelektrinė medžiaga. Vos žemiau Kiuri temperatūros (130°C) BT pasižymi tetragonaline faze, esant mažiau nei 5°C – ortorombinė fazė, esant žemiau -90°C – romboedrinė fazė. Dielektrinės ir pjezoelektrinės keramikos $BaTiO_3$ savybės gali būti paveiktos pačios steichiometrijos, mikrostruktūros ir difuzanto įvesto į kietą tirpalą. Modifikuotos keramikos su difuzoriais, tokiais kaip Pb ar Ca jonais buvo išvystytos siekiant stabilizuoti tetragonalinę fazę platesniam temperatūriniam spektrui. Bario titanatas, atradus PZT, nustotas naudoti pjezoelektriniuose prietaisuose, dabar naudojamas kondensatoriuose.

Pjezoelektriniai $Pb(Ti,Zr)O_3$ kieti tirpalai (PZT) keramikos, atrastos 1950m. plačiai naudojamos šiandien dėl geresnių pjezoelektrinių savybių. PZT kristalinė simetrija nustatoma pagal Zr kiekį. Jungiant PZT medžiagą su donoriniais ir akceptoriniais jonais, jos savybės drastiškai pasikeičia. Nb^{5+} ir Ta^{5+} suteikia PZT minkštą formą (PZT-5), Fe^{3+} ir Sc^{3+} suteikia kietą formą (PZT -8) [12].

1.2.3 Polimerai

1969 Kuwaii atrado, kad polivinilidenfluorido (PVDF arba PVF₂) (žr. 1.2 lentelė) pjezoelektrinis reiškinys keletą kartų stipresnis nei kvarco. Ištempus plona PVDF plėvelė ji buvo poliarizuojama prie 100 °C, elektrinio lauko stipris siekė 300 kV/cm. Atlikus poliarizavimą gauta PVDF pjezoelektrinė pastovioji apie 30 pC/N.

PVDF – polimeras, kuris 40 – 50 procentų kristalinis. Polimero kristalas yra bimorfis, dviejų fazių (α ir β fazės). β fazė poliarizuota ir pjezoelektrinė. Siekiant pagerinti pjezoelektrinį reiškinį buvo pradėta vystyti kopolimerus. Kopolimeras P(VDF/ TrFE) pagrinde sudarytas iš α fazės PVDF, jo kristališkumas 90 procentų. Nors ir TrFE poliarizuotas perpus mažiau nei VDF, kopolimero didelis kristališkumas iššaukia didelį ryšio koeficientą κ VDF polimere.

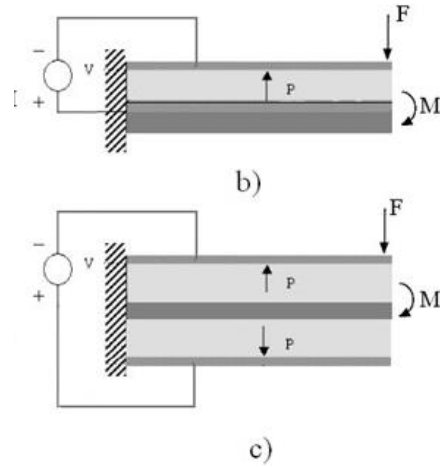
1.2 lentelė Pjezoelektrinių medžiagų konstantos bei Kiuri temperatūros [14]

Komponentas	d ₃₃	d ₃₁	d ₁₅	g ₃₃	g ₃₁	g ₁₅	Kiuri temperatūra °C
	[10 ⁻¹² C N ⁻¹]			[10 ⁻³ V mN ⁻¹]			
PZT-2	152	-60,2	440	38,1	-15.1	50,3	370
PZT-4	289	-123	496	26,1	-11.1	39,4	328
PZT-5A	374	-171	584	24,8	-11.4	38,2	365
PZT-5H	593	-274	741	19,7	-9.1	26,8	193
PZT-8	225	-37	330	25,4	-10.9	28,9	300
Pz21	640	-259	616	15,6	-7.4	26,8	218
Keramika B	149	-58	242	14,1	-5.5	21	115
BaTiO ₃	145	-58	245	13,1	-5.2	20,5	120
PVDF	-33	23	-	330	216	-	100
0.70PMN-0.30PT	1611	-2517	157	29,2	-45,6	9	150
0.69PMN-0.31PT	-	-	5980	-	-	56	146
MFC M8528	460	-210	-	-	-	-	80

Dėl pjezoelektrinių polimerų lankstumo, jie dažniausiai gaminami plėvelės formos. Ši savybė leidžia juos naudoti garsiakalbiuose. PVDF veikimas priklauso nuo temperatūros bei poliarizavimo būdo [15].

1.3 Gembiniai pjezoelektriniai generatoriai

Gembinė struktūra dažniausiai naudojama pjezoelektriniuose generatoriuose, ypač generuojant elektros energiją naudojant mechaninių virpesių energiją. Gembei virpant iššaukiamos didelės deformacijos, nuo ko priklauso generuojama įtampa. Dar svarbiau, rezonansinis dažnis gembės lankstymo režimu mažesnis nei kitų konstrukcijų. Šiandien dažniausiai sutinkami pjezoelektriniai generatoriai naudoja unimorfines bei bimorfines gembes (žr. 1.11 pav.).



1.11 pav. Unimorfis a) ir bimorfis b) pjezoelektrinis generatoriai [16]

Metalinė plokštelė gali būti padengta plonu pjezoelektrinės medžiagos sluoksniu, o vienas galas įtvirtintas siekiant gauti lenkimą dėl apkrovos. tokia konstrukcija vadinama unimorfine, nes naudojamas tik vienas pjezoelektrinės medžiagos sluoksnis. Taip pat ant metalinės plokštelės gali būti pritvirtinti du ploni pjezoelektrinės medžiagos sluoksniai, siekiant padidinti generuojamą energiją – bimorfine struktūra. Ši struktūra dažniau sutinkama, nes generuojama dvigubai daugiau energijos minimaliai pasikeičiant gembės matmenims [17].

1.3.1 Geminio pjezoelektrinio generatoriaus baigtinių elementų matematinis modelis

Pjezoelektrinį reiškinį nusako lygtys:

$$\{T\} = [c^E]\{S\} - [d]^T\{E\}; \quad (10)$$

$$\{D\} = [d]\{S\} - [\varepsilon^S]\{E\}; \quad (11)$$

čia $\{T\} = \{T_{11} T_{22} T_{33} T_{23} T_{13} T_{12}\}^T$ – įtempių vektorius, N/m^2 , $\{S\} = \{S_{11} S_{22} S_{33} 2S_{23} 2S_{13} 2S_{12}\}^T$ – deformacijų vektorius, $\{E\} = \{E_1 E_2 E_3\}$ – elektrinio lauko stiprumas, V/m , $\{D\} = \{D_1 D_2 D_3\}$ – elektrinė indukcija, C/m^2 , $[c^E]$ – paslankumo matrica, m/N , $[\varepsilon^S]$ – dielektrinės skvarbos matrica, F/m , $[d]$ – pjezoelektrinės pastoviosios matrica, C/N .

Pjezoelektrinio kontinuumo dinaminės lygtys gali būti išvedama naudojant Hamiltono principą [10].

Pjezoelektrinės medžiagos potencinės energijos tankis priklauso nuo deformacijos bei elektrostatinės energijos [18].

$$\partial\Pi = \int_{t_1}^{t_2} [\partial(T - U + W)]dt = 0; \quad (12)$$

čia ∂ – variacija, t_1 ir t_2 – pradžios ir pabaigos laikas, T – pilnutinė kinetinė energija, U – pilnutinė potencinė energija ir W – atliktas darbas elektrinių bei mechaninių jėgų. Suma $T-U+W$ – Lagranžas La.

$$U = \frac{1}{2} \int_{V_b} S^T T dV_b + \frac{1}{2} \int_{V_p} S^T T dV_p - \frac{1}{2} \int_{V_p} E^T D dV_p; \quad (13)$$

$$T = \frac{1}{2} \int_{V_b} \rho_b \dot{w}^T dV_b + \frac{1}{2} \int_{V_p} \rho_p \dot{w}^T \dot{w} dV_p; \quad (14)$$

$$W = \sum_{i=1}^{n_f} \partial w(x_i) Q_i(x_i); \quad (15)$$

čia V – tūris, w – poslinkis, x - padėtis išilgai gembės, v – šaltinio įtampa, q – krūvis, ρ – tankis, indeksai b - gembės dedamosios, p – pjezoelektrinės medžiagos, Q - apkrova.

$$\partial \Pi = \int_{t_1}^{t_2} \left[\int_{V_b} \rho_b \delta \dot{w}^T dV_b + \int_{V_p} \rho_b \delta \dot{w}^T dV_p - \int_{V_b} \delta S^T c^S S dV_p - \int_{V_p} \delta S^T c^S S dV_p + \int_{V_p} \delta S^T e^T E dV_p \right. \\ \left. + \int_{V_b} \delta E^T e^S dV_p + \int_{V_b} \delta E^T e^S dV_p \sum_{i=1}^{n_f} \delta w(x_i) Q_i(x_i) \right]; \quad (16)$$

Ši lygtis gali būti panaudota sprendžiant dinamikos uždavinius bet kokios mechaninės sistemos turinčios pjezoelektrinių medžiagų. Gembės poslinkiai x , y ir z kryptimis užrašomi:

$$u(x, y, z, t) = z\theta(x, t) = z\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right); \quad (17)$$

$$v(x, y, z, t) = 0; \quad (18)$$

$$w(x, y, z, t) = w(x, t); \quad (19)$$

čia w – skersinis centrinės ašies poslinkis, θ – skerspjūvio posūkis apie y ašį, u – ašinis poslinkis išilgai x ašies, v – poslinkis išilgai y ašies lygus nuliui.

$$w = a_1 + a_2 x + a_3 x^2 + a_4 x^3; \quad (20)$$

čia x – atstumas nuo baigtinio elemento mazgo iki gembės tvirtinimo vietos. a_1, a_2, a_3, a_4 – nežinomieji, randami naudojant kraštines sąlygas gembės galuose.

$$w(x, t) = [N_w]\{r\}; \quad (21)$$

$$\dot{w}(x, t) = [N_\theta]\{r\}; \quad (22)$$

čia $[N_w]$ ir $[N_\theta]$ geometrijos funkcija poslinkiui ir posūkiui. $\{r\}$ – mazgo poslinkis.

Elektrinis laukas gali būti tiksliai aproksimuojamas:

$$-E = [B_p]\{v\} = \left[\frac{1}{t_p} \right] \{v\}; \quad (23)$$

Masių matricos gali būti užrašomos:

$$[M_b] = \int_0^{L_b} [N_w]^T \rho_b A_b [N_w] dx; \quad (24)$$

$$[M_p] = \int_0^{L_b} [N_w]^T \rho_p A_p [N_w] dx; \quad (25)$$

Standumo matricos:

$$[K_b] = \int_0^{L_b} \left[\frac{\partial [N_\theta]}{\partial x} \right]^T E_b I_b \left[\frac{\partial [N_\theta]}{\partial x} \right] dx; \quad (26)$$

$$[K_p] = \int_0^{L_b} \left[\frac{\partial [N_\theta]}{\partial x} \right]^T E_p I_p \left[\frac{\partial [N_\theta]}{\partial x} \right] dx; \quad (27)$$

Elektromechaninė jungiamoji matrica K_{pb} ir talpos matrica – K_{pp} aprašomos:

$$[K_{pb}] = \int_{V_p} \left[\frac{\partial [N_\theta]}{\partial x} \right]^T e^T [B_V] dV_p; \quad (28)$$

$$[K_{pp}] = \int_{V_p} [B_V]^T \varepsilon [B_V] dV_p; \quad (29)$$

Slopinimas randamas :

$$C = \alpha(M_b + M_p) + \beta(K_b + K_p); \quad (30)$$

Kur α ir β randami iš :

$$\zeta_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta w_i}{2} \quad i = 1, 2, 3 \dots n; \quad (31)$$

čia ζ_1 slopinimo koeficientas priklausantis nuo sistemos atsako į virpesių dažnį.

Sistemą nusakanti lygtys:

$$(M_b + M_p)\ddot{r}(t) + C\dot{r}(t) + (K_b + K_p)r(t) - K_{pb}v(t) = \sum_{i=1}^{nf} [N_w]^T Q_i(t); \quad (32)$$

$$K_{bp}r(t) + K_{pp}v(t) = 0; \quad (33)$$

čia $r(t)$ – poslinkiu vektorius. Iš lygčių matyti, kad dėl mechaninių ir elektrinių komponentų apjungimo, poslinkiai pjezoelektrinėje medžiagoje iššaukia elektrinį krūvį elektroduose.

Aukščiau nurodytos lygtys taip pat gali būti užrašytos:

$$\{\dot{X}\} = [A]\{X\} + [B]\{u\}; \quad (34)$$

$$\{y\} = [C]\{X\}; \quad (35)$$

čia $[A]$ – sistemos matrica, $[B]$ – įėjimo matrica, $[C]$ – išėjimo matrica, $\{X\}$ – padėties vektorius, $\{u\}$ – įėjimo vektorius [34].

