



PJEZOELEKTRINIŲ ENERGIJOS SURINKIMO SISTEMŲ APŽVALGA

Andrius ČEPONIS¹, Dalius MAŽEIKA²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹andrius.ceponis@vgtu.lt; ²dalius.mazeika@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje apžvelgiamos problemos ir sprendimai, susiję su elektrinės energijos tiekimu mažos galios elektronikos sistemoms, taikant energijos surinkimo iš aplinkos technologijas. Vienas iš pagrindinių energijos surinkimo sistemų apibūdinančių parametrų yra galios tankis. Pjezoelektrinė energijos surinkimo technologija pasižymi vienu iš didžiausių galios tankiu, todėl straipsnyje išsamiai nagrinėjami pjezoelektriniai kinetinės energijos keitikliai, apžvelgiamos keitiklių konstrukcijos, jų sudedamosios dalys, išskiriamos technologinės sąlygos, darančios įtaką keitiklių efektyvumui.

Reikšminiai žodžiai: energijos surinkimas, pjezoelektrinis efektas, pjezoelektriniai keitikliai, mažos galios elektronika.

Įvadas

Sparčiai vystantis mažos galios elektronikai ir dėvimos elektronikos sistemoms, atrandamos vis platesnės jų pritaikymo sritys. Mažos galios elektronikos įtaisai pasižymi plačiu pritaikymu įvairiose technologinėse srityse pradedant bevielių jutiklių tinklais ir baigiant žmogaus fiziologinių rodiklių stebėjimu ir analizavimu.

Mažos galios ar dėvimos elektronikos sistemoms maitinti plačiausiai taikomi sprendimai, paremti įvairių tipų keičiamų baterijų arba fotovoltinių elementų naudojimu. Naudojant keičiamas baterijas susiduriama su papildomomis ekonominėmis sąnaudomis tvarkant ir prižiūrint sistemas. Fotovoltiniai elementai apriboja šių sistemų taikymą patalpose ar aplinkose, kuriose yra žemo intensyvumo apšviestumas.

Problemas, susijusias su energijos tiekimu mažos galios elektronikos sistemoms, vis dažniau siūloma spręsti taikant energijos surinkimo iš aplinkos metodus. Energijos gavyba iš sistemą supančios aplinkos pasižymi savybėmis, kurias pritaikius galima išspręsti problemas, kylančias tiekiant energiją šio tipo įrenginiams.

Energijos surinkimas iš aplinkos – tai aplinkoje esančios mechaninės, radijo bangų, šiluminės energijos keitimas į elektros energiją. Kiekviena aplinkoje esanti energijos rūšis gali būti verčiama į elektros energiją, pasitelkiant keitiklius, kurių konstrukcinės savybės ar juose naudojamos medžiagos, sąveikaudamos su aplinkoje esančia energija, sukuria elektros energiją.

Atsižvelgdami į surenkamos energijos tipą ir keitimo metodą galime apibrėžti vieną iš esminių energijos keiti-

mo parametrų – sukuriama elektrinės galios santykį su keitiklio paviršiaus plotu (W/m^2) arba jo tūriu (W/m^3). Galios tankis apibrėžia energijos surinkimo sistemos efektyvumą, todėl, vertindami šį elektromechaninį parametą, apžvelgsime įvairius energijos surinkimo metodus, išskirdami pjezoelektrines sistemas, kaip didžiausiu energetiniu potencialu pasižyminčią energijos surinkimo metodiką, kuri gali būti sėkmingai pritaikyta mažos galios elektronikos įtaisuose.

Radijo bangų (*anglų k. Radio frequency*) energijos surinkimas iš aplinkos – tai energijos surinkimo metodas, paremtas aplinkoje esančių skirtingų dažnių radijo bangų energijos transformavimu į elektros energiją. Šiam energijos surinkimo tipui naudojami keitikliai mažai skiriasi nuo radijo imtuvuose ir siųstuvuose naudojamų antenų. Šio metodo galios tankis remiantis atliktais eksperimentiniais tyrimais – $60\text{--}70\mu W/m^2$, esant $2,4\text{ GHz}$ radijo bangų dažniui (Bouchouicha *et al.* 2010)

Šiluminės energijos surinkimas iš aplinkos – tai energijos surinkimo metodas, paremtas medžiagos savybe sukurti elektros energiją ją veikiant termiškai, t. y. kaitinant arba šaldant. Šio metodo galios tankis yra $50\text{--}60\mu W/m^2$ (Stevens 1999).

