



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Pjezoelektrinių energijos generatorių ir apkrovų impedanso suderinimo metodų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Evaldas Katilius

Projekto autorius

Prof. Vytautas Markevičius

Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Pjezoelektrinių energijos generatorių ir apkrovų impedanso suderinimo metodų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektronikos inžinerija (6121EX012)

Evaldas Katilius

Projekto autorius

Prof. Vytautas Markevičius

Vadovas

Asist. Vytautas Daunoras

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Evaldas Katilius

Pjezoelektrinių energijos generatorių ir apkrovų impedanso suderinimo metodų 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.

Evaldas Katilius

Patvirtinta elektroniniu būdu

Katilius Evaldas. Pjezoelektrinių energijos generatorių ir apkrovų impedanso suderinimo metodų tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Vytautas Markevičius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: pjezoelektrinis generatorius, sinchronizuotas perjungimas, sinchronizuotas krūvio ištraukimas, impedanso suderinimas, bimorfinė gembė.

Kaunas, 2026. 52 p.

Santrauka

Baigiamojo magistro projekto tikslas – ištirti pjezoelektrinių energijos generatorių apkrovos impedanso suderinimo metodus ir, taikant modeliavimą COMSOL bei LTspice aplinkose, nustatyti efektyviausius energijos surinkimo iš vibracijų sprendimus. Darbo aktualumą pagrindžia augantis autonominių elektroninių sistemų ir daiktų interneto (IoT) įrenginių kiekis, kuriems reikalingi mažos galios, savaimė pasikraunantys energijos šaltiniai, mažinantys baterijų išsieikvojimą ir priežiūros kaštus.

Pirmojoje darbo dalyje atlikta literatūros analizė: apžvelgtas pjezoelektrinis efektas, svarbiausios, tinkančios energijos išgavimui pjezoelektrinės medžiagos (PZT, PVDF) ir jų savybės, išanalizuotos tipinės pjezoelektrinių energijos generatorių konstrukcijos bei jų taikymo sritys, detaliai aptarta apkrovos impedanso suderinimo svarba ir derinimo metodai – pasyvūs (RC, LC), aktyvūs (DC–DC keitikliai), sinchronizuoto perjungimo (SSHI, SECE) ir adaptyvūs MPPT algoritmai.

Antrojoje darbo dalyje COMSOL aplinkoje sukurtas bimorfinės pjezoelektrinės gembės modelis ir ištirta įvairių energijos išgavimo įtaisų parametrai – vibracijų amplitudės, apkrovos varžos, gembės ilgio, pjezoelektrinės medžiagos storio, G jėgos ir inertinės masės – įtaka generuojamai įtampai, išėjimo galiai ir rezonansiniam dažniui. Pagal modeliavimo rezultatus nustatyti generatoriaus elektriniai parametrai ir optimalių darbinių zonų sritys vėlesniam elektrinių grandinių modeliavimui. Trečiojoje darbo dalyje LTspice aplinkoje sudarytas pjezoelektrinio generatoriaus Norton ekvivalentinis modelis ir ištirtos energijos surinkimo grandinės: pasyvūs diodų ir aktyvūs AC–DC keitiklis su MOSFET tiltu bei sinchronizuoto krūvio ištraukimo metodai (SECE, SSHI). Įvertintas jų efektyvumas pagal išėjimo galią, energijos perdavimo charakteristikas ir apkrovos įtaką, atlikta skirtingų topologijų palyginamoji analizė ir nustatyta, kokiomis sąlygomis sinchronizuoto perjungimo metodai leidžia išgauti didesnę nei pasyviosios grandinės surenkamą galią.

Katilius, Evaldas. The Study of Piezoelectric Energy Harvesters and Load Impedance Matching Methods. Master's Final Degree Project / supervisor Prof. dr. Vytautas Markevičius; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: piezoelectric generator, Synchronous Electric Charge Extraction (SECE), Synchronized Switch Harvesting on Inductor (SSHI), impedance matching, bimorph cantilever.

Kaunas, 2026. 52 p.

Summary

The aim of this master's thesis is to investigate load impedance matching methods for piezoelectric energy harvesters and, using modeling in COMSOL and LTspice environments, to identify the most efficient energy harvesting interface solutions. The work is motivated by the increasing demand for autonomous electronic systems and Internet of Things (IoT) devices, which require low-power, self-sustaining energy sources that reduce battery discharge and maintenance efforts.

In the first part of the thesis, a literature review is presented: the fundamentals of the piezoelectric effect, the main piezoelectric materials for energy harvesters (PZT, PVDF) and their properties are discussed; typical structures and application areas of piezoelectric energy harvesters are analyzed; special attention is given to the importance of load impedance matching and to the main techniques, including passive (RC, LC), active (DC–DC converters), synchronized switching (SSHI, SECE) and adaptive MPPT-based methods.

The second part focuses on modeling a bimorph piezoelectric cantilever in the COMSOL Multiphysics environment. The influence of vibration amplitude, load resistance, beam length, piezoelectric layer thickness, excitation acceleration (G force) and tip mass on generated voltage, output power and resonant frequency is investigated. Based on the simulation results, the electrical parameters of the harvester and the ranges of optimal operating area are determined for further electrical interface design.

In the third part, an equivalent Norton model of the piezoelectric generator is implemented in the LTspice environment, and several energy harvesting interfaces are analyzed: a passive diode bridge rectifier, an active MOSFET-based AC–DC converter and synchronized charge extraction techniques (SECE, SSHI). Their performance is evaluated in terms of output power, energy transfer characteristics and sensitivity to load variations, and a comparative analysis of different topologies is carried out, showing under which conditions synchronized switching methods can achieve higher harvested power than passive rectifier solutions.

Turinys

Santrumpų ir terminų sąrašas	7
Įvadas.....	8
1. Literatūros analizė.....	9
1.1. Pjezoelektrinių energijos generatorių veikimo principas ir savybės	9
1.2. Pjezoelektrinių energijos generatorių tipai, privalumai, trūkumai ir taikymo sritys	11
1.3. Impedanso suderinimo svarba pjezoelektriniuose energijos generatoriuose.....	14
1.4. Impedanso suderinimo metodai.....	15
1.4.1. Pasyvūs suderinimo būdai (RC, LC).....	15
1.4.2. Aktyvios galios grandinės (impulsiniai keitikliai)	16
1.4.3. Synchronizuoto perjungimo metodai (SSHI, SECE)	18
1.4.4. Adaptyvūs impedanso sekimo metodai (MPPT algoritmai)	21
2. Efektyvumo modeliavimas COMSOL	22
2.1. Bimorfinio PEH modelis	22
2.2. Savasis dažnis	22
2.3. Vibracijų įtaka generuojamai įtampai ir galiai	24
2.4. Apkrovos įtaka generuojamai įtampai ir galiai	25
2.5. Gembės ilgio įtaka generuojamai įtampai ir galiai.....	26
2.6. Pjezoelektrinės medžiagos storio įtaka generuojamai įtampai ir galiai.....	27
2.7. Aplinkos vibracijų pagreičio įtaka generuojamai įtampai ir galiai	28
2.8. Inertinės masės įtaka generuojamai įtampai ir galiai	29
3. Elektrinio efektyvumo modeliavimas paketu LTSpice	30
3.1. Ekvivalentinė Norton grandinė.....	30
3.2. AC-DC tilteliai	31
3.3. SECE be papildomo išorinio maitinimo	35
3.4. SSHI be papildomo išorinio maitinimo	41
3.5. Energijos išgavimo topologijų palyginimas	47
Išvados	49
Literatūros sąrašas	50

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

IoT – daiktų internetas (angl. *Internet of Things*);

PEH – pjezoelektrinis energijos generatorius (angl. *Piezoelectric Energy Harvester*);

SSHI – sinchronizuotas energijos surinkimas su induktyvumu (angl. *Synchronized Switch Harvesting on Inductor*);

SECE – sinchronizuotas elektrinio krūvio ištraukimas (angl. *Synchronous Electric Charge Extraction*);

MPPT – maksimalaus galios taško sekimas (angl. *Maximum Power Point Tracking*);

PZT – švino cirkonato titanato keramika (angl. *Lead Zirconate Titanate*);

PVDF – polivinilfluoridas (angl. *Polyvinylidene Fluoride*);

COMSOL – daugiafizikinio modeliavimo programinė aplinka (angl. *COMSOL Multiphysics*);

LTSpice – elektroninių grandinių modeliavimo programinė įranga;

V_{oc} – atviros grandinės įtampa (angl. *Open-Circuit Voltage*).

MOSFET – metalo oksido puslaidininkio lauko tranzistorius, įtampa valdomas puslaidininkinis tranzistorius, plačiai naudojamas galios elektronikoje ir energijos keitikliuose.

Terminai:

Sinchronizuotas perjungimas – metodas, kai grandinės elementai įjungiami tam tikru signalo momentu, siekiant sumažinti energijos nuostolius.

Maksimalaus galios taško sekimas (MPPT) – algoritmas, leidžiantis realiu laiku palaikyti optimalų energijos išgavimo režimą.

Rezonansinis dažnis – dažnis, kuriuo sistema vibruoja didžiausia amplitude dėl energijos kaupimosi mechaninėje struktūroje.

Bimorfinė gembė – pjezoelektrinė konstrukcija, sudaryta iš dviejų aktyvių pjezo elementų sluoksnių, generuojančių didesnę įtampą nei vienas sluoksnis.

Impedansas – kompleksinė elektrinės grandinės varža, apimanti tiek aktyviają (varžinę), tiek reaktyviają (talpinę ir induktyvinę) dedamąsias.

Pjezoelektrinis efektas – reiškiny, kai mechaninis poveikis medžiagai sukelia elektrinio krūvio atsiradimą arba, veikiant elektriniam laukui, sukelia mechaninę deformaciją.

Pjezoelektrinis energijos generatorius – įrenginys, kuris mechaninę energiją (vibracijas, slėgį) paverčia elektros energija.

Įvadas

Pastaraisiais metais, spartėjant klimato kaitos procesams ir didėjant poreikiui mažinti iškastinių energijos šaltinių naudojimą, vis daugiau dėmesio skiriama tvariems ir aplinkai draugiškiems energijos gavimo būdams. Greta atsinaujinančios energetikos šaltinių, tokių kaip saulės, vėjo ar vandens energija, aktyviai tiriamos ir alternatyvios mažos galios energijos surinkimo technologijos, leidžiančios išnaudoti aplinkoje natūraliai egzistuojančius energijos šaltinius. Viena iš perspektyviausių krypčių yra energijos surinkimas iš mechaninių vibracijų, kurios plačiai paplitusios ir pramonėje, ir kasdienėje aplinkoje. [5], [6], [7]

Įvairūs mechaniniai įrenginiai, transporto priemonės, pramonės agregatai, pastatų konstrukcijos ar net žmogaus judesiai generuoja vibracijas, kurios dažniausiai nėra panaudojamos ir išsisklaido šilumos pavidalu kaip nuostoliai. Ši mechaninė energija gali būti paversta elektros energija, panaudojant pjezoelektrines medžiagas. Toks energijos surinkimo principas leidžia kurti autonomines mažos galios sistemas, kurioms nereikalingas nuolatinis išorinis maitinimas arba dažnas baterijų keitimas.

Sparčiai augant daiktų interneto (angl. *Internet of Things*) sistemoms, kuriose naudojami dideli kiekiai belaidžių jutiklių, matavimo mazgų ir stebėsenos įrenginių, ši technologija įgauna didelę svarbą. Tokie įtaisai dažnai montuojami sunkiai pasiekiamose vietose, todėl jų maitinimo autonomiškumas tampa vienu svarbiausių projektavimo uždavinių. Pjezoelektriniai energijos generatoriai leidžia iš aplinkos vibracijų surinktą energiją kaupti baterijose arba superkondensatoriuose, taip prailginant visos sistemos veikimo laiką. [2], [3], [4]

Be to, tokie sprendimai prisideda prie tvarios energetikos plėtros ir žaliosios elektronikos idėjos, nes leidžia sumažinti baterijų naudojimą, jų sukeltamų atliekų kiekį bei energijos sąnaudas eksploatacijos metu. Todėl pjezoelektrinių energijos surinkimo sistemų efektyvumo didinimas yra aktualus tiek moksliniu, tiek aplinkosauginiu požiūriu.

Viena pagrindinių problemų šiose sistemose yra ne vien pačios mechaninės energijos pavertimas elektros energija, bet ir efektyvus šios energijos perdavimas energijos kaupikliui arba apkrovai. Dėl pjezoelektrinių elementų talpinio pobūdžio ir priklausomybės nuo rezonansinio dažnio, didelė dalis sugeneruotos energijos prarandama, jei apkrovos impedansas nėra tinkamai suderintas su generatoriaus impedansu. Dėl šios priežasties ypač svarbūs tampa impedanso suderinimo metodai, tokie kaip SSHI (angl. *Synchronized Switch Harvesting on Inductor*) ir SECE (angl. *Synchronous Electric Charge Extraction*), leidžiantys sumažinti energijos nuostolius ir padidinti naudingąją galią.

Darbo tikslas – ištirti pjezoelektrinių energijos generatorių veikimo principus ir apkrovos impedanso suderinimo metodus bei, taikant modeliavimą COMSOL ir LTSpice aplinkose, išgauti didesnę galią, nei naudojant pasyviuosius elementus.

Tikslui pasiekti iškelti šie uždaviniai:

1. išanalizuoti pjezoelektrinių energijos generatorių veikimo ir modeliavimo principus bei pagrindinius impedanso suderinimo metodus;
2. sumodeliuoti bimorfinį pjezoelektrinį energijos generatorių COMSOL aplinkoje ir nustatyti jo elektrinius bei mechaninius parametrus;
3. realizuoti LTSpice aplinkoje skirtingus energijos surinkimo ir impedansų derinimo metodus;
4. įvertinti skirtingų metodų efektyvumą pagal išgaunamą galią ir energijos kaupimo rezultatus;
5. palyginti gautus rezultatus ir nustatyti efektyviausią sprendimą.

1. Literatūros analizė

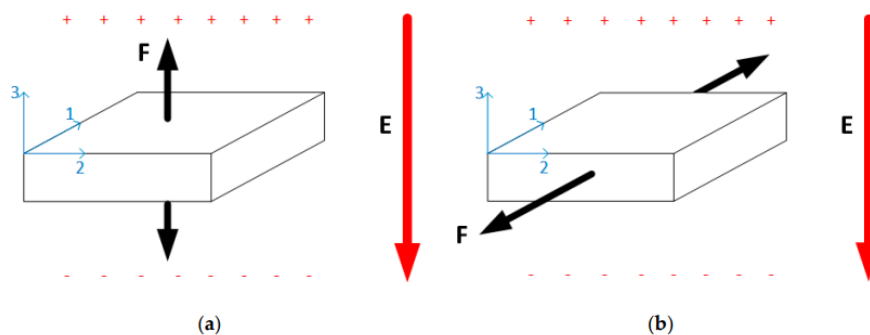
Šiame skyriuje pateikiami svarbiausi pjezoefekto principai, apžvelgiamos pagrindinės pjezoelektrinių medžiagų rūšys, pjezoelektrikų veikimo režimai. Taip pat, skyriuje apžvelgiami PEH tipai ir konstrukcijos: privalumai, trūkumai ir taikymo sritys. Išsamiai išanalizuojama impedanso suderinimo svarba bei jų metodai.

1.1. Pjezoelektrinių energijos generatorių veikimo principas ir savybės

Pjezoelektrinis efektas – tai medžiagų gebėjimas mechaniškai deformuojantis generuoti elektrinį krūvį (tiesioginis pjezoefektas) arba, veikiant elektriniam laukui, patirti mechaninę deformaciją (atvirkštinis pjezoefektas). Dėl tiesioginio pjezoefekto mechaniškai įtemptos pjezoelektrinės medžiagos paviršiuje atsiranda elektrinė įtampa – ši savybė naudojama jutikliuose ir generuojant energijos. Atvirkštinis pjezoefektas veikia atvirkščiai – naudojant įtampą, medžiaga keičia formą, todėl jis taikomas aktuatoriuose ir ultragarsiniuose keitikliuose. Pjezoefektas pasireiškia tik necentrosimetrinėse kristalinėse struktūrose – iš 32 kristalų klasių 20 turi tiesioginį pjezoefektą, o 10 iš jų dar ir yra polinės (feroelektrinės), suteikiančios galimybę poliarizuoti medžiagą norima kryptimi. [1], [15]

Praktikoje paplitusios dvi pjezoelektrinių medžiagų grupės: keramikos (pvz., švino cirkonato titanato – PZT) ir polimerai (pvz., polivinilfluoridinės – PVDF). Keraminės medžiagos, tokios kaip PZT, pasižymi aukštu pjezoelektrinių koeficientų dydžiu – tipinės PZT keramikos turi tiesinį įtempimų-koeficientą d_{33} apie $200\text{--}600 \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$, kai PVDF polimero d konstantos yra mažesnės (pvz., $d_{33} \sim 33 \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$). Vadinasi, PZT veikiant tam pačiam mechaniniam įtempiui, sukaupia kelis kartus daugiau krūvio nei PVDF. Dėl to keraminiai pjezoelementai generuoja didesnę įtampą ir gali pasiekti aukštesnę energijos generavimo efektyvumą. Tačiau PZT ir panašūs keraminiai elementai yra standūs ir trapūs, jautrūs skilimams esant didelėms deformacijoms, o PVDF yra lankstus polimeras, kurį galima lengvai formuoti į plonas plėveles, dengti didelius paviršius, yra lengvesnis, atsparus korozijai. Nors PVDF pjezo elemento jautris mažesnis, polimerai gali generuoti elektrą esant didesnėms deformacijoms ir žemesniems dažniams, todėl tinkami lankstiems, dėvimiems ar biomedicininiais prietaisams, kur keramika netiktų dėl standumo ar svorio. [8], [9], [10], [11] Siekiant išvengti toksinio švino naudojamos ir bešvinės pjezoelektrinės keramikos (pvz., BaTiO_3 , KNN ir kt.), tačiau jų pjezoelektrinės savybės dažnai kiek prastesnės už PZT. [12], [13], [14]

Pjezoelektrinis energijos generatorius – tai laisvu vienu galu laikomas konsolinis elementas (dažnai elastinga sija ar plokštelė), ant kurio pritvirtinti pjezoelektriniai sluoksniai. Gembės deformuojamos išilginės (lenkimo) vibracijos sukelia pjezoelektriniame sluoksnyje tempimo-slėgimo įtempius ir generuoja elektros energiją. Priklausomai nuo pjezoelemento padėties ir poliarizacijos, išskiriami keli veikimo režimai (dar vadinami pjezoelektrinių konstantų indeksais):



1.1 pav. Darbo režimai a) d_{33} skersinis, b) d_{31} išilginis [1]

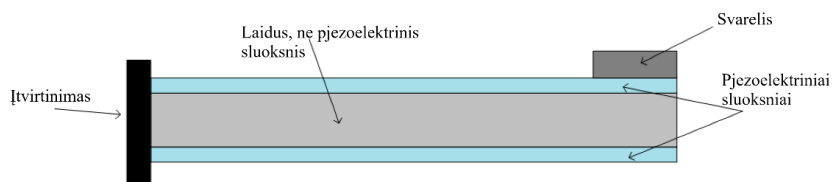
- d_{31} – dar vadinamas išilginiu ar lenkimo režimu. Šiuo atveju elektrinis laukas taikomas statmenai mechaniniams įtempiams. Pavyzdžiui, unimorfines ar bimorfines gembėse pjezosluoksniai poliarizuoti aukščio kryptimi (z ašimi), o juos deformuoja lenkimo tempiamieji įtempiai išilgai x ašies. Tai atitinka d_{31} konstantą. Būtent d_{31} režimu veikia dauguma klasikinių gembių (unimorfų, bimorfų), nes lenkimo metu pjezoelementas patiria slenkamųjų įtempių. Šio režimo privalumas – paprasta įgyvendinti konstrukcija (plokštelė ant atramos), tačiau pjezoelektrinė sąveika nėra pati stipriausia lyginant su kitais režimais.
- d_{33} – dar vadinamas skersiniu režimu. Čia mechaninis įtempis veikia lygiagrečiai poliarizacijos kryptčiai. Pavyzdžiui, daugiaksluoksnė pjezoelementų konstrukcija, kai kiekvienas sluoksnis deformuojasi storio kryptimi veikiant elektriniam laukui, o mechaniniai poslinkiai sumuojasi. d_{33} režimu dirbančios konstrukcijos (pvz., pjezoelementų kameros) generuoja didesnę poslinkį ir paprastai turi didesnę d_{33} koeficientą, todėl teoriškai gali išgauti daugiau energijos. Literatūroje nurodoma, kad d_{33} režimu generuojama galia gali būti 2–5 kartus didesnė nei analogiško d_{31} elemento. Tačiau tokios konstrukcijos būna standžios ir labiau tinka didelėms apkrovoms (pvz., presavimo jutikliams) nei mažo dažnio smulkioms vibracijoms.
- d_{15} (šlyties režimas) – rečiau sutinkamas režimas, kai išnaudojamas pjezoelemento šlyties deformavimas. d_{15} konstanta aprašo krūvį, sukuriama medžiagą veikiant šlyties įtempimu. Tyrimai rodo, kad šlyties režimo generatoriai tam tikrais atvejais gali pagaminti ~50 % daugiau galios nei analogiški lenkimo režimo, kadangi d_{15} koeficientai kai kuriuose kristaluose net didesni už d_{31} . Vis dėlto, grynojo šlyties deformaciją techniškai sudėtingiau realizuoti – dažniausiai reikia specialios sandaros (pvz., trapecinės sijos ar įstrižai poliarizuotų sluoksnių), todėl praktikoje d_{15} režimas taikomas rečiau.

Pjezoelektrinė gembė paprastai sudaryta iš vieno ar kelių pjezo elementų sluoksnių, suformuotų ant metalinės ar kompozitinės laikančiosios sijos. Unimorfas – tai gembė su vienu pjezo elemento sluoksniu (antra pusė – inertiška medžiaga), bimorfas – su dviem priešingais pjezo elemento sluoksniais. Bimorfai efektyvesni nei unimorfai, nes du sluoksniai generuoja dvigubai didesnę srovę ir galią, nepadidinant konstrukcijos gabaritų. Gembės laisvasis galas dažnai turi pritvirtintą svarelį, kuris sumažina savąjį dažnį ir padidina vibracijų deformacijas – taip žemų dažnių aplinkoje padidinama generuojama galia.[1]

1.2. Pjezoelektrinių energijos generatorių tipai, privalumai, trūkumai ir taikymo sritys

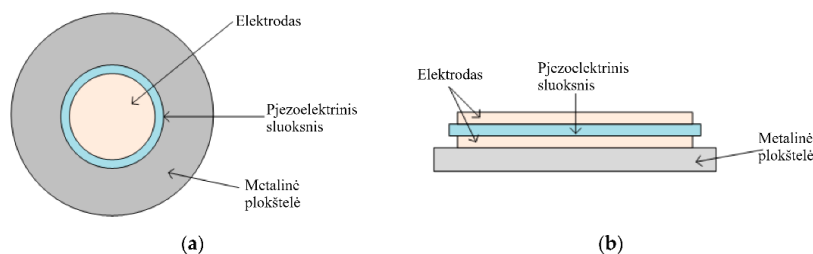
Pjezoelektriniai energijos generatoriai gali būti įvairių formų ir konstrukcijų. Dažniausiai literatūroje aptariami tipai pateikiami toliau.