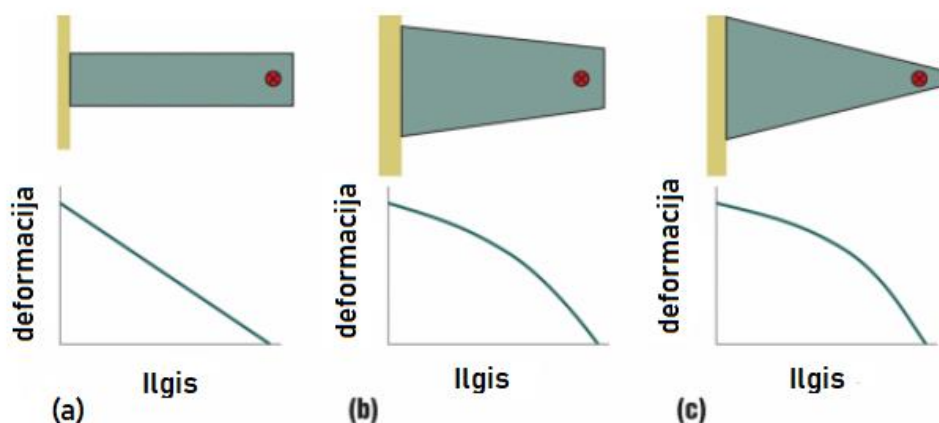
1.3.2 Gembės geometrijos optimizavimas

Kuriant naują gembės formą turi būti stengiamasi pasiekti šių tikslų:

- maksimizuoti pjezoelektrinį atsaką į apkrovą. Tai gali būti pasiekta maksimizuojant vidutines deformacijas;
- padidinti gembės tvirtumą mažinant įtempių koncentracijas;
- minimizuoti nuostolius (klampą) susijusius su mechanine struktūra;
- palengvinti gamybą.

Nors ir stačiakampės gembės pasižymi žemu rezonansiniu dažniu bei gana didele vidutine deformacija nuo apkrovos, gembės dažnai kenčia nuo pertempimų, kurie randasi netoli tvirtinimo galų. Kai kurioms pjezoelektrinėms medžiagoms leistinos deformacijos $500 \cdot 10^{-6}$, vengiant trapios lūžio. Siekiant sumažinti įtempius, buvo imtos kurti alternatyvios mechaninės struktūros. Tikslas pasiektas pradėjus gaminti naujų formų gembes, tokias kaip trapecinė (žr. 1.12 pav. b)) Su tokiu pat kiekiu PZT ir trapecijos formos geometrija, galima paskirstyti įtempius tolygiau, maksimalios deformacijos gali būti gaunamos kiekviename bimorfinės plokštelės taške. Trapecinė geometrija gali

generuoti dvigubai daugiau elektros energijos nei stačiakampė gembė. Apačioje parodytos lenkimo energijos vertės per gembės ilgį (žr. pav. 1.12).



1.12 pav. Stačiakampės a) trapecinės b) bei trikampės c) gembės deformacijų pasiskirstymas ilgyje [14]

Kadangi pjezoelektriniai generatoriai geriausiai dirba rezonanse, tai gembės rezonansinis dažnis turėtų būti pasiektas toks kaip ir aplinkos dažnis, kurioje generatorius dirbs. Rezonansinio dažnio reguliavimui naudojama masė gembės laisvajame gale.

Rezonansinis dažnis įtvirtintos gembės gali būti apskaičiuotas:

$$f_r = \frac{v_n^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{mw}}; \quad (36)$$

čia E – Jungo modulis, I – inercijos momentas, L – gembės ilgis, w – gembės plotis, m – masė per ilgio vienetą, $v_n=1,875$ pirmos modos koeficientas

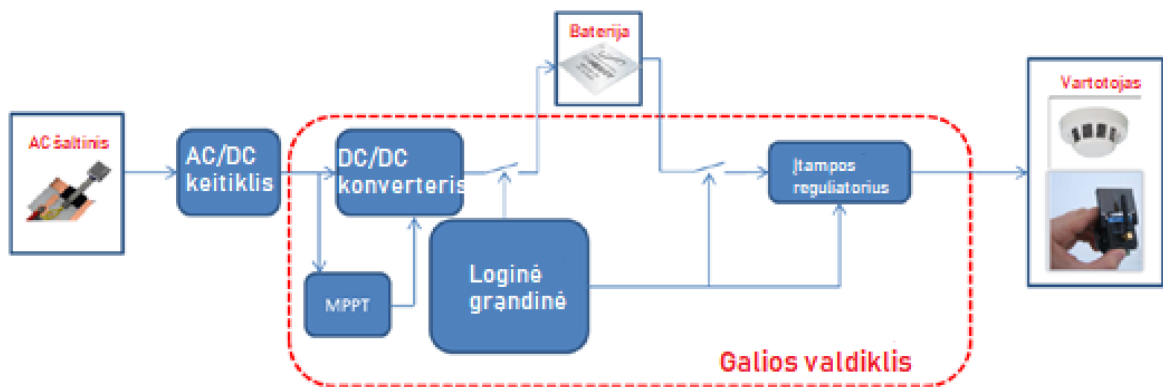
Siekiant sumažinti rezonansinį dažnį, masė gali būti pritvirtinta prie laisvo gembės galo. Prieš tai lygtis supaprastinama:

$$f_r = \frac{v_n'^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{K}{m_e + \Delta m}}. \quad (37)$$

čia $v_n'^2 = v_n^2 \sqrt{0,236/3}$, $m_e=0,236mwL$ – efektyvi gembės masė, Δm – pridėta masė, K – gembės standumas [14,20].

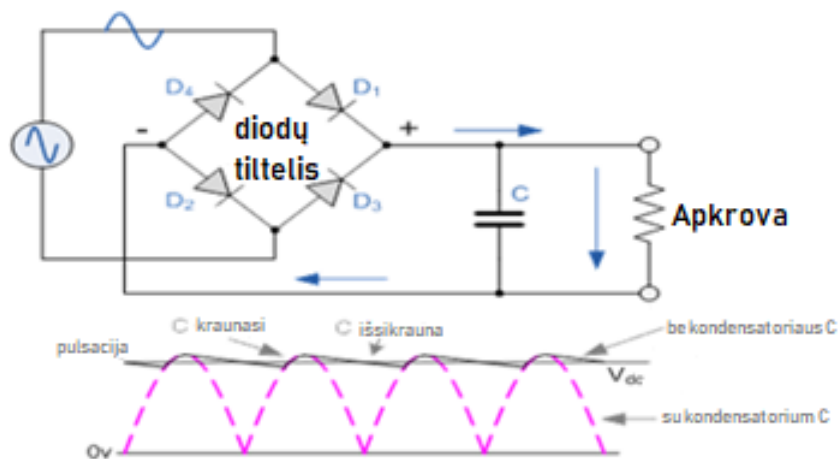
1.4 Generuojamos elektros energijos valdymas

Generuojant energiją pjezoelektriniais generatoriais iškyla technologinių kliūčių kaip suvaldyti energiją. Energijos valdymui kuriami galios valdikliai, kurie atsakingi už stabilų energijos perdavimą nuo generatoriaus iki maitinamo prietaiso ar dažniausiu atveju iki baterijos. Tipinė tokio galios valdiklio schema pavaizduota 1.13 pav.



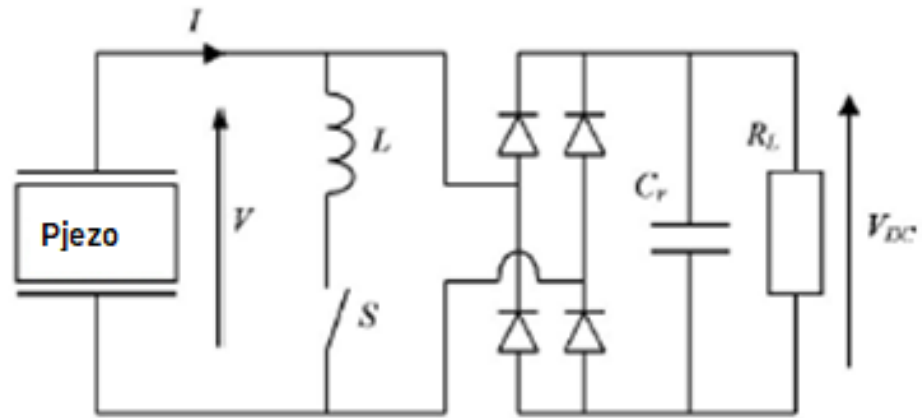
1.13 pav. Galios valdiklis [14]

Galios valdikliai sukurti tiek nuolatinės srovės (DC) tiek kintamos srovės (AC) šaltiniams. Jie dažniausiai naudoja DC-DC konverterius, nes siekiama gauti vienodą šaltinio, maitinamos baterijos krovimo įtampą bei varžą. Verčiant energiją iš AC į DC naudojami srovės lygintuvai. Varžos reguliavimui naudojamas maksimalios galios sekiklis (MPPT), jis leidžia maksimaliai išnaudoti generuojama elektros energiją nustatydamas darbinę įtampą. MPPT beveik vienodai tinka ir DC energijos šaltiniams. Loginė grandinė įvedama į sistemą siekiant valdyti baterijos krovimą ir iškrovimą. Virš įtampą arba nepakankamą įtampą galima valdyti lygintuvais arba jungtukais. Pjezoelektriniai generatoriai yra kintamos srovės šaltiniai, todėl jų išėjimo galia turi būti reguliuojama, kad užmaitintų prietaisą. Paprasčiausias lygintuvas gali būti diodų tiltelis 1.14 pav. Po to galios optimizavimui bei įtampos reguliavimui seka DC – DC konverteris.[14,21]



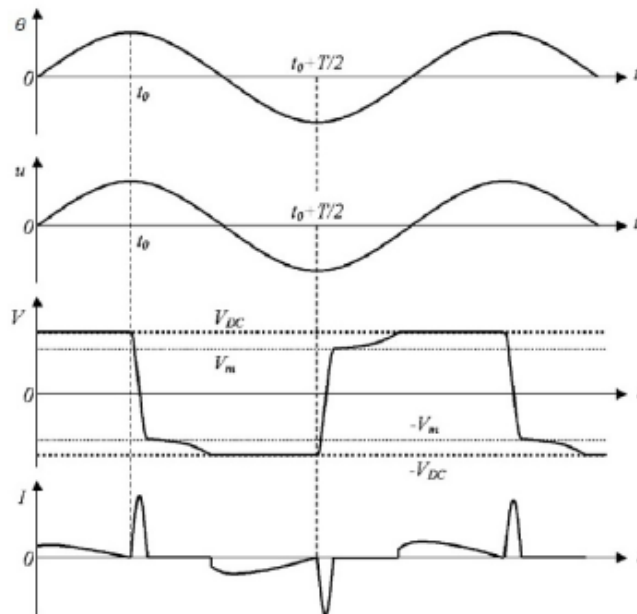
1.14 pav. Diodų tiltelis [21]

Kitas galimas būdas reguliuoti generuojamą įtampą – parallel-SSH (synchronized switch harvesting on inductor). Šis būdas padidina generatoriaus naudingumo koeficientą keletą kartų. Ši technika išsivystė iš mechaninės struktūros SSD (synchronized switch damping). Ši konfigūracija jungiama paraleliai energijos šaltiniui į grandinę įterpiant induktorių L ir jungtuką S (žr. 1.15 pav.).



1.15 pav. Parallel-SSHI grandinė [22]

Esant maksimaliam gembės įlinkiui, jungtukas trumpam įjungiamas. Tuo momentu L – C0 elektrinė grandinė sujungiama. Įjungimo periodas pasirenkamas daug mažesnis nei mechaninių virpesių. Praėjus pusei įjungimo periodo L – C0 atjungiamas ir to pasėkoje gaunama įtampos inversija. Teorinė temperatūra, poslinkiai, įtampos ir srovės banginės formos pavaizduotos 1.16 pav.