Kinetinės energijos surinkimas iš aplinkos naudojant elektromagnetinius keitiklius – tai energijos surinkimo metodas, paremtas nuolatinio magnetinio lauko sąveika su laidininku. Šio metodo galios tankis – $3,1\text{--}5,6\mu W/m^3$ (Bouendeu *et al.* 2009).

Kinetinės energijos surinkimas iš aplinkos naudojant pjezoelektrinius keitiklius – tai energijos surinkimo metodas, paremtas tiesioginiu pjezoelektriniu efektu. Efektas pasireiškia pjezoelektrinę medžiagą veikiant mechanškai, gniuždant ar ją tempiant. Šio metodo galios tankis – 200–300 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ (Feenstra *et al.* 2008).

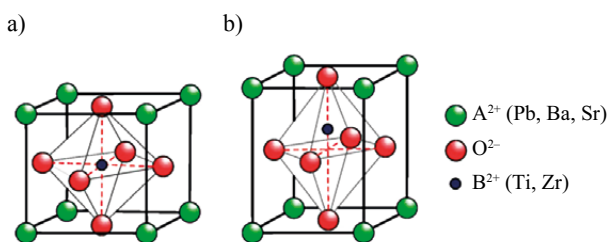
Apžvelgę ir palyginę pagrindinius energijos surinkimo metodus, galime daryti išvadą, kad tiesioginio pjezoelektrinio efekto taikymas transformuojant mechaninę energiją į elektrinę pasižymi didžiausiu galios tankiu, todėl toliau bus išsamiai apžvelgtos šios sistemos.

Medžiagos, pasižyminčios pjezoelektrinėmis savybėmis

Prieš nagrinėjant tiesioginį pjezoelektrinį efektą, bus apžvelgtos medžiagos, pasižyminčios pjezoelektrinėmis savybėmis. Pjezoelektrinės medžiagos – tai anizotropinės medžiagos, pasižyminčios skirtingomis fizikinėmis savybėmis įvairiomis kristalinės gardelės kryptimis. Tokias medžiagas galima aptikti gamtoje. Tai sengeno druska, kvarcas ir berlinitas. Nors šios medžiagos ir pasižymi geromis pjezoelektrinėmis savybėmis, jų praktinis pritaikymas yra ribotas. Devyniolikto amžiaus pradžioje pirmą kartą buvo susintetintos medžiagos – gliumo fosfatas ir langistatas. Nors šie sintetiniai kristalai ir pasižymėjo pjezoelektrinėmis savybėmis, artimomis natūraliam kvarco kristalui, tačiau jų praktinis pritaikymas išliko ribotas dėl sudėtingo kristalų gamybos proceso.

Polimeras polivinilidenfluoridas (PVDF) pasižymi pjezoelektrinėmis savybėmis, kelis kartus lenkiančiomis kvarčą. Skirtingai nuo keramikų, kuriose pjezoelektrinį efektą sukuria kristalinė medžiagos struktūra, polimeruose šis efektas pasireiškia ilgose molekulių grandinėse, kurios sąveikaudamos tarpusavyje sukuria elektrinį lauką.

Viena iš svarbiausių pjezoelektrinių medžiagų ir šiuo metu plačiausiai naudojamų praktikoje yra pjezoelektrinė švino cirkonato titanato (PZT) keramika. Šis keramikos tipas pasižymi polikristaline perovskitine kristaline struktūra (1 pav.).

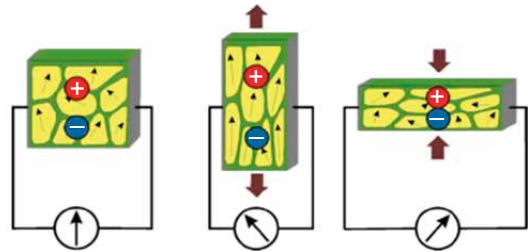


1 pav. PZT keramikos kristalinė gardelė: a – virš Kiuri taško; b – žemiau Kiuri taško
Fig. 1. The lattice of PZT ceramics: a – above Curie point; b – below Curie point

Galimybė iš PZT keramikos pudros gaminti įvairių geometrinių formų, dydžių ir storių gaminius lėmė plačias šios pjezoelektrinės keramikos pritaikymo galimybes.