- Konsolinė gembė (angl. *cantilever beam*) – tai labiausiai paplitusi konstrukcija dėl savo paprastumo ir efektyvumo mažų amplitudžių vibracijų diapazone. Gembė (žr. 1.2 pav.) susideda iš plonos pjezoelektrinės plokštelės (ar dviejų – bimorfiniu atveju) ir tvirto pagrindo, tvirtinamo viename gale. Laisvas galas gali turėti papildomą masę rezonansinio dažnio reguliavimui. Gembė veikia lenkimo režimu (dažniausiai d_{31} kryptimi). Konstrukcijos privalumas: labai paprasta struktūra, lengva pagaminti, žemas natūralus dažnis (gali dirbti kelių dešimčių Hz diapazone, tinkama aplinkos vibracijoms); išėjimo galia gali būti padidinta pridėdant galinį svorį; didelis mechaninis Q faktorius leidžia efektyviai kaupti energiją rezonanso metu. Trūkumai: tokia gembė negali atlaikyti didelių smūgių – stiprus smūgis gali ją sulaužyti dėl trapumo; taip pat jos standumas mažas, todėl netinka labai aukšto dažnio ar didelio greitėjimo virpesiams (aukšto dažnio srityje labiau tinka standesni elementai). [5], [6], [7]



1.2 pav. Konsolinė gembė [1]

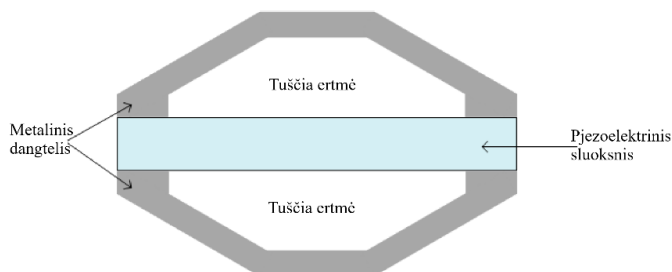
- Apvali diafragma (angl. *circular diaphragm*) – tai plonas diskas arba membrana su pjezo elemento sluoksniu, pritvirtinta metaliniu rėmu (žr. 1.3 pav.). Centre dažnai tvirtinamas svarelis, padidinantis išlinkimą veikiant slėgiui ar vibracijai. Konstrukcijos privalumas: tinkama dideliame slėgiui, pvz.: kai aplinkos šaltinis – kintantis slėgis, spaudimas (pvz., garso, žmogaus žingsnių sukeltas spaudimas); tvirtesnė už tokio pat dydžio gembę; diafragma pasižymi didesniu rezonansiniu dažniu nei analogiško dydžio gembė. Trūkumai: aukštesnis rezonansinis dažnis reiškia, kad žemų dažnių vibracijų energija nesurenkama (todėl dažnai reikalauja didesnių jėgų arba spartesnių virpesių šaltinių nei gembė). [5], [6], [7]



1.3 pav. Apvali diafragma a) vaizdas iš priekio, b) vaizdas iš šono [1]

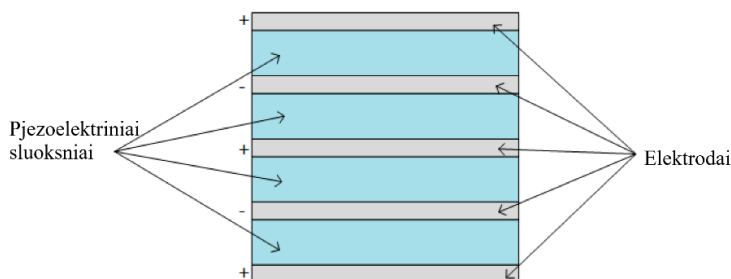
- „Cymbal“ tipo keitiklis – tai diskinis pjezo elementas, abipus apgaubtas išgaubtais metaliniais dangteliais (žr. 1.4 pav.). Spaudžiant tokią struktūrą ašine jėga, metaliniai dangteliai deformuojasi ir slėgis perduodamas pjezo elemento diskui, versdamas jį plėstis radialine kryptimi. Tokiu būdu cimbolinė konstrukcija paverčia ašinę slėgį į pjezo elemento išilginę deformaciją, sustiprindama

efektą. Privalumai: gali generuoti didesnę energiją nei vien tik pjezo elemento diskas (dėl jėgos transformacijos); atlaiko dideles smūgines apkrovas, tinkama didelės amplitudės virpesiams. Trūkumai: efektyvi tik esant didelėms jėgoms; netinka silpnoms žemos amplitudės vibracijoms, reikalauja didelio mechaninio poveikio; dažniausiai taikoma aukštos amplitudės sužadinimuose pvz. transporto priemonėse. [5], [6], [7]



1.4 pav. Cimbolinis energijos generatorius [1]

- Daugiasluoksniė struktūra (angl. *stacked structure*) – sudaryta iš kelių pjezo elementų sluoksnių, suklijuotų vienas ant kito į stulpelį (žr. 1.5 pav.). Poliarizacija orientuota per sluoksniu storį lygiagrečiai spaudimo krypčiai, todėl ši struktūra veikia d_{33} režimu. Privalumai: labai didelis standumas – gali atlaikyti dideles mechanines apkrovas; tinka generuoti energijai iš tiesioginio spaudimo (presavimo); suminis poslinkis didesnis, todėl d_{33} režimu išgaunama didesnė galia. Trūkumai: dėl didelio standumo tokie generatoriai turi aukštą rezonansinį dažnį ir siaurą darbinį dažnių diapazoną; neefektyvūs esant mažos amplitudės periodinėms vibracijoms, labiau tinka, kai yra pulsuojantis jėgos poveikis (pvz., mašinų sukeliama vibracija su pastovia jėga). [5], [6], [7]



1.5 pav. Daugiasluoksniė pjezo elementų struktūra [1]

Anksčiau paminėtų konfigūracijų privalumai ir trūkumai apibendrinti 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. Skirtingų pjezoelektrinių keitiklių konfigūracijų palyginimas. [1], [7], [15], [16]

Konstrukcija	Privalumai	Trūkumai
Unimorfas/Bimorfas (gembė)	Paprasta sandara; pigi gamyba; žemas, lengvai reguliuojamas rezonansinis dažnis; generuojama galia proporcinga pridėtinei masei; aukštas mechaninis kokybinis koeficientas (Q)	Nepajėgi atlaikyti didelių smūgių ar apkrovų (trapi)
Apvali diafragma	Tinkama spaudimo režimui (slėgio virpesiams)	Standesnė nei tokio pat dydžio gembė; aukštesnis rezonansinis dažnis (mažiau jautri lėtiems virpesiams)

Cimbolinis	Didelė generuojama energija; atlaiko stiprius smūgius	Ribota naudoti tik didelių amplitudžių vibracijoms (aukšto slėgio atvejams)
Daugiasluoksnė struktūra	Atlaiko dideles mechanines apkrovas; tinkamas spaudimo režimui; didelė galia d_{33} režimu	Labai standi (aukštas savas dažnis); mažas poslinkis esant silpniems virpesiams

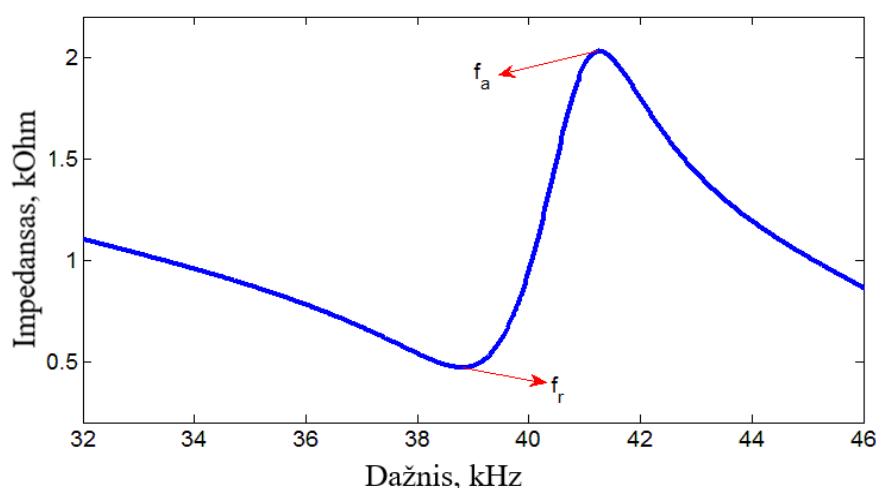
Pjezoelektriniai energijos generatoriai pritaikomi ten, kur aplinkoje yra mechaninė energija (vibracijos, slėgio pulsacijos, judesiai) ir poreikis maitinti mažos galios įrenginius. Dėl IoT ir belaidžių jutiklių tobulėjimo, labai aktualus energijos generavimas (angl. *energy harvesting*) iš aplinkos – tai leidžia kurti jutiklius, nereikalaujančius baterijų keitimo. Tipinės panaudojimo sritys:

- **Pramoninės ir transporto vibracijos:** pjezoelektrinės gembės tvirtinamos prie variklių, kompresorių, transporto priemonių rėmų ir generuoja energiją iš vibruojančių mechanizmų. Pvz., vibracijų energija gali maitinti padangų slėgio jutiklius, konstrukcijų būsenos stebėjimo mazgus. Literatūroje aprašyti atvejai, kai kelio dangos pjezoelementai renka energiją iš automobilių eismo – Naujajame Džersyje įrengę kelių sluoksnių PZT „tiltelio“ tipo keitiklį, generavo ~2,1 mW iš pravažiuojančio sunkvežimio padangų slėgio, sukuriančio ~270 kg apkrovą. [5][7]
- **Nešiojami ir dėvimi įrenginiai:** PVDF plėvelės integruojamos į drabužius, batų padus – vaikščiojimo, žmogaus judesių mechaninė energija gali krauti smulkius akumulatorius ar maitinti jutiklius. Pavyzdžiui, pjezoelektriniai vidpadžiai rinkdami energiją nuo žingsnių gali maitinti žingsniamatį ar Bluetooth siųstuvą. Taip pat biomechaninės energijos generatoriai (ant rankų, kojų sąnarių) generuoja kelis mV, pakankamus trumpais intervalais dėvimai elektronikai.[8][10]
- **Infrastruktūra ir aplinkos šaltiniai:** vėjo sukelti pastatų, tiltų virpesiai, vandens srautų sukeltos vibracijos vamzdžiuose – visa tai gali būti paversta elektra. Pjezoelektriniai generatoriai, dedami ant tiltų konstrukcijų, geležinkelių bėgių, didelių ventiliatorių – jie maitina bevielius jutiklius matuojant struktūrų būklę, vibracijas. Taip pat kuriami hidro-pjezoelektriniai generatoriai, kur vibraciją sukelia skysčio tėkmė (pvz., srauto sukelti vamzdžių sienelių virpesiai).[1][7]
- **Medicinos taikymai:** dėl mažo dydžio pjezoelementai naudojami implantuojamuose prietaisuose. Pvz., širdies plakimo ar plaučių judesių energija gali maitinti širdies stimuliatorių – tyrimuose bandomi pjezokeramikiniai elementai, tvirtinami prie diafragmos ar plaučių audinio, kad generuotų energiją iš kvėpavimo. Taip pat miniatiūriniai pjezogeneratoriai integruojami į kaulų varžtus ar protezus, kur judesių metu generuota srovė stimuliuoja kaulo gijimą (mechanotransdukcijai pagerinti).[3][4]

Skirtingiems pritaikymams renkamosi atitinkamo tipo generatorius: lankščioms dėvimoms sistemoms labiau tinka PVDF gembės ar diafragmos dėl lankstumo; transporto ir infrastruktūros atvejams – tvirtesni PZT bimorfai, cimbolinės ar daugiasluoksnės konstrukcijos elementai (pvz., po kelio danga). Siekiant praplėsti darbinį dažnių diapazoną, tiriamos nelineinės konstrukcijos (su magnetais, papildomomis spyruoklėmis, dvistabilės sistemos) – jos leidžia išgauti energiją platesniame dažnių ruože.

1.3. Impedanso suderinimo svarba pjezoelektriniuose energijos generatoriuose

Pjezoelektrinis generatorius, kaip energijos šaltinis, pasižymi vidiniu impedansu – paprastai didelė talpinė varža Z_P (dėl pjezo elemento talpos C_P ir mechaninių nuostolių). Norint iš šaltinio paimti maksimalią galią, apkrovos impedansas turi būti suderintas su šaltinio impedansu. Tai analogiška elektrotechnikos dėsniai: didžiausia galia į apkrovą išsiskiria, kai apkrovos varža lygi vidinei varžai. Pjezoelektrinio generatoriaus atveju suderinimas reiškia, kad apkrova turėtų kompensuoti pjezo elemento talpumą induktyvumu ir turėti tokio pat dydžio realiąją aktyvinę dalį, kaip pjezo elemento vidinė varža. Idealizuotame modelyje (srovės šaltinis su R_P ir C_P) tai reikštų, jog apkrovos impedansas $Z_L = R_P - jX_P$, kur X_P – pjezo elemento talpos reaktyvinė varža. Tokiu atveju teoriškai įmanoma išgauti maksimalią įmanomą galią iš generatoriaus. [17]



1.6 pav. Pjezo elemento impedanso priklausomybė nuo dažnio [30]

Paprastam elektros šaltiniui impedanso suderinimas paprastai reiškia tiesiog varžos pritaikymą ($R_L = R_{vid}$). Tačiau pjezo elementas – tai nuo dažnio priklausomas elektros šaltinis (žr. 1.6 pav.). Jo vidinė varža priklauso nuo vibracijos dažnio: prie rezonansinio dažnio (f_r) pjezo elementas elgiasi daugiausiai kaip aktyvus elementas (mechaninė energija efektyviausiai konvertuojama į elektros, Z_P tampa labiau aktyvinė). Būtent rezonanso taške pakanka suderinti aktyviają dalį ($R_L = R_P$), nes X_P ten artima nuliui. Jeigu vibracijos dažnis nesutampa su natūraliu gembės dažniu, pjezo elemento Z_P turės ženkliai reaktyvinę (talpinę) dedamąją. Tokiu atveju paprastas varžos suderinimas nebus optimalus – lieka „nepaimta“ energijos dalis, kaupiama ir išsklaidoma talpoje. Nesuderinus apkrovos, dalis pjezo elemente sukaupto krūvio nespėja atlikti darbo apkrovoje ir grįžta atgal į mechaninę sistemą kiekvieno ciklo metu. Tai pasireiškia papildomu mechaniniu slopinimu: jeigu apkrova per didelės varžos (beveik atvira grandinė), generatoriumi beveik neteka srovė – mechaninė sistema vibruoja laisviau (artėjama prie atviros grandinės dažnio, kuris kiek aukštesnis už trumpojo jungimo dažnį). Priešingu atveju, jei apkrova labai maža (trumpas sujungimas), didelė srovė tekės pjezoelementu generuodama priešingą elektrinį lauką, kuris stabdo mechaninį judėjimą – rezonansinis dažnis pasislenka žemyn ir sistema stipriai slopinama. Tik tinkamai parinkus apkrovos impedansą mechaninė ir elektrinė posistemės dirbs efektyviai: apkrova iš pjezoelemento ištrauks tiek energijos, kad mechaninė sistema bus optimaliai slopinama (ne per daug, kad neišnyktų virpesiai, ir ne per mažai, kad energija nesilptų medžiagoje). Impedanso suderinimas lemia energijos perdavimo efektyvumą – netinkamai parinkus apkrovą, didelė dalis vibracinės energijos arba neperkeliamą į elektros energiją, arba sugražinama mechanikai kaip reaktyvusis komponentas.[17][18]

Kaip minėta, pjezoelektrinio generatoriaus rezonansinis dažnis gali priklausyti nuo apkrovos. Teoriškai, pilnai suderinus (kompensavus talpą induktyviai), generatorius mato grynai aktyvinę apkrovą visame dažnių ruože – tai vadinama jungtiniu suderinimu, pasiekiamu idealiai parinkus rezonansinį induktorių. Deja, tai reikalauja didelės induktyvumo ritės (H eilės), nes pjezo elemento C_P paprastai $\sim nF$ – μF diapazone, o vibracijų dažniai žemi, ~ 10 – 200 Hz, kas realybėje sunkiai įgyvendinama miniatiūrinėse sistemose. Dažniau praktikoje tenkinamasi aktyviniu suderinimu prie rezonansinio taško: vibravimo dažnį parinkus artimą pačios gembės natūraliam dažniui, pjezoelementas turi tik nedidelę reaktyvią dedamąją, tuomet užtenka apkrovos varžą R_L sulyginti su vidine varža R_P . Taip gaunamas maksimalus galios išskyrimas prie rezonansinio dažnio. Nuokrypis nuo rezonanso stipriai mažina išgaunamą galią – čia ir slypi daugelio pjezoelektrinių generatorių problema: jie efektyvūs tik siaurame dažnių diapazone aplink rezonansinį dažnį. Jei apkrova nesuderinta sistema tampa per daug slopinama.[19]

Kadangi pjezogeneratoriai dažniausia generuoja labai nedideles galias (mikro ar milivatus), prarasti nors dalį energijos dėl impedanso nesuderinamumo yra prabanga. Tinkamas suderinimas gali padidinti naudingai išskiriamą galią kelis kartus. Literatūroje teigiama, kad dviejų pakopų grandis su jungtiniu suderinimu išplečia efektyvią juostą 156 % ir leidžia surinkti žymiai daugiau energijos. Kiti tyrimai rodo, kad sinchronizuoto komutavimo metodais galima pasiekti net 4–5 kartus didesnę galią nei su paprastu lygintuvu ir rezistyvine apkrova. Suderinimas svarbus ir sistemos stabilumui: pavyzdžiui, esant netinkamai apkrovai, pjezoelementas gali veikti ne optimaliame režime, kisti jo darbinis dažnis, todėl jei vibracijų spektras keičiasi, sistema greičiau nukryps nuo rezonanso taško. Suderinimo metodai (pvz., valdomi keitikliai) apima ir maksimalaus galios taško (MPPT) kontrolę, kuris leidžia automatiškai palaikyti apkrovos optimalią reikšmę kintant aplinkos sąlygoms.[18]

1.4. Impedanso suderinimo metodai

Literatūroje minima daug metodų, siekiančių efektyviai suderinti pjezoelektrinio šaltinio impedansą su apkrova. Juos galima suskirstyti į keletą grupių: pasyvieji (naudojant tik pasyvius R , L , C elementus), aktyviosios grandinės (impulsiniai keitikliai, galintys keisti apkrovos matuojamą impedansą), sinchronizuoto komutavimo metodai (angl. *SSHI* ir *SECE*) naudojant netiesines perjungimo technikas ir adaptyvūs MPPT algoritmais paremti sprendimai. Dažnai realiose sistemose taikomas metodų junginys (pvz., sinchronizuotas perjungimas kartu su aktyviu keitikliu). Žemiau detaliau nagrinėjami kiekvienas metodų tipas, jų principai, privalumai ir trūkumai.

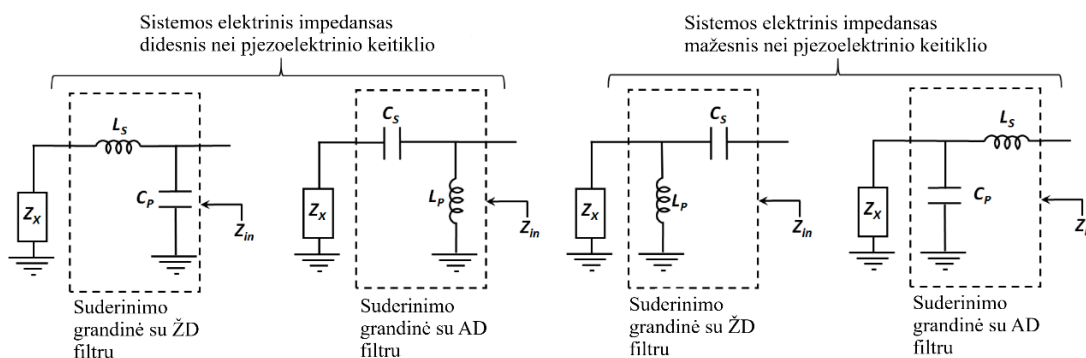
1.4.1. Pasyvūs suderinimo būdai (RC, LC)

Paprasčiausias būdas suderinti apkrovą – tinkamai parinkti rezistyvinę apkrovą. Kaip aptarta 1.3 poskyryje, pjezo elemento vidinė varža dirbant rezonansiniu dažniu tampa reali, tad egzistuoja optimali varžos reikšmė R_{opt} , kuriai esant galia didžiausia. Šią vertę galima nustatyti eksperimentiškai arba modeliuojant (dažnai ji artima pjezo elemento mechaninio slopinimo varžai). Tačiau rezistorius vienas pats neišsprendžia fazinio suderinimo – esant ne rezonanse, pjezo elemento talpa vis tiek sukelia fazės poslinkį tarp srovės ir įtampos, mažindama efektyvumą. Rezistyvinė apkrova tik užtikrina maksimalią galios išskyrimą rezonansiniame taške, bet už jo ribų efektyvumas krenta. Nepaisant to, pradinėse sistemose dažnai tiesiog naudojama optimali varža.

- Induktyvinis kompensavimas (LC rezonansas). Norint kompensuoti pjezoelemento talpą C_P , jungiama induktyvi ritė L . Dvi dažniausios konfigūracijos: L nuosekliai su pjezoelementu arba L lygiagrečiai. Nuoseklojoje konfigūracijoje galima kontroliuoti rezonansinį grandinės dažnį, kurį lemia pjezo elemento talpa ir išorinės ritės induktyvumas – tuomet bendras šaltinio

impedansas tampa grynai aktyvinis. Tinkamai parinkus L (kai $1/(\omega C_P) = \omega L$), pasiekiamas jungtinis suderinimas prie tam tikro dažnio. Tai ženkliai padidina išgaunamą galią ir išplečia darbinį dažnių juostos plotį šalia rezonanso. Pavyzdžiui, tyrime integruota jungtinė suderinimo grandinė leido net $\sim 1,56$ karto praplėsti dažnių intervalą, kuriame išlaikomas didelis efektyvumas, lyginant su vien aktyvine apkrova. Tokios grandinės trūkumas – praktinėje realizacijoje reikiamos induktyvumo vertės gali būti labai didelės (pvz., keli šimtai mH), jeigu rezonansas < 100 Hz ir $C_P \sim \mu\text{F}$. Tokių ričių dydis ir nuostoliai tampa nepraktiški mikroelektronikos taikymams. Lygiagrečioji L prijungimo schema gali padidinti sistemos standumą ir sukurti dvigubą rezonansą (mechaninį ir elektromechaninį), kas kartais naudojama juostos praplėtimui, tačiau valdyti tokią sistemą tampa sudėtinga.[17][18][19]

- Kai kur literatūroje minimi RC grandynai – pavyzdžiui, „snubber“ tipo grandynas viršįtampiams slopinti ar fazei koreguoti. Tačiau jie dažniau naudojami apsaugai, o ne energijos gavimo efektyvinimui. Pasyvūs transformatoriai ar talpiniai dalikliai taip pat gali suderinti įtampų lygį: pvz., jeigu pjezo elementas duoda labai aukštą įtampą ir mažą srovę, galima naudoti transformatorių, arba talpų daliklį tam, kad sumažinti įtampą ir padidinti srovę – taip efektyviau apkraunant šaltinį. Visgi, transformatoriai prideda svorio ir nuostolių, todėl retesni mikroelektronikos srityje.[20][21]



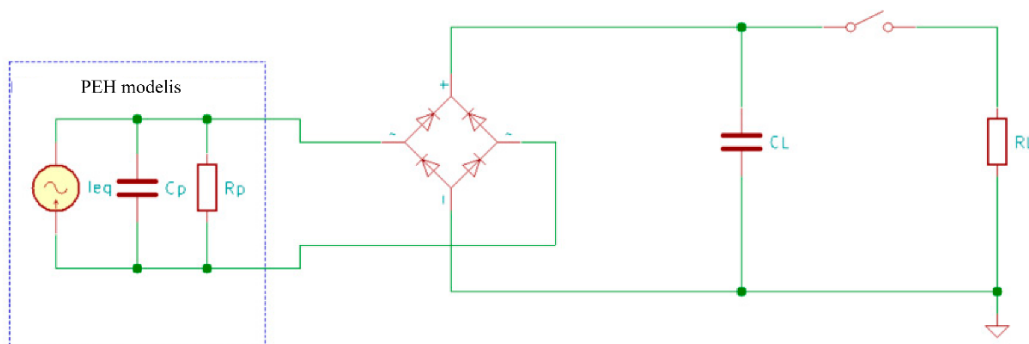
1.7 pav. Pasyvūs impedanso suderinimo metodai [31]

Pasyvūs metodai yra patrauklūs savo paprastumu ir kad nereikia atskiro maitinimo. Teisingai parinkus LC elementus, įmanoma išgauti maksimalią galią rezonanse. Tačiau jų efektyvumas labai priklauso nuo dažnio – sistema turi veikti praktiškai pastoviu dažniu (nes pasyvūs parametrai fiksuoti). Aplinkos vibracijų dažnis gali kisti, todėl pasyvus suderinimas gali dažnai būti neoptimalus. Be to, didelės induktyvumo ritės – netinkamos panaudojimui nešiojamose sistemose dėl dydžio. Dėl šių priežasčių naudingiau naudoti aktyvias grandines, galinčias prisitaikyti prie kintančio impedanso be didelių pasyvių elementų.

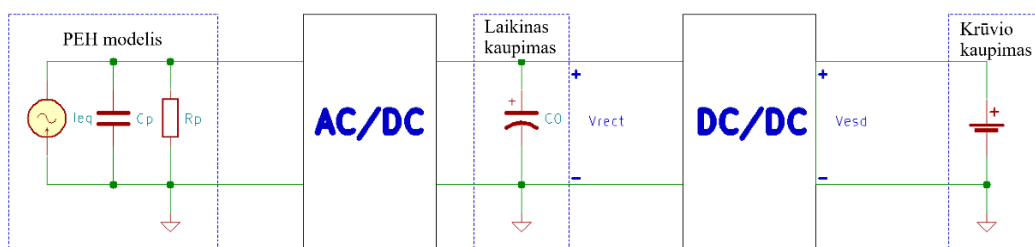
1.4.2. Aktyvios galios grandinės (impulsiniai keitikliai)

Šiuolaikinėse pjezoelektrinių generatorių sistemose dažnai naudojamas dviejų pakopų maitinimo grandinės principas. Pirmoje pakopoje pjezo elemento kintama srovė lyginama (AC–DC lygintuvu), antroje – prijungiamas DC-DC keitiklis (dažniausiai įtampą žeminantis, t. y. „buck“ tipo) tarp lygintuvo ir kaupiklio (kondensatoriaus ar superkondensatoriaus). Toks jungimas leidžia valdyti, kokią efektyvią apkrovą „mato“ pjezo elementas. DC-DC keitiklio valdymu pjezo elementą galima priversti dirbti optimaliame taške net kai energijos kaupiklio įtampa fiksuota. Maksimalaus galios taško sekimas (MPPT) dažnai integruojamas į aktyvaus keitiklio valdiklį – matuojant pjezo elemento

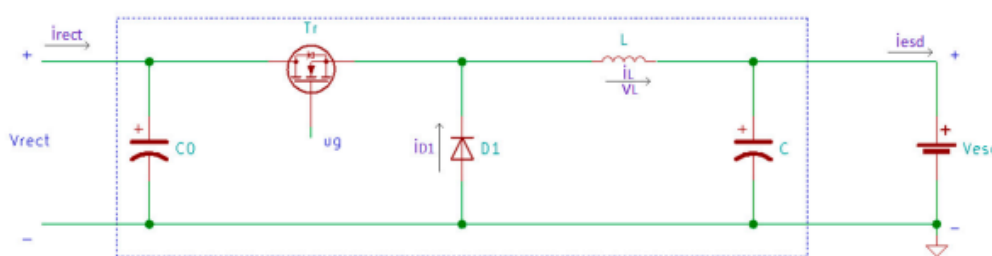
įtampa/srovė ir periodiškai koreguojant keitiklio darbo ciklą, galima palaikyti optimalias sąlygas. Literatūroje teigiama, kad panaudojus žeminantį DC-DC keitiklį, energijos perdavimas į kaupimo bateriją gali padidėti iki 3 kartų. Tai vyksta todėl, kad be keitiklio pjezo elemento įtampos išlyginimo metu įtampa kyla iki tam tikro lygio ir srovė gali nustoti tekėti dar neperdavus visos energijos (dėl impedanso neatitikimo). Aktyvus keitiklis priima tą perteklinę įtampą, paversdamas ją papildoma srove į kaupiklį – tokiu būdu pjezo elementas visą laiką veikia arčiau maksimalios galios taško.[17][20][21]



1.8 pav. AC-DC jungimas su standartiniu pjezoelektrinio keitiklio modeliu [1]



1.9 pav. Dviejų pakopų pjezoelektrinio generatoriaus principinė schema [1]



1.10 pav. Principinė DC-DC keitiklio schema [1]

Standartinis sprendimas – diodų tiltelio lygintuvas + „buck“ žeminantysis DC-DC keitiklis. Tiltinis lygintuvas (4 diodų tiltelis) paverčia pjezo elemento kintamą įtampą į nuolatinę (pulsuojančią). Ant kondensatoriaus kaupiasi įkrova, o toliau prijungtas „buck“ keitiklis nukrauna tą kondensatorių į apkrovą tik tada, kai kondensatoriuje pasiekta tam tikra optimali įtampa. Paprasčiausiu atveju galima naudoti DCM režimą: „buck“ konverteris sureguliuojamas taip, kad pjezo elementas „matytų“ tam tikrą efektyvią varžą. Literatūroje teigiama, jog reikia valdyti „buck“ keitiklio darbo ciklą pagal pjezo elemento atviros grandinės įtampos pusę – nustatyta, kad optimalu pjezo elementą apkrauti taip, kad jo įtampa būtų $\sim 0,5 V_{oc}$ (pusė atviros grandinės įtampos). Toks MPPT metodas (vadinamas pusė

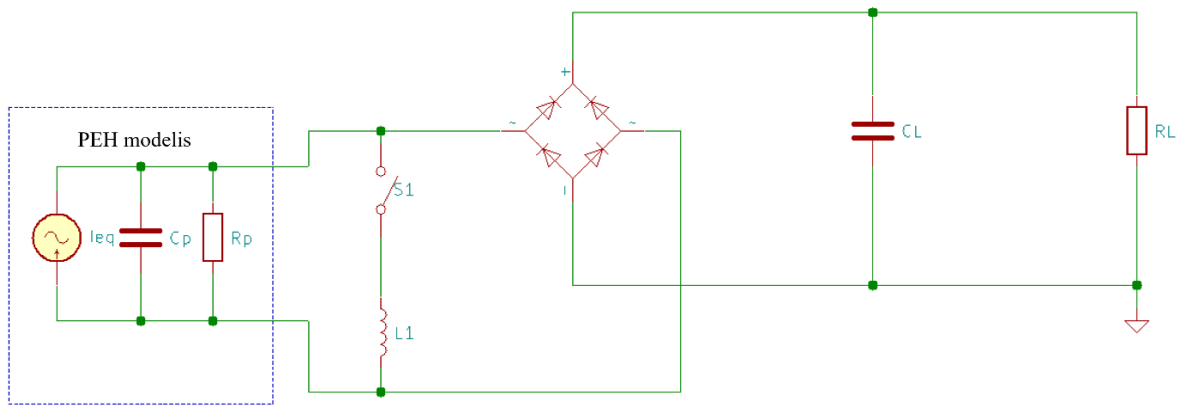
atviros grandinės, angl. *half-open-circuit voltage*) leidžia be sudėtingų algoritmų nustatyti keitiklį arti optimalaus taško. Kiti metodai – „perturb and observe“ (P&O) algoritmai, kai periodiškai keičiama apkrova nedideliu žingsniu ir stebima, ar galia didėja, kol surandamas maksimumas. Šiuolaikiniai keitiklių valdikliai gali veikti su itin mažu energijos suvartojimu (keli μW), todėl patiriami labai maži nuostoliai.[20][21]

Svarbu paminėti, kad pats DC-DC keitiklis sukuria nuostolius – dėl diodų/MOSFET perjungimo. Daugelis tyrimų siekia sukurti keitiklį, kurio nuotėkio srovė būtų nanoamperų lygio. Pvz., naujausiuose darbuose demonstruojami MPPT keitikliai su ~80 % efektyvumu, suvartojantys $<1 \mu\text{A}$ srovės valdymui. Aktyvioji suderinimo grandinė pranašesnė nei pasyvioji, kai vibracijų parametrai kinta: ji gali adaptuotis. Be to, ji leidžia kaupti energiją patogiu pavidalu – tiesiogiai įkrauti bateriją reikiama įtampa. Pasyvi schema (pvz., tik tiesioginis lygintuvas su rezistoriumi) paprastai negali pakrauti baterijos, nes reikalautų didelio rezistoriaus (maža srovė – ilgas krovimas). Aktyvus „buck“ keitiklis gali pakelti srovę ir sumažinti įtampą, taigi greičiau perduoti energiją į kaupiklį. Taip pat tam tikromis sąlygomis (kai labai maža vibracija) keitiklis gali išnaudoti visą surinktą energiją savo veikimui, jei sugeneruotos energijos itin mažai. Todėl dažnai naudojamos hibridinės sistemos: pvz., esant pakankamai vibracijai – įjungiamas MPPT keitiklis, o jei vibracija labai maža – sistema persijungia į tiesioginį režimą be keitiklio, kad nebūtų išekvojama energija keitikliui.