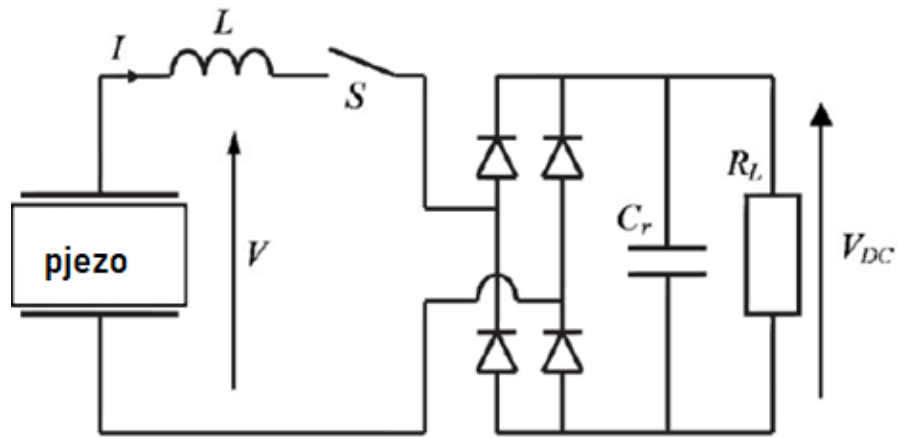
1.16 pav. Parallel-SSHI: temperatūros, poslinkių, įtampos ir srovės banginės formos [22]

Įtampos inversija nėra ideali, tai reiškia, kad visada yra energijos nuostoliai. Šie nuostoliai atsiranda dėl induktoriaus ir jungtuko. Nuostolius nusako elektros kokybės koeficientas Q :

$$V_m = -V_{DC} e^{\frac{-\pi}{2Q}}; \quad (38)$$

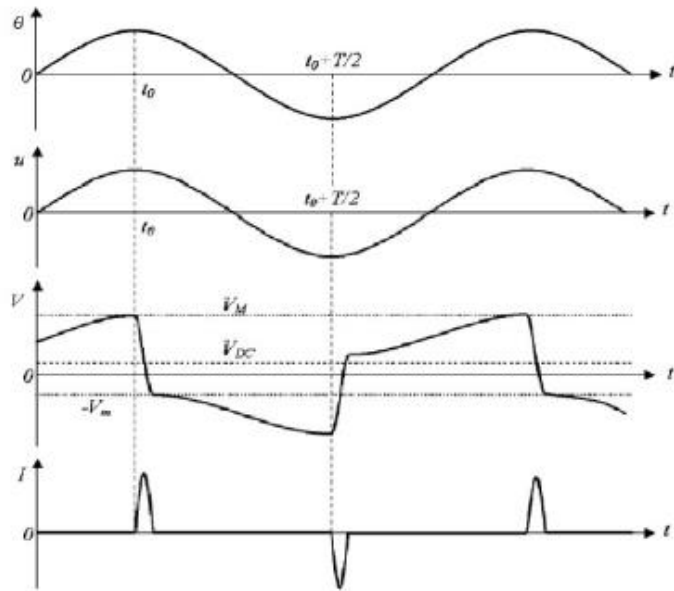
čia V_m – generatoriaus įtampa po modifikavimo, V_{DC} – imtuvo įtampa.

SSHI serijos grandinė labai panaši į parallel-SSHI, skiriasi tik jungtuko ir induktoriaus padėtis grandinėje (žr. pav.1.17).



1.17 pav. SSHI serijos grandinė [22]

Jungtuko valdymas visai toks pat kaip ir parallel–SSHI grandinėje. Didžiąją laiko dalį jungtukas išjungtas, įjungiamas tik gembei esant maksimaliai išlinkusiai. Tokiais momentais gaunama įtampos inversija. Teorinė temperatūra, poslinkiai, įtampos ir srovės banginės formos pavaizduotos 1.18 pav.



1.18 pav. SSHI serijos grandinė: temperatūros, poslinkių, įtampos ir srovės banginės formos [22]

Ryšys tarp pjezoelektrinio elemento įtampos prieš (V_M) ir po (V_m) invertavimo, išlygintos įtampos V_{DC} ir elektros kokybės koeficiento Q išreiškiamas lygtimi:

$$V_m - V_{DC} = -(V_M - V_{DC})e^{\frac{-\pi}{2Q}}; \quad (39)$$

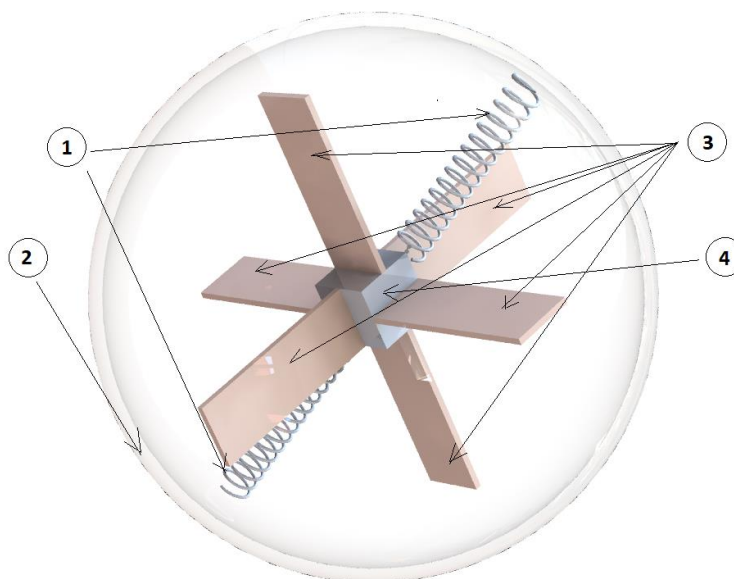
Taip pat ryšį tarp V_M ir V_m nusako lygtis:

$$V_M = -V_m + \frac{2\alpha_2 u_m}{c_0} + \frac{2\alpha_1 Q_m}{c_0}. \quad (40)$$

čia α_1 ir α_2 – piroelektrinės ir pjezoelektrinės savybės, c_0 – kondensatoriaus talpa [22].

1.5 Literatūros apžvalgos išvados

Atlikus literatūros analizę, kilo inovatyvi pjezoelektrinio generatoriaus koncepcijos idėja pavaizduota 1.19 pav.



1.19 pav. Koncepcinio pjezoelektrinio generatoriaus modelis: 1 – spyruoklės, 2 – korpusas, 3 – generuojantys elementai, 4 – laikiklis

Konstrukcija sudaro: šešios bimorfines PVDF plokštelės 3 pritvirtintos prie laikiklio 4. Laikiklis pozicionuojamas korpuso 2 centre spyruoklių 1 pagalba. Tokia konstrukcija leidžia gauti atskirų plokštelių porų virpesių žadinimą XY, YZ ar XZ plokštumose. Taip pat galimas pjezoelektrinio elemento žadinimas esant sukimuisi apie ašį O_x , O_y ar O_z . Visą generatoriaus elektroniką būtų galima talpinti į laikiklio vidų arba ant jo, taip visa elektronika atstotų seisminę masę reikalingą žadinti virpesiams. Tokių generatorių būtų galima panaudoti surenkant vandens bangavimo, vėjo, žmogaus judesių bei kitą aplinkos mechaninę energiją esant laisvai kūno judesio trajektorijai erdvėje. Toks generatorius būtų tik μW arba mW eilės galios, bet to pilnai užtenka užmaitinti LED lemputėms, jutikliams, siūstuvams. Sandariai izolius generatorių, jį būtų galima naudoti vandenyje. Žaidimų kamuolyje jis veiktų, kaip permanentinis energijos šaltinis diodų lemputėms užmaitinti, tai galėtų būti pramogos forma, įmontuotas GPS siūstuvas ar akcelerometras galėtų padėti sportininkams bei treneriams stebėti naujus pasiekimus, klaidas.

Generatoriaus tipas pasirinktas pjezoelektrinis, nes jis plačiausiai pritaikomas mechaninių virpesių energijai surinkti ir paversti į elektros energiją. Yra sukurta žemo dažnio generatorių naudojančių elektromagnetinę indukciją, bet šie generatoriai savo sandaroje turi nuolatinių magnetų, kas yra žalinga kai kuriems elektronikos prietaisams, pavyzdžiui, navigatoriams. Generatoriai naudojantys elektrostatinę indukciją reikalauja precizikos gamyboje, jautrūs pašaliniai elektrinei talpai.

Medžiaga generuojančioms plokštelėms pasirinkta PVDF, nepaisant to, kad ryšio koeficientas $\kappa=0,2$, kai tuo tarpu keramikos $\kappa=0,7$, šis polimeras yra nejautrus mechaniniam poveikiui bei senėjimui, todėl tinka smūginėms apkrovoms.

Generatoriaus geometriniai matmenys parenkami tolimesnėje darbo eigoje atlikus projektinius skaičiavimus.

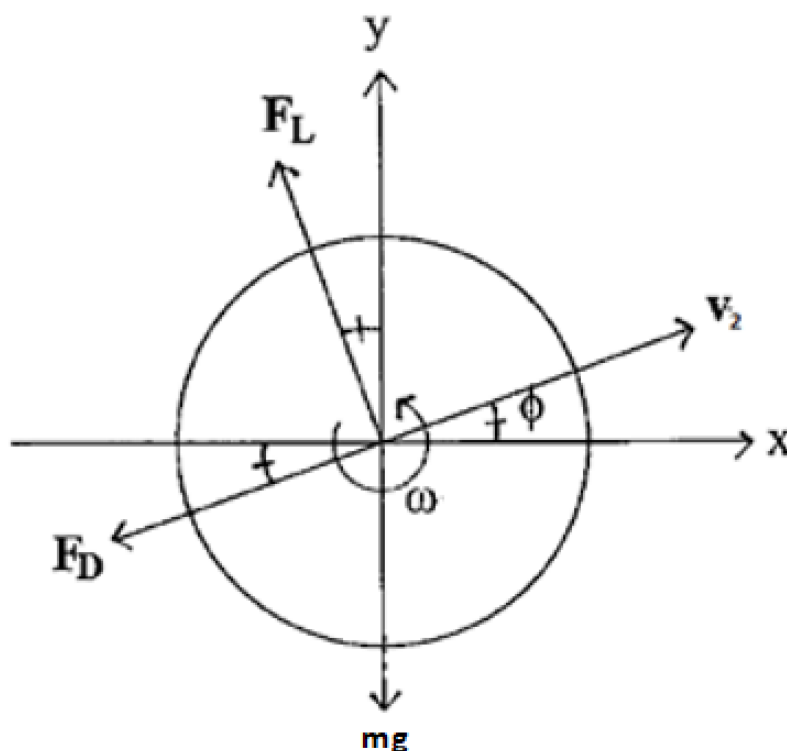
2. Generatoriaus kūrimas bei tyrimas

2.1 Generatoriaus dinaminė analizė

Generatoriaus dinaminė analizė atliekama aprašant atskirai viso generatoriaus ir generuojančios sistemos dinamiką trimis etapais: 1) generatoriaus pradinis judesys; 2) netiesinis kontaktas su kliūtimi; 3) atsakas į kontaktą. Dinamikos analizei pasirinktas redukuotas dvimatis generatoriaus modelis. Dėl skaičiavimų sudėtingumo bei kompiuterinių simuliacijų galimybių bei jų trukmės.

2.1.1 Pirmas etapas – generatoriaus pradinis judesys

Generatoriaus korpusas analizėje priimamas kaip nedeformuojamas standus kūnas, kurį veikia išorinės jėgos (žr. 2.1 pav.).



2.1 pav. Kūną veikiančios jėgos[3]

Generatoriaus greičio vektoriui priešinga kryptimi veikia oro pasipriešinimo jėga F_D , kuri mažina judėjimo greitį. Generatoriui sukantis kampiniu greičiu ω , atsiranda jėga F_L , kuri statmena greičio vektoriui bei sukimosi ašiai. Taip pat kūną veikia sunkio jėga mg , čia m – korpuso masės m_1 ir seisminės masės m_2 suma, o g – laisvo kritimo pagreitis ($9,81 \text{ m/s}^2$). Kampas ϕ - tai kampas, kuriuo į horizontą išmetamas kūnas [24-26].

Korpuso judėjimą aprašo lygtys:

$$m\ddot{x}_1 = -F_D \cos\phi - F_L \sin\phi; \quad (41)$$

$$m\ddot{y}_1 = -F_D \sin\phi + F_L \cos\phi - mg; \quad (42)$$

F_D ir F_L jėgos aprašomos formulėmis:

$$F_D = 0,5C_D\rho Av_1^2; \quad (43)$$

$$F_L = 0,5C_L\rho Av_1^2; \quad (44)$$

čia ρ – oro tankis, kuris normaliomis sąlygomis $1,21 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, A – korpuso skerspjūvio plotas m^2 , C_D – oro pasipriešinimo koeficientas (sferai 0,55).

C_D – koeficientas kuris randamas:

$$C_L = \frac{1}{2 + \frac{v_1}{R\omega}}; \quad (45)$$

čia R – korpuso spindulys.

Į lygtis įsistačius jėgų F_L ir F_D išraiškas gauname:

$$m\ddot{x}_1 = -0,5C_D\rho Av_1^2 \cos\phi - 0,5C_L\rho Av_1^2 \sin\phi; \quad (46)$$

$$m\ddot{y}_1 = -0,5C_D\rho Av_1^2 \sin\phi + 0,5C_L\rho Av_1^2 \cos\phi - mg; \quad (47)$$

Taip pat darome pakeitimus:

$$v_1 \cos\phi = \dot{x}_1; \quad (48)$$

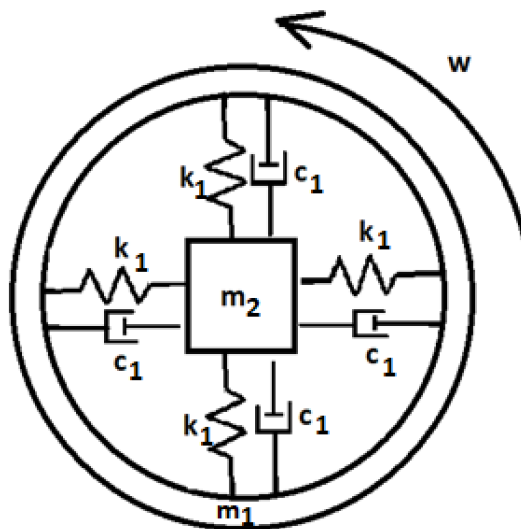
$$v_1 \sin\phi = \dot{y}_1; \quad (49)$$

Tuomet:

$$m\ddot{x}_1 = -0,5C_D\rho A\dot{x}_1^2 - 0,5C_L\rho A\dot{y}_1^2; \quad (50)$$

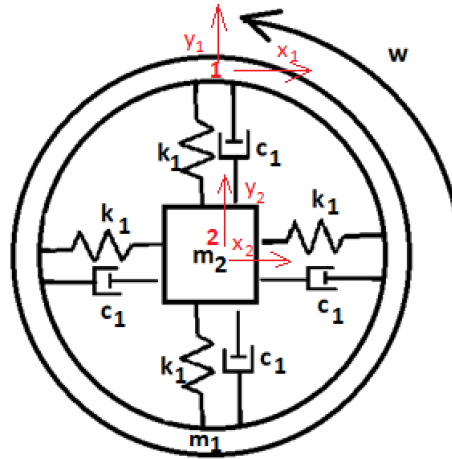
$$m\ddot{y}_1 = -0,5C_D\rho A\dot{y}_1^2 + 0,5C_L\rho A\dot{x}_1^2 - mg; \quad (51)$$

Virpesius generuojanti sistema (žr. 2.2 pav.) pritvirtinta generatoriaus centre spyruoklėmis, kurių standumas k_1 , slopinimas c_1 .