Tiesioginio pjezoelektrinio efekto modelis

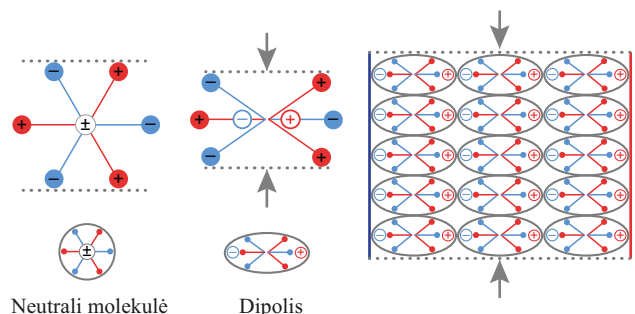
Tiesioginis pjezoeftas teigia, kad, gniuždant ar tempiant pjezoelektrines medžiagas, susidaro elektros krūvis medžiagos paviršiuose (2 pav.).



2 pav. Tiesioginio pjezoelektrinio efekto modelis
Fig. 2. Model of direct piezoelectric effect

Tiesioginio pjezoelektrinio efekto modelis iliustruoja, kaip mechaninis medžiagos veikimas daro įtaką elektrinio krūvio susidarymui deformuojamos medžiagos paviršiuje. Šis modelis tik iš dalies paaiškina pjezoelektrinį efektą, todėl toliau bus nagrinėjamas molekulinis jo modelis.

Molekulinis pjezoelektrinio efekto modelis (3 pav.) paaiškina elektros krūvio susidarymą, kai pjezoelektrinę medžiagą veikia mechaninė apkrova. Prieš paveikiant medžiagą, teigiamo ir neigiamo krūvininkų molekulių centrai sutampa ir elektrinis krūvis nėra sukuriamas. Veikiant medžiagą išorine jėga, kubinė kristalo gardelė deformuojasi ir atsiradusi deformacija paslenka teigiamus ir neigiamus krūvininkus iš gardelės centro. Todėl gaunami nedideli dipoliai. Susiduriantys skirtingo poliškumo krūvininkai vienas kitą stumia ir taip pasiskirsto medžiagos paviršiuje sukurdami elektros krūvį. Taip medžiaga poliarizuojasi ir dėl šios poliarizacijos mechaninę energiją, susidarančią veikiamoje medžiagoje, galime paversi elektros energija.



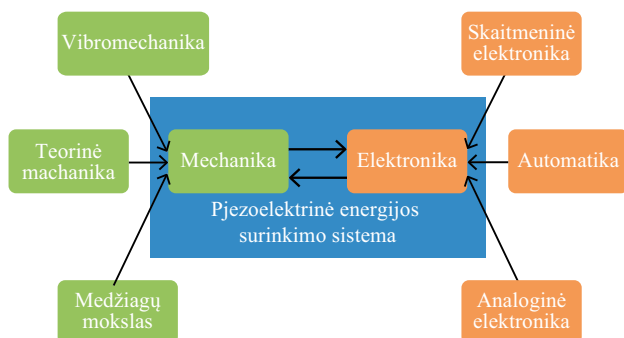
3 pav. Tiesioginio pjezoelektrinio efekto molekulinis modelis
Fig. 3. Molecular model of direct piezoelectric effect

Siekdami efektyviai išnaudoti tiesioginį pjezoelektrinį efektą, turime teisingai parinkti pjezoelektrinės keramikos tipą. Naudojamos keramikos tipas tiesiogiai veiks sistemos energetinį efektyvumą ir technologinį potencialą. Pjezoelektrinės keramikos (PZT) skirstomos į dvi grupes: kietąją keramiką ir minkštąją keramiką. Kietoji pjezoelektrinė keramika pasižymi aukštu atsparumu dideliems elektriniams ir mechaniniams poveikiams. Aukštas šio tipo keramikų temperatūrinis ir depoliarizacijos stabilumas suteikia galimybę jas taikyti pjezoelektriniuose varikliuose, aukštos įtampos generatoriuose bei didelės mechaninės galios pjezoelektrinėse sistemose. Kietosios pjezoelektrinės keramikos taikymas energijos surinkimo sistemose yra ribotas dėl aukšto mechaninės kokybės koeficiento, žemo pjezoelektrinio koeficiento, lyginant su minkštąją keramika. Minkštoji pjezoelektrinė keramika pasižymi didesniu pjezoelektriniu koeficientu, aukštu elektrinės skvarbos rodikliu, žemu mechaninės kokybės koeficientu. Šio tipo keramikos neigiamos savybės – tai žemas temperatūrinis ir depoliarizacijos stabilumas. Fizikinės šios medžiagos savybės apibrėžia keramikos pritaikymo sritį. Minkštoji keramika naudojama jutikliuose, žemos galios keitikliuose, energijos surinkimo sistemose.