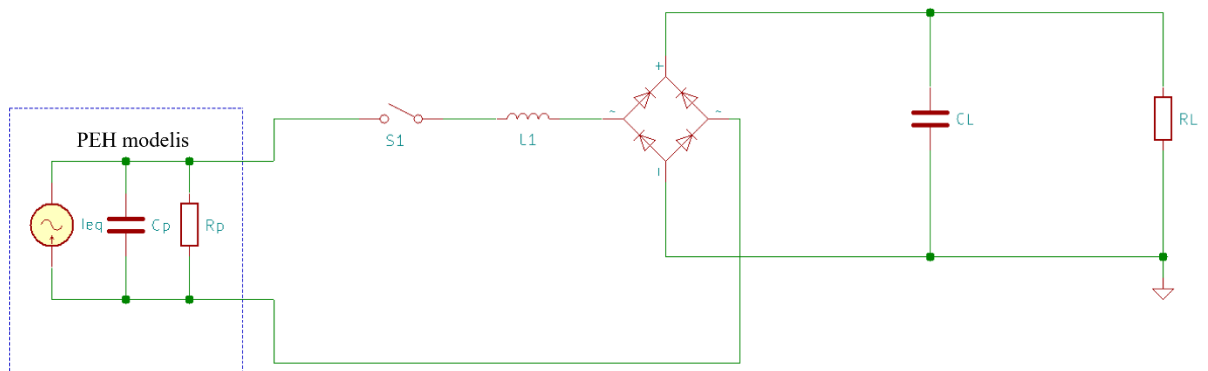
1.4.3. Sinchronizuoto perjungimo metodai (SSHI, SECE)

Net ir su geriausiu tiesiniu keitikliu lieka pjezoelemento talpos sukeliama problema – kintant mechaninei jėgai, pjezoelemento įtampos ir srovės fazės nesutampa (dėl C_p). Dalis energijos kaskart krauna tą talpą, o vėliau grįžta atgal į mechaninę energiją, sukeldama nuostolius. Sinchronizuoto komutavimo principas sprendžia būtent šią bėdą: jis siekia pašalinti arba išnaudoti tą talpoje sukauptą energiją kiekvieno ciklo metu. Du plačiausiai nagrinėjami metodai – SSHI (angl. *Synchronized Switch Harvesting on Inductor*) ir SECE (angl. *Synchronous Electric Charge Extraction*).

SSHI - sinchronizuotas jungimas su induktoriu. Šioje grandinėje naudojamas nedidelis induktyvumas ir elektroninis jungiklis, kurie sinchroniškai perjungia pjezo elementą tam tikrais momentais. Yra dvi SSHI atmainos: lygiagretus ir nuoseklus. Lygiagretus SSHI: pjezo elementui su diodų tilteliu prijungiamas lygiagrečiai LC kontūras (maža ritė L ir jungiklis S). Kiekvieną kartą, kai pjezo elemento vibracijos metu jo įtampa pasiekia maksimumą (t. y. momentas prieš keičiant poliarumą), elektroninis jungiklis trumpam uždaro L prijungimą. Susidaro rezonansinis L–C svyravimas, kurio metu per ketvirtadalį periodo pjezo elemento talpumo įtampa pakeičia ženklą (apsiverčia poliarumas). Tada jungiklis tuoj pat atidaromas, atjungiant rezonansinį kontūrą. Tokiu būdu, pjezo elemento talpumas nebepakraunamas iki pradinės įtampos, o įtampa pakeičia poliarumą. Taip prieš kiekvieną pusperiodį pjezo elemento įtampa yra atstatoma (arba apverčiama), dėl ko talpoje nelieka energijos, kuri grįžtų į mechaninę. Visa ta energija, kuri būtų iššvaistoma krovimui ir iškrovimui C_p , dabar nukreipiama per L į kaupiklį arba apkrovą. Kitaip tariant, SSHI neutralizuoja talpos efektą. Tiek lygiagretus, tiek nuoseklus SSHI siekia to paties – tik nuosekliame variante jungiklis ir L jungiami nuosekliai su pjezo elementu, kas sukelia įtampos persivertimą nuosekloje grandinėje.[22][23]



1.11 pav. Lygiagretus SSHI jungimas [1]

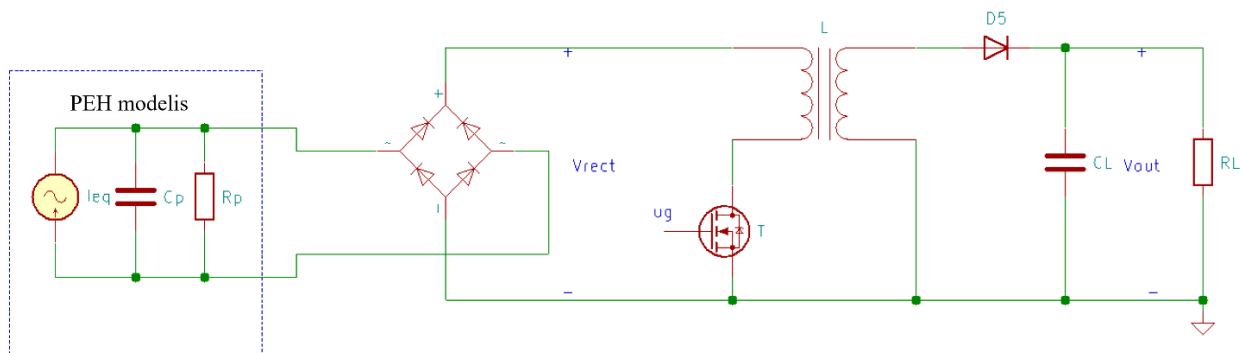


1.12 pav. Nuoseklus SSHI jungimas [1]

Šis metodas gali žymiai padidinti išgaunamą galią, ypač kai pjezo elementas turi didelę talpą (t.y. kai C_p sudaro didelę šaltinio impedanso dalį). Eksperimentais parodyta, kad SSHI sąsaja gali išgauti 3–5 kartus daugiau galios nei paprastas diodų tiltelis su optimaliu rezistoriumi. Pavyzdžiui, Lallart [23] nustatė apytiksliai 4 kartus galios padidėjimą su 3,3 mH rite. Pagrindinis trūkumas – reikia induktyvumo elemento, nors ir gerokai mažesnio nei jungtiniam pasyviai suderinimui. Visgi MEMS srityje tai nėra praktiška. Taip pat reikia aptikti įtampos maksimumus (nulinius srovės momentus). Tam dažnai naudojami maitinimo nereikalaujantys sprendimai, pvz., SSHI – Lallart ir Guyomar parodė grandinę, kuri pati aptinka maksimumą pjezo elemento įtampoje per tam tikrą slenkstį ir automatiškai sujungia jungiklį. Vis dėlto valdymo sudėtingumas didėja, ypač jei vibracijų dažnis kinta (nors SSHI veiks vis tiek, tik gali būti neidealiai sinchronizuotas). Dar vienas iššūkis – optimizuoti perjungimo trukmę. Reikia, kad jungiklis būtų įjungtas kaip tik tokiam laikui, kad įtampa apsiverstų ir jokios energijos neliktų talpoje. Per ilgas arba per trumpas įjungimas sukels didesnius nuostolius. Nepaisant to, SSHI laikomas labai efektyviu, ypač mažos galios sistemose, kur tiesioginio pjezo elemento talpumui perkėlimui neužtenka – net ir menkas pjezo elemento talpos kompensavimas duoda sąlyginai daug naudos.[23][25][26]

SECE (sinchronizuotas krūvio ištraukimas) metodas šiek tiek kitoks – jo idėja yra visiškai iškrauti pjezo elementą kiekviename pusperiodyje nepriklausomai nuo apkrovos. SECE veikia taip: kai pjezo elemento srovė kerta nulį (arba įtampa pasiekia amplitudinę vertę), grandinė sujungia pjezo elementą su induktyvumu ir kaupimo elementu taip, kad visas krūvis nuo pjezo elemento talpos būtų perneštas į kaupiklį. Kitaip tariant, pjezo elemento kondensatorius visiškai iškraunamas kiekvieno pusperiodžio

pabaigoje. Todėl, prasidedant kitam pusperiodžiui, pjezoelementas visada startuoja nuo 0 įtampos (ar arti jos). Tai reiškia, kad apkrovos varža išvis neįtakoja, kiek krūvio bus paimta – jis visada paimamas visas (iki iškrovimo). Dėl to SECE jungimas teoriškai nepriklauso nuo apkrovos. Praktikoje SECE realizuojamas su diodų tilteliu ir DC-DC konverteriu, veikiančiu kaip „flyback“ keitiklis: trumpais intervalais, sinchronizuotais su srovės nuliais, tranzistorius jungia induktyvumą tarp pjezo elemento ir kaupiklio, taip ištraukdamas krūvį iš pjezo elemento. Po to pjezo elementas vėl atjungiamas iki kito nulinio kirtimo. Didžiausias privalumas – nepriklausomumas nuo apkrovos. Tai labai naudinga, kai apkrova gali kisti (pvz., kartais įrenginys naudoja energiją, kartais ne) – SECE užtikrina, kad generavimo grandis visada dirbs optimaliu režimu, o galia tiesiog kaupsis kaupiklyje, nešvaistoma vidaus varžose. Kitas privalumas – paprasta integruoti į esamą keitiklį: SECE reikalauja vieno tranzistoriaus, induktyvumo ir diodų (iš esmės tai „flyback“ DC-DC keitiklis). Jau yra LSI lustų, gebančių veikti SECE režimu. Nors teoriškai apkrova neįtakoja, bendras efektyvumas paprastai mažesnis nei SSHI. Priežastis – visos energijos išėmimas sukelia didelę momentinę srovę per induktyvumą, o jos metu dalis energijos prarandama aktyvinėje varžoje (indukcijos nuostoliai). Tyrimai rodo, kad SECE gali surinkti tik $\sim 1/4$ tos energijos, kurią surenka idealus SSHI esant sėkmingai sinchronizacijai. Kitaip tariant, jei pjezo elementas gali atiduoti didelę galią, SSHI bus efektyvesnis nei SECE. Tačiau mažos galios atvejais (labai mažos vibracijos arba labai maža pjezo elemento talpa) SECE pranašesnis – nereikia taikyti apkrovos, ir jo pakanka surinkti viską, ką pjezo elementas sugeneravo. Dar vienas SECE trūkumas – sudėtingesnis valdymas: reikia greito valdiklio, nustatančio srovės nulį ir valdančio keitiklį. Taip pat, SECE reikalinga ganėtinai sudėtingos valdymo grandinės, kas praktikoje sudėtinga įgyvendinti.[24][27][29]



1.13 pav. SECE jungimas [1]

Be SSHI ir SECE, yra variantų kaip MULTI-SSHI, Parallel-SSHI vs Series-SSHI, Bias-Flip (BF) ir hibridinės schemas (pvz., derinant SECE ir SSHI). Metodai su daugkartiniu įtampos apvertimu per vieną pusperiodį, siekiant dar labiau sumažinti nuostolius; arba iš anksto įkrauti pjezoelementą (Bias-Flip) tam tikro poliarumo įtampa, kad padidinti gaunamą krūvį. Šie metodai gali dar labiau pagerinti energijos surinkimą. Pavyzdžiui, MCE (angl. *multiple charge extraction*) metodas padalina įkrovos ištraukimo procesą į kelis žingsnius, taip sumažindamas piko sroves ir nuostolius. „Pre-bias“ arba išankstinio užkrovimo metodas – prieš prasidedant ciklui, pjezo elementas prijungiamas prie nedidelės įtampos šaltinio, kad jo įtampa startuotų ne nuo nulio, o nuo tam tikros įtampos, taip padidinant išgaunamą energiją. Sinchronizuoto perjungimo metodai pasižymi tuo, kad nereikalauja išorinio maitinimo valdymui (gali būti suveikiantys nuo paties pjezo elemento signalo) ir labai sumažina nuostolius. Jie tarsi sujungia pasyvių ir aktyvių sprendimų privalumus: pasinaudoja induktyvumu efektyvumui kelti, bet neturi ištinio galios elektronikos nuostolio (tik trumpi perjungimo momentai). Inercinės sistemos su pastoviu dažniu – ideali sritis SSHI/SECE taikyti (pvz.,

variklio pastovios vibracijos). Jei dažnis labai kinta, tuomet MPPT aktyvus keitiklis gali būti lankstesnis. Dėl to neretai derinami sprendimai: pvz., P-SSHI su MPPT „buck“ keitikliu, kad ir fazė būtų sutvarkyta, ir priderinta apkrova. [24][27][29]

1.4.4. Adaptyvūs impedanso sekimo metodai (MPPT algoritmai)

Aktyvūs keitikliai suteikia galimybę valdyti apkrovos „matomą“ impedansą dinamiškai. MPPT (*angl. Maximum Power Point Tracking*) – tai algoritmai, kurie yra naudojami saulės ir vėjo energetikoje, tačiau taikomi ir pjezoelektriniuose generatoriuose. Šio algoritmo esmė - realiu laiku prisitaikyti prie šaltinio parametrų pokyčių, kad būtų nuolat išgaunama maksimali galia. Vibracijų aplinkoje amplitudės ir dažniai gali kisti: pvz., mašina gali vibruoti skirtingai priklausomai nuo režimo, keistis vėjo greitis. Optimali apkrova R_{opt} nėra pastovi – ji priklauso nuo vibracijos amplitudės ir dažnio. MPPT valdiklis sprendžia šias problemas stebėdamas galingumą (ar įtampą/srovę) ir periodiškai koreguoja keitiklio parametrus.[20]

MPPT algoritmų pavyzdžiai:

- P&O (*angl. perturb and observe*): valdiklis kas tam tikrą intervalą šiek tiek pakeičia darbo ciklą (pvz., padidina arba sumažina „buck“ keitiklio impulsų plotį) ir pamatuoja, kaip pasikeitė galia (arba pjezo elemento išėjimo įtampa). Jeigu galia padidėjo – tęsia keitimą ta pačia kryptimi, jei sumažėjo – keičia kryptį. Taip nusistovi ties maksimumu. Šis metodas plačiai taikomas dėl paprastumo, bet esant triukšmingoms sąlygoms gali svyruoti aplink optimalią reikšmę. Taip pat, pademonstruota uždaro ciklo sistema, kur „buck-boost“ keitiklis su P&O algoritmu sėkmingai pritaikė pjezo elemento šaltinio įtampą skirtingų vėjo vibracijų scenarijams – modeliavimas parodė stabilų sensoriaus maitinimą net kintant vibracijos lygiui.[20]
- FOCV (*angl. Fractional Open-Circuit Voltage*): periodiškai trumpai atjungiama apkrova ir pamatuojama pjezo elemento atviros grandinės įtampa V_{oc} . Teoriškai žinoma, kad optimali apkrova leidžia pjezoelementui vibruoti su $\sim 1/2$ atviros įtampos amplitude. Tad po matavimo, valdiklis nustato keitiklio išėjimo tikslinę įtampą $= 0,5 * V_{oc}$. Šis metodas labai greitas ir nereikalauja ilgos optimizacijos, tačiau turi būti daromas pakankamai retai, kad pernelyg netrikdytų generavimo (nes reikia atjungti apkrovą matavimui). Kai kurie lustai (pvz., LTC3331) naudoja tokį principą – kas kelias sekundes atjungia pjezo elementą ir matuoja jo įtampą, taip sureguliuodami MPPT.[17][21]
- Histerezės valdymas: kai kurie autoriai siūlo palaikyti pjezo elemento įtampą tarp dviejų ribų, tarp kurių vidurkis atitinka optimumą. Pvz., valdiklis leidžia pjezo elemento įtampai kilti iki viršutinės ribos, tuomet stipriau apkrauna (įjungia keitiklį), kol nukrenta iki apatinės ribos, tada vėl atleidžia. Tai sukuria bangavimą, bet vidutiniškai pjezo elementas dirba prie tam tikros įtampos. Toks sprendimas paprastas analogiškai realizuoti (poros komparatorių sukeliamas bangavimas), tačiau nėra tiksliai optimalus, labiau užtikrina, kad neperžengia tam tikrų ribų.[17][19]

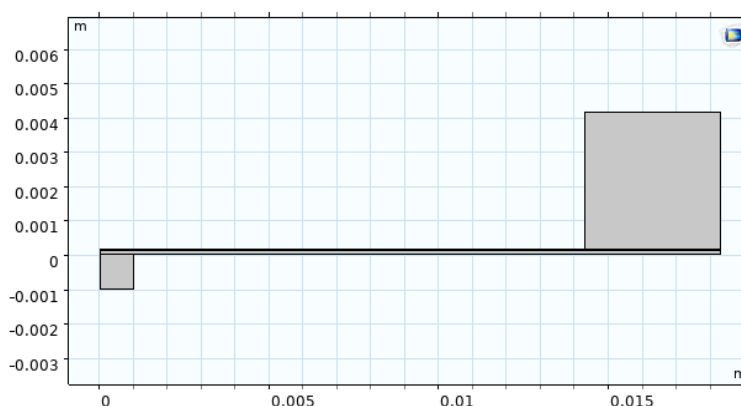
MPPT reikalauja itin efektyvių žemos galios sprendimų – valdiklis turi suvartoti μW ar mažiau, kitaip gali išseikvoti didelę dalį pagamintos energijos. Taip pat, per greitas MPPT reagavimas gali sugeneruoti triukšmą – reikia rasti kompromisą tarp greito reagavimo pasikeitus sąlygoms ir stabilumo. Nepaisant to, adaptuojantys algoritmai yra būtini, jei siekiama ilgalaikio, autonomiško sistemos veikimo realiomis sąlygomis, kur parametrai dažnai kinta.[21]

2. Efektyvumo modeliavimas COMSOL

Šiame skyriuje COMSOL aplinkoje modeliuojamas bimorfinis pjezoelektrinis energijos generatorius ir analizuojamos jo charakteristikos. Modeliavimas atliekamas siekiant nustatyti optimalius PEH geometrinius ir elektrinius parametrus, įvertinti rezonansinio režimo įtaką energijos generavimui bei sudaryti realioms sąlygoms artimą pjezoelektrinio generatoriaus modelį tolimesniam energijos surinkimo grandinių tyrimui. Gauti rezultatai naudojami Norton ekvivalentinės grandinės sudarymui ir įvairių elektrinių topologijų modeliavimui, orientuojantis į mažos galios sistemų kūrimą.

2.1. Bimorfinio PEH modelis

Siekiant ištirti pjezoelektrinio energijos generatoriaus veikimą ir įvertinti skirtingų parametrų įtaką generuojamai galiai, COMSOL aplinkoje sukurtas bimorfinio pjezoelektrinio energijos generatoriaus modelis. Bimorfinė konstrukcija pasirinkta dėl didesnės generuojamos galios, kadangi deformuojantis gembei abu pjezoelektriniai sluoksniai generuoja elektrinę krūvį. Modelis sudarytas iš metalinės šerdies, dviejų pjezo elemento sluoksnių ir inertinės masės, kuri naudojama rezonansiniam dažniui mažinti bei mechaninei deformacijai padidinti. Sukurtas 2D modelis pateikiamas 2.1 pav.

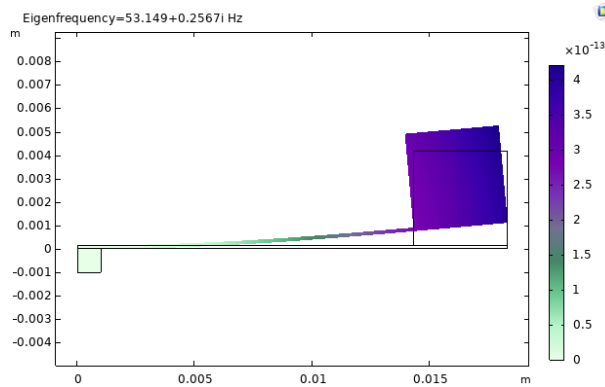


2.1 pav. Pjezoelektrinio energijos generatoriaus 2D modelis

Gembės šerdies storis 0.1 mm Pjezoelektrinės medžiagos sluoksnių storiai tiriami tolimesnėje eigoje. Šerdies ir inertinės masės medžiaga – plienas, o pjezoelektrinė medžiaga naudojama PVDF.

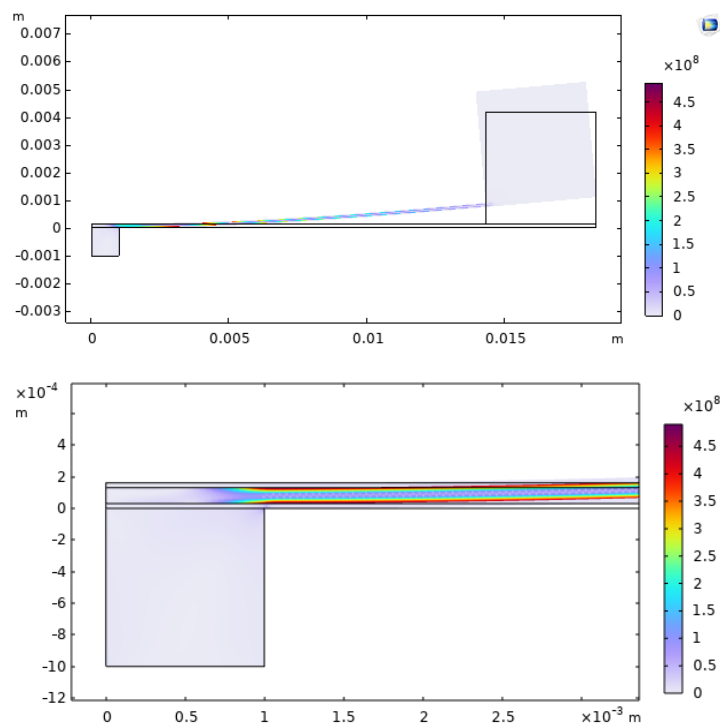
2.2. Savasis dažnis

Atliekama savaiminio dažnio (angl. *eigenfrequency*) analizė, kuri nustato natūralųjį mechaninės sistemos virpesių dažnį, kuriuo sistema linkusi vibruoti be išorinio periodinio žadinimo, kai ji yra tik trumpai pastumiamą. Savaiminis dažnis priklauso nuo geometrijos, medžiagų savybių (Jungo modulio, tankio) ir ribinių sąlygų. Ši analizė atliekama siekiant nustatyti rezonansinį sistemos dažnį ir suderinti pjezoelektrinio generatoriaus konstrukciją su aplinkos vibracijų dažniu, kad būtų generuojama maksimali galia.



2.2 pav. Sistemos poslinkio amplitudė svyruojant savaiminiu dažniu

Atlikus analizę gautas savaiminis dažnis – $53.149 + 0.25671i$ Hz. Tačiau reikia nesuklysti – savaiminis dažnis ir rezonansas nėra tas pats dažnis. Dėl slopinimo ir elektromechaninio ryšio rezonansinis dažnis šiek tiek skiriasi nuo savaiminio.