2.2 pav. Virpesių generatoriaus skaičiuojamoji schema

Sistemai lygtys užrašomos pasitelkiant baigtinių elementų metodą. Mazgų numeracija bei poslinkiai pavaizduoti 2.3 pav.



2.3 pav. Baigtinių elementų modelis

Bendroji sistemos lygtis:

$$[M] \cdot \{\ddot{X}\} + [C] \cdot \{\dot{X}\} + [K] \cdot \{X\} = 0; \quad (52)$$

Sudaroma masių matrica:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix};$$

Standumo matrica:

$$K = \begin{bmatrix} 2k_1 & -2k_1 \\ -2k_1 & 2k_1 \end{bmatrix};$$

Slopavimo matrica

$$C = \begin{bmatrix} 2c_1 & -2c_1 \\ -2c_1 & 2c_1 \end{bmatrix};$$

Iš matricinės lygties formos perėjus į diferencialinę ir įvertinus Koriolio pagreitį dėl sistemos sukimosi, gaunamos lygtys:

$$m_2 \ddot{x}_2 + 2k_1(x_1 - x_2) + 2c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + 2m_2 \dot{y}_1 \omega = 0; \quad (53)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 + 2k_1(y_2 - y_1) + 2c_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + 2m_2 \dot{x}_1 \omega = 0; \quad (54)$$

Apjungus viso generatoriaus bei seisminės masės dinamiką, gaunama lygčių sistema:

$$m_1 \ddot{x}_1 = -0,5C_D \rho A \dot{x}_1^2 - 0,5C_L \rho A \dot{y}_1^2; \quad (55)$$

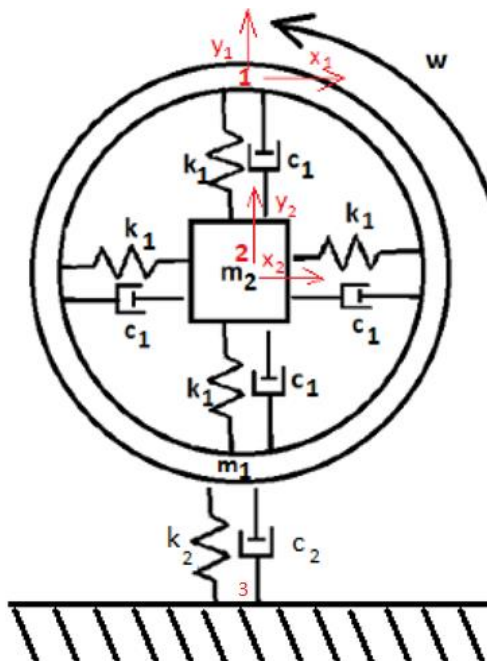
$$m_1 \ddot{y}_1 = -0,5C_D \rho A \dot{y}_1^2 + 0,5C_L \rho A \dot{x}_1^2 - mg; \quad (56)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = -2k(x_1 - x_2) - 2c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - 2m_2 \dot{y}_1 \omega; \quad (57)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 = -2k(y_1 - y_2) - 2c(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) - 2m_2 \dot{x}_1 \omega; \quad (58)$$

2.1.2. Antras etapas – netiesinis kontaktas su kliūtimi

Generatorius pasiekęs kliūtį, po kontakto, verčia ją deformuotis. Sukaupia deformacijos energija vėliau verčia generatorių atšokti (trečias analizės etapas). Taip pat galimas generatoriaus pagavimas, kai generatorius nebeatšoka, bet vis tiek gaunamas seisminis žadinimas. Šiame etape yra įvertinami kontakto standumas k_2 bei slopinimas c_2 (žr. 2.4 pav.).



2.4 pav. Baigtinių elementų modelis kontakto su kliūtimi metu

Bendroji sistemos lygtis:

$$[M] \cdot \{\ddot{X}\} + [C] \cdot \{\dot{X}\} + [K] \cdot \{X\} = 0; \quad (59)$$

Sudaroma masių matrica:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix};$$

Standumo matrica:

$$K = \begin{bmatrix} 2k_1 & -2k_1 & 0 \\ -2k_1 & 2k_1 + k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{bmatrix};$$

Slopinimo matrica;

$$C = \begin{bmatrix} 2c_1 & -2c_1 & 0 \\ -2c_1 & 2c_1 + c_2 & -c_2 \\ 0 & -c_2 & c_2 \end{bmatrix};$$

Iš matricinės lygties formos perėjus į diferencialinę ir įvertinus Koriolio pagreitį dėl sistemos sukimosi, gaunamos lygtys:

$$m_1\ddot{x}_1 = -2k_1(x_1 - x_2) - 2c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2); \quad (60)$$

$$m_1\ddot{y}_1 = -2k_1(y_1 - y_2) - 2c_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_2); \quad (61)$$

$$m_2\ddot{x}_2 = -2k_1(x_2 - x_1) - 2k_2x_2 + 2c_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - 2c_2x_2 - 2m_2\dot{x}_1\omega; \quad (62)$$

$$m_2\ddot{y}_2 = -2k_1(y_2 - y_1) - 2k_2y_2 - 2c_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - 2c_2y_2 - 2m_2\dot{y}_1\omega. \quad (63)$$

2.1.3. Trečias etapas – atsakas į kontaktą

Kliūtis deformacijos metu sukaupia energijos, kuri išmeta generatorių. Visai sistemai būdingas judėjimo dėsnis kaip ir pirmajame etape, o seisminė masė sužadinta toliau lekia virpėdama, kol galiausiai virpesiai nuslopsta arba pasiekama kita kliūtis, kuri vėl sužadina virpesius.

Dinamikos lygtys:

$$m_1\ddot{x}_1 = -0,5C_D\rho A\dot{x}_1^2 - 0,5C_L\rho A\dot{y}_1^2; \quad (64)$$

$$m_1\ddot{y}_1 = -0,5C_D\rho A\dot{y}_1^2 + 0,5C_L\rho A\dot{x}_1^2 - mg; \quad (65)$$

$$m_2\ddot{x}_2 = -2k(x_1 - x_2) - 2c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - 2m_2\dot{y}_1\omega; \quad (66)$$

$$m_2\ddot{y}_2 = -2k(y_1 - y_2) - 2c(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) - 2m_2\dot{x}_1\omega. \quad (67)$$

Lygčių sistemoms išspręsti naudojamas ketvirtos eilės Rungės ir Kuto skaitinis metodas pasitelkiant *Matlab* programinę įrangą. Parašytos programos kodas prieduose (*1 Priedas*).

2.2 Eksperimentinis pagrindo slopinino bei standumo verčių nustatymas

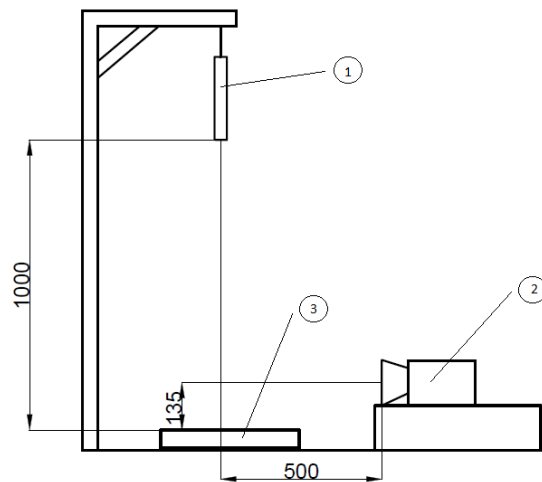
Norint išspręsti anksčiau gautas diferencialines lygtis, būtina žinoti generatoriaus sistemos spyruoklių slopinimą c_I ir standumą k_I . Koeficientas k_1 apskaičiuojamas:

$$k_1 = \frac{Gd^4}{8D^3n}; \quad (68)$$

čia G – medžiagos šlyties modulis (Pa), d – apvijos skersmuo(m), D – spyruoklės skersmuo(m), n – aktyvių apvijų skaičius.

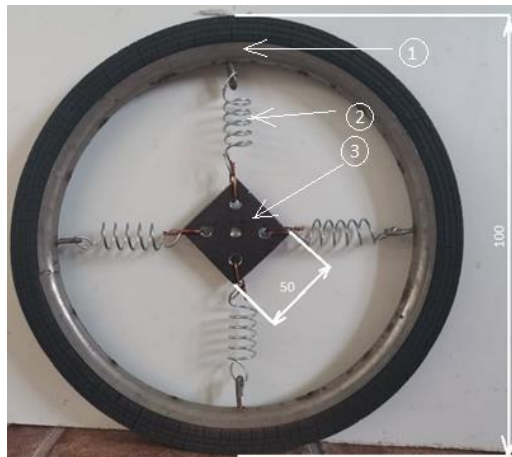
Sudėtinga apskaičiuoti k_2 , c_I , c_2 reikšmes. Jei imtume spyruoklės slopinimą vien dėl oro pasipriešinimo, tai jis būtų apie $5 \cdot 10^{-5}$ Ns/m, bet dėl mechaninių jungčių jis žymiai išauga. Pagrindo standumui bei slopinimui daro įtaką daugelis veiksnių, todėl juos nustatyti skaitiniais metodais labai sudėtinga, todėl atliekamas eksperimentas koeficientams c_I , c_2 ir k_2 nustatyti. Nustačius koeficientų vertes, jas galima įstatyti į anksčiau gautas lygtis ir įvertinti jų adekvatumą.

Tyrimui atlikti panaudota ši įranga: tyrimo objektas *I*, mob. telefonas Huawei *Honor 20 2*, betoninė trinkelė *3*. Taip pat kompiuteris su įdiegta programine įranga *Tracker 5.1.4* bei *Matlab* (žr. 2.5 pav.).



2.5 pav. Eksperimentinė schema: 1 – tyrimo objektas, 2 – mob. telefonas *Huawei honor 20*, 3 – trinkelė.

Eksperimento objektą pavaizduotą 2.6 pav. sudaro: gumuotas žiedas 1, kurio masė $m_1=0,675$ kg, keturios spyruoklės 2, bei seisminė masė $m_2=0,1$ kg 3.



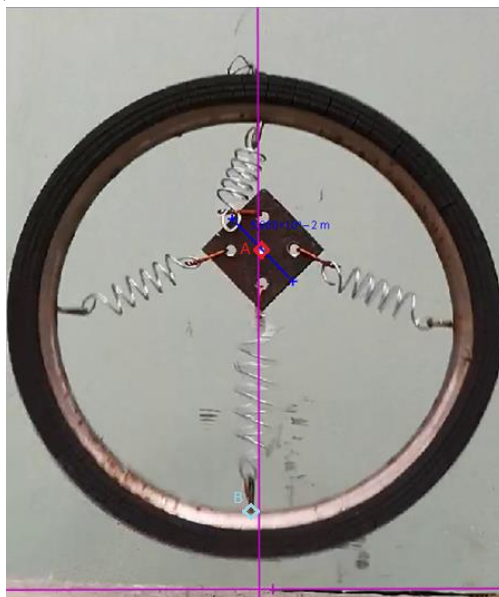
2.6 pav. Eksperimento objektas: 1 – gumuotas žiedas, 2 – spyruoklė, 3 – seisminė masė.

Eksperimentas atliekamas tyrimo objektą pakabinus į aukštį, kai tarp jo žemiausio taško ir betoninės trinkelės lieka metro tarpas. Betoninė trinkelė pozicionuojama horizontaliai, siekiant sumažinti šalutinių veiksnių poveikį, pagrindas po trinkelę išlyginamas plonu smėlio sluoksniu, trinkelės masė – 10 kg. Mob. telefonas *Huawei Honor 20* naudojamas filmavimui pastatomas puse metro nuo tyrimo objekto virpesių žadinimo vietos. Seisminė masė pasirinkta gan didelė, siekiant sumažinti virpesių dažnį galimybei užfiksuoti virpesius turima įranga. Mob. telefonas *Huawei Honor 20* pasižymi 240 kadrų per sekundę filmavimo funkcija.

Pradėjus filmavimą objektas paleidžiamas, o po kontakto su trinkelė ir virpesių užgesimo sustabdomas. Eksperimentas kartojamas kelis kartus siekiant užfiksuoti tinkamą vertikalų tiriamo objekto atšokimą.