Tiesioginio pjezoelektrinio efekto taikymas kinetinei energijai surinkti iš aplinkos atveria plačias galimybes šiam energijos surinkimo metodui taikyti mažos galios elektronikoje. Pasitelkiant šį efektą gali būti išsprędžiamos problemos, susijusios su šių sistemų maitinimu.

Pjezoelektrinių energijos surinkimo sistemų komponentai

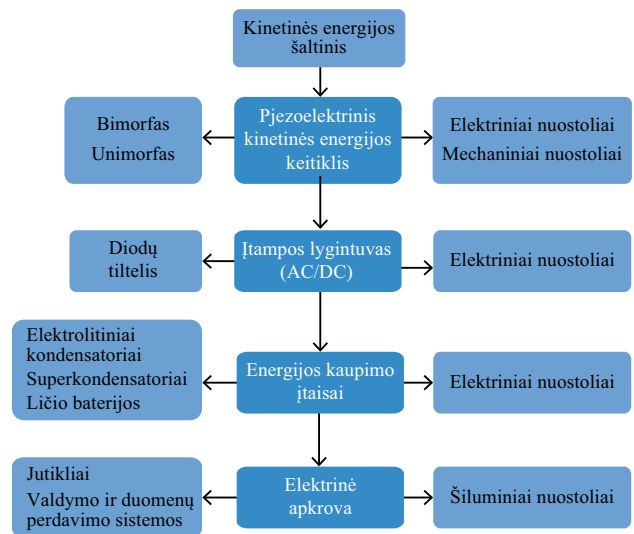
Iki šiol buvo nagrinėjama tik fizikinė tiesioginio pjezoelektrinio efekto prasmė, išskiriamas šio efekto energetinis potencialas. Nagrinėdami pjezoelektrines energijos surinkimo sistemas susiduriame su dviem mokslo šakomis – mechanika ir elektronika, kurių sąsaja pasižymi stiprių tarpdalykinių ryšių (4 pav.).



4 pav. Mechanikos ir elektronikos sąsajos pjezoelektrinėse energijos surinkimo sistemose

Fig. 4. Interdisciplinary between mechanics and electronics in piezoelectric energy harvesting systems

Mechanikos ir elektronikos sąsajos pjezoelektrinėse energijos surinkimo sistemose yra labai glaudžios, todėl, kurdami mechaninės sistemos komponentus, turime nepamiršti jos suderinamumo su naudojamomis elektros grandinėmis ir elektronikos komponentais, kurie tiesiogiai veikia mechaninės dalies efektyvumą. Klasikinę energijos surinkimo sistemą sudaro: pjezoelektrinis kinetinės energijos keitiklis, įtampos lygintuvas (AC/DC), energijos kaupimo įtaisai, elektrinė apkrova (5 pav.).



5 pav. Pjezoelektrinės energijos surinkimo sistemos topologija
Fig. 5. Topology of the piezoelectric energy harvesting system

Iš pjezoelektrinės energijos surinkimo sistemos topologijos matome, kad svarbus ne tik keitiklio, bet ir elektronikos dalies efektyvumas. Elektronika turi pasižymėti žemais elektriniais nuostoliais, efektyviu generuojamos įtampos lyginimu ir sukuriama energijos kaupimu.

Toliau bus nagrinėjama mechaninė ir elektroninė energijos surinkimo sistemų dalys, aptarti pagrindiniai reikalavimai, keliami mechaninės energijos keitikliams, apžvelgti elektroninės dalies komponentai ir jų taikymo efektyvumas.