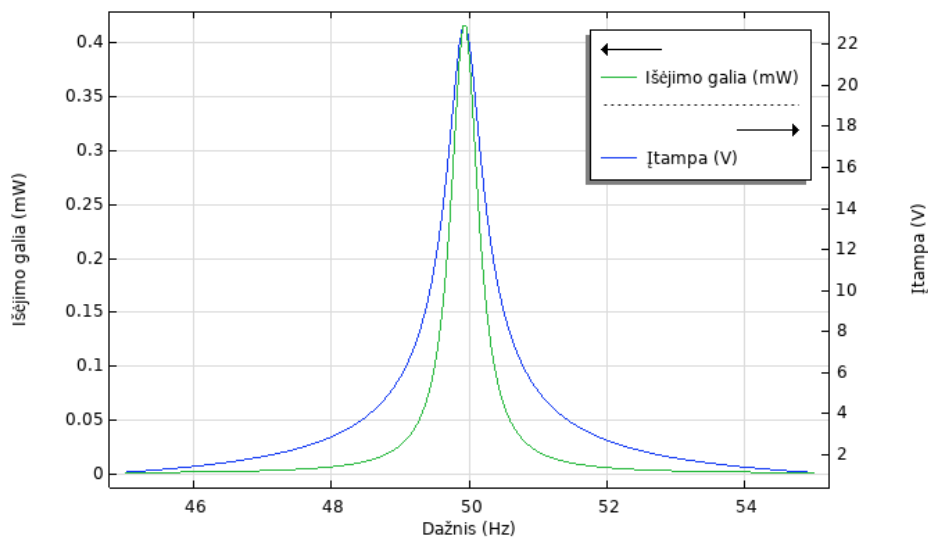


2.3 pav. Von Mises įtempių lygiai modelyje

Paveiksle parodytas Von Mises įtempių pasiskirstymas (peak) konstrukcijoje. Matyti, kad didžiausios mechaninės įtampos koncentruojasi prie įtvirtinimo vietos, kur lenkimo momentas yra didžiausias. Tai atitinka teorinius lanksčių sijų modelius, pagal kuriuos maksimalios įtampos atsiranda fiksuoto galo srityje, o artėjant prie laisvo galo jos palaipsniui mažėja. Sijos deformacijos forma rodo pirmąjį lenkimo režimą, kuriam būdingas vienkryptis išlinkimas be mazgų per visą ilgį. Tai ypač palanku pjezoelektriniam energijos generatoriui, nes pjezoelektrinis sluoksnis šiuo režimu patiria didžiausią tempiamąją ir gniuždomąją deformaciją, o tai lemia didesnę generuojamą elektros įtampą. Laisvajame gale esanti masė padidina inerciją, todėl sumažina savąjį dažnį ir leidžia generatoriui efektyviau veikti žemų dažnių vibracijų aplinkoje.

2.3. Vibracijų įtaka generuojamai įtampai ir galiui

Atliekama pjezoelektrinio energijos generatoriaus dažninė analizė, siekiant įvertinti, kaip žadinimo dažnis veikia generuojamą įtampą ir išėjimo galią. Tokia analizė leidžia nustatyti rezonansinį dažnį, kuriame sistema generuoja didžiausią energiją, ir įvertinti generatoriaus darbo efektyvumą skirtinguose dažnių diapazonuose. Gauti rezultatai yra svarbūs tolimesniam grandinių projektavimui ir optimalių darbo sąlygų parinkimui, nes didžiausias energijos surinkimo efektyvumas pasiekiamas tada, kai žadinimo dažnis sutampa su mechaniniu rezonansu.

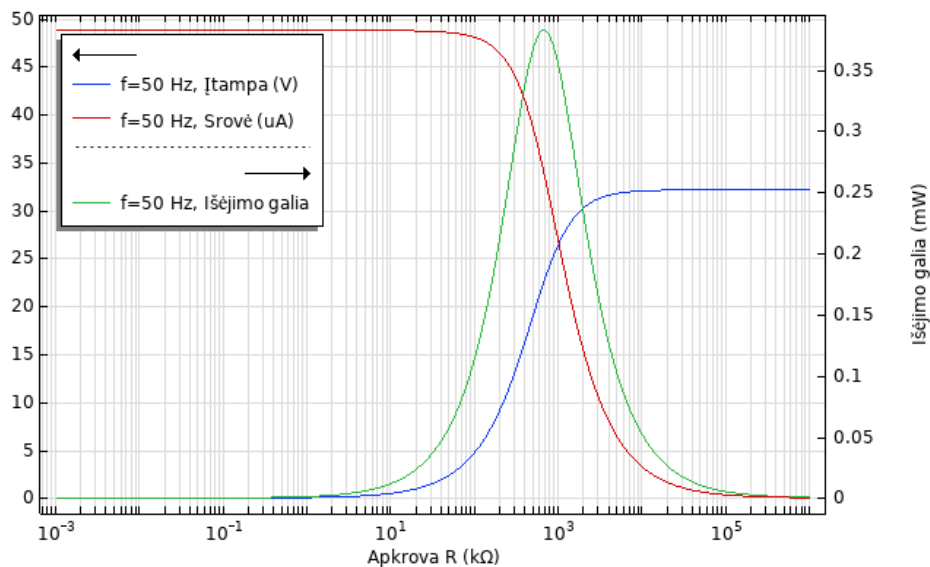


2.4 pav. Įtampos ir išgaunamos galios priklausomybė nuo dažnio

Šiame grafike pateikta pjezoelektrinio energijos generatoriaus dažninė charakteristika, kurioje pavaizduota generuojamos įtampos ir elektrinės galios priklausomybė nuo žadinimo dažnio. Matyti aiškus rezonansinis maksimumas prie 49,9 Hz, kuris labai gerai sutampa su anksčiau nustatytu pirmuoju savuoju dažniu (angl. *eigenfrequency*). Šiuo dažniu generuojama didžiausia įtampa $U = 22,856$ V, o išėjimo galia pasiekia $P = 0,4146$ mW. Tai patvirtina, kad sistema veikia rezonansiniame režime, kuriame gembės konstrukcija patiria didžiausią mechaninę deformaciją, o pjezoelektrinis sluoksnis generuoja didžiausią elektrinį krūvį. Tolistant nuo rezonansinio dažnio tiek įtampa, tiek galia sparčiai mažėja, kas būdinga mažai slopinamoms mechaninėms sistemoms, kurioms rezonanso srityje būdingas ryškus amplitudės padidėjimas. Nors įtampos maksimumas yra labai siauras, galios maksimumas yra kiek platesnis, nes galia priklauso ne tik nuo įtampos, bet ir nuo apkrovos bei energijos perdavimo efektyvumo. Tolimesniems tyrimams pasirinktas 50 Hz dažnis, nes jis yra artimas rezonansiniam ir leidžia supaprastinti elektrinių grandinių analizę. Šiuo dažniu generuojama įtampa siekia $U = 21,931$ V, o galia – $P = 0,3817$ mW, t. y. tik nežymiai mažesnė nei maksimali reikšmė. Gauti rezultatai patvirtina, kad optimalus energijos išgavimas vyksta tik siaurame dažnių diapazone, todėl projektuojant pjezoelektrinius energijos generatorius būtina suderinti jų rezonansinį dažnį su aplinkos vibracijų dažniu. Tai taip pat pagrindžia gembės geometrinį parametrų ir inertinės masės parinkimo svarbą.

2.4. Apkrovos įtaka generuojamai įtampai ir galiai

Atliekama analizė kaip apkrovos varža įtakoja pjezoelektrinio energijos generatoriaus generuojamą įtampą ir išėjimo galią. Tokia analizė atliekama siekiant nustatyti optimalią apkrovos varžą, kuriai esant pasiekiamas maksimalus galios perdavimas. Gauti rezultatai leidžia įvertinti generatoriaus ir apkrovos suderinimo svarbą bei yra būtini tolimesniam energijos surinkimo grandinių projektavimui.

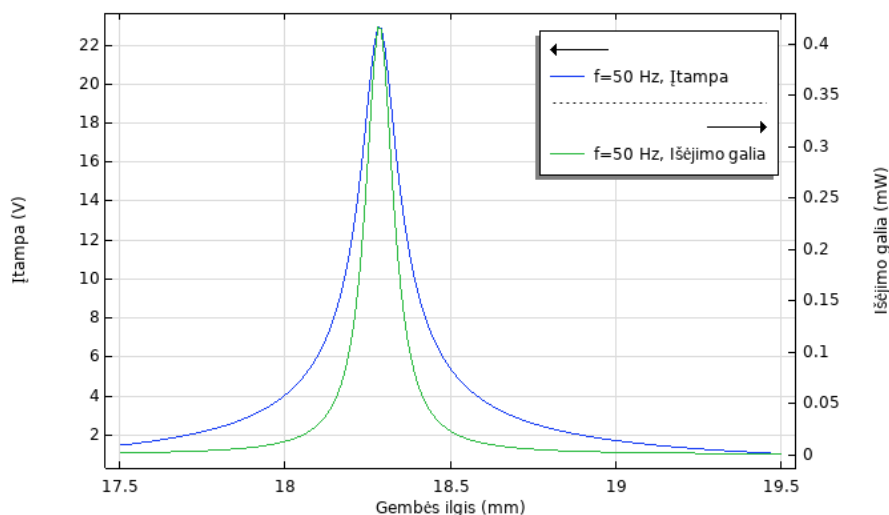


2.5 pav. Įtampos, srovės ir išgaunamos galios priklausomybė nuo apkrovos

Šiame grafike pavaizduota apkrovos varžos (R_{load}) įtaka generuojamai įtampai ir elektrinei galiai, esant fiksuotam žadinimo dažniui 50 Hz, kuris atitinka sistemos rezonansinį dažnį. Mėlyna kreivė rodo, kad didėjant apkrovos varžai, išėjimo įtampa didėja ir artėja prie ribinės, t. y. atviros grandinės įtampos. Esant mažoms varžoms, pjezoelektrinis elementas yra stipriai apkraunamas, todėl įtampa išėjime yra maža, o didėjant R_{load} , srovė mažėja ir įtampa didėja. Didžiausia galia (žalia kreivė žr. 2.5 pav.) $P = 0.3821$ mW pasiekama prie 660.69 k Ω apkrovos varžos, kai įtampa yra $U = 22.471$ V, o srovė – $I = 34.011$ μ A. Šis rezultatas rodo jog didžiausia galia perduodama tada, kai apkrovos varža yra artima vidinei generatoriaus varžai arba jo kompleksiniam impedansui rezonansiniame dažnyje. Taip pat matyti, kad esant labai didelėms apkrovos varžoms, įtampa pasiekia maksimalias reikšmes, tačiau išėjimo galia mažėja ir artėja prie nulio, nes srovė praktiškai neteka. Priešingai, esant labai mažoms varžoms, srovė yra didelė, tačiau dėl mažos įtampos galia taip pat išlieka nedidelė. Gauti rezultatai patvirtina, kad tinkamas apkrovos parinkimas yra kritiškai svarbus siekiant maksimalios energijos išgavimo. Praktiniu požiūriu tai reiškia, kad energijos kaupimo ir valdymo grandinės turi būti suderintos su pjezoelektrinio generatoriaus vidiniu impedansu, kad būtų užtikrintas efektyvus galios perdavimas.

2.5. Gembės ilgio įtaka generuojamai įtampai ir galiai

Analizuojama gembės ilgio įtaka pjezoelektrinio energijos generatoriaus generuojamai įtampai ir išėjimo galiai. Tokia analizė atliekama siekiant įvertinti, kaip geometriniai konstrukcijos parametrai veikia mechanines savybes ir rezonansinį dažnį, o tuo pačiu – ir energijos generavimo efektyvumą. Gauti rezultatai leidžia nustatyti optimalius konstrukcijos matmenis, užtikrinančius maksimalų energijos išgavimą.

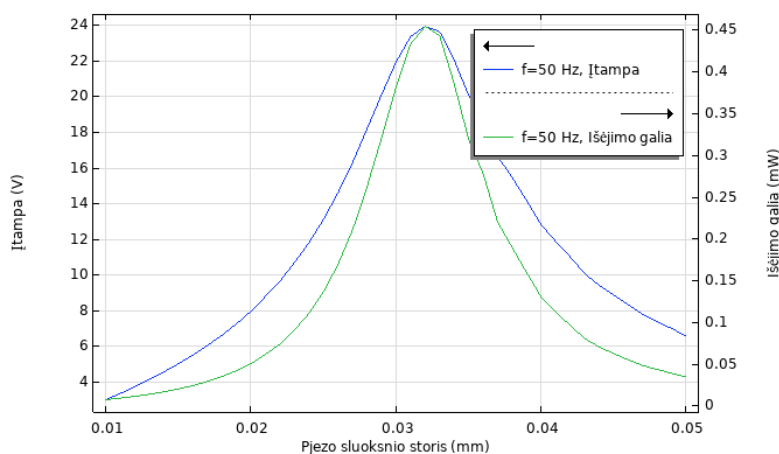


2.6 pav. Įtampos ir išgaunamos galios priklausomybė nuo gembės ilgio

Šiame grafike pavaizduota pjezoelektrinio energijos generatoriaus sijos ilgio (L) įtaka generuojamai įtampai ir elektrinei galiai, esant pastoviam žadinimo dažniui 50 Hz. Mėlyna kreivė rodo išėjimo įtampos priklausomybę nuo sijos ilgio, o žalia – į apkrovą perduodamos elektrinės galios pokytį. Matyti aiškiai išreikštas maksimumas, kuris pasiekiamas prie $L = 18,28$ mm, kai išėjimo galia siekia $P = 0,4155$ mW. Šis taškas atitinka konstrukcijos savąjį dažnį, suderintą su žadinimo dažniu, todėl sistema veikia rezonansiniame režime. Keičiant sijos ilgį, keičiasi jos masės ir standumo santykis, dėl ko kinta savasis virpesių dažnis. Kai šis dažnis sutampa su žadinimo dažniu (50 Hz), pasiekiamas maksimali mechaninė deformacija, o kartu ir didžiausia generuojama įtampa bei galia. Esant trumpesnėms arba ilgesnėms sijoms, savasis dažnis nutolsta nuo rezonansinės reikšmės, todėl rezonansinis efektas silpnėja ir tiek įtampa, tiek galia mažėja. Praktiniais sumetimais tolimesniems tyrimams pasirinktas $L = 18,3$ mm sijos ilgis, kuris yra labai artimas optimaliam ir leidžia išlaikyti aukštą generuojamą galią ($P \approx 0,38$ mW), tuo pačiu užtikrinant paprastesnę konstrukcijos realizaciją. Šie rezultatai patvirtina, kad sijos ilgis yra vienas svarbiausių konstrukcinių parametru, leidžiančių suderinti pjezoelektrinį energijos generatorių su konkrečiomis aplinkos vibracijomis. Praktikoje tai reiškia, kad optimalus energijos surinkimas gali būti pasiektas tik tiksliai parenkant geometrinius parametrus pagal vyraujančią žadinimo dažnį.

2.6. Pjezoelektrinės medžiagos storio įtaka generuojamai įtampai ir galiui

Analizuojama pjezoelektrinės medžiagos sluoksnio storio įtaka generuojamai įtampai ir išėjimo galiui. Tokia analizė atliekama siekiant įvertinti, kaip aktyviosios pjezoelektrinės medžiagos matmenys veikia elektromechaninį rezultatą ir bendrą generatoriaus efektyvumą. Gauti rezultatai leidžia nustatyti tinkamiausią pjezo elemento sluoksnio storį, kuriam esant pasiekiamas didžiausias energijos išgavimas.

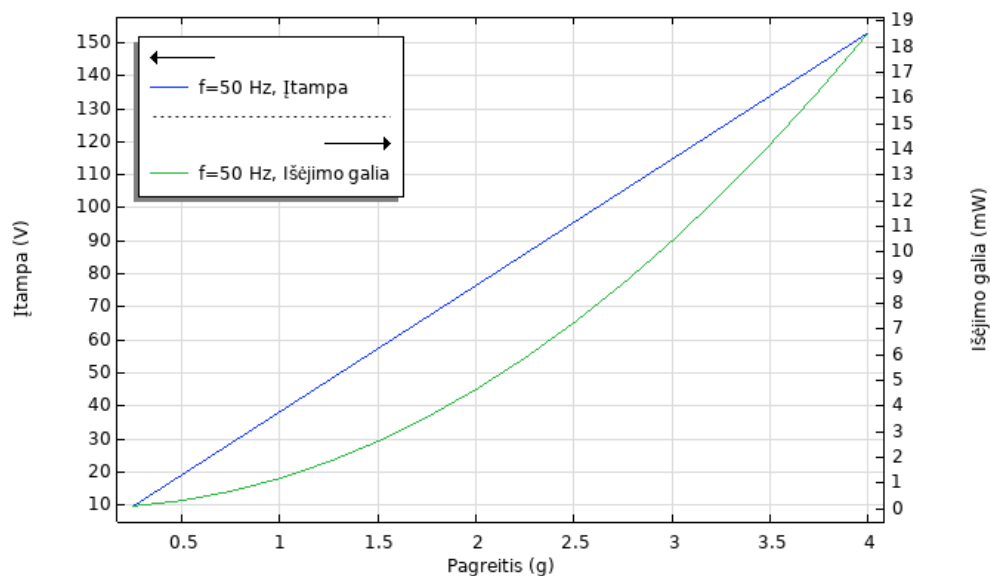


2.7 pav. Įtampos ir išgaunamos galios priklausomybė nuo pjezoelektrinės medžiagos storio

Šiame grafike pavaizduota pjezoelektrinio sluoksnio storio t_{pz} įtaka generuojamai įtampai ir elektrinei galiui, esant pastoviam 50 Hz žadinimo dažniui. Matyti, kad didžiausia išėjimo galia pasiekama prie $t_{pz}=0,032$ mm, kai $P = 0,4538$ mW. Šis maksimumas rodo, kad egzistuoja optimalus pjezoelektrinio sluoksnio storis, kuriam esant elektromechaninės energijos konversija yra efektyviausia. Didėjant pjezoelektrinio sluoksnio storiui, didėja generuojama įtampa, tačiau kartu keičiasi konstrukcijos standumas ir neutraliosios ašies padėtis. Per plonas pjezo elemento sluoksnius turi silpnesnį elektromechaninį ryšį, todėl generuojama galia yra mažesnė. Per storas sluoksnius padidina bendrą gembės standumą, sumažina lenkimo deformaciją ir taip riboja energijos išgavimą. Dėl šios priežasties galios kreivėje susiformuoja aiškūs maksimumai. Nors didžiausia galia gaunama prie 0,032 mm storio, praktinėje realizacijoje pasirinktas 0,03 mm PVDF sluoksnis, nes tokio storio plėvelė yra lengviau prieinama ir realistiškiau pritaikoma gamyboje. Ši reikšmė yra artima optimaliam taškui, o gauta galia siekia apie 0,38 mW, todėl pasirinkimas laikomas pagrįstu tiek techniniu, tiek praktiniu požiūriu.

2.7. Aplinkos vibracijų pagreičio įtaka generuojamai įtampai ir galiai

Analizuojama mechaninio žadinimo (G jėgos) pagreičio įtaka pjezoelektrinio energijos generatoriaus generuojamai įtampai ir išėjimo galiai. Ši analizė atliekama siekiant įvertinti, kaip vibracijų intensyvumas veikia išgaunamą energiją. Gauti rezultatai leidžia nustatyti, kokiomis mechaninio žadinimo sąlygomis generatorius gali užtikrinti didžiausią energijos išgavimą.

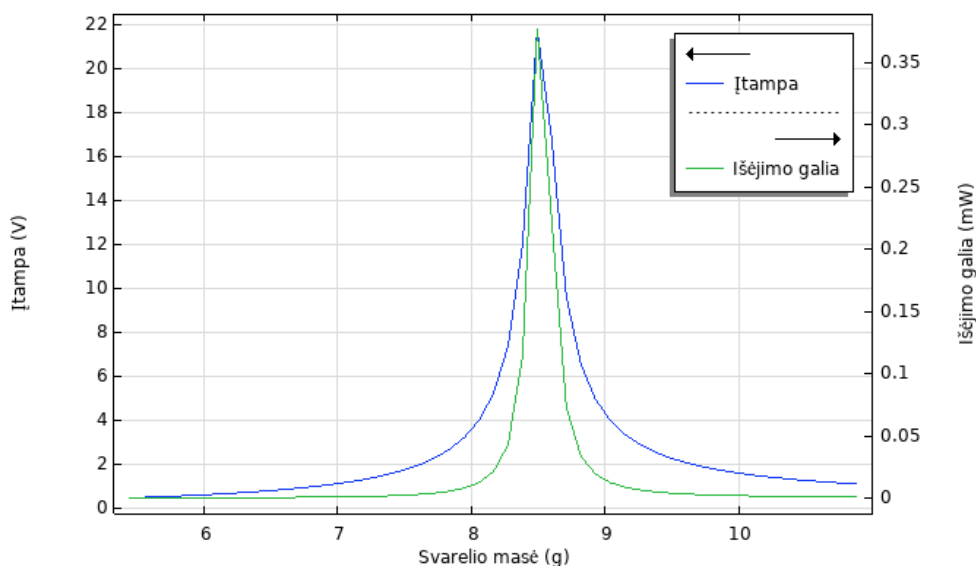


2.8 pav. Įtampos ir išgaunamos galios priklausomybė nuo pagreičio (g)

Šiame grafike pavaizduota žadinimo pagreičio įtaka generuojamai įtampai ir elektrinei galiai, esant pastoviam žadinimo dažniui 50 Hz, kuris atitinka pjezoelektrinio energijos generatoriaus rezonansinį režimą. Mėlyna kreivė rodo generuojamos įtampos priklausomybę nuo pagreičio, o žalia – į apkrovą perduodamos elektrinės galios pokytį. Matyti, kad didėjant pagreičiui, išėjimo įtampa didėja beveik tiesiškai. Tai atitinka teorinius linijinio pjezoelektrinio modelio dėsnius, pagal kuriuos mechaninė deformacija sijoje yra proporcinga žadinimo jėgai, o ši – judančios gembės pagreičiui. Kadangi pjezoelektrinis efektas yra tiesinis tam tikrame veikiančios jėgos intervale, generuojama įtampa tiesiogiai atkartoja mechaninės deformacijos amplitudę. Elektrinė galia didėja netiesiškai, artimai kvadratinei priklausomybei nuo pagreičio. Taip yra todėl, kad galia yra proporcinga įtampos kvadratui ($P \propto V^2/R$), todėl net ir tiesinis įtampos augimas lemia spartesnę galios didėjimą. Dėl šios priežasties esant didesniems pagreičiams, išėjimo galia didėja ypač sparčiai. Gauti rezultatai įrodo, kad pjezoelektrinio energijos generatoriaus našumas stipriai priklauso nuo aplinkos vibracijų intensyvumo. Tačiau praktikoje pagreičio didinimą riboja mechaniniai įtempimai, medžiagu atsparumas ir ilgaamžiškumo reikalavimai. Todėl projektuojant tokius generatorius būtina rasti kompromisą tarp maksimalios išgaunamos energijos ir konstrukcijos patikimumo.

2.8. Inertinės masės įtaka generuojamai įtampai ir galiai

Analizuojama inertinės masės įtaka pjezoelektrinio energijos generatoriaus generuojamai įtampai ir išėjimo galiai. Tokia analizė atliekama siekiant įvertinti, kaip papildoma masė keičia gembės dinamines savybes, ypač rezonansinį dažnį ir deformacijos amplitudę. Gauti rezultatai leidžia nustatyti optimalią inertinę masę, kuri užtikrina maksimalų energijos išgavimą esant pasirinktoms vibracinėms sąlygoms.



2.9 pav. Įtampos ir išgaunamos galios priklausomybė nuo inertinės masės dydžio

Didinant inertinę masę (angl. *tip mass*) nuo 5 g iki 11 g (perskaičiuota pagal $1 \times 1 \times 68$ mm svarelis matmenis), generuojama įtampa ir išėjimo galia kinta netiesiškai ir turi aiškų maksimumą. Mažų masių srityje (iki 8 g) įtampa ir galia yra nedidelės, nes konstrukcijos savasis dažnis yra per didelis ir nesutampa su 50 Hz žadinimu, todėl gembės deformacijos amplitudė lieka maža. Didėjant masei, sistemos dinamika „minkštėja“ (didėja inercija laisvajame gale), savasis dažnis mažėja ir artėja prie 50 Hz, todėl atsakas sparčiai didėja. Didžiausios reikšmės ($P=0.38$ mW, $U=21.9$ V) pasiekiamos prie maždaug 8.48 g: čia sistema praktiškai yra suderinta su žadinimo dažniu, todėl lenkimo amplitudė, pjezo elemento sluoksnio deformacijos ir elektromechaninė konversija yra maksimalios. Toliau didinant masę virš ~ 8.48 g, savasis dažnis tampa mažesnis už 50 Hz, rezonansas praslenka pro žadinimo dažnį ir atsakas krenta: įtampa mažėja, o galia tampa artima nuliui, nes sistema dirba neoptimalioje, nuo rezonanso nutolusioje srityje. Šie rezultatai parodo, kad inertinė masė yra vienas efektyviausių parametrų rezonansui derinti: tinkamai parinkus inertinę masę galima suderinti generatorių su konkrečiu aplinkos vibracijų dažniu ir ženkliai padidinti išgaunamą elektrinę galią. Nustatyta, kad esant rezonansiniam dažniui 50 Hz generuojama apie 0.38 mW išėjimo galia. Optimalūs konstrukciniai ir darbo parametrai: apkrovos varža 660 k Ω , gembės ilgis 18.3 mm, pjezoelektrinio sluoksnio storis 0.03 mm, inertinė masė 8.5g.

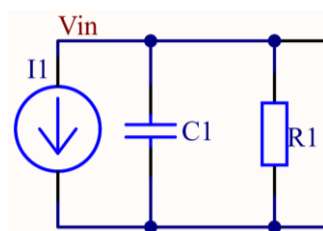
3. Elektrinio efektyvumo modeliavimas paketu LTSpice

Šiame skyriuje nagrinėjami skirtingi energijos kaupimo ir galios perdavimo sprendimai, paremti pjezoelektrinio energijos šaltinio integravimu su kaupimo bei apkrovos grandinėmis, siekiant nustatyti, kuris energijos surinkimo metodas leidžia pasiekti didžiausią išėjimo galią ir energijos perdavimo efektyvumą. Analizuojami du skirtingi jungimo būdai, vertinant jų įtaką įtampos formavimuisi, galios perdavimui, energijos kaupimo efektyvumui bei dinaminiam sistemos stabilumui.