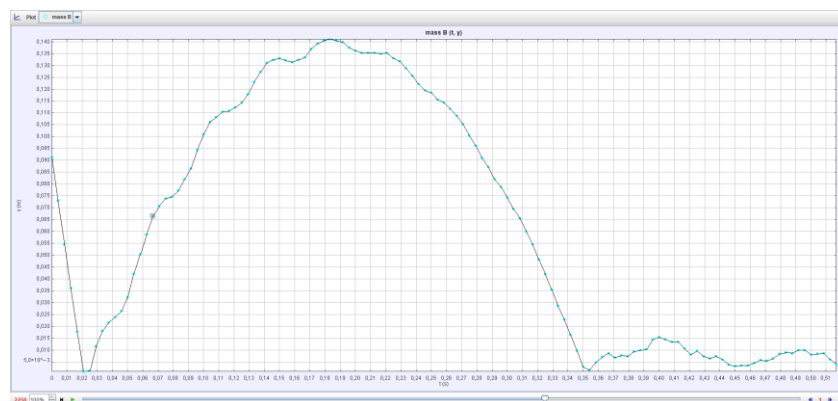
Gauti įrašai toliau tiriami *Tracker 5.1.4* programine įranga (žr. 2.7 pav.). Atsidarius vaizdo įrašą pirmiausiai pasirenkama failo sritis (kadrai) virpesiams tirti. Uždedama koordinatinių atskaitos sistema poslinkiams horizontalios ir vertikalios ašių kryptimis fiksuoti. Atliekamas kalibravimas, vaizdo įrašė pasižymint žinomą ilgio atkarpą ir nurodant jos vertę. Korpuso ir seisminės masės poslinkiai

fiksuojami kiekviename kadre, juos pažymint. Korpuso poslinkiai fiksuojami mėlynu rombu (B), o seisminės masės – raudonu (A).

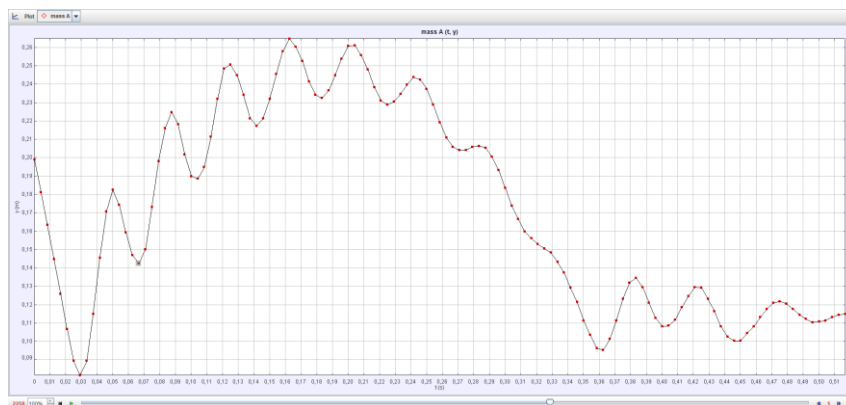


2.7 pav. Eksperimento įrašo kalibravimas. Čia A – seisminės masės padėtis, B – korpuso padėtis.

Eksperimento rezultatai *Tracker* pateikiami lentelių bei grafikų forma (žr. 2.8 pav., 2.9 pav.). Poslinkiai fiksuojami ne nuo paleidimo momento, nes kamera buvo pozicijuota arčiau, į kadra neapimant paleidimo momento, siekiant gauti kuo geresnę kontrastą.

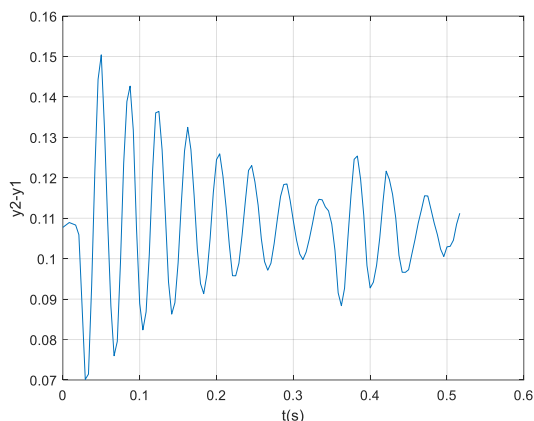


2.8 pav. Korpuso poslinkiai $y_1(t)$



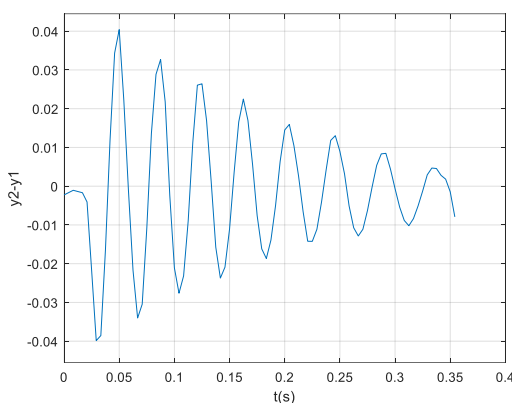
2.9 pav. Seisminės masės poslinkiai $y_2(t)$

Gauti eksperimento rezultatai toliau apdorojami *Matlab* programine įranga. Iš seisminės masės poslinkių atimami korpuso poslinkiai vertikalios ašies kryptimi $y_2(t)-y_1(t)$ tam, kad rasti poslinkius korpuso atžvilgiu (žr. 2.10 pav.).



2.10 pav. Seisminės masės poslinkiai $y_1(t)-y_2(t)$

Tyrimui pasirenkama funkcijos atkarpa iki antro atšokimo (žr. 2.11 pav.), taip pat transformuojama funkcija, kad svyravimas vyktu apie horizontalią ašį.



2.11 pav. Transformuoti seisminės masės poslinkiai $y_1(t)-y_2(t)$ trunkantys 0.351s

Slopinamųjų laisvųjų virpesių slopinimą nusako švytuojančios masės dviejų gretimų ekstremumų vienas kitam nukrypimų nuo pusiausvyros padėties santykis [23].

Kadangi

$$x(t_0) = C e^{-\delta t_0} \cos(\omega_d t_0 - \alpha); \quad (69)$$

$$x(t_0 + \tau) = C e^{-\delta(t_0 + \tau)} \cos(\omega_d(t_0 + \tau) - \alpha); \quad (70)$$

Gauname

$$\frac{x(t_0)}{x(t_0 + \tau)} = e^{\delta \tau} = \text{const}; \quad (71)$$

Gautas santykis yra pastovus, todėl virpesių amplitudė mažėja pagal geometrinės progresijos dėsnį. Natūrinis šio santykio logaritmas vadinamas laisvųjų virpesių logaritminiu dekrementu:

$$\Lambda = \ln \frac{x(t_0)}{x(t_0+n\tau)}; \quad (72)$$

Ryšys tarp logaritminio dekremento Λ , slopinimo koeficiento δ ir slopinimo laipsnio ϑ :

$$\Lambda = \delta\tau = 2\pi \frac{\vartheta}{\sqrt{(1-\vartheta^2)}}; \quad (73)$$

Eksperimento funkcijos logaritminis dekrementas:

$$\Lambda = \ln \frac{-0,04}{-0,034} = 0,1625; \quad (74)$$

Slopinimo koeficientas:

$$\delta = \frac{\Lambda}{\tau} = \frac{0,1625}{0,0394} = 4,13; \quad (75)$$

Turint eksperimento rezultatus, atliekamas koeficientų c_1 , c_2 , k_2 radimas.

Pirmiausia apskaičiuojamos spyruoklių standumo vertės:

$$k_1 = \frac{Gd^4}{8D^3n} = \frac{80 \cdot 10^9 \cdot 0,0015^4}{8 \cdot 0,018^3 \cdot 5} = 1736 \text{ N/m}; \quad (76)$$

čia $d=1,5$ mm, $D=18$ mm, $50CrV4$ plieno šlyties modulis $G=80$ GPa, $n=5$

Keitimo būdu į lygtis statomos koeficientų c_1 , c_2 , k_2 vertės ir sprendimo rezultatai lyginami su eksperimento.

Parinktos žemiau nurodytos koeficientų vertės:

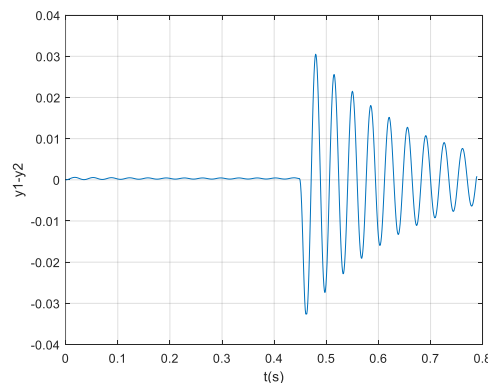
$$c_1 = 0,5 \text{ Ns/m};$$

$$c_2 = 81 \text{ Ns/m};$$

$$k_2 = 50 \text{ kN/m};$$

Pradinės lygčių sprendimo sąlygos $y_1(t_0=0)=1\text{m}$; $y_2(t_0=0)=1\text{m}$

Išsprendus lygtis gaunami generatoriaus korpuso bei seisminės masės poslinkiai. Seisminės masės poslinkiai korpuso atžvilgiu pavaizduoti grafike 2.12 pav.



2.12 pav. Seisminės masės virpesiai korpuso atžvilgiu $y_2(t)$

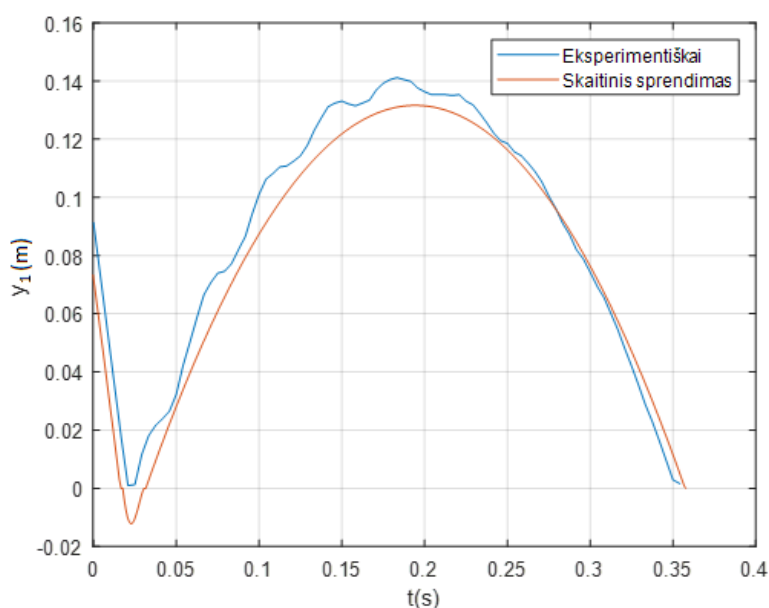
Funkcijos logaritminis dekrementas:

$$\Lambda = \ln \frac{-0,0325}{-0,027} = 0,1854; \quad (77)$$

Slopinimo koeficientas:

$$\delta = \frac{\Lambda}{\tau} = \frac{0,1854}{0,0377} = 4,9; \quad (78)$$

Palyginami generatoriaus korpuso gauti poslinkiai $y_1(t)$ eksperimento būdu bei skaitiniu metodu (žr. 2.13 pav.).



2.13 pav. Generatoriaus poslinkiai $y_1(t)$ gauti eksperimentiškai bei skaitiniu metodu

2.1 lentelė Eksperimento ir skaičiavimo rezultatai

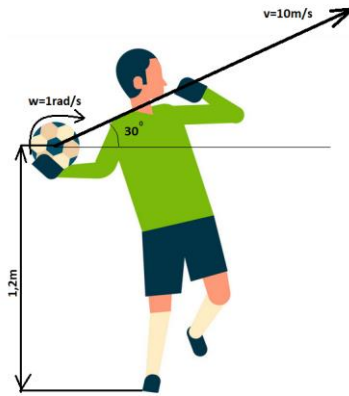
	Eksperimentas	Skaitinis metodas
Seisminės masės slopinimo koeficientas δ	4,13	4,9
Seisminės masės virpesių dažnis ω (Hz)	24,5	26,6
Trukmė tarp kontaktų su pagrindu t (s)	0,33	0,33
Maksimalus korpuso poslinkis $y_1(t)$ (m)	0,1411	0,1316

Atlikus eksperimentą nustatyta, kad sudarytas skaitinis modelis yra adekvatus. Gauti eksperimento rezultatai skiriasi nuo modelio, nes skaičiavimuose generatoriaus korpusas priimamas kaip nedeformuojamas kūnas, o iš grafiko $y_1(t)$ matyti, kaip po smūgio virpa ne tik seisminė masė, bet ir korpusas.

Toliau žinant, jog lygtys parašytos gerai, galima koreguoti pradines vertes, kai $t_0=0$ s.

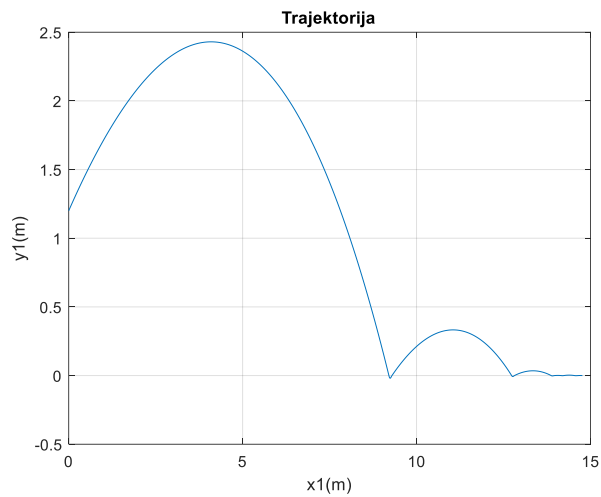
Uždavinys:

Generatorius – žemiau pavaizduotas 2.14 pav. kamuolys. Jis išmetamas į horizontą 30° kampu su pradiniu greičiu 10m/s, kampinis greitis 1rad/s, paleidimo aukštis 1,2 m.