Pjezoelektriniai kinetinės energijos keitikliai

Taikydami tiesioginį pjezoelektrinį efektą mechaninei energijai surinkti iš aplinkos, turime apibrėžti elektromechaninius keitiklio parametrus, kurie tiesiogiai priklauso nuo išorinės jėgos žadinimo dažnio ir virpesių amplitudės. Dažniausiai naudojamas pjezoelektrinės energijos surinkimo sistemos mechaninės konstrukcijos elementas – viensluksnė (6 pav., a) arba dvisluksnė (6 pav., b) lenkiamoji plokštelė. Jeigu keitiklis sudarytas iš vieno pasyvaus ir vieno aktyvaus pjezoelektrinės keramikos sluoksnio, tai toks keitiklis vadinamas viensluksne sistema. Jei pjezoelektrinės keramikos sluoksniai yra abėjuose pasyvaus

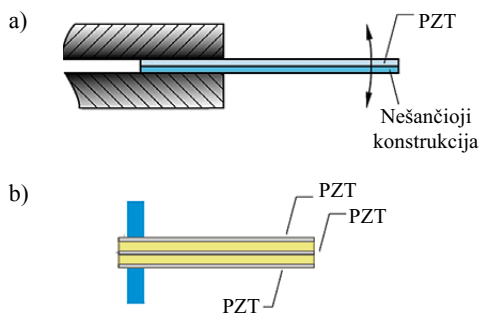
sluoksniu paviršiuose, tokia keitiklio konstrukcija vadinama dvisluoksne. Dvisluoksnių konstrukcijos keitiklių keramikos sluoksniai jungiami nuosekliai ar lygiagrečiai būdu.

Keitiklių elektromechanines savybes apibrėžia dvi toliau pateiktos išraiškos:

$$S = s^E T + d_T E; \quad (1)$$

$$D = d_T T + \varepsilon^T E, \quad (2)$$

čia S – mechaniniai įtempiai; T – mechaninis poveikis; E – elektrinis laukas; D – elektrinio lauko poslinkis, s^E – tamprumo matrica, esant pastoviam elektriniam laukui; d – pjezoelektrinio koeficiento matrica; ε^T – elektrinės skvarbos matrica, esant pastovioms mechaniniams įtempimams (Varadrajan, Bhanusri 2013).



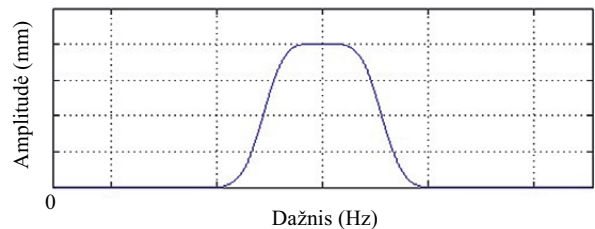
6 pav. Pjezoelektriniai kinetinės energijos keitikliai: a – viensluksnė plokštelė; b – dvisluksnė plokštelė

Fig. 6. Piezoelectric converters of kinetic energy: a – unimorph; b – bimorph

Pjezoelektriniai kinetinės energijos keitikliai dažniausiai virpa modose d_{33} ir d_{31} . Moda d_{33} (tempimo ir gniuždymo moda) nusako, kad įtampa ant elektrodų susidaro, kai veikiančioji jėga yra lygiagreti su pjezoelektrinės keramikos poliarizacijos vektoriumi. Moda d_{31} (lenkimo moda) nusako įtampos susidarymą, kai veikiančioji jėga yra statmena pjezoelektrinės keramikos poliarizacijos vektoriui (Varadrajan, Bhanusri 2013). Lyginant pagrindines veikimo modas galima pastebėti, kad sistema, veikianti d_{31} mode, pasižymės geresniu įtampos generavimo koeficientu, lyginant su d_{33} moda, kai žadinimo jėgos amplitudė vienoda (Varadrajan, Bhanusri 2013).