3.1. Ekvivalentinė Norton grandinė

Atliekant pjezoelektrinio energijos generatoriaus analizę COMSOL aplinkoje, gaunami rezultatai yra išreikšti mechaninių ir elektrinių dydžių priklausomybėmis, kurios tiesiogiai nėra patogios naudoti elektrinių grandinių modeliavimo aplinkoje. Dėl šios priežasties tolimesniam energijos surinkimo grandinių tyrimui „LTSpice“ aplinkoje pjezoelektrinis generatorius (PEH) yra pakeičiamas ekvivalentine elektrine schema. Vienas dažniausiai naudojamų modelių yra Norton ekvivalentinė grandinė.

Norton ekvivalentinė grandinė (žr. 3.1 pav.) leidžia sudėtingą fizikinį pjezoelektrinį modelį pakeisti paprasta elektrine schema, kurią sudaro ideali sinusinės formos srovės šaltinio grandis, lygiagrečiai sujungta su talpa ir nuotėkio varža. Tokia schema atitinka pjezoelektrinio elemento fizikinę prigimtį, kadangi jis pasižymi talpiniu pobūdžiu ir generuoja proporcingą mechaninei deformacijai srovę.



3.1 pav. Pjezoelektrinio energijos generatoriaus Norton elektrinis modelis

Apskaičiuojami Norton ekvivalentinės grandinės parametrai:

Srovės šaltinio amplitudė randama iš trumpojo jungimo režimo (šiuo atveju, kai apkrova 10Ω , žr. 2.6 pav.) t.y.:

$I = 48.769 \mu A$, 50 Hz, sinusinės formos.

Vidinio impedanso modulis apskaičiuojamas esant beveik atvirai grandinei (šiuo atveju, kai apkrova $100 M\Omega$, žr. 2.6 pav.):

$$|Z_p| = \frac{U_{OC}}{I_N} \quad (3.1)$$

Kai $I_N = 48.769 \mu A$, o $U_{OC} = 32.139 V$ (žr. 2.6 pav.), tai:

$$|Z_p| = 659 k\Omega$$

Ši varža labai gerai sutampa su COMSOL modeliavimo metu gauta maksimalia galia prie $660 k\Omega$. Pagal gautą impedansą, apskaičiuojama vidinė C talpos impedansas ir pati talpa:

$$|X_C| \approx |Z_p| \approx 659 k\Omega$$

Kai talpinė reaktyvioji varža:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}, \quad (3.2)$$

tai:

$$C = \frac{1}{\omega |X_C|}. \quad (3.3)$$

$$C_{p\text{jezo}} = 4.83 \text{ nF}$$

Nuotėkio varžos apskaičiavimui reikalingas apkrovos taškas, pavyzdžiui prie 660 k Ω įtampos dydis – $U = 31.949 \text{ V}$. Beveik atviros grandinės taške:

$$U_{OC} = \frac{I_N}{\sqrt{G_p^2 + (\omega C_p)^2}}. \quad (3.4)$$

Gaunama $G_p = 3.64 \cdot 10^{-8} \text{ S}$, todėl:

$$R_p = \frac{1}{G_p}. \quad (3.5)$$

Taigi, nuotėkio varža lygi $R_p = 27.5 \text{ M}\Omega$

Visi Norton ekvivalentinės schemos parametrai:

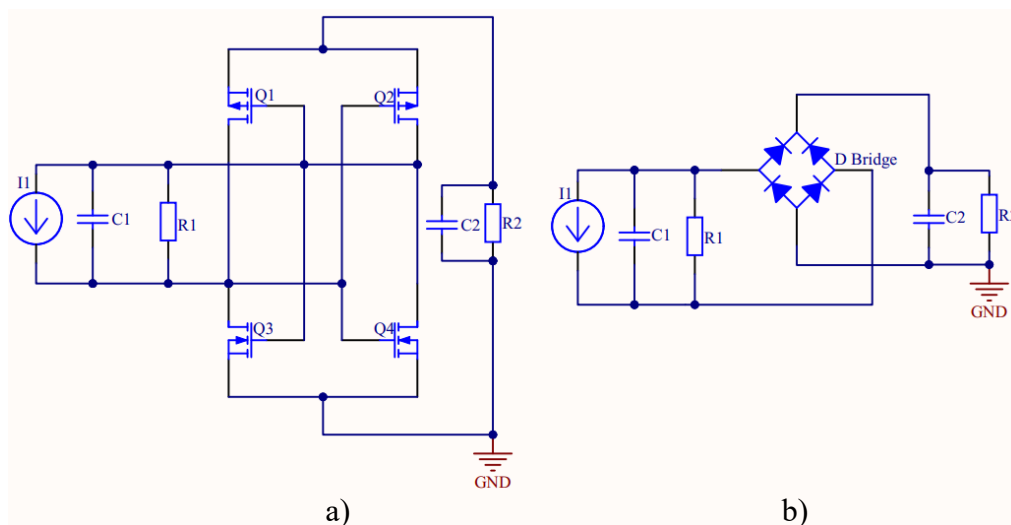
Nuotėkio varža $R_p = 27.5 \text{ M}\Omega$

Srovės šaltinio amplitudė $I_N = 48.769 \mu\text{A}$, dažnis 50 Hz sinusine forma.

Vidinė talpa $C_p = 4.83 \text{ nF}$

3.2. AC-DC tilteliai

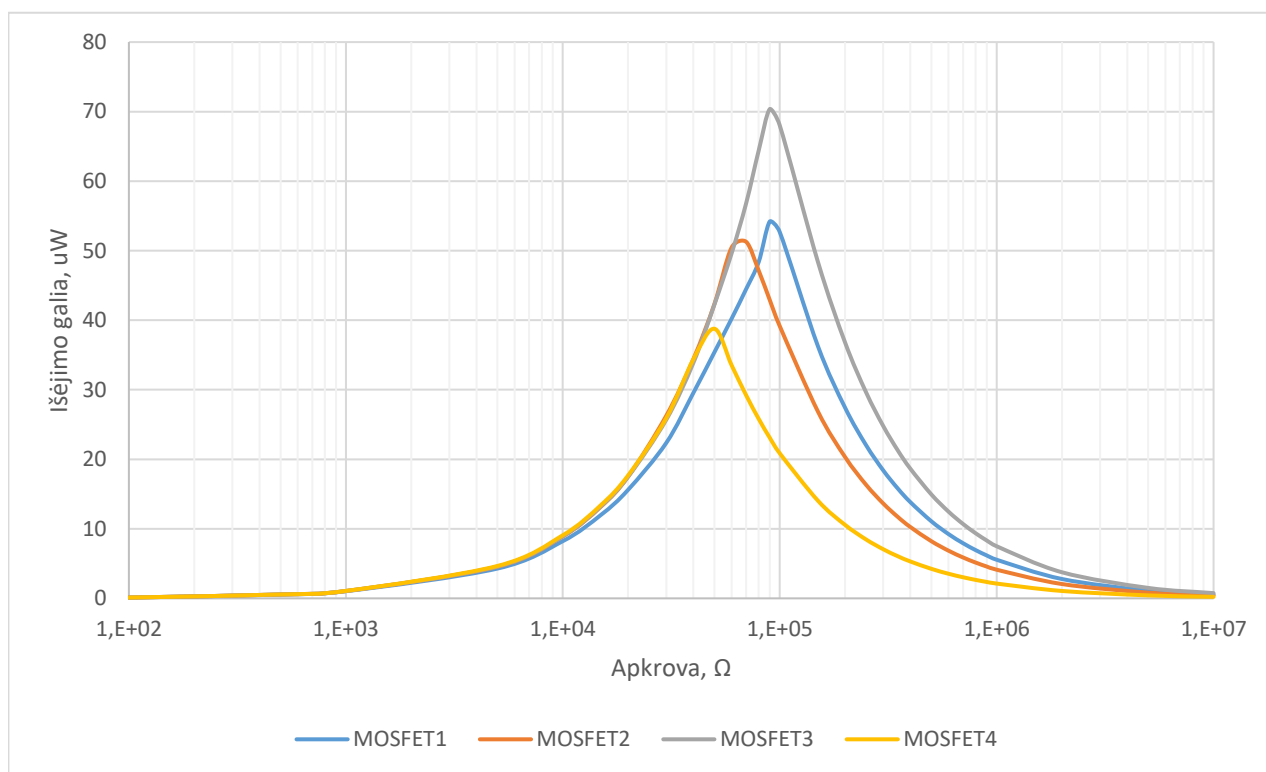
Pjezoelektrinis energijos generatorius generuoja kintamąją (AC) įtampą, todėl norint šią energiją panaudoti realiose sistemose, būtina ją paversti į nuolatinę (DC), reikiamo dydžio įtampą. Tuo tikslu naudojami AC–DC keitikliai, kurie užtikrina energijos perdavimą į apkrovą, arba kaupimo elementą.



3.2 pav. Aktyvus a) ir pasyvus b) AC-DC tilteliai

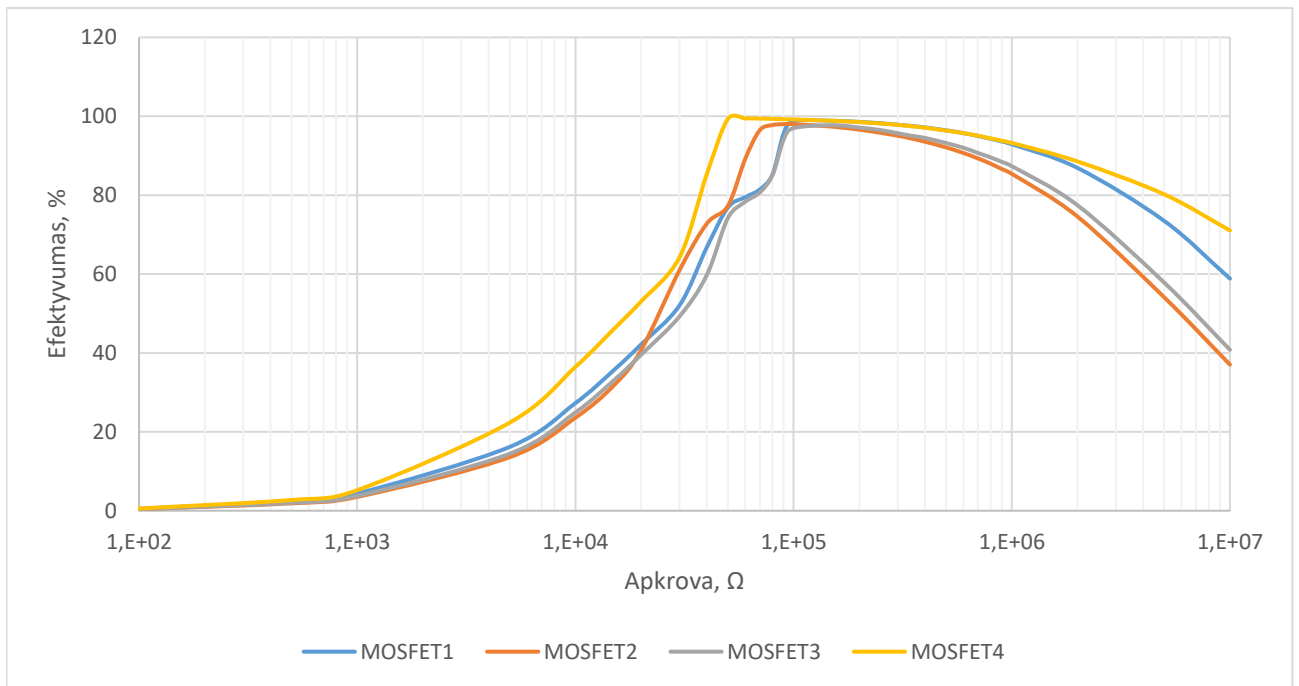
Dažniausiai taikomi du pagrindiniai keitiklių tipai: pasyvūs, sudaryti iš diodų (pvz., Šotkio diodų tiltas, žr. 3.2 pav. b)), ir aktyvūs, realizuojami naudojant MOSFET tranzistoriais (žr. 3.2 pav. a)). Pasyvūs keitikliai pasižymi paprasta struktūra ir nereikalauja papildomo valdymo, tačiau turi nuostolių dėl įtampos kritimo ant diodų. Aktyvūs keitikliai leidžia sumažinti nuostolius ir padidinti efektyvumą, tačiau jų realizacija yra sudėtingesnė, nes reikalingas papildomas valdymo signalas. Atsižvelgiant į šiuos skirtumus, šiame darbe atliekamas abiejų tiltelių tipų palyginamasis tyrimas, siekiant nustatyti, kuris sprendimas konkrečiu atveju leidžia pasiekti didesnę išėjimo galią. Kadangi pjezoelektriniuose generatoriuose generuojami signalai pasižymi mažomis srovėmis ir palyginti didelėmis vidinėmis varžomis, net ir nedideli nuostoliai gali reikšmingai paveikti galutinį rezultatą.

Todėl keitiklio pasirinkimas yra kritinis veiksnys, tiesiogiai lemiantis energijos išgavimo efektyvumą ir didžiausią pasiekiamą galią.



3.3 pav. Išėjimo galios priklausomybė nuo aktyviajame tiltelyje naudojamų MOSFET tranzistorių tipo

Aktyviojo tiltelio tyrime buvo analizuojamos keturios skirtingos N ir P kanalų MOSFET tranzistorių poros: AONR21357 + BSG0811NDQ2 (MOSFET1), BSS84 + 2N7002 (MOSFET2), BSS84 + BSS145 (MOSFET3) bei SI9400DY + QS6K21 (MOSFET4). 3.3 pav. pateikta išėjimo galios priklausomybė nuo apkrovos varžos, kai aktyvusis tiltelis realizuotas naudojant šias MOSFET poras. Iš grafiko matyti, kad didžiausia išėjimo galia gaunama naudojant BSS84 ir BSS145 tranzistorių porą – šiuo atveju maksimali išėjimo galia yra apie 70 μW su 90 k Ω apkrova. Mažiausia maksimali išėjimo galia nustatyta naudojant SI9400DY ir QS6K21 tranzistorių porą – ji siekia apie 38–39 μW su 50 k Ω apkrova. Kitos dvi tyrinėtoms poroms užima tarpines padėtis: AONR21357 + BSG0811NDQ2 pora pasiekia apie 54 μW su maždaug 90 k Ω apkrova, o BSS84 + 2N7002 – apie 51 μW su 60 k Ω apkrova.

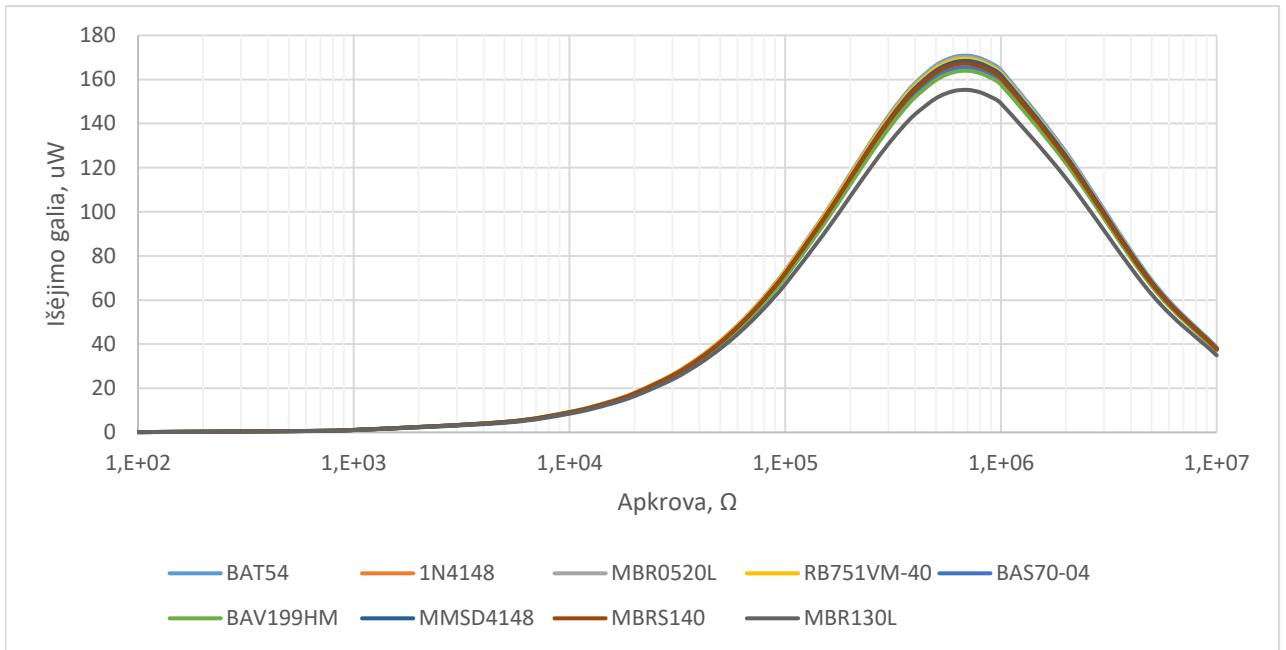


3.4 pav. Efektyvumo priklausomybė nuo aktyviajame tiltelyje naudojamų MOSFET tranzistorių tipo

3.4 pav. pavaizduotas aktyviojo tiltelio efektyvumas, naudojant tas pačias keturias MOSFET tranzistorių poras: AONR21357 + BSG0811NDQ2, BSS84 + 2N7002, BSS84 + BSS145 bei SI9400DY + QS6K21. Efektyvumas apskaičiuojamas kaip išėjimo galios ir įėjimo galios santykis, t.y. pjezoelektrinio generatoriaus atiduodamos galios ir į apkrovą perduodamos galios santykis.

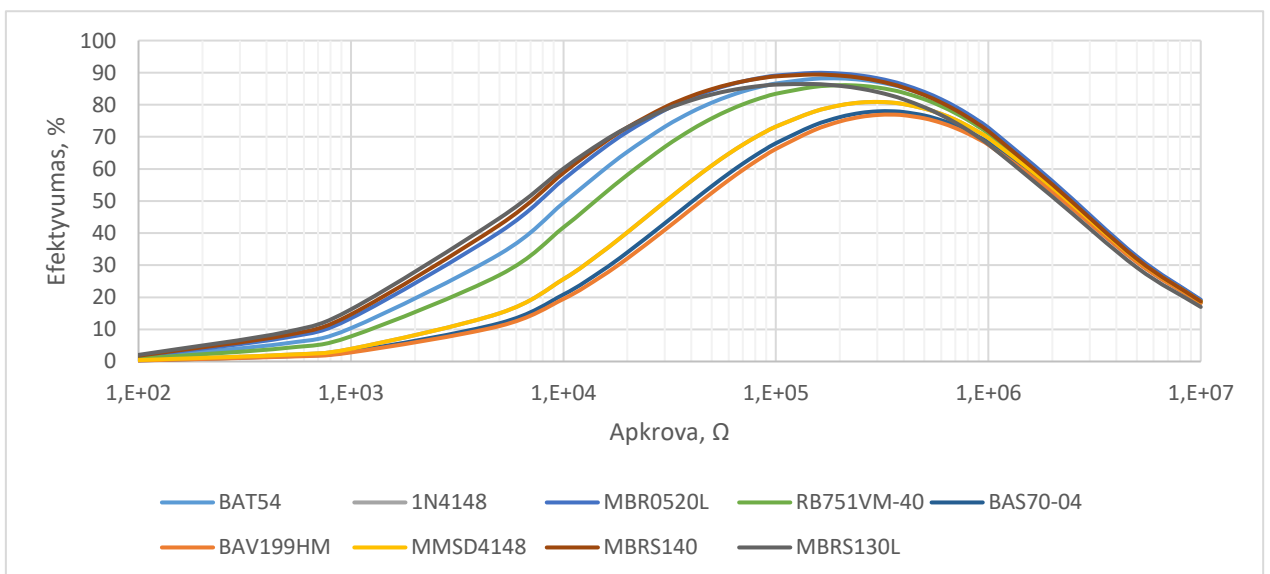
Iš grafiko matyti, kad visų MOSFET efektyvumas didėja didėjant apkrovos varžai ir maksimumą pasiekia maždaug prie 50–100 kΩ. Didžiausias efektyvumas stebimas naudojant SI9400DY ir QS6K21 tranzistorių porą – pasiekia apie 99 % su maždaug 50–70 kΩ apkrova. Su kitomis tranzistorių poromis taip pat galim pasiekti labai aukštą efektyvumą – apie 97–99 % su panašiomis apkrovos reikšmėmis.

Toliau didinant apkrovos varžą, efektyvumas palaipsniui mažėja. Esant labai didelėms apkrovos varžoms (apie $10^7 \Omega$), efektyvumas sumažėja iki maždaug 60 % naudojant AONR21357 + BSG0811NDQ2, ir iki 35–40 % naudojant BSS84 + 2N7002, iki 40 % naudojant BSS84 + BSS145, ir išlieka didžiausias – apie 70 % naudojant SI9400DY + QS6K21 porą.



3.5 pav. Išėjimo galios priklausomybė nuo diodų tiltelio elementų

3.5 pav. pateikta išėjimo galios priklausomybės nuo apkrovos varžos, kai tilteliuose naudojami skirtingi pasyvūs diodai. Tyrinėti šie diodai: BAT54, 1N4148, MBR0520L, RB751VM-40, BAS70-04, BAV199HM, MMSD4148, MBRS140 ir MBR130L. Didžiausios galios reikšmės pasiekiamos apkrovų srityje 600–800 kΩ. Nustatyta, kad didžiausia išėjimo galia, siekianti apie 170 μW, gaunama naudojant MBR0520L diodą. Panašaus dydžio galios vertės taip pat pasiekiamos su BAT54 ir BAS70-04 diodais, tačiau jos yra nežymiai mažesnės. Šiek tiek mažesnė maksimali galia, apie 165–168 μW, gaunama naudojant MBRS140, 1N4148 ir MMSD4148 diodus. Mažiausia išėjimo galia nustatyta naudojant MBR130L diodą, kurio atveju ji siekia apie 150–155 μW. Visais atvejais, nutolus nuo optimalios apkrovos, išėjimo galia mažėja, o esant labai mažoms arba labai didelėms apkrovos varžoms tampa artima nuliui.



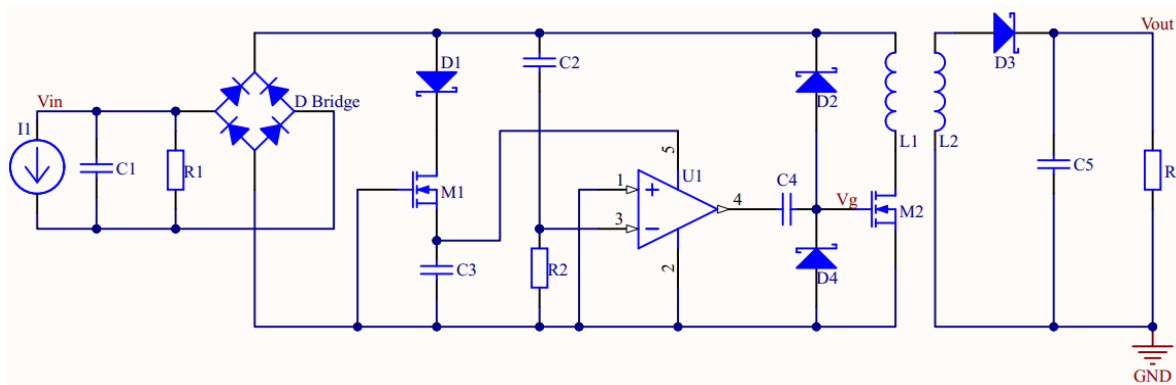
3.6 pav. Efektyvumo priklausomybė nuo diodų tiltelio elementų

3.6 pav. pavaizduotas skirtingų Šotkio tiltelių efektyvumas priklausomai nuo apkrovos varžos. Efektyvumas skaičiuojamas kaip į apkrovą perduodamos galios ir pjezoelektrinio generatoriaus generuojamos galios santykis. Didžiausias efektyvumas stebimas 100–300k Ω apkrovos srityje. Šiame intervale geriausi rezultatai gaunami naudojant BAT54, MBR0520L ir MBRS140 diodus, kurių efektyvumas siekia apie 89–90 %. Šiek tiek mažesnis efektyvumas stebimas naudojant 1N4148, BAS70-04 ir MBR130L diodus – jų maksimalios reikšmės yra apie 85–88 %. Mažiausias efektyvumas visame diapazone stebimas naudojant BAV199HM, kur maksimalus efektyvumas yra apie 77 %. Didėjant apkrovai virš optimalaus intervalo, efektyvumas palaipsniui mažėja ir prie labai didelių varžų (apie 10⁷ Ω) visiems nagrinėtiems diodams sumažėja iki maždaug 18–20 %.

Iš atliktos analizės nustatyta, kad didžiausia išėjimo galia gaunama naudojant MBR0520L diodų tiltą – maksimali vertė siekia apie 170 μ W. Dėl šios priežasties tolimesniuose darbo etapuose, nagrinėjant skirtingas grandines ir energijos surinkimo topologijas, bus naudojamas būtent šis diodų tipas, kaip užtikrinantis didžiausią generuojamą galią.