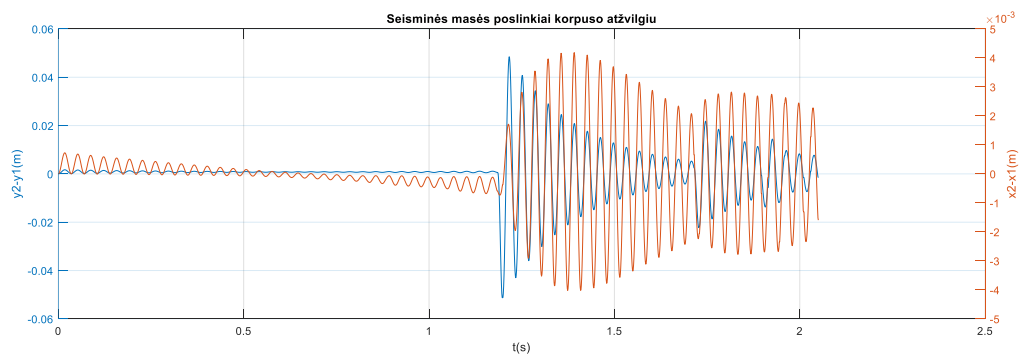


2.14 pav. Uždavinio pavyzdžio iliustracija

Įsistačius pradinis duomenis į sistemą gauname kamuolio poslinkių (trajektorijos) (žr. 2.15 pav.) bei virpesius generuojančios sistemos poslinkių kamuolio atžvilgiu grafikus (žr. 2.16 pav.). Slopinimo bei standumo vertės paliekamos gautos eksperimento metu.



2.15 pav. Generatoriaus judėjimo trajektorija



2.16 pav. Seisminės masės poslinkiai korpuso (kamuolio) atžvilgiu priklausomybė nuo laiko: raudona – poslinkiai horizontalia kryptimi, mėlyna – poslinkiai vertikalia kryptimi

Šiuo atveju generuojamų virpesių dažnis apskaičiuotas 25,6 Hz, kai tuo tarpu eksperimento atveju 26,6Hz. Iš to galime spręsti, kad generatoriaus sistemos generuojamų virpesių dažnis kinta siauruose ribose, bei dėl Koriolio jėgos atsiranda virpesiai horizontalios ašies kryptimi.

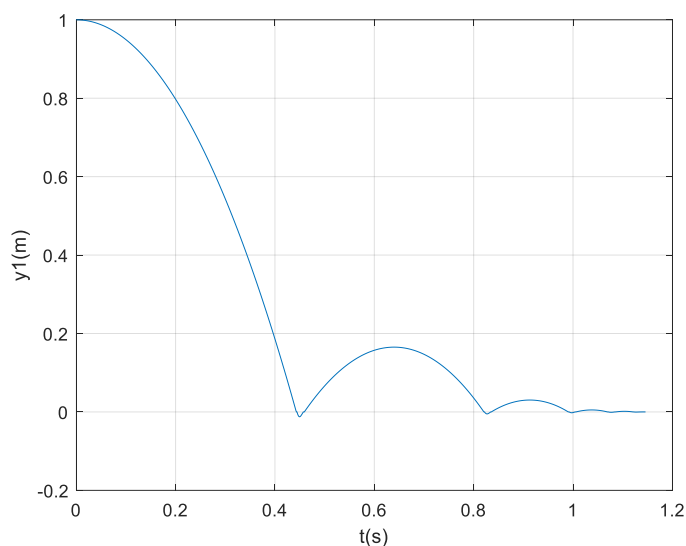
2.3 Generatoriaus optimizavimas žadinimo dažniui

Eksperimento metu ištirtas generatoriaus modelis pasižymi žemu žadinimo dažniu po kontakto su kliūtimi 24,5 Hz. Esant tokiam žemam žadinimo dažniui sudėtinga parinkti elektros energiją generuojančius elementus. Būtina sistemos korekcija siekiant padidinti žadinimo dažnį. Pasirinktas žadinimo dažnis – 40 Hz.

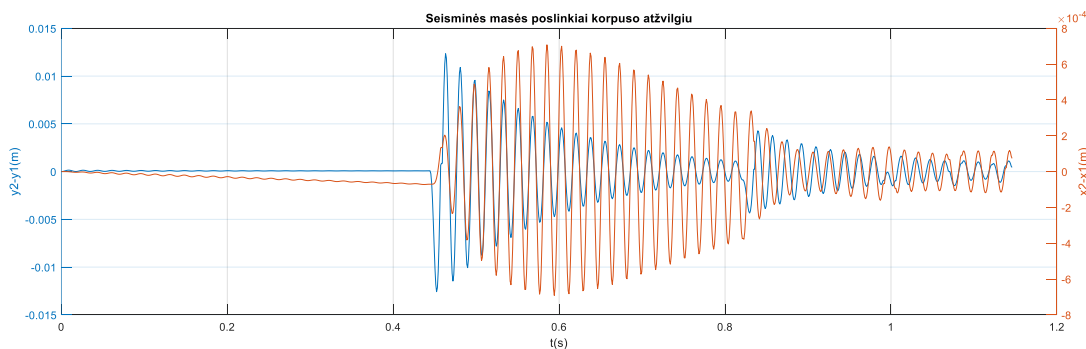
Anksčiau modeliuotą sistemą stengiamasi koreguoti kiek galima minimaliau, kaičiama tik seisminė masė m_2 bei spyruoklės, kad sistemos slopinimo vertė nuo realios, eksperimento metu apskaičiuotos nukryptu kiek galima minimaliau, nes tolimesniuose skaičiavimuose c_2 vertė laikoma pastovi 81Ns/m.

Įvertinus galimų elektronikos komponentų bei šešių PVDF plokštelių (apie jas vėliau) masę, virpesius generuojančios sistemos masė sumažinama iki 0,07 kg. Toliau lygtyse keičiamas spyruoklių standumas k_1 , taip kol gaunamas pasirinktas 40 Hz žadinimo dažnis, slopinimo c_1 nekeičiame 0,5 Ns/m.

Pasirinktas tikrinis dažnis 39,5Hz pasiekiamas, Esant standumui $k_1=4400$ N/m, korpuso bei seisminės masės poslinkiai pavaizduoti 2.17 pav. ir 2.18 pav.



2.17 pav. Korpuso poslinkiai vertikalia kryptimi



2.18 pav. Seisminės masės poslinkių korpuso atžvilgiu priklausomybė nuo laiko, $t=1,15$ s

Apskaičiuotas seisminės masės žadinimo dažnis 39,5 Hz.

Spyruoklės medžiaga nekeičiama, jos geometriniai matmenys apskaičiuojami:

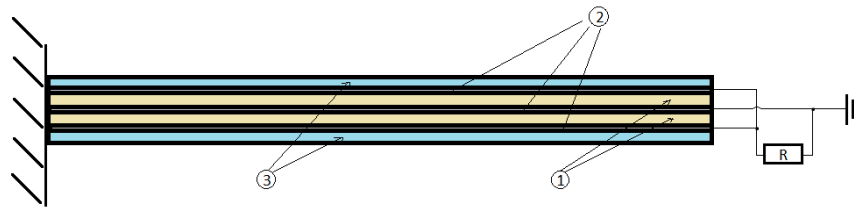
$$D = \sqrt[3]{\frac{Gd^4}{8k_1n}} \quad (79)$$

Čia G – 50CrV4 plieno šlyties modulis 80 GPa, d – apvijos diametras 1,5 mm, k_1 – spyruoklės standumas 4400 N/m, n – aktyvių apvijų skaičius 5.

$$D = \sqrt[3]{\frac{80 \cdot 10^9 \cdot 0.0015^4}{8 \cdot 4400 \cdot 5}} = 0,013m$$

2.4 Generuojančio elemento parinkimas bei tyrimas

Tyrimui pasirinktą plokštelę (žr. 2.19 pav.) sudaro penki sluoksniai: du PVDF polimero sluoksniai 1, trys sidabrinių elektrodų sluoksniai 2 bei du akrilinio plastiko sluoksniai 3. PVDF deformacijų metu generuojama įtampa nukraunama sidabrinių elektrodų pagalba. Prie centrinio elektrodo jungiamas žemės polius, o prie išorinių – terminalas įtampos nuėmimui bei jungimui prie apkrovos R. Akrilinis plastikas atlieka apsaugos nuo išorinio poveikio paskirtį.



2.19 pav. Pjezoelektrinės plokštelės schema

Plokštelė 16 mm pločio, 126 μ m aukščio. PVDF plėvelės storis – 28 μ m, sidabro elektrodo – 10 μ m, akrilinio plastiko – 20 μ m.

Tiesinėje pjezoelektrinio reiškinių teorijoje tiesinio plastiškumo lygtys sujungiamos su elektrostatikos lygtimis pjezoelektriniais koeficientais:

$$\{T\} = [c^E]\{S\} - [d]^T\{E\}; \quad (80)$$

$$\{D\} = [d]\{S\} - [\varepsilon^S]\{E\}; \quad (81)$$

Kur $\{T\} = \{T_{11} T_{22} T_{33} T_{23} T_{13} T_{12}\}^T$ – įtempių vektorius, N/m², $\{S\} = \{S_{11} S_{22} S_{33} 2S_{23} 2S_{13} 2S_{12}\}^T$ – deformacijų vektorius, $\{E\} = \{E_1 E_2 E_3\}$ – elektrinio lauko stiprumas, V/m, $\{D\} = \{D_1 D_2 D_3\}$ – elektrinė indukcija, C/m², $[c^E]$ – paslankumo matrica, m/N, $[\varepsilon^S]$ – dielektrinės skvarbos matrica, F/m, $[d]$ – pjezoelektrinės pastoviosios matrica, C/N.

Tirto polimero parametrai:

$$c^E = \begin{bmatrix} 3,8e^{-9} & 1,9e^{-9} & 0,9e^{-9} & 0 & 0 & 0 \\ 1,9e^{-9} & 3,8e^{-9} & 0,9e^{-9} & 0 & 0 & 0 \\ 0,9e^{-9} & 0,9e^{-9} & 1,2e^{-9} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,7e^{-9} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9e^{-9} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9e^{-9} \end{bmatrix} Pa;$$

$$d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,024 & 0,001 & -0,027 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} C/m^2;$$

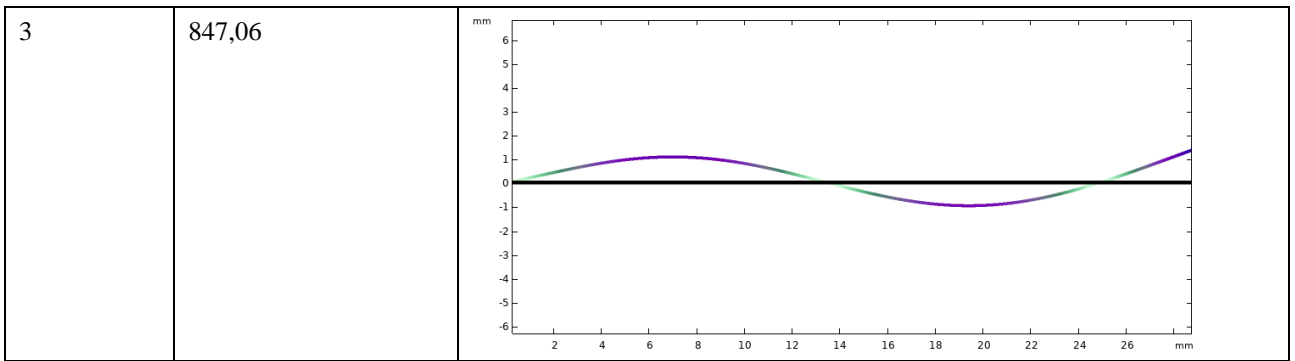
$$\varepsilon^S = \begin{bmatrix} 7,4 & 0 & 0 \\ 0 & 9,3 & 0 \\ 0 & 0 & 7,6 \end{bmatrix}.$$

Pirmiausia keitimo metodu parenkamas generuojančios plokštelės ilgis toks, kad jos pirmos modos tikrinių virpesių dažnis būtų 39,5Hz.