Energijos surinkimo sistemų, paremtų pjezoelektriniais energijos keitikliais, efektyvumas priklauso nuo virpesių šaltinio ir keitiklio savųjų svyravimų dažnio. Kadangi sistemos slopinimas priklauso nuo virpesių dažnio, todėl pjezoelektrinio keitiklio didžiausias efektyvumas pasiekiamas, kai jis dirba rezonansiniu režimu. Keitiklio savieji dažniai priklauso nuo keitiklio geometrijos, medžiagos charakteristikų ir tvirtinimo sąlygų, todėl galima teigti, kad kiekvienas pjezoelektrinis keitiklis turi būti pritaikytas prie

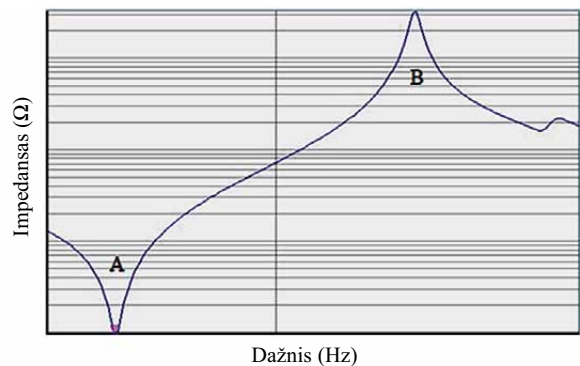
tam tikro dažnio mechaninių virpesių šaltinio (Roundy *et al.* 2003). Tačiau keitikliai, naudojami kinetinei energijai surinkti iš aplinkos, turi pasižymėti plačia mechaninio rezonansinio dažnio juosta (7 pav.) tam, kad jis galėtų prisitaikyti prie skirtingo dažnio virpesių šaltinių. Platus mechaninio rezonansinio dažnio diapazonas apibrėžia keitiklio savybę išlikti rezonanse kintant išoriniams virpesių šaltiniams.



7 pav. Idealizuota rezonansinio dažnio spektrinė charakteristika
Fig. 7. Idealized characteristic of resonance frequency spectrum

Tokie plataus mechaninio rezonansinių dažnių spektro keitikliai tampa universalesni rezonansinio dažnio atžvilgiu, bet pastebimai sumažėja keitiklių mechaninių virpesių amplitudės, kurios tiesiogiai veikia generuojamos elektrinės įtampos amplitudę. Todėl, kuriant pjezoelektrinę energijos surinkimo sistemą, reikia atsižvelgti į rezonansinio dažnio ir keitiklio svyravimų amplitudės santykį.

Keitiklio sukuriama elektrinė galia tiesiogiai priklauso nuo jo impedanso – dažninės priklausomybės (8 pav.). Rezonansinės sistemos elektrinis impedansas mažėja, todėl gaunami žymiai mažesni elektriniai nuostoliai, kurie ir daro įtaką generuojamos galios šuoliui.



8 pav. Impedanso dažninė charakteristika: A – rezonansinis dažnis; B – antirezonansinis dažnis

Fig. 8. Characteristic of impedance – frequency response: A – resonant frequency; B – antiresonant frequency

Rezonansinis pjezoelektrinio keitiklio dažnis tiesiogiai priklauso nuo jo masės, ilgio ir pločio bei storio, t. y. nuo geometrinių keitiklio parametru, taip pat ir nuo medžiagos charakteristikų: Jungo modulio, Puasono koeficiento.

Norint keitklį pritaikyti tam tikro dažnio mechaninės energijos šaltiniui, reikia nustatyti geometrinius keitklio parametrus, kurie tiesiogiai priklausys nuo energijos šaltinio virpesių dažnio. Plokštelės tipo pjezoelektrinio keitklio lenkimo virpesių rezonansinį dažnį galima apskaičiuoti pagal tokią formulę (Priya 2007):

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Ywh^3}{4l^3(m + 0.24m_c)}}, \quad (3)$$

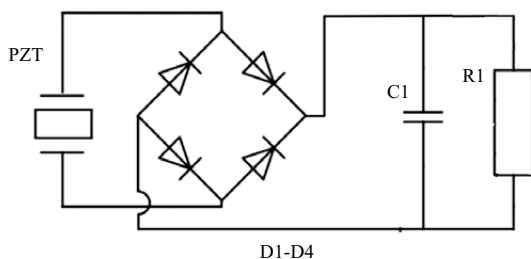
čia Y – medžiagos, iš kurios pagaminta nešančioji keitklio konstrukcija, Jungo modulis; w – keitklio plotis; h – keitklio storis; l – keitklio ilgis; m_c – keitklio svoris.