3.3. SECE be papildomo išorinio maitinimo

Sinchronizuoto elektrinio krūvio ištraukimas, nereikalaujantis išorinio maitinimo (angl. *Self-Powered Synchronous Electric Charge Extraction*) - metodas naudojamas pjezoelektrinio generatoriaus išėjimo galios didinimui, efektyviau išgaunant sukauptą krūvį kiekvieno virpesio metu. Ši topologija leidžia perkelti energiją iš pjezoelektrinio elemento į kaupimo grandinę sinchronizuotais impulsais, nenaudojant išorinio maitinimo šaltinio. Tokiu būdu sumažinami nuostoliai ir padidinamas energijos perdavimo efektyvumas.[27][29]



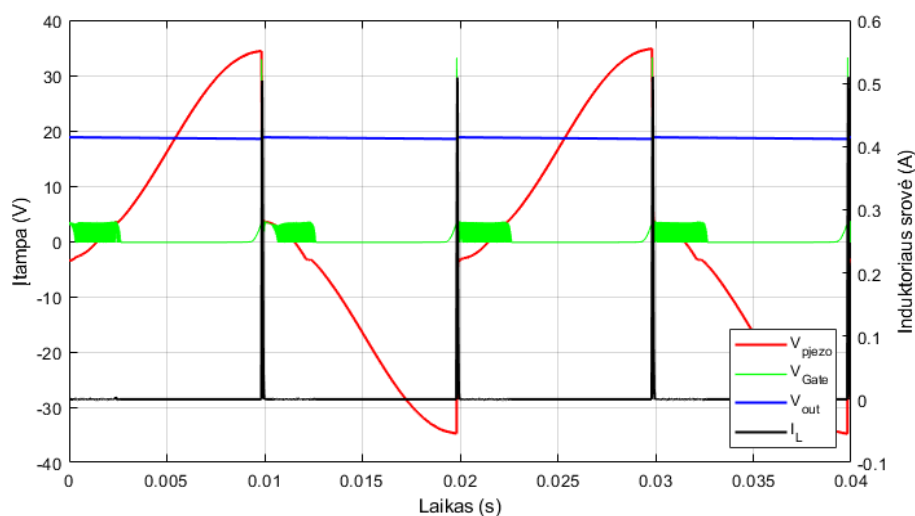
3.7 pav. SECE jungimas

Šioje topologijoje naudojami Šotkio diodai (D1–D4) sudaro pasyvų diodų tiltelį, kuris pjezoelektrinio generatoriaus generuojamą kintamąją įtampą paverčia į nuolatinę. Grandinė, sudaryta iš C2 ir R2, atlieka vėlinimo funkciją – tai RC grandinė, kuri suformuoja pavėlintą įtampos signalą, paduodamą į invertuojantį komparatoriaus įėjimą. MOSFET M1 kartu su C3 sudaro „pre-harvesting“ modulį, kuris leidžia sukaupti energiją ir maitinti komparatorių be išorinio šaltinio. Kondensatorius C4 naudojamas kaip signalo tarp komparatoriaus išėjimo ir valdymo grandies MOSFET perdavimo elementas. Komparatorius (U1) palygina tiesioginę pjezo elemento įtampą su RC grandinės (C2, R2) suformuotu pavėlintu signalu, todėl veikia kaip amplitudinės įtampos (angl. *peak*) detektorius. Aptikus įtampos maksimumą, komparatorius generuoja valdymo impulsą. MOSFET M2, gavęs įtampos impulsą iš komparatoriaus, suformuoja LC kontūrą, sudarytą iš induktoriaus L1 ir pjezoelemento talpos C1, ir taip pradamas rezonansinis energijos perdavimo procesas. 3.1 lentelėje pateikti pagrindiniai komponentai, naudoti šios schemos realizacijai, bei jų svarbiausi parametrai.

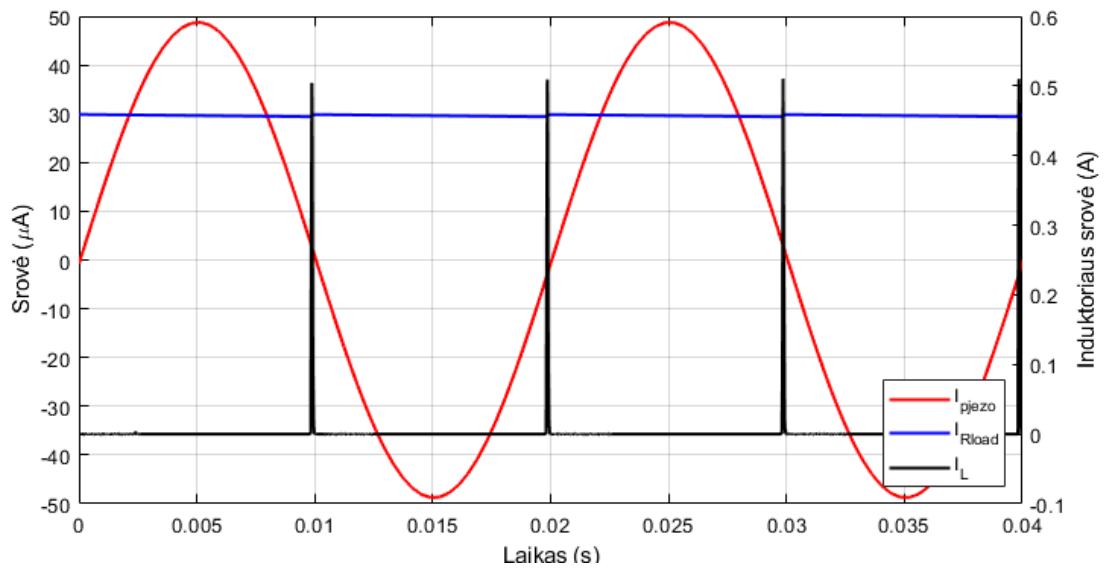
3.1 lentelė. Komponentai naudojami Self-powered SECE jungime

Komponentas	Tipas	Gamintojo kodas	Svarbūs parametrai
D1, D2, D3, D4	Šotkio diodas	MBR0520L	$V_f=0.3V$
C2	Kondensatorius	-	1.5nF
C3	Kondensatorius	-	1uF
C4	Kondensatorius	-	1.2nF
R2	Rezistorius	-	10k
U1	Komparatorius	ADCMP380-1ACBZ-RL7	$I_{supp}=92nA$, $V_{supp}=2-5.5V$
M1	N MOSFET su pradiniu kanalu	BSS159N	$V_{th} -3V$
M2	Žemos slenkstinės įtampos N MOSFET	ZVN4424A	$V_{th} 1.7V$
L1	Induktorius	-	1mH

3.1 lentelėje pateikti komponentai parinkti atsižvelgiant į mažos galios pjezoelektrinės energijos surinkimo sistemos reikalavimus, siekiant sumažinti nuostolius ir užtikrinti patikimą veikimą be išorinio maitinimo (angl. *self-powered*). Naudojami Šotkio diodai MBR0520L pasirinkti dėl mažo įtampos kritimo ($V_f=0.3V$) ir gerų rezultatų ankstesnėje analizėje, kur buvo nustatyta didžiausia išėjimo galia. Svarbi grandinės dalis yra M1 tranzistorius (BSS159N), kuris yra N-MOSFET su pradiniu kanalu. Kadangi jo slenkstinė įtampa yra neigiama ($V_{th}\approx-3V$), tranzistorius yra įprastai atviras net esant 0 V ant užtūros. Dėl šios savybės jis užtikrina pastovų maitinimą komparatoriui, leidžiantį sistemai veikti be išorinio maitinimo šaltinio. Tranzistorius M2 (ZVN4424A) parinktas dėl mažos slenkstinės įtampos ($V_{th}\approx 1.7V$), kadangi komparatoriaus suformuojamas valdymo signalas yra nedidelės amplitudės. Maža slenkstinė reikšmė užtikrina, kad tranzistorius tinkamai atsidarys ir laiku, ir suformuos rezonansinį LC kontūrą. Komparatorius ADCMP380-1ACBZ-RL7 pasirinktas dėl itin mažų energijos sąnaudų – jo maitinimo srovė yra tik apie 92 nA, 3 V maitinimo įtampa yra pakankama, todėl jis praktiškai neapkrauna sistemos ir yra tinkamas šiai energijos surinkimo sistemai. Tai ypač svarbu, kai visa sistema maitinama iš labai mažos galios pjezoelektrinio šaltinio. Kiti pasyvūs komponentai (C2, C3, C4 ir R2) parinkti taip, kad užtikrintų tinkamą signalų formavimą, vėlinimą ir energijos kaupimą, reikalingą stabiliam SECE grandinės funkcionavimui.

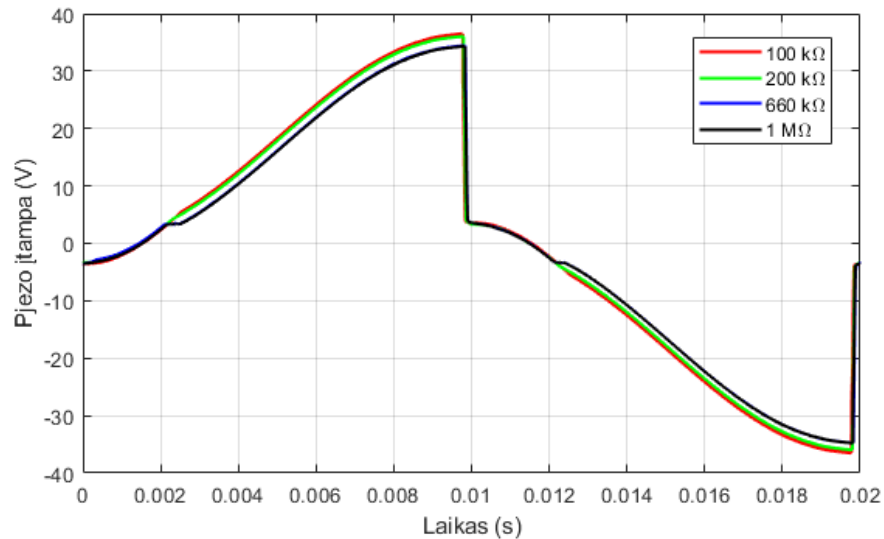


3.8 pav. Laikinė diagrama, kai apkrova 660 kΩ. Mėlyna linija – išėjimo įtampa, raudona linija – pjezo elemento įtampa, žalia linija MOSFET užtūros valdymo signalo įtampa, juoda linija – srovė per induktorių



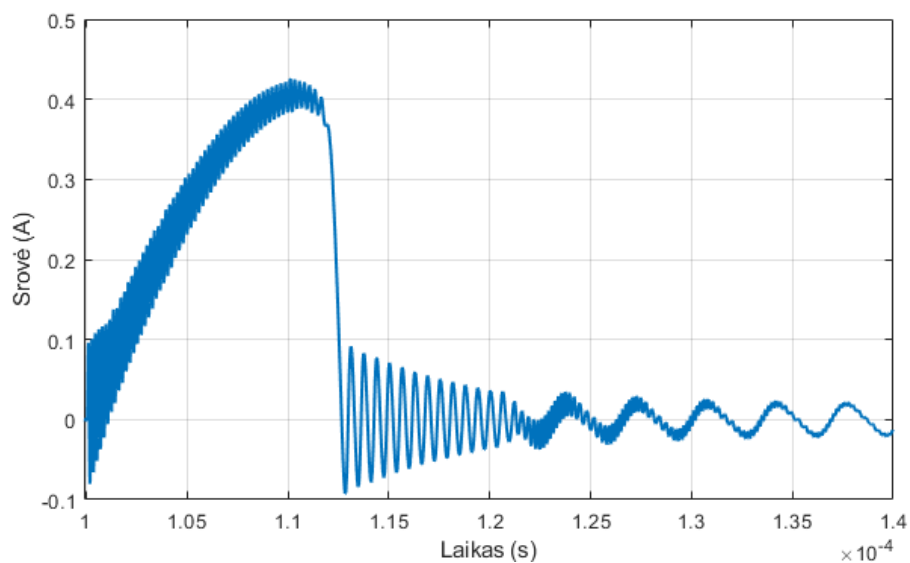
3.9 pav. Laikinė diagrama, kai apkrova 660 kΩ. Mėlyna linija - apkrovos srovė, raudona linija – pjezo elemento srovė, juoda linija - srovė per induktorių

Galima pastebėti, kad pjezoelektrinio elemento įtampa V_{piezo} (raudona kreivė 3.8 pav.) tarp perjungimo momentų didėja palaipsniui – tai atitinka energijos kaupimo fazę, kai pjezoelektrinis elementas veikia kaip srovės šaltinis ir krauna savo vidinę talpą. Didėjant įtampai, ji pasiekia maksimumą kiekvieno pusperiodžio pabaigoje. Būtent šiuo momentu, kai įtampa yra didžiausia ir tuo pačiu metu pjezo elemento srovė keičia ženklą (t.y. pereina per nulį), amplitudės detektoriaus dalis (komparatorius) suformuoja išėjimo impulsą ir įjungiamas MOSFET tranzistorius. Iš 3.8 pav. matyti, jog prie įtampos maksimumo atsiranda valdymo impulsas (įtampa MOSFET užtūroje, 3.8 pav. žalia kreivė) ir tuo pačiu momentu prasideda induktoriaus srovės impulsas (3.8 pav. juoda kreivė). Po MOSFET įjungimo pjezoelektrinio elemento įtampa staigiai sumažėja, nes sukaupta energija greitai perkeliama į induktorių. Šis staigus įtampos kritimas rodo, kad pjezo elemento talpa yra iškraunama per labai trumpą laiką, o energija nukreipiama į tolimesnes grandines. Toliau ši energija perduodama į antrinę transformatoriaus apviją ir per diodą D3 perduodama į išėjimo kondensatorių C5 ir apkrovą R3. Po energijos perdavimo tranzistorius išsijungia, o pjezoelektrinis elementas pradeda naują energijos kaupimo ciklą. Šis procesas kartojasi kiekvieno pusperiodžio metu, todėl energija išgaunama diskrečiais impulsais, sinchronizuotais su pjezo elemento įtampos maksimumais. Tai patvirtina, kad SECE metodas leidžia atskirti energijos generavimo ir perdavimo fazes, efektyviai iškraunant pjezo elemento talpą tik optimaliu momentu. Pjezoelektrinio elemento įtampos RMS vertė siekia 20,5 V, o išėjime gaunama 18,8 V RMS įtampa. Atitinkamai pjezo elemento srovės efektyvioji vertė yra 34,448 µA, o apkrovos srovės efektyvioji vertė siekia 28,526 µA. Šie rezultatai rodo, kad didžioji dalis pjezoelektrinio elemento generuojamos energijos yra sėkmingai perduodama į apkrovą, nors dalis nuostolių išlieka dėl perjungimo, diodų ir transformatoriaus grandies aktyvinių varžų.



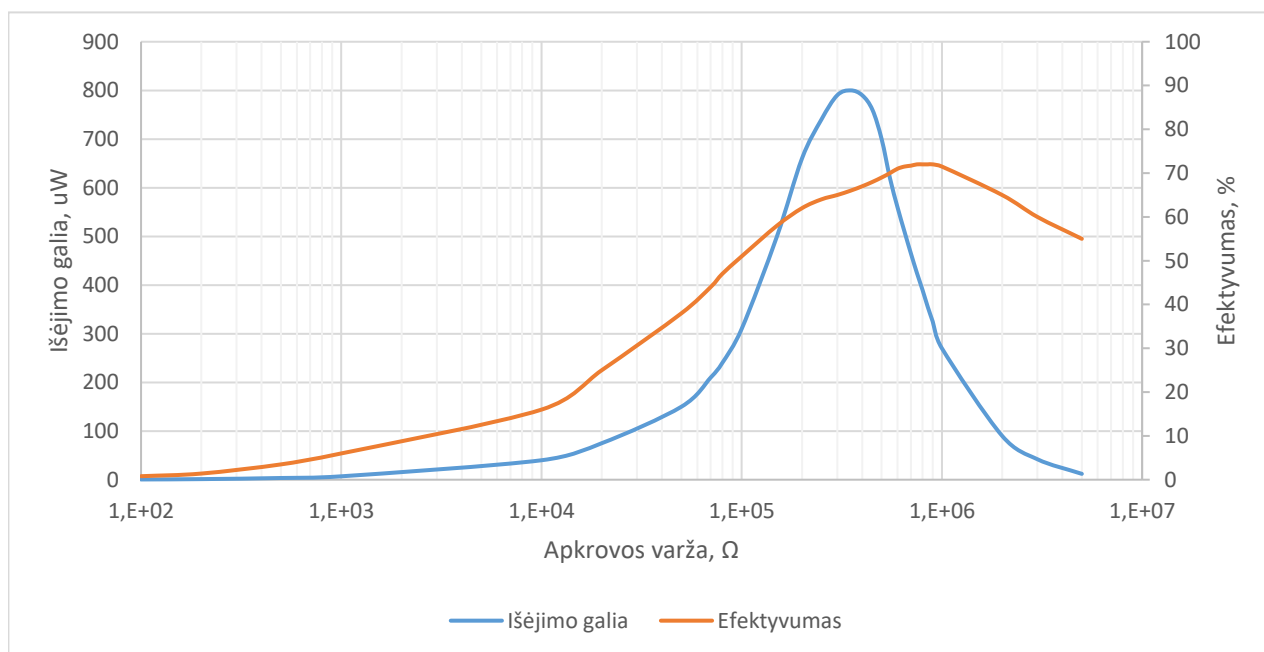
3.10 pav. Laikinė diagrama esant skirtingoms apkrovos varžoms (juoda linija – 1 MΩ, mėlyna linija – 660 kΩ, žalia linija – 200 kΩ, raudona linija – 100 kΩ)

Literatūros šaltiniai teigia, kad lygiagreto SSHI ir ypač nuoseklaus SSHI atveju didėjant apkrovos varžai didėja pjezoelektrinio elemento įtampos amplitudė, tačiau kartu blogėja įtampos inversijos kokybė, įtampos signalas tampa mažiau simetriškas, o energijos ištraukimas mažiau efektyvus. Gauti SECE grandinės rezultatai rodo analogišką tendenciją įtampos amplitudės atžvilgiu – didėjant apkrovai nuo 100 kΩ iki 1 MΩ, pjezo elemento įtampos maksimumas padidėja nuo maždaug 34 V iki apie 36–37 V. Tačiau, skirtingai nei SSHI atveju, įtampos forma išlieka stabili visame apkrovų diapazone, o energijos ištraukimas vyksta staigiais impulsais prie įtampos maksimumų. Tai įrodo, kad SECE grandinė yra mažiau jautri apkrovos pokyčiams, kadangi energijos perdavimas vykdomas diskrečiais momentais, sinchronizuotais su pjezo elemento įtampos viršūnėmis. SSHI grandinėse energijos perdavimo procesas yra labiau priklausomas nuo apkrovos, kas lemia didesnius nuostolius prie didesnių apkrovos varžų.



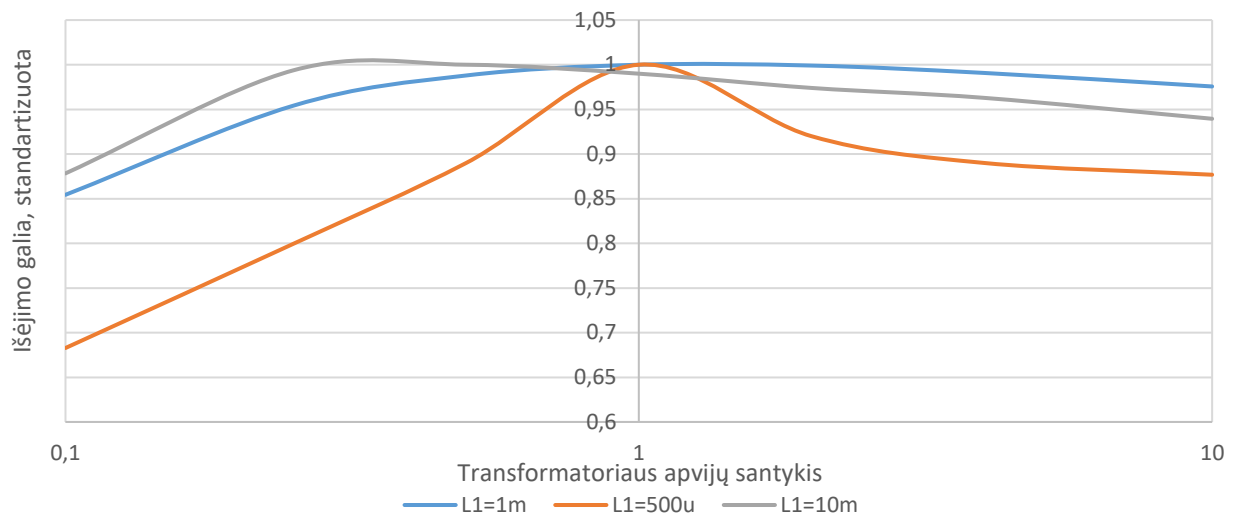
3.11 pav. Induktoriaus srovė vykstant virpesių kontūro rezonansui

Pjezoelektriniam generatoriui pasiekus amplitudinę įtampą (arba kai srovė keičia ženklą), MOSFET tranzistorius įjungiamas ir stebimas staigus srovės pokytis - prasideda ryškūs aukšto dažnio svyravimai. Šie svyravimai yra LC kontūro, sudaryto iš induktoriaus ir pjezoelektrinio elemento talpos, rezonansiniai virpesiai. Toks srovės pobūdis patvirtina teorinį SECE veikimo principą – energija iš pjezoelektrinio elemento nėra perduodama tiesiogiai, bet pirmiausia perkeliama į LC rezonansinį kontūrą, kuriame vyksta greitas energijos mainų procesas tarp talpos ir induktoriaus. Vėliau ši energija perduodama į apkrovą.



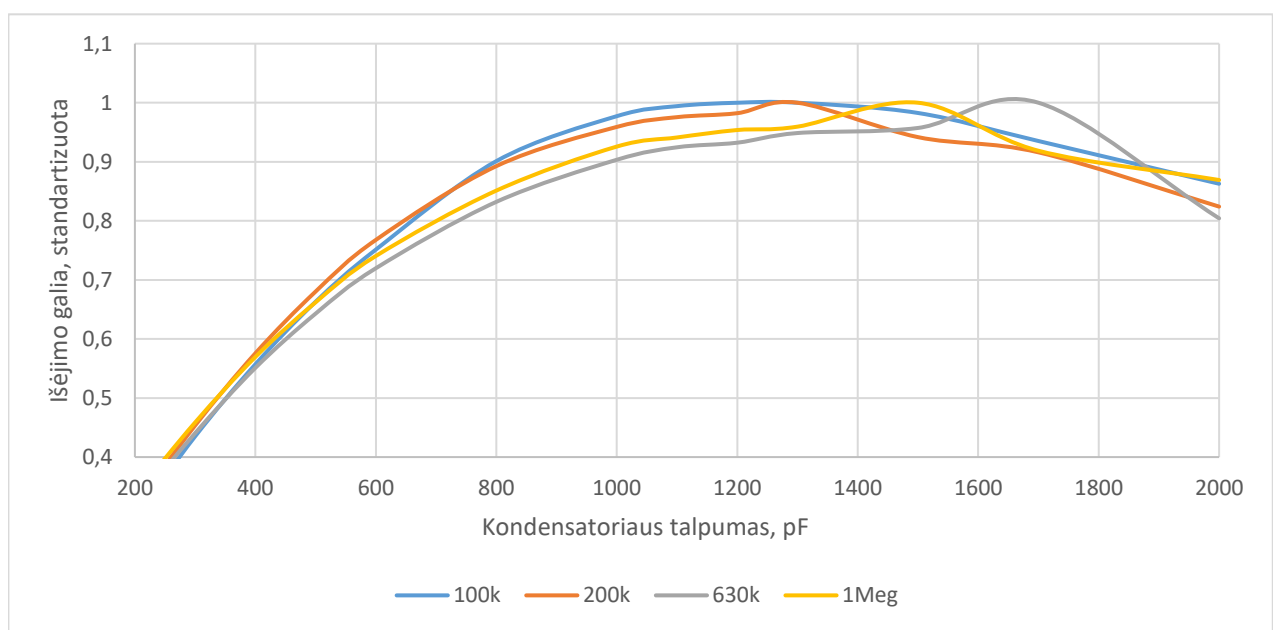
3.12 pav. Išėjimo galios ir efektyvumo priklausomybės nuo apkrovos varžos

Iš 3.12 pav. grafiko matoma, kad išėjimo galia didėja didėjant apkrovos varžai ir pasiekia maksimumą prie 350 k Ω . Didžiausia galia siekia apie 800 μW . Toliau didinant apkrovą, galia pradeda mažėti: pavyzdžiui, prie 1 M Ω ji sumažėja iki maždaug 270 μW , o prie 5 M Ω – iki vos 12 μW . Efektyvumo kreivė pasižymi kiek kitokiu pobūdžiu – maksimumas pasiekiamas ne prie galios maksimumo, o didesnių varžų srityje. Didžiausias efektyvumas siekia apie 72 % ir išlieka beveik pastovus intervale nuo maždaug 700 k Ω iki 900 k Ω . Net ir prie 1 M Ω efektyvumas išlieka aukštas – apie 71,5 %. Esant mažoms apkrovoms (iki 10 k Ω), tiek galia, tiek efektyvumas yra labai maži (atitinkamai iki ~40 μW ir ~16 %), nes didžioji dalis energijos prarandama dėl netinkamo impedansų suderinimo. Esant labai didelėms apkrovoms (virš 1 M Ω), efektyvumas išlieka palyginti aukštas, tačiau perduodama galia ženkliai sumažėja dėl mažos srovės. Svarbiausia, jog prie 660 k Ω pasiekama 515 μW , t.y. 303 % daugiau galios nei naudojant Šotkio diodų tiltelį, kai prie 660 k Ω pasiekiami 171 μW maksimali galia. O lyginant amplitudines vertes su SECE topologija prie 350 k Ω gauta 800 μW – t.y. net 468 % galios padidėjimas.



3.13 pav. Transformatoriaus apvijų santykio įtaka išėjimo galiiai

Iš grafiko matoma, kad visais nagrinėtais atvejais didžiausia išėjimo galia pasiekama tuomet, kai transformatoriaus vijų santykis yra artimas vienetui, t. y. $n \approx 1$. Tai rodo, kad šiai SECE grandinei efektyviausias energijos perdavimas gaunamas tada, kai transformatorius neveikia kaip aukštinantis ar žeminantis. Taip pat matyti, kad naudojant $L1=500\mu\text{H}$ išėjimo galia yra jautresnė vijų santykio pokyčiams, o nukrypus nuo optimalaus taško ji mažėja sparčiausiai. Esant $L1=10\text{mH}$, galios priklausomybė tampa tolygesnė, tačiau toks induktyvumas praktikoje nėra realistiškas, nes 10 mH pirminė vija jau yra santykinai didelė, sunkiau realizuojama kompaktiškoje sistemoje ir gali turėti didesnius papildomus nuostolius dėl parazitinės varžos. Dėl šios priežasties $L1=1\text{mH}$ laikomas racionalių sprendimų tarp praktinio pritaikomumo ir gaunamos galios – ši reikšmė užtikrina pakankamai aukštą galią visame nagrinėjamame diapazone. Todėl tolesniam modeliavimui ir galimai grandinės realizacijai parinkta pirminė induktyvumo reikšmė $L1=1\text{mH}$, o transformatoriaus vijų santykis pasirinktas lygus 1, nes būtent tada gaunama didžiausia išėjimo galia.