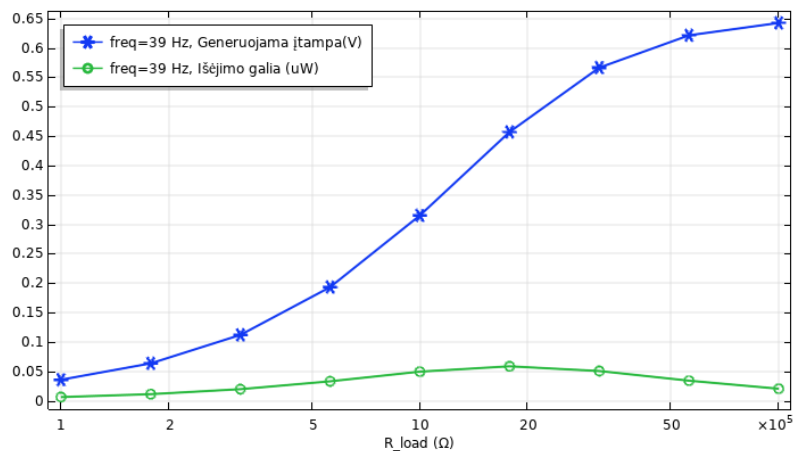
Sumodeliavus plokštelės dvimatį modelį *Comsol* aplinkoje ir parinkus ilgį 29 mm, gautos modos su tikriniais dažniais 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė PVDF plokštelės modos

Modos nr.	Tikrinis dažnis (Hz)	Tikrinės formos
1	39,19	
2	285,63	

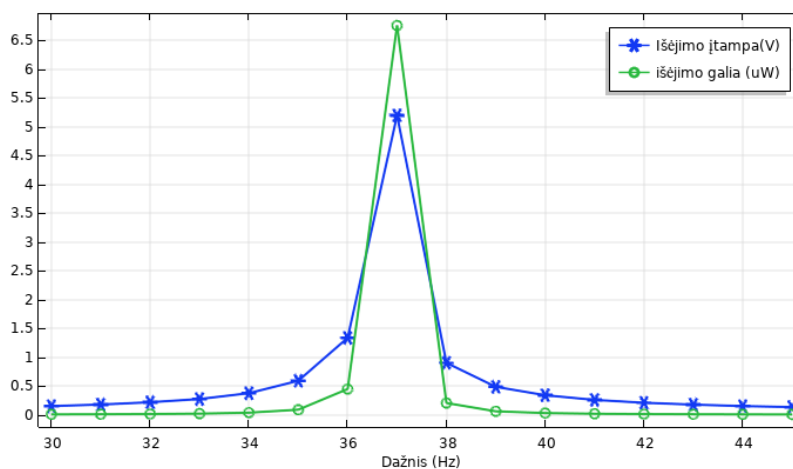


Žinant pirmos modos tikrinį dažnį 39,19 Hz, atliekamas optimalios elektrinės apkrovos nustatymas, kai sinusoidinio žadinimo pagreitis 9,8 m/s². Fiksuojama generuojama elektrinė galia bei įtampa intervale 10⁵ – 10⁷ Ω (žr. 2.20pav.).



2.20 pav. Generuojamos įtampos bei išėjimo galios priklausomybė nuo elektrinės apkrovos, kai žadinimo dažnis 39Hz

Iš rezultato matyti, kad daugiausiai galios generuoja 0,05 μW, kai apkrova apie 2 MΩ, todėl toliau tiriama išėjimo galia bei įtampa, kai virpesių pagreitis 9,8 m/s², apkrova 2 MΩ, o žadinimo dažnis keičiamas intervale 30 – 45 Hz (žr. 2.21pav.).

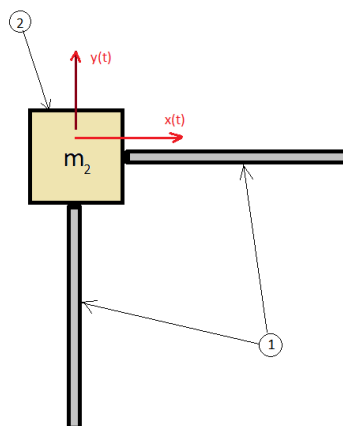


2.21 pav. Generuojamos įtampos bei išėjimo galios priklausomybė nuo žadinimo dažnio, kai apkrova 2 MΩ

Iš gauto grafiko matyti, kad daugiausia įtampos 5,25 V bei galios 6,75 μW generuojama žadinimo dažniui esant 37 Hz, kas yra artima plokštelės tikriniam dažniui 39 Hz.

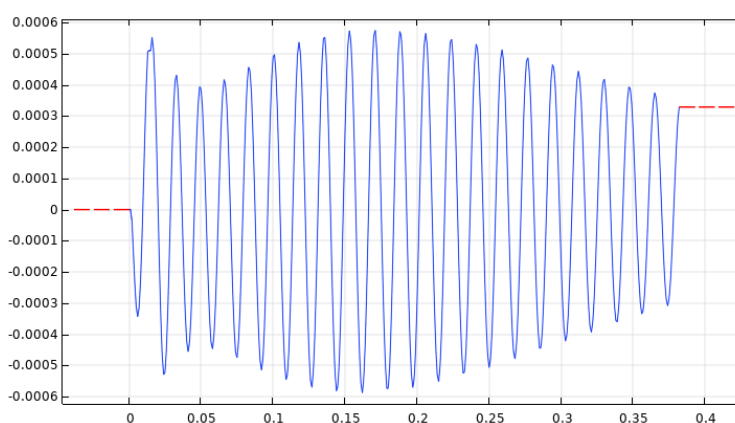
2.5 Generatoriaus išėjimo įtampos bei galios tyrimas

Nustačius generatoriaus žadinimo dažnį 39,5 Hz bei PVDF plokštelės tikrinį dažnį 39,2 Hz, atliekamas tyrimas generuojamos įtampos bei galios priklausomybei nuo laiko nustatyti. Generatoriaus išėjimo įtampos bei galios tyrimui pasirinktos dvi generatoriaus pjezoelektrinės plokštelės 1 kaip pavaizduota 2.22 pav., kurios tvirtinamos prie seisminės masės 2.

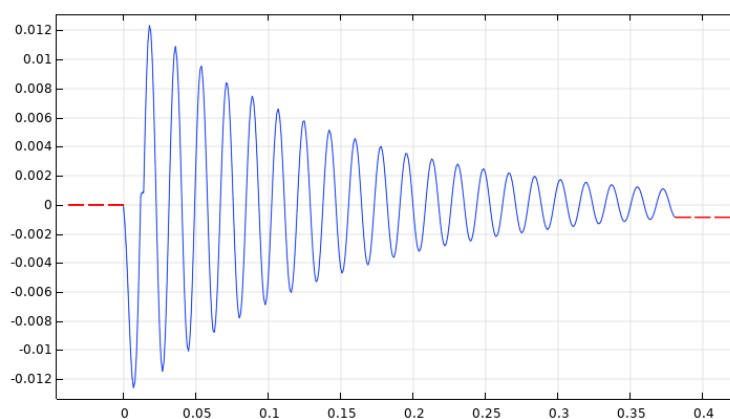


2.22 pav. Tyrime naudojamas modelis: 1 – PVDF plokštelės, 2 – seisminė masė m_2 .

Išsprendus dinamikos lygtis, generatoriaus žadinimo dažniui nustatyti, gauti seisminės masės poslinkiai korpuso atžvilgiu (žr. 2.23 pav., 2.24 pav.) suteikiami plokštelių galams, tvirtinamiems prie seisminės masės. Kiekvienas generuojantis elementas tiriamas atskirai.



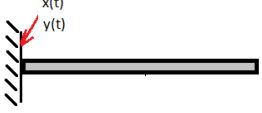
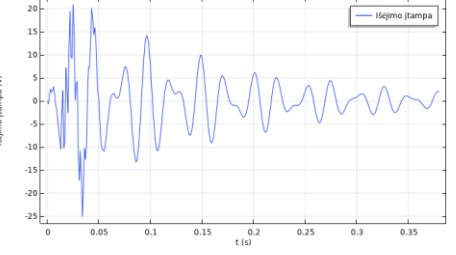
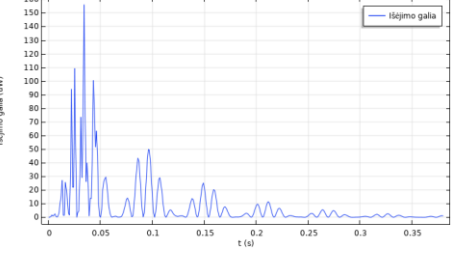
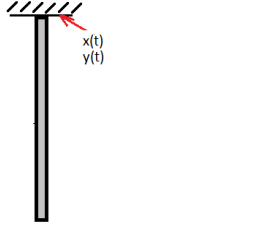
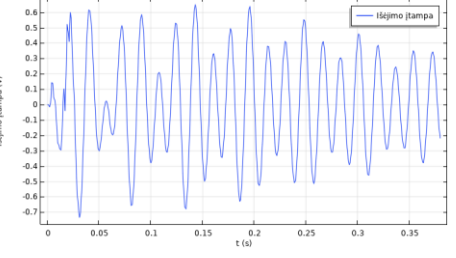
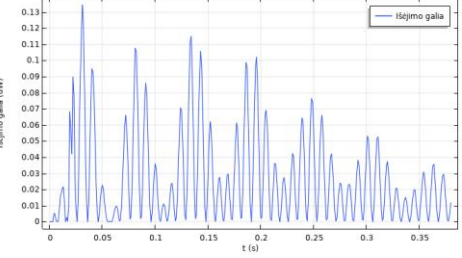
2.23 pav. Kinematinio plokštelės žadinimo horizontalios ašies kryptimi priklausomybė nuo laiko



2.24 pav. Kinematinio plokštelės žadinimo vertikalios ašies kryptimi priklausomybė nuo laiko

Įtamos bei galios priklausomybei nuo laiko nustatyti atliekama simuliacija naudojant *Comsol*. Tyrimo rezultatai pateikti 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė Tyrimo rezultatai

Tiriama plokštelė	Generuojama įtampa $U(t), V$	Išėjimo galia $P(t), \mu W$
		
		

Iš gautų rezultatų nustatyta, kad horizontaliai pozicijuotos plokštelės maksimali išėjimo įtampa 20 V, maksimali galia 155 μW , vertikaliai pozicijuotos plokštelės – maksimali įtampa 0,65 V, maksimali galia 0,135 μW . Vertikali plokštelė tyrimo atveju generuoja labai mažai elektrinės energijos, nes jos dydis priklauso nuo kampinio dažnio, o šiuo atveju jis 1 rad/s.

Išvados

1. Atlikus literatūros apžvalgą, nustatyta, kad esant sistemos vibrosmūginiam žadinimui racionaliausi yra pjezoelektriniai generatoriai, dėl nesudėtingo generuojamos energijos valdymo.
2. Sukurtas pjezoelektrinio generatoriaus koncepcinis modelis leidžiantis gauti atskirų PVDF plokštelių porų virpesių žadinimą skirtingose erdvės plokštumose kartu esant ir galimam sukimuisi apie koordinačių sistemos ašis.
3. Generatoriaus dinaminė analizė atlikta aprašant generatoriaus ir generuojančios sistemos dinamiką trimis etapais: 1) generatoriaus pradinis judesys; 2) netiesinis kontaktas su kliūtimi 3) atsakas į kontaktą. Dinamikos analizei pasirinktas redukuotas dvimatis generatoriaus modelis. Sudarytos modelio skaičiuojamosios schemas bei redukuotos generatoriaus sistemos matematinis modelis, kuris realizuotas taikant skaitinį Rungės ir Kuto (paprastųjų dif. lygčių sprendimo) metodą *Matlab* aplinkoje.
4. Eksperimentiškai nustatyti smūginio kontakto slopinimo $c_2=81\text{Ns/m}$ ir standumo $k_2=50\text{ kN/m}$ vertės. Atliktas eksperimentinių ir modeliavimo metu apskaičiuotų generatoriaus žadinimo dažnių palyginimas: apskaičiuotas – 26,6 Hz, eksperimento – 24,5 Hz.
5. Įvertinus galimų elektronikos komponentų bei šešių PVDF plokštelių masę, virpesius generuojančios sistemos masė parinkta 0,07 kg. Spyruoklių standumas 4400 N/m. Sistemos žadinimo dažnis 39,5 Hz, modeliuoto PVDF bimorfo skersinių virpesių pirmasis tikrinis dažnis – 39,2 Hz.
6. Horizontaliai pozicionuotos plokštelės maksimali išėjimo įtampos vertė – 20 V, maksimali galios vertė – 155 μW , vertikaliai pozicionuotos plokštelės maksimali išėjimo įtampos vertė – 0,65 V, maksimali galios vertė – 0,135 μW . Horizontalioje padėtyje plokštelė generuoja žymiai daugiau elektros energijos nei vertikali. Norint padidinti vertikalios plokštelės išėjimo galią bei įtampą, reikia didinti generatoriaus kampinį dažnį.