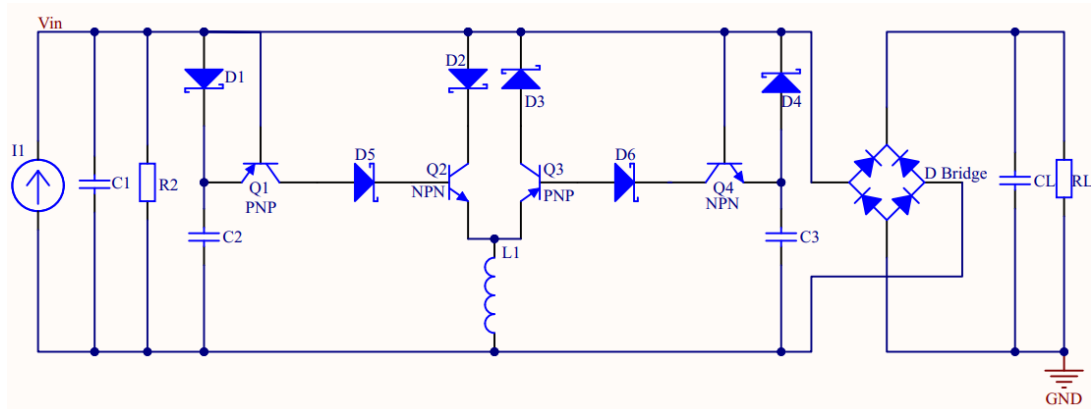
3.14 pav. Išėjimo galios priklausomybės nuo kondensatoriaus talpos esant skirtingoms apkrovoms

SECE grandinėje kondensatorius C4 lemia MOSFET užtūros impulso trukmę, t. y. kiek laiko tranzistorius lieka įjungtas. Tai tiesiogiai įtakoja LC kontūro sužadimą ir energijos ištraukimo procesą. Esant per mažai C4 talpai, į užtūrą perduodamas impulsas yra per trumpas arba per silpnas, todėl MOSFET arba nespėja pilnai įsijungti, arba iš viso neatsidaro. Tokiu atveju LC kontūras nesusiformuoja, nevyksta rezonansinis energijos perdavimas iš pjezo elemento talpos į induktorių, o tai yra pagrindinė SECE veikimo esmė. Esant per didelei C4 talpai, MOSFET išlieka įjungtas per ilgai. Tokiu atveju LC kontūras ne tik atlieka energijos perdavimą, bet ir yra per daug slopinamas – dalis energijos pradeda tekėti atgal arba išsisklaido grandinėje. Taip pat gali būti iškraunama pjezo elemento talpa ilgiau nei reikia, todėl prarandamas optimalus perjungimo momentas ir atsiranda papildomi nuostoliai. Dėl šios priežasties išėjimo galia vėl mažėja. Todėl būtina parinkti tokią C4 talpą, kuri užtikrintų pakankamai ilgą, bet ne per ilgą MOSFET įjungimo laiką, kad būtų pilnai sužadintas LC kontūras ir energija ištraukiama efektyviai. Pagal pateiktus rezultatus, matomus 3.14 pav., optimali C4 reikšmė yra apie 1.2 nF, prie kurios pasiekama didžiausia išėjimo galia.

Nustatyta, kad naudojant SECE grandinę pasiekiami maksimali išėjimo galia siekia apie 800 μW prie 350 k Ω apkrovos varžos, o naudojant pasyvių Šotkio diodų tiltelį didžiausia galia yra 171 μW prie 660 k Ω . Tai reiškia, kad SECE metodas leidžia padidinti išgaunamą galią iki 468 %. Taip pat, esant artimai optimaliai apkrovai (apie 660 k Ω), SECE grandinėje gaunama apie 515 μW galia, kai tuo pačiu atveju su diodų tilteliu pasiekiami apie 171 μW , t. y. galios padidėjimas siekia apie 303 %. Efektyvumo analizė rodo, kad SECE grandinės efektyvumas optimaliame darbo taške siekia apie 70–72 %, tačiau išlieka mažesnis nei kai kurių pasyvių sprendimų dėl papildomų perjungimo ir nuostolių induktoriuje. Šie rezultatai patvirtina, kad SECE metodas ženkliai pagerina energijos išgavimą iš pjezoelektrinio generatoriaus, tačiau gaunamas mažesnis efektyvumas. Dėl to toliau tikslinga nagrinėti SSHI metodą, kuris orientuotas į reaktyviosios energijos mažinimą ir gali užtikrinti dar didesnę bendrą sistemos efektyvumą.

3.4. SSHI be papildomo išorinio maitinimo

SSHI (angl. *Synchronized Switch Harvesting on Inductor*) - sinchronizuotas energijos surinkimas su induktoriumi - jungimas skirtas padidinti pjezoelektrinio generatoriaus efektyvumą, keičiant pjezo elemento talpos įtampos fazę kiekvieno pusperiodžio metu. Ši topologija neperkelia energijos diskrečiais impulsais į kaupimo grandinę, kaip vyksta SECE grandinėje, bet atlieka įtampos inversiją, taip sumažindama reaktyviosios energijos nuostolius ir padidindama perduodamą į apkrovą galią. Šioje topologijoje naudojamas valdymas, leidžiantis sinchronizuoti perjungimo momentus su pjezo elemento įtampos maksimumais be išorinio maitinimo šaltinio.[28]



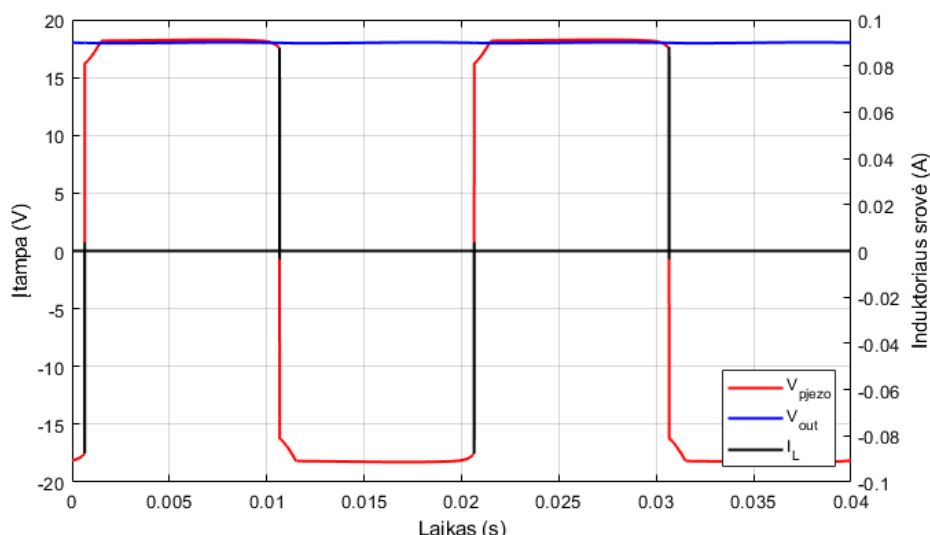
3.15 pav. SSHI jungimas

Tranzistoriai Q1–Q4 sudaro simetrišką perjungimo grandinę, kuri leidžia SSHI veikti abiejų pusperiodžių metu. Priklausomai nuo to, ar pjezo elemento įtampa pasiekia teigiamą ar neigiamą maksimumą, aktyvuojama atitinkama tranzistorių pora. Vieno pusperiodžio metu įsijungia viena šaka (pvz., Q1–Q2), o kito – kita (Q3–Q4), todėl grandinė automatiškai prisitaiko prie įtampos poliarumo ir realizuoja perjungimą abiem kryptimis. Įjungus atitinkamą tranzistorių porą, induktorių L1 trumpam sujungiamas su pjezo elemento talpa, sudarydamas LC kontūrą. Tuo momentu vyksta rezonansinis procesas – energija svyruoja tarp talpos ir induktoriaus, o pjezo elemento įtampa per labai trumpą laiką yra apverčiama (invertuojama). Tai yra pagrindinis SSHI principas, leidžiantis sumažinti reaktyvius nuostolius ir padidinti išgaunamą energiją.

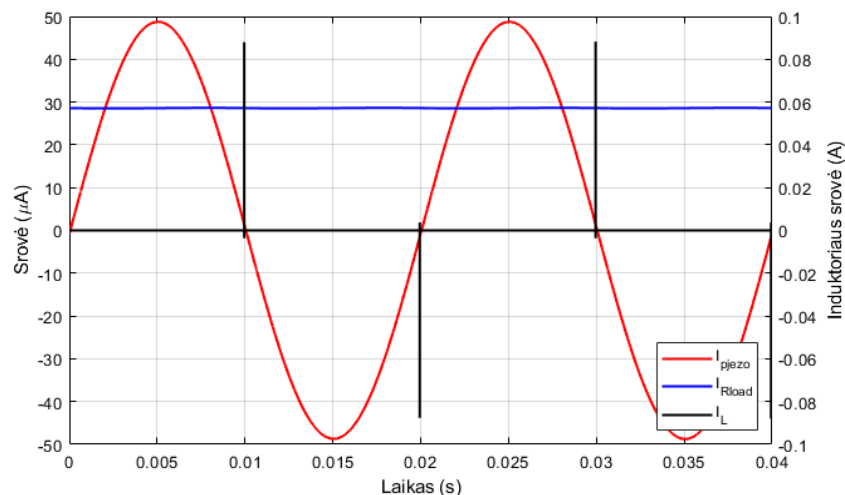
3.2 lentelė. Komponentai naudojami SSHI jungime

Komponentas	Tipas	Gamintojo kodas	Svarbūs parametrai
D1, D2, D3, D4, D5, D6	Šotkio diodas	MBR0520L	$V_f=0.3V$
C2, C3	Kondensatorius	-	700pF
Q1, Q3	PNP Tranzistorius	BC557C	
Q2, Q4	NPN Tranzistorius	BC547C	
L1	Induktorius	-	220uH

3.2 lentelėje pateikti komponentai, kurie naudojami SSHI jungimui. Naudojami MBR0520L Šotkio diodai parinkti dėl mažo įtampos kritimo ($V_f = 0.3 V$) ir 3.2 poskyryje gautus geriausius rezultatus. Grandinėje esantys kondensatoriai (700 pF) naudojami signalų formavimui ir laikinėms konstantoms nustatyti, kurios lemia tinkamą perjungimo momentą. Bipoliarūs tranzistoriai (BC547C ir BC557C) sudaro impulsų generavimo dalį, leidžiančią aptikti pjezo elemento įtampos maksimumus ir automatiškai įjungti perjungimo elementą be išorinio maitinimo. Induktorius (220 μH) yra esminis SSHI metodo komponentas – jis naudojamas trumpam rezonansiniam LC procesui, kurio metu pjezo elemento talpos įtampa apverčiama, taip sumažinant reaktyvius nuostolius ir padidinant į apkrovą perduodamą energiją.

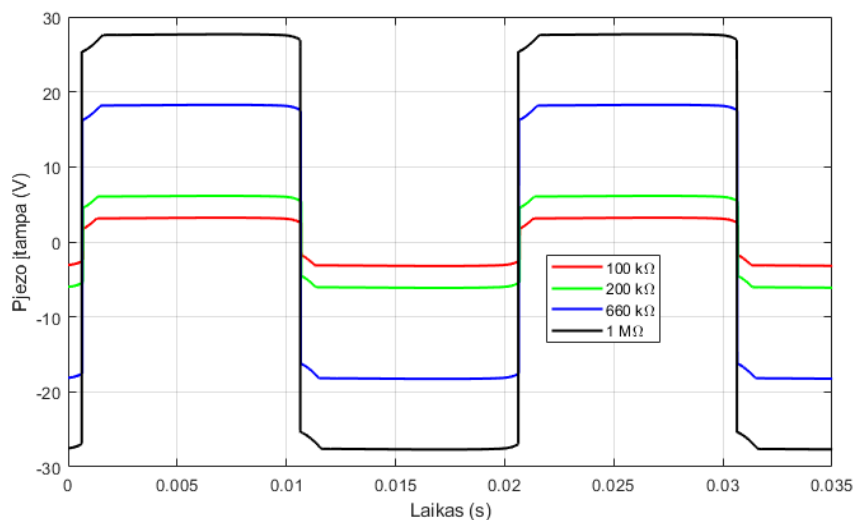


3.16 pav. Laikinė diagrama, kai apkrovos varža 660 k Ω (mėlyna - išėjimo įtampa, raudona – pjezo elemento įtampa, juoda – srovė per induktorių)



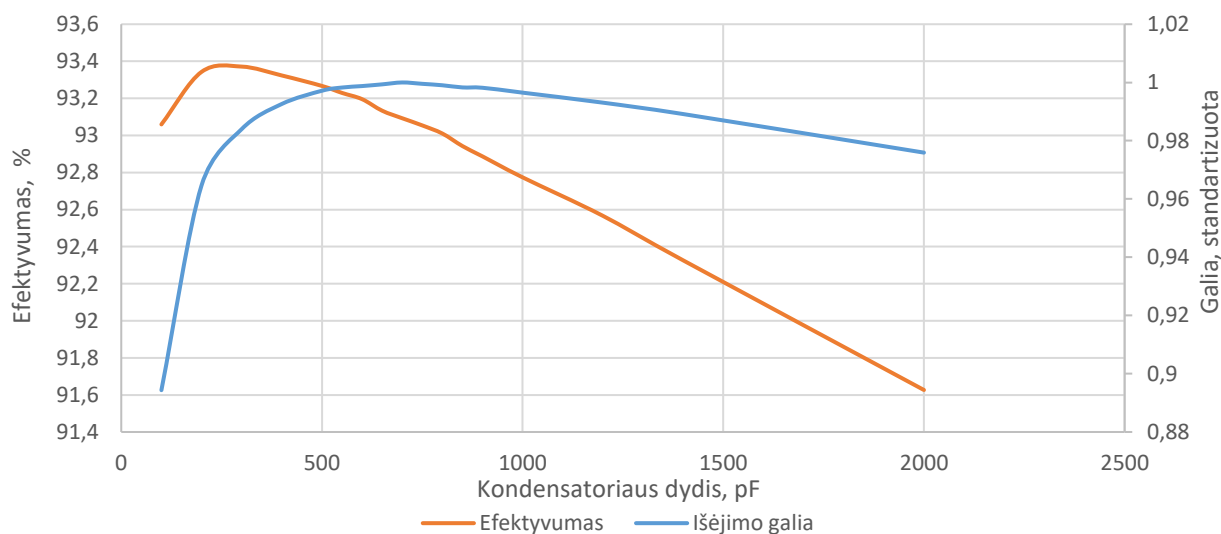
3.17 pav. Laikinė diagrama , kai apkrovos varža 660 kΩ (mėlyna – srovė per apkrovą, raudona – pjezo elemento srovė, juoda – srovė per induktorių)

Iš laikinių diagramų matyti, kad prie kiekvieno pjezo elemento įtampos maksimumo (tiek teigiamu, tiek neigiamu) stebimas staigus įtampos šuolis (3.16 pav.). Toks įtampos invertavimas leidžia sumažinti reaktyviosios energijos nuostolius ir padidinti energijos perdavimą į apkrovą. Šis staigus pokytis vyksta labai trumpai, kai suveikia perjungimo grandinė. Tuo pat metu matomas induktoriaus srovės I_L (juoda kreivė 3.17 pav.) šuolis ir pasiekiami 90mA amplitudės srovė. Tai rodo, kad tuo momentu induktorių trumpam prijungiamas prie pjezo elemento talpos ir vyksta LC kontūro rezonansas. Induktoriaus srovės impulsai atsiranda tik tais momentais, kai pjezo elemento srovė kerta nulį (t. y. keičia ženklą), kas sutampa su įtampos maksimumais. Apkrovos srovė I_{Rload} yra beveik pastovi, apie 29–30 μA , kas rodo stabilų energijos tiekimą į apkrovą. Taigi, kaip teorijoje ir grindžiama, SSHI grandinė veikia sinchronizuodama perjungimą su pjezo elemento įtampos maksimumais. Kiekvieno pusperiodžio metu trumpam suformuojamas LC kontūras, induktoriuje atsiranda didelės amplitudės impulsinė srovė, o pjezo elemento įtampa yra invertuojama. Dėl to energija efektyviau perduodama į apkrovą, išlaikant stabilias išėjimo įtampos ir srovės vertes.



3.18 pav. Laikinė pjezo elemento įtampos diagrama esant skirtingoms apkrovos varžoms (juoda – 1 MΩ apkrova, mėlyna – 660 kΩ apkrova, žalia – 200 kΩ apkrova, raudona 100 kΩ apkrova)

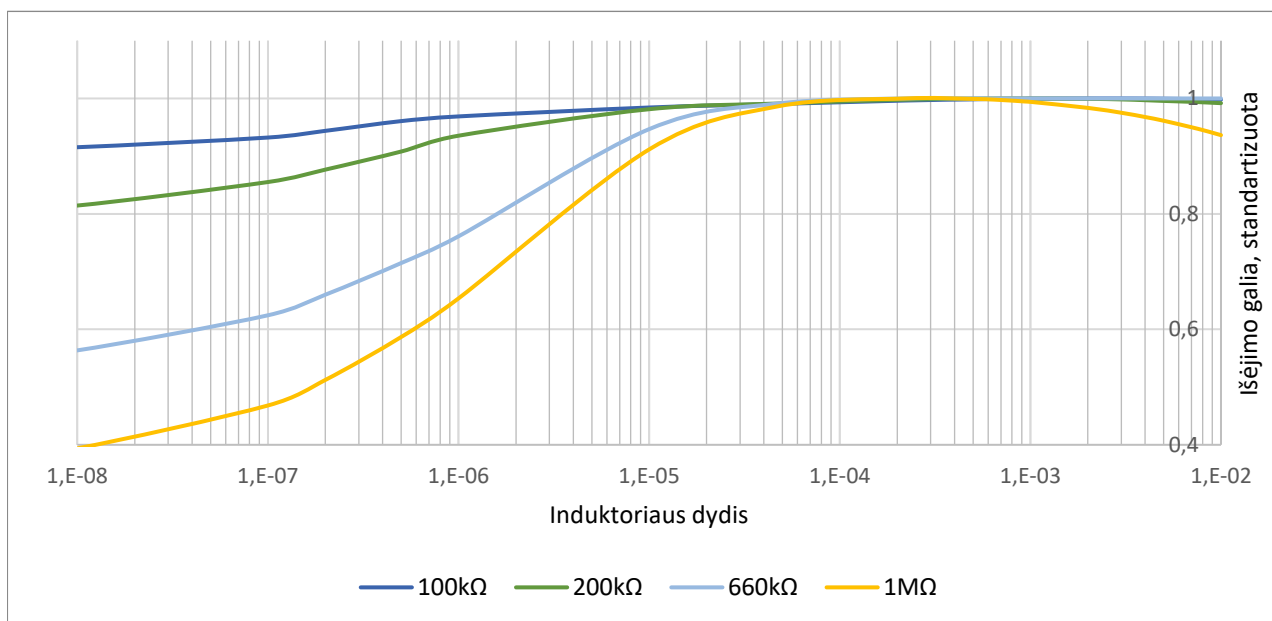
Matyti, kad įtampos forma visais atvejais yra panaši – tarp perjungimo momentų įtampa išlieka beveik pastovi, o prie perjungimo momentų staigiai invertuojama. Didėjant apkrovos varžai, pjezo elemento įtampos amplitudė didėja. Esant 100 kΩ apkrovai (raudona kreivė 3.18 pav.), įtampos amplitudė siekia apie ±3 V, esant 200 kΩ (žalia kreivė 3.18 pav.) – ±6 V, prie 660 kΩ (mėlyna kreivė 3.18 pav.) – ±18 V, o esant 1 MΩ (juoda kreivė 3.18 pav.) – iki ±28 V. Tai rodo, kad didesnė apkrova mažiau slopina pjezoelektrinį elementą, nes teka mažesnė srovė, todėl leidžia susikaupti didesnei įtampai. Perjungimo momentai visais atvejais vyksta tuo pačiu laiku, kas rodo, kad SSHI grandinė sinchronizuoja perjungimą su mechaninių virpesių periodu, nepriklausomai nuo apkrovos. Taigi, apkrovos varža turi tiesioginę įtaką pjezo elemento įtampos amplitudei, tačiau nekeičia pagrindinio SSHI veikimo principo – įtampos inversija vykdoma sinchroniškai kiekvieno pusperiodžio metu.



3.19 pav. Išėjimo galios (standartizuota) ir efektyvumo priklausomybė nuo naudojamo kondensatoriaus talpos

SSHI grandinėje naudojami C2 ir C3 kondensatoriai stipriai lemia išėjimo galios dydį, nes nuo jų priklauso valdymo grandies dinaminės savybės – kaip formuojamas perjungimo impulsas, jo trukmė bei sinchronizavimas su pjezoelektrinio elemento įtampos maksimumu. Kadangi SSHI veikimo principas grindžiamas įtampos inversija tiksliai prie maksimumo, šio kondensatoriaus talpa tiesiogiai lemia tiek LC rezonanso sužadimą, tiek bendrą energijos ištraukimą. Dėl šios priežasties atliekama šio parametro analizė, siekiant nustatyti optimalią reikšmę. Esant labai mažai kondensatoriaus talpai, susiformuojantis valdymo impulsas yra per silpnas ir per trumpas. Tokiu atveju tranzistoriai gali neatsidaryti pilnai, arba įsijungti per trumpam laikui, todėl LC kontūras nesusėja pilnai susiformuoti. Dėl to įtampos inversija vyksta nepilnai, o dalis energijos lieka pjezo elemento talpoje. Be to, perjungimo momentas tampa netikslus ir jautrus trikdžiams, kas papildomai mažina efektyvumą. Priešingai, esant labai didelei talpai, kondensatorius ilgiau kraunasi ir išsikrauna, todėl formuojamas impulsas tampa platesnis ir vėluoja. Tokiu atveju perjungimas įvyksta ne prie įtampos maksimumo, o jau prasidėjus jos mažėjimui. Dėl to LC kontūro rezonansas inicijuojamas ne optimaliu momentu, įtampos inversija tampa mažiau efektyvi, o dėl per ilgo tranzistorių įjungimo atsiranda papildomi nuostoliai grandinėje. 3.19 pav. pateikti modeliavimo rezultatai patvirtina šias priklausomybes. Didėjant kondensatoriaus talpai nuo 100 pF iki 700 pF, išėjimo galia didėja nuo 0.894 iki maksimalios reikšmės 1 (standartizuota). Toliau didinant talpą virš 700 pF, išėjimo galia pradeda mažėti ir prie 2 nF sumažėja iki 0,976, kas rodo atsirandančius nuostolius dėl netikslaus perjungimo. Didžiausias

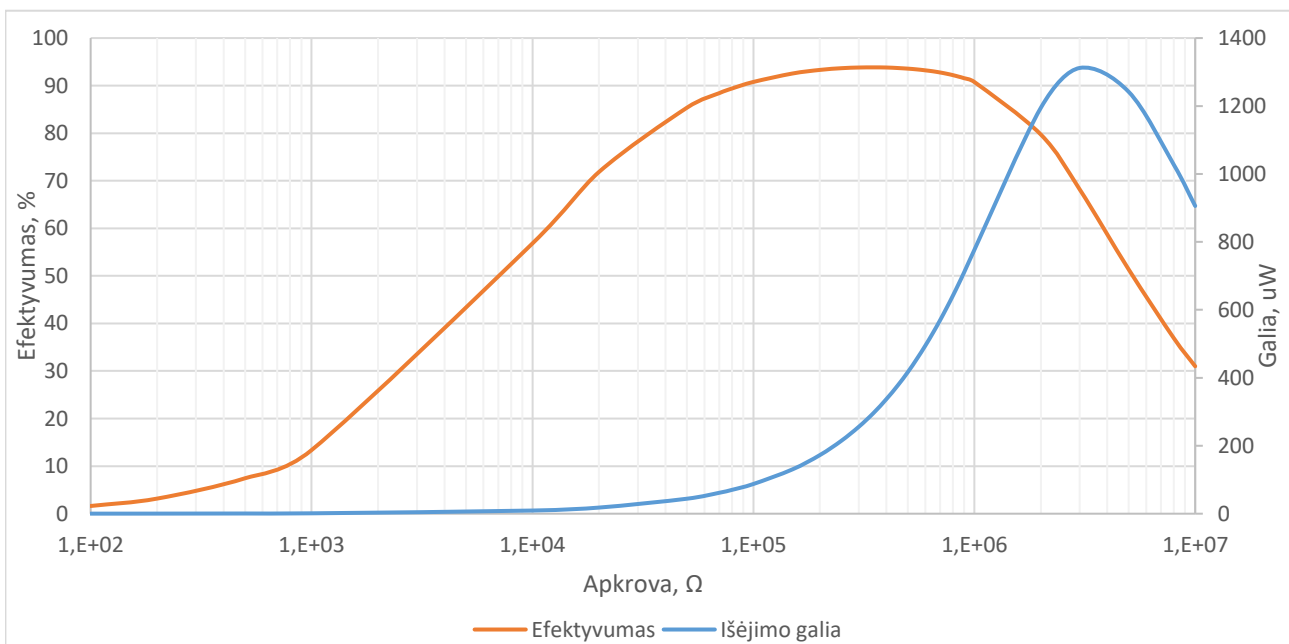
efektyvumas, siekiantis 93,37 %, gaunamas prie 300 pF talpos. Toliau didėjant talpai, efektyvumas palaipsniui mažėja ir prie 2 nF sumažėja iki 91,63 %. Nors šis pokytis nėra labai didelis, jis patvirtina, kad per didelė talpa blogina perjungimo proceso kokybę. Taigi, siekiant didžiausios galios pasirenkamas 700 pF kondensatoriaus talpa.