Literatūra

1. Sulalit Bandyopadhyay. *Fabrication and Application of Nanomaterials. Applications in Energy Harvesting*, Chapter (McGraw-Hill Education: New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto, 2019).
<https://www-accessengineeringlibrary-com.ezproxy.ktu.edu/content/book/9781260132236/chapter/chapter12>
2. Huidong Li, Chuan Tian, and Z. Daniel Deng *Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials* Applied Physics Reviews 1, 041301 (2014);
<https://doi.org/10.1063/1.4900845>
3. Spies, P., Pollak, M., Mateu, L. (2015) *Handbook of Energy Harvesting Power Supplies and Applications* CRC Press [žiūrėta 2019 06 09] Prieiga per internetą:
https://books.google.lt/books?hl=lt&lr=&id=3TSsCQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=piezo++handbook+pdf&ots=JY6h822hxw&sig=gqDH08EiSFI_TntsCRWLoPe8p4o&redir_esc=y#v=onepage&q=piezo%20%20handbook%20pdf&f=false
4. Zhang, C., Tang, W., Han, C., Fan, F., & Wang, Z. (2014). Theoretical Comparison, Equivalent Transformation, and Conjunction Operations of Electromagnetic Induction Generator and Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Mechanical Energy. *Advanced Materials*, 26(22), 3580-3591.
<https://onlinelibrary-wiley-com.ezproxy.ktu.edu/doi/full/10.1002/adma.201400207>
5. Neil Sclater. *Mechanisms and Mechanical Devices Sourcebook, Fifth Edition. MECHANISMS FOR RENEWABLE POWER GENERATION*, Chapter (McGraw-Hill Education: New York, Chicago, San Francisco, Lisbon, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, San Juan, Seoul, Singapore, Sydney, Toronto, 2011). <https://www-accessengineeringlibrary-com.ezproxy.ktu.edu/content/book/9780071704427/chapter/chapter4>
6. Sandoval, David. (2020, April 21). What are the Advantages and Disadvantages of Electromagnetic Energy Power Sources?. sciencing.com. Retrieved from
<https://sciencing.com/advantages-electromagnetic-energy-power-sources-6779004.html>
7. S. Boisseau, G. Despesse and B. Ahmed Seddik, *Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting, Small-Scale Energy Harvesting*, Intech, 2012 <http://dx.doi.org/10.5772/51360>
8. *Pjezoelektrinis reiškiny's* [ilustracija] [žiūrėta 2019 06 09] Prieiga per internetą:
https://nptel.ac.in/courses/113104005/lecture29/29_3.htm
9. Uchino, K. (1997) *Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors*, Kluwer Academic Publishers, MA,
10. Najarian, S., Dargahi, J., Mehrizi, A. A., (2009) *Artificial Tactile Sensing in Biomedical Engineering* [žiūrėta 2019 06 09] Prieiga per internetą:
<https://www.accessengineeringlibrary.com/browse/artificial-tactile-sensing-in-biomedical-engineering/p200167979970085001?s.num=15&start=10&q=piezoelectric#p200167979970075001>
11. E. Bansevicius, E. Dragašius, I. Skiedraitė, R. T. Toločka (2008), „Adaptyvios mechatroninės sistemos“ Praktiniai darbai Kaunas Technologija
12. Uchino, K., (2010) *Advanced piezoelectric materials* UK: Woodhead Publishing Limited [žiūrėta 2019 06 09] Prieiga per internetą:
https://books.google.lt/books?id=oYlWAgAAQBAJ&pg=PA34&lpg=PA34&dq=single-crystal+materials,+piezoceramics,+piezo+polymers,+composites+andpiezofilms.&source=bl&ots=j3h3lsM_ry&sig=ACfU3U2byP_uKV4h9M_zChfIYpA6hz4ICQ&hl=lt&sa=X&ved=2ahUK

Ewj-k-LDksPiAhUR2aQKHd96CQAQ6AEwAHoECAkQAQ#v=onepage&q=single-crystal%20materials%2C%20piezoceramics%2C%20piezo%20polymers%2C%20composites%20andpiezofilms.&f=true

13. *Polinimas* [ilustracija] [žiūrėta 2019 06 09] Prieiga per internetą:
https://www.researchgate.net/figure/Poling-of-piezoelectric-ceramic-material-Each-arrow-represents-a-ferroelectric-domain_fig1_300893681
14. Calìò, R. , Rongala, U. B. 1, Domenico Camboni , Milazzo, M., Stefanini, C., Petris, G. ir Oddo, C. M. (2014) *Piezoelectric Energy Harvesting Solutions*
doi:10.3390/s140304755
15. Ali M. Sadegh, William M. Worek, (2018) *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 12th Edition [žiūrėta 2019 06 09] Prieiga per internetą:
https://www.accessengineeringlibrary.com/browse/marks-standard-handbook-for-mechanical-engineers-12th-edition/c9781259588501ch04lev1sec16?q=PZT+PVDF#ch04table4_16_3
16. *Unimorfinė ir bimorfinė gembės* [ilustracija] [žiūrėta 2019 06 09] Prieiga per internetą:
<https://www.jvejournals.com/article/14595>
17. Grzybek, D., (2013) *Piezoelectric generators: materials and structures* [žiūrėta 2019 06 09] Prieiga per internetą:
<http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-21db2c9c-5c2d-4c52-804a-ea90109060bc/c/Grzybek.pdf>
18. Piefort, V, Preumont, A. *Finite element modeling of piezoelectric structure* [žiūrėta 2019 06 09] Prieiga per internetą:
http://scmero.ulb.ac.be/Publications/Papers/js2001_ulb_vp.pdf
19. Biswal, Dr-Alok & Behera, Rabindra & Roy, Tarapada. (2014). *Finite element modeling of a beam coupled with piezoelectric patch for voltage generation*. [žiūrėta 2019 06 09] Prieiga per internetą:
https://www.researchgate.net/publication/308067465_Finite_element_modeling_of_a_beam_coupled_with_piezoelectric_patch_for_voltage_generation/download
20. S. Roundy (2005) *Improving power output for vibration-based energy scavengers*
doi: 10.1109/MPRV.2005.
21. *Bridge rectifier* [ilustracija] [žiūrėta 2019 06 09] Prieiga per internetą:
<https://www.elprocus.com/bridge-rectifier-basics-application/>
22. Goudarzi, Masoud & Niazi, Kamran & Kazem Besharati, Mohammad. (2013). *Hybrid energy harvesting from vibration and temperature gradient by PZT and PMN-0.25PT ceramics*. [žiūrėta 2019 06 09] Prieiga per internetą:
https://www.researchgate.net/publication/275034922_Hybrid_energy_harvesting_from_vibration_and_temperature_gradient_by_PZT_and_PMN-025PT_ceramics/download
23. Žiliukas, P. Barauskas, R. (2008). *Mechaniniai virpesiai*. Vilnius: Pedagoginio universiteto leidykla
24. Piezo Ceramic Bimorph 40x10x0.5mm <https://www.steminc.com/PZT/en/piezo-ceramic-bimorph-40x10x05mm-2-khz> [žiūrėta 2020-01-02]
25. Penner A. R., (2001) The physics of golf: The optimum loft of a driver. *American Journal of Physics* 69 <https://doi.org/10.1119/1.1344164>
26. Cross R. (2012) Aerodynamics in the classroom and at the ball park. *American Journal of Physics* 80(4):289-297 <http://dx.doi.org/10.1119/1.3680609>
27. Cross R. (2011) Ball Trajectories. In: *Physics of Baseball & Softball*. Springer, New York, NY https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8113-4_3

28. *Piezoelectric harvester* [žiūrėta 2020-01-02] <https://www.comsol.com/model/piezoelectric-energy-harvester-21421>
29. *Piezoelectric harvester* [žiūrėta 2020-01-02] <https://www.comsol.com/multiphysics/eigenfrequency-analysis>

1 Priedas. Matlab programos kodas

```
clear all;

clc;
r=0.27/2;%sistemos spindulys

m1=0.675; %korpuso mase
m2=0.07; % generatoriaus mase

m=m1+m2; %sistemos mase

k1=4400; %spyruokles standumas
k2=50000; % pagrindo standumas

c1=0.5; %spyruokles slopinimas
c2=81; % pagrindo slopinimas
w=-1; % kampinis greitis rad/s
%-----

A=pi*r^2; %skersjuvio plotas
g=9.81; %laisvo kritimo pagreitis
Cd=0.55;% oro pasipriesinimo koef
ro=1.21; % oro tankis

%-----PALEIDIMAS

fun=@(t,y1) [y1(2);

    (-Cd*0.5*ro*A*(y1(2)^2)-
0.5*(1/(2+(sqrt(y1(2)^2+y1(4)^2)/(r*w))))*A*ro*(y1(4)^2))/m;

    y1(4);

    ((-
Cd*0.5*ro*A*(y1(4)^2)+0.5*(1/(2+(sqrt(y1(2)^2+y1(4)^2)/(r*w))))*A*ro*(y1(2)^2))
/m-g;

    y1(6);

    (-2*k1*(y1(5)-y1(1))-2*c1*(y1(6)-y1(2))-2*m2*y1(8)*w)/m2;

    y1(8);

    (-2*k1*(y1(7)-y1(3))-2*c1*(y1(8)-y1(4))-2*m2*y1(6)*w)/m2];

initial_x = 0; % pradinis poslinkis x
initial_dxdt = 0; % pradinis greitis x m/s
initial_y = 1; % pradinis poslinkis y
initial_dydt = 0; % pradinis greitis y m/s
initial_x2 = 0; % pradinis poslinkis x
```

```

initial_dxdt2 = 0; % pradinis greitis x m/s

initial_y2     = 1; % pradinis poslinkis y

initial_dydt2 = 0; % pradinis greitis y m/s

Y0=[initial_x; initial_dxdt; initial_y; initial_dydt; initial_x2; initial_dxdt2;
initial_y2; initial_dydt2];

t=0:0.001:3;    % laiko intervalas s

options1 = odeset('Events',@events1);

[t,y1]=ode45( fun, t, Y0, options1 );

laikas1=t(length(t));

tp=laikas1;

y=y1;
while abs(y1(end,4))>0.1 % ciklas sukasi iki kol Vy>0.1
%-----KONTAKTAS SU ZEME

initial_x1=y1(end,1);

initial_dxdt1=y1(end,2);
yx=y1(end,2);
initial_y1=y1(end,3);

initial_dydt1=y1(end,4);

initial_x20=y1(end,5);

initial_dxdt20=y1(end,6);

initial_y20=y1(end,7);

initial_dydt20=(y1(end,8));

Y00=[initial_x1; initial_dxdt1; initial_y1; initial_dydt1; initial_x20;
initial_dxdt20; initial_y20; initial_dydt20];

fun1=@(t1,y1) [y1(2);

0;

y1(4);

(-2*k1*(y1(3)-y1(7))-k2*y1(3)-2*c1*(y1(4)-y1(8))-c2*y1(4))/m1;

y1(6);

(-2*k1*(y1(5)-y1(1))-2*c1*(y1(6)-y1(2))-2*m2*y1(8)*w)/m2;

```

```

y1(8);

(-2*k1*(y1(7)-y1(3))-2*c1*(y1(8)-y1(4))-2*m2*y1(6)*w)/m2];

t=0:0.001:3;% laiko intervalas s

options1 = odeset('Events',@events1);
[t,y1]=ode45( fun1, t, Y00,options1 );

laikas1=laikas1+t(length(t));
y=[y;y1];

%-----
ATSOKIMAS
initial_x1=y1(end,1);

initial_dxdt1=yx;

initial_y1=y1(end,3);

initial_dydt1=y1(end,4);

initial_x20=y1(end,5);

initial_dxdt20=y1(end,6);

initial_y20=y1(end,7);

initial_dydt20=(y1(end,8));

Y00=[initial_x1; initial_dxdt1; initial_y1; initial_dydt1; initial_x20;
initial_dxdt20; initial_y20; initial_dydt20];

fun1=@(t1,y1)[y1(2);

(-Cd*0.5*ro*A*(y1(2)^2)-
0.5*(1/(2+(sqrt(y1(2)^2+y1(4)^2)/(r*w))))*A*ro*(y1(4)^2))/m;

y1(4);

((-
Cd*0.5*ro*A*(y1(4)^2)+0.5*(1/(2+(sqrt(y1(2)^2+y1(4)^2)/(r*w))))*A*ro*(y1(2)^2))
/m-g;

y1(6);

(-2*k1*(y1(5)-y1(1))-2*c1*(y1(6)-y1(2))-2*m2*y1(8)*w)/m2;

y1(8);

(-2*k1*(y1(7)-y1(3))-2*c1*(y1(8)-y1(4))-2*m2*y1(6)*w)/m2];

t=0:0.001:3;% laiko intervalas s

options1 = odeset('Events',@events1);

[t,y1]=ode45( fun1, t, Y00, options1 );

```

```

laikas1=laikas1+t(length(t));

y=[y;y1];
end;

C=y(:,7)-y(:,3);%seismines mases posilinkiai y
B=y(:,5)-y(:,1);%seismines mases posilinkiai x
%-----
nx3=length(y);

zing=laikas1/nx3;

t3=0:zing:laikas1-zing;

%-----Daznio radimas

peaks=length(findpeaks(y(:,7)))

daznis=peaks/(laikas1-tp)

disp(['daznis =' num2str(daznis), 'Hz']);

%-----
%t3(1:433)=[];
%t3=t3-0.431;

%C(1:433)=[];
%B(1:433)=[];
A=y(:,3);
%A(1:433)=[];
figure(1)

plot(t3,y(:,3));
grid on

xlabel('t(s)'); ylabel('y1(m)');

figure(2)

yyaxis left

plot(t3,C);
title('Seisminės masės poslinkiai korpuso atžvilgiu');

xlabel('t(s)'); ylabel('y2-y1(m)');

grid on

yyaxis right

plot(t3,B);

xlabel('t(s)'); ylabel('x2-x1(m)');

Xposlinkiai=B;
ux=table(Xposlinkiai);
writetable(ux)

```

```
Yposlinkiai=C;
uy=table(Yposlinkiai);
writetable(uy)

function [values, isterminal, direction] = events1(t,y1)

values = y1(3);

isterminal = 1;    % Stop the integration

direction = 0;

end
```