3.20 pav. Išėjimo galios (standartizuota) priklausomybė nuo naudojamo induktoriaus induktyvumo esant skirtingai apkrovai

SSHI grandinėje induktorius yra vienas svarbiausių elementų, nes būtent jis kartu su pjezoelektrinio elemento talpa sudaro rezonansinį LC kontūrą, per kurį įvykdoma pjezo elemento įtampos invertavimas. Tai yra pagrindinė SSHI metodo veikimo esmė, todėl induktyvumo nominalas tiesiogiai lemia, kaip greitai ir kaip efektyviai vyksta rezonansiniai svyravimai tarp talpos ir induktyvumo. Dėl šios priežasties atliekama induktoriaus induktyvumo analizė, siekiant nustatyti, koks jo dydis leidžia pasiekti didžiausią išėjimo galią esant skirtingoms apkrovoms. Esant per mažam induktyvumui, LC kontūro rezonansinis procesas vyksta labai greitai, todėl įtampos invertavimas tampa pernelyg staigus ir ne visada pakankamai efektyvus. Tokiu atveju dalis energijos gali būti neišnaudojama, nes perjungimo procesas tampa jautresnis tranzistorių, diodų varžai ir kitiems parazitiniams elementų parametrams. Be to, mažas induktyvumas lemia didesnes momentines sroves, kurios realioje grandinėje galėtų sukelti didesnius laidumo nuostolius ir apsunkinti stabilų grandinės veikimą. Priešingai, esant labai dideliui induktyvumui, rezonansinis procesas vyksta lėčiau. Tuomet įtampos inversija vyksta švelniau, tačiau gali tapti per lėta, todėl dalis energijos prarandama ne optimaliu laiko momentu. Per didelis induktyvumas taip pat reiškia didesnę fizinę komponentą, didesnę apvijų varžą ir sunkiau realizuojamą konstrukciją. Todėl pernelyg didelės induktyvumo reikšmės nėra racionalios realios grandinės įgyvendinimo požiūriu. 3.20 pav. pateikta standartizuotos išėjimo galios priklausomybė nuo induktoriaus nominalo, esant 100 kΩ, 200 kΩ, 660 kΩ ir 1 MΩ apkrovoms. Iš rezultatų matyti, kad didėjant induktyvumui išėjimo galia visais atvejais pirmiausia didėja, vėliau pasiekia maksimumą, o po to stabilizuojasi ir pradeda nežymiai mažėti. Tai rodo, kad per mažas induktorius neleidžia pilnai realizuoti SSHI inversijos proceso, o nuo tam tikros ribos didesnis induktyvumas jau nebesuteikia apčiuopiamos naudos. Esant 100 kΩ apkrovai, standartizuota galia kinta palyginti nedaug – nuo maždaug 0,916 prie itin mažo induktyvumo (nuo 0.01nH) iki 1 prie ~1–2 mH. Tai rodo, kad šiuo atveju SSHI grandinė yra mažai jautri induktoriaus nominalui, o

net ir netikslus parinkimas nesukelia didelio galios sumažėjimo. Esant 200 kΩ apkrovai, priklausomybė tampa ryškesnė – standartizuota galia didėja nuo ~0,814 iki 1, maksimumą pasiekdama prie maždaug 0,22–1 mH. Tai rodo, kad optimalaus LC rezonanso formavimas tampa svarbesnis, o mažesni induktoriai jau neleidžia pilnai realizuoti energijos pernešimo proceso. Didžiausia induktoriaus įtaka pastebima esant 660 kΩ apkrovai. Šiuo atveju standartizuota galia mažų induktyvumų srityje yra tik apie 0,56, tačiau didėjant induktyvumui pasiekia 1 prie maždaug 0,22–0,68 mH. Tai reiškia, kad netinkamai parinktas induktorius gali sumažinti išgaunamą galią beveik dvigubai, todėl induktyvumo optimizavimas yra kritiškai svarbus. Panaši, tačiau dar ryškesnė tendencija stebima esant 1 MΩ apkrovai. Pradiniame diapazone standartizuota galia siekia tik ~0,39, o maksimumas pasiekiamas prie ~0,22–0,47 mH. Vėliau, didinant induktyvumą, stebimas nežymus galios mažėjimas (iki ~0,94 prie 10 mH). Taigi, per mažas induktyvumas lemia pernelyg greitą ir mažiau efektyvų rezonansinį procesą, o per didelis – pernelyg lėtą inversiją ir didesnius laidumo nuostolius. Gauti rezultatai rodo, kad racionaliausios induktyvumo reikšmės yra maždaug 0,22–1 mH intervale, nes būtent šiame diapazone visoms nagrinėtoms apkrovoms pasiekiamą didžiausia arba beveik didžiausia išėjimo galia. Todėl, atsižvelgiant į tai, kad 220 μH yra mažiausias induktoriaus nominalas šiame optimaliame diapazone, jis buvo pasirinktas tolimesniems tyrimams. Toks pasirinkimas yra pagrįstas ne tik išėjimo galios maksimizavimu, bet ir praktiniais aspektais – mažesnio nominalo induktoriai pasižymi mažesniais matmenimis, mažesnėmis parazitinėmis varžomis bei paprastesne realizacija realiose grandinėse, išlaikant maksimalų energijos išgavimo efektyvumą.



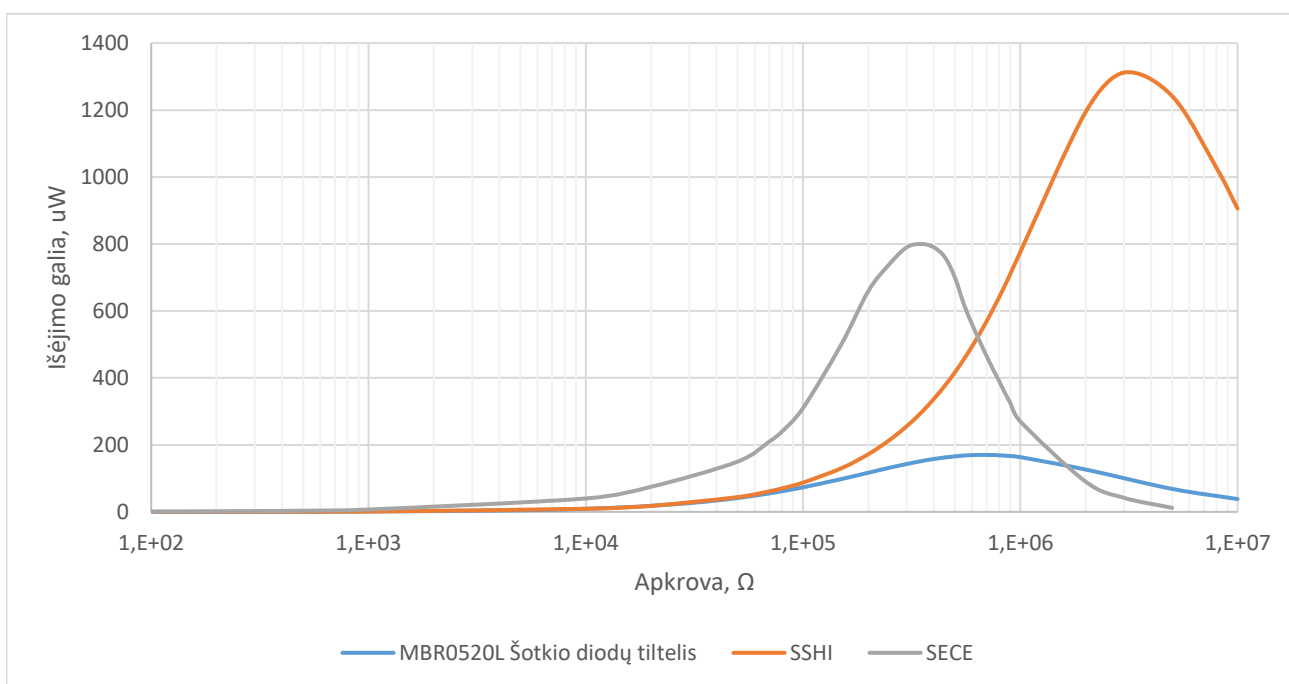
3.21 pav. Išėjimo galios ir efektyvumo priklausomybė nuo apkrovos dydžio

Iš priklausomybės matyti, kad išėjimo galia didėja didėjant apkrovos varžai ir maksimumą pasiekia prie MΩ eilės apkrovų. Didžiausia galia pasiekiamą 1312 μW prie 3 MΩ apkrovos varžos. Toliau didinant apkrovą, galia pradeda mažėti, ir prie 10 MΩ ji sumažėja iki 906 μW. Efektyvumas sparčiai didėja didėjant apkrovai ir maksimumą pasiekia prie maždaug 300–400 kΩ, kur jis siekia 93.8 %. Toliau apkrovai didėjant, efektyvumas palaipsniui mažėja: prie 1 MΩ jis lygus apie 90.8 %, o prie 10 MΩ sumažėja iki maždaug 31 %. Esant mažoms apkrovoms (iki 10 kΩ), tiek išėjimo galia, tiek efektyvumas yra labai maži (atitinkamai iki ~9 μW ir ~57 %), nes sistema stipriai apkrauna

pjezoelektrinį elementą ir neleidžia sukaupti pakankamai įtampos. Didėjant apkrovai, mažėja slopinimas, todėl didėja tiek įtampos amplitudė, tiek išgaunama galia. Svarbu pastebėti, kad maksimalios galios ir maksimalaus efektyvumo taškai nesutampa. Didžiausias efektyvumas pasiekiamas prie $\sim 350 \text{ k}\Omega$, o didžiausia galia – prie $\sim 3 \text{ M}\Omega$. Tai rodo dėsningumą tarp efektyvumo ir galios: mažesnės apkrovos varžos leidžia efektyviau išnaudoti energiją, tačiau riboja jos kiekį, o didesnės apkrovos varžos leidžia išgauti daugiau galios, tačiau su didesniais nuostoliais. SSHI topologija leidžia pasiekti labai aukštą efektyvumą (iki $\sim 94 \%$) bei gana didelę išėjimo galią (iki $\sim 1.3 \text{ mW}$), lyginant su anksčiau analizuotomis topologijomis. Svarbu pabrėžti, kad lyginant SSHI topologiją su pasyviu Šotkio diodų tilteliu prie tos pačios $660 \text{ k}\Omega$ apkrovos, matomas aiškus galios padidėjimas. Naudojant SSHI grandinę prie $660 \text{ k}\Omega$ apkrovos gaunama $532 \mu\text{W}$ išėjimo galia, o naudojant diodų tiltelį – $171 \mu\text{W}$. Tai reiškia, kad SSHI topologija leidžia išgauti 311 % didesnę galią.

3.5. Energijos išgavimo topologijų palyginimas

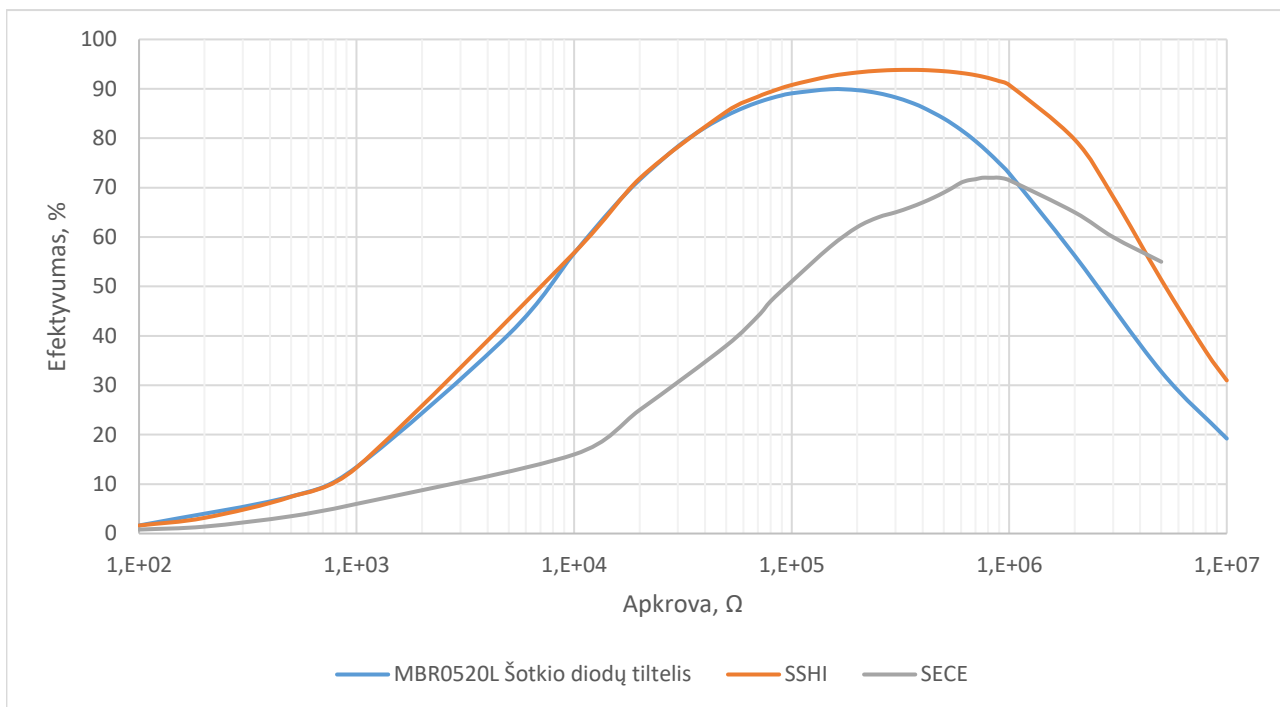
Siekiant įvertinti skirtingų energijos išgavimo metodų efektyvumą, šiame skyriuje atliekamas trijų topologijų – pasyvaus Šotkio diodų tiltelio, SECE ir SSHI – palyginimas. Analizė atliekama vertinant išėjimo galios ir efektyvumo priklausomybes nuo apkrovos varžos, taip leidžiant nustatyti optimalias darbo sritis ir kiekvienos grandinės taikymo ribas.



3.22 pav. Įvairių topologijų gaunama išėjimo galia

Išėjimo galios priklausomybės grafike matyti, kad visos trys topologijos pasižymi skirtingu dėsningumu priklausomai nuo apkrovos. Pasyvaus diodų tiltelio atveju maksimali išėjimo galia siekia apie $170 \mu\text{W}$ prie $\sim 600\text{--}700 \text{ k}\Omega$ apkrovos. SECE jungimo maksimali galia pasiekama prie $\sim 350 \text{ k}\Omega$ ir siekia apie $800 \mu\text{W}$, t.y. 4,7 karto daugiau nei naudojant diodų tiltelį prie $660 \text{ k}\Omega$ arba 5,1 karto daugiau prie $350 \text{ k}\Omega$. SSHI jungimu pasiekiamas dar didesnis galios prieaugis – maksimali išėjimo galia pasiekia $1312 \mu\text{W}$ prie $\sim 3 \text{ M}\Omega$ apkrovos, kas sudaro apie 7,7 karto didesnę galią lyginant su pasyviu tiltu arba $532 \mu\text{W}$ prie $660 \text{ k}\Omega$, kas yra 3.1 karto daugiau nei su Šotkių diodų tilteliu. Tačiau, toks maksimumas (prie $3 \text{ M}\Omega$ apkrovos) pasiekiamas labai didelės apkrovos srityje, kuri praktinėse sistemose dažnai yra sunkiai realizuojama dėl didelio impedanso ir riboto energijos panaudojimo

galimybių. Dėl šios priežasties realiame taikyme svarbiau vertinti galios reikšmes vidutinių apkrovų diapazone, kur SECE ir SSHI topologijų skirtumai tampa mažesni, o SECE dažnai pasižymi pranašumu žemesnių apkrovų srityje.



3.23 pav. Išgavimo topologijų efektyvumas

Efektyvumo priklausomybės grafike matyti, kad tiek diodų tiltelis, tiek SSHI topologija pasižymi aukštais efektyvumo rodikliais vidutinėse apkrovose. Diodų tiltelio maksimalus efektyvumas siekia apie 89–90 %, o SSHI topologijoje efektyvumas padidėja iki ~93,8 % prie ~300–350 k Ω apkrovos. SECE topologija pasižymi mažesniu efektyvumu – maksimaliai apie 72 %, tačiau pasiekama didesnė išėjimo galia. Taip pat pastebima, kad didėjant apkrovos varžai, visų topologijų efektyvumas pradeda mažėti, ypač SSHI atveju esant labai didelėms apkrovoms.

Taigi, visos nagrinėtos topologijos turi skirtingas optimalias taikymo sritis. Pasyvus diodų tiltelis yra paprasčiausias sprendimas, tačiau užtikrina mažiausią išėjimo galią. SECE topologija yra efektyvesnė žemesnių ir vidutinių apkrovų diapazone, kur leidžia 4.7 karto padidinti išgaunamą galią. SSHI topologija pasižymi didžiausiu potencialu išgauti energiją ir aukščiausiu efektyvumu, tačiau jos maksimalūs rezultatai pasiekiami esant didelėms apkrovos varžoms, kurios ne visada yra praktiškai tinkamos. Todėl konkrečios topologijos pasirinkimas turi būti atliekamas atsižvelgiant į numatomą apkrovos diapazoną: žemesnių impedansų srityje pranašesnė SECE topologija, o aukštesnių – SSHI, tačiau abiem atvejais pasiekiami rezultatai yra kelis kartus geresni nei naudojant vien tik pasyvų diodų tiltelį.

Išvados

1. Atlikta literatūros analizė parodė, kad pjezoelektrinių energijos generatorių efektyvumą lemia apkrovos ir generatoriaus impedansų santykis, o pažangūs metodai, tokie kaip SSHI ir SECE, leidžia ženkliai padidinti išgaunamą galią, palyginti su tradiciniais pasyviais diodų tilteliais.
2. COMSOL aplinkoje realizuotas bimorfinės pjezoelektrinės gembės modelis leido optimizuoti mechaninius ir elektrinius pjezoelektrinio generatoriaus parametrus. Modeliavimo metu nustatyta, kad esant 0,5 G vibracinio žadinimo pagreičiui ir 49,9 Hz rezonansiniam dažniui generatorius pasiekia 23 V išėjimo įtampą bei 0,38 mW generuojamą galią.
3. Nustatyta, kad naudojant Šotkio diodų tiltelį (MBR0520L), didžiausia išėjimo galia siekia apie 170 μW prie 600–700 k Ω apkrova, o efektyvumas artėja prie 90 %; toks sprendimas užtikrina geresnį rezultatą nei aktyvus MOSFET tiltelis (maksimali 70 μW galia prie 90 k Ω), todėl konkrečiam galios ir įtampos lygiui Šotkio diodų tiltelis leidžia gauti maždaug 2–2,5 karto didesnę galią nei MOSFET pagrindu veikiančios topologijos.
4. SECE topologija leidžia ženkliai padidinti išgaunamą galią – didžiausia galia siekia apie 800 μW prie 300–400 k Ω apkrovos, t.y. 4,5–4,7 karto daugiau nei naudojant Šotkio diodų tiltelį su ta pačia apkrova. Prie 660 k Ω apkrovos SECE grandinė generuoja 515 μW , o Šotkio diodų tiltelis – 171 μW , todėl šiame taške SECE suteikia 3 kartus didesnę galią, nors efektyvumas (72 %) yra mažesnis nei diodų tiltelio (~90 %).
5. SSHI topologija pasižymi didžiausia iš PEH išgaunama galia– maksimaliai pasiekta 1,3 mW su 3 M Ω apkrova, kas yra daugiau nei 7 kartus didesnė galia nei Šotkio diodų tiltelio maksimali galia. Prie 660 k Ω apkrovos SSHI generuoja 532 μW , kai Šotkio diodų tiltelis – 171 μW , t.y. SSHI šiame taške suteikia 3,1 karto didesnę galią, išlaikydama aukštą efektyvumą 90–94 %.
6. Aktyvūs energijos surinkimo metodai (SECE ir SSHI) kelis kartus padidina išgaunamą galią, tačiau jų efektyvus taikymas priklauso nuo konkrečių sistemos sąlygų ir apkrovos, todėl praktiniuose sprendimuose būtina parinkti tinkamiausią jungimą pagal darbo režimą, t.y. esant mažesnėms ir vidutinėms apkrovos varžoms (iki 600–700 k Ω) SECE topologija yra tinkamesnė dėl didesnės galios prie tipinių IoT apkrovų (pvz., 660 k Ω), o didesnėms apkrovoms (virš 700 k Ω , ir M Ω diapazone) efektyvesnis sprendimas yra SSHI topologija, leidžianti pasiekti didžiausią išgaunamą galią ir labai aukštą efektyvumą.

Literatūros sąrašas

1. COVACI, C. ir A. GONTEAN. Piezoelectric energy harvesting solutions: A review. *Sensors* . 2020, 20(12), 3512 [žiūrėta 2026-04-24]. ISSN 1424-8220. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/12/3512>
2. LANDALUCE, H., L. ARJONA, A. PERALLOS, F. FALCONE, I. ANGULO ir F. MURALTER. A Review of IoT Sensing Applications and Challenges Using RFID and Wireless Sensor Networks. *Sensors* . 2020, 20, 2495 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/9/2495>
3. SUDEVALAYAM, S. ir P. KULKARNI. Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* . 2011, 13, 443–461 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5522465>
4. SHAIKH, F. K. ir S. ZEADALLY. Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* . 2016, 55, 1041–1054 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115012629?via%3Dihub>
5. ROUNDY, S., P. K. WRIGHT ir J. RABAEY. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. *Computer Communications* . 2003, 26, 1131–1144 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366402002487?via%3Dihub>
6. MITCHESON, P., T. GREEN, E. YEATMAN ir A. HOLMES. Architectures for vibration-driven micropower generators. *Journal of Microelectromechanical Systems* . 2004, 13, 429–440 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1303621/>
7. MAAMER, B., A. BOUGHAMOURA, A. M. F. EL-BAB, L. A. FRANCIS ir F. TOUNSI. A review on design improvements and techniques for mechanical energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic schemes. *Energy Conversion and Management* . 2019, 199, 111973 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419309793?via%3Dihub>
8. VATANSEVER, D., R. L. HADIMANI, T. SHAH ir E. SIORES. An investigation of energy harvesting from renewable sources with PVDF and PZT. *Smart Materials and Structures* . 2011, 20, 055019 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/20/5/055019>
9. RAMADAN, K. S., D. SAMEOTO ir S. EVOY. A review of piezoelectric polymers as functional materials for electromechanical transducers *Smart Materials and Structures* . 2014, 23, 033001 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/23/3/033001>
10. MISHRA, S., L. UNNIKRISHNAN, S. K. NAYAK ir S. MOHANTY. Advances in piezoelectric polymer composites for energy harvesting applications: A systematic review. *Macromolecular Materials and Engineering* . 2018, 304, 1800463 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/mame.201800463>
11. SAPPATI, K. ir S. BHADRA. Piezoelectric Polymer and Paper Substrates: A Review. *Sensors* . 2018, 18, 3605 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/11/3605>
12. RÖDEL, J., K. G. WEBBER, R. DITTMER, W. JO, M. KIMURA ir D. DAMJANOVIC. Transferring lead-free piezoelectric ceramics into application. *Journal of the European Ceramic Society* . 2015, 35, 1659–1681 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221914006700?via%3Dihub>
13. BAEK, C., H. PARK, J. H. YUN, D. K. KIM ir K.-I. PARK. Lead-free BaTiO₃ nanowire arrays-based piezoelectric energy harvester. *MRS Advances* . 2017, 2, 3415–3420 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://link.springer.com/article/10.1557/adv.2017.305>

14. ZHENG, M., Y. HOU, L. CHAO ir M. ZHU. Piezoelectric KNN ceramic for energy harvesting from mechanochemically activated precursors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* . 2018, 29, 9582–9587 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10854-018-8993-4>
15. CALIÒ, R., U. RONGALA, D. CAMBONI, M. MILAZZO, C. STEFANINI, G. DE PETRIS ir C. ODDO. Piezoelectric Energy Harvesting Solutions. *Sensors* . 2014, 14, 4755–4790 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/1424-8220/14/3/4755>
16. WOO, M. S., J. H. AHN, J. H. EOM, W. S. HWANG, J. H. KIM, C. H. YANG ir T. H. SUNG. Study on increasing output current of piezoelectric energy harvester by fabrication of multilayer thick film. *Sensors and Actuators A: Physical* . 2018, 269, 524–534 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424717315959?via%3Dihub>
17. SHU, Y. C. ir I. C. LIEN. Analysis of power output for piezoelectric energy harvesting systems. *Smart Materials and Structures* . 2006, 15, 1499–1512 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/15/6/001>
18. UCHINO, K. ir T. ISHII. Energy Flow Analysis in Piezoelectric Energy Harvesting Systems. *Ferroelectrics* . 2010, 400, 305–320 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00150193.2110.505852>
19. KONG, N., D. S. HA, A. ERTURK ir D. J. INMAN. Resistive impedance matching circuit for piezoelectric energy harvesting. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* . 2010, 21, 1293–1302 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1045389X09357971>
20. OTTMAN, G., H. HOFMANN, A. BHATT ir G. LESIEUTRE. Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply. *IEEE Transactions on Power Electronics* . 2002, 17, 669–676 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1035141/>
21. OTTMAN, G., H. HOFMANN ir G. LESIEUTRE. Optimized piezoelectric energy harvesting circuit using step-down converter in discontinuous conduction mode. *IEEE Transactions on Power Electronics* . 2003, 18, 696–703 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1189621>
22. GUYOMAR, D., A. BADEL, E. LEFEUVRE ir C. RICHARD. Toward energy harvesting using active materials and conversion improvement by nonlinear processing. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* . 2005, 52, 584–595 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1428041>
23. LALLART, M. ir D. GUYOMAR. An optimized self-powered switching circuit for non-linear energy harvesting with low voltage output. *Smart Materials and Structures* . 2008, 17, 035030 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/17/3/035030>
24. LEFEUVRE, E., A. BADEL, C. RICHARD ir D. GUYOMAR. Piezoelectric Energy Harvesting Device Optimization by Synchronous Electric Charge Extraction. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* . 2005, 16, 865–876 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1045389X05056859>
25. WU, L., X.-D. DO, S.-G. LEE ir D. S. HA. A Self-Powered and Optimal SSHI Circuit Integrated with an Active Rectifier for Piezoelectric Energy Harvesting. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers* . 2017, 64, 537–549 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7778136/>
26. ELTAMALY, Ali M. ir Khaled E. ADDOWEESH. A Novel Self-Power SSHI Circuit for Piezoelectric Energy Harvester. *IEEE Transactions on Power Electronics* . 2017, 32(10), 7663–7673 [žiūrėta 2026-04-24]. ISSN 0885-8993. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2636903. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7776977/>

27. LEFEUVRE, Elie, Adrien BADEL, Claude RICHARD ir Daniel GUYOMAR. Piezoelectric Energy Harvesting Device Optimization by Synchronous Electric Charge Extraction. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* . 2005, 16, 865–876 [žiūrėta 2026-04-24]. ISSN 1045-389X. DOI: 10.1177/1045389X05056859. Prieiga per internetą: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1045389X05056859>
28. LIU, Haili, Rui HUA, Yang LU, Ya WANG, Emre SALMAN ir Junrui LIANG. Boosting the efficiency of a footstep piezoelectric-stack energy harvester using the synchronized switch technology. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* . 2019, 30(6), 813–822 [žiūrėta 2026-04-24]. DOI: 10.1177/1045389X19828512. Prieiga per internetą: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1045389X19828512>
29. QIU, Jiacong ir Junrui LIANG. A Self-powered Extensible SECE Rectifier For Piezoelectric Energy Harvesting. In *The 2022 International Power Electronics Conference (IPEC-Himeji 2022 – ECCE Asia)*. 2022 [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9807178>
30. DAVARI, P., N. GHASEMI ir F. ZARE. Power converters design and analysis for high power piezoelectric ultrasonic transducers. In: *Proceedings of the 16th Conference on Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe)*. 2014, p. 1–9 [žiūrėta 2026-04-28]. DOI: 10.1109/EPE.2014.6910986. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/265686185_Power_converters_design_and_analysis_for_high_power_piezoelectric_ultrasonic_transducers
31. RATHOD, Vivek T. A Review of Electric Impedance Matching Techniques for Piezoelectric Sensors, Actuators and Transducers. *Electronics*. 2019, 8(2), 169 [žiūrėta 2026-04-28]. ISSN 2079-9292. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/2/169>