Egzistuoja ir kiti būdai, kuriais galima sutapatinti keitklio ir vibracijų šaltinio svyravimų dažnius, t. y. masės centro derinimas, rezonansinio dažnio derinimas tempiant ar gniuždant keitklį, elektroninis rezonansinio dažnio derinimas ir kiti (Zhu *et al.* 2010). Rezonansinio dažnio derinimo būdai taikomi jau pagamintų pjezoelektrinių keitklių dažniams suderinti, todėl nėra labai efektyvūs.

Pjezoelektrinių energijos surinkimo sistemų elektroniniai komponentai

Mechaninių virpesių šaltinio charakteristikos taip pat veikia ne vien tik pjezoelektrinių keitklių projektavimo procesą, bet ir elektrinės grandinės schemą bei elektronikos komponentus, skirtus elektrinei energijai kaupti.

Pjezoelektrinių energijos surinkimo sistemų principinė elektrinė grandinė pateikta 9 pav. Ją sudaro pjezoelektrinis keitklis, diodų tiltelis, kondensatorius ir elektrinė apkrova.



9 pav. Elektrinė kinetinės energijos surinkimo schema: PZT – pjezoelektrinis keitklis; D1-D4 – įtampos lyginimo diodai; C1 – kondensatorius; R1 – elektrinė apkrova

Fig. 9. An electric circuit diagram of the energy harvesting system: PZT – piezoelectric transducer; D1-D4 – diodes of the voltage rectifier; C1 – capacitor; R1 – electrical load

Diodų tiltelis atlieka kintamosios įtampos lygintuvo (AC/DC) funkciją. Pjezoelektrinės sistemos sukuria kintamąją įtampą, tačiau tokia įtampa retai naudojama mažos galios elektronikoje, todėl kintamoji įtampa turi būti išlyginta į nuolatinę (DC). Elektriniai nuostoliai šiame etape

tiesiogiai priklauso nuo naudojamų puslaidininkių diodų, t. y. nuo jų persijungimo greičio. Siekiant mažinti energijos nuostolius, kai įtampa lyginama, klasikiniai lyginimo diodai keičiami Zenerio diodais, Schottky diodais ar Esaki diodais. Taip pat galima naudoti tranzistorių p-n sandūrą kaip lygintuvo komponentą. Tranzistorių naudojimas įtampai lyginti taip pat suteikia galimybę valdyti lyginimo procesą ir taip itin pagerinti šio etapo efektyvumą.

Elektrinei energijai kaupti energijos surinkimo sistemose retai kada naudojami elektrolitiniai kondensatoriai dėl mažos jų talpos ir dėl didelių elektrinių nuostolių, kurie priklauso nuo aukšto impedanso lygio. Ličio geležies fosfato baterijų (LFP) pritaikymas energijai kaupti nėra patogus, nes reikia turėti baterijos krovimo valdymo sistemą, kurios taikymas lemia papildomus elektrinius ir šiluminius nuostolius. Superkondensatoriai, kaip energijos kaupimo įtaisai, energijos surinkimo sistemose pasižymi geriausiu pritaikymu dėl savo didelės talpos, greito pasikrovimo ir išsikrovimo laiko bei žemo impedanso lygio.

Išvados

1. Mažos galios elektronikos sistemų energijos maitinimo problema gali būti sprendžiama taikant energijos surinkimo iš aplinkos technologijas. Iš visų energijos surinkimo technologijų didžiausiu technologiniu potencialu pasižymi pjezoelektrinis kinetinės energijos surinkimo metodas.
2. Švino cirkonato titanato (PZT) keramika plačiausiai taikoma energijos surinkimo sistemose, nes pasižymi geromis pjezoelektrinėmis savybėmis, o jos gamybos procesas žymiai paprastesnis nei pjezoelektrinių kristalų.
3. Pjezoelektrinių kinetinės energijos keitklių efektyvumas tiesiogiai priklauso nuo keitklio ir kinetinės energijos šaltinio svyravimų dažnių, t. y. pjezoelektrinės energijos keitimo sistemos efektyvumas didžiausias, kai ji veikia rezonansiniu dažniu.
4. Pjezoelektrinių energijos surinkimo sistemų efektyvumas priklauso ne tik nuo mechaninių komponentų, bet ir nuo elektrinių. Elektrinei grandinei gali būti keliami įvairūs reikalavimai, kurie daro įtaką sistemos efektyvumui, bet vienas iš kertinių elektrinės sistemos parametru išlieka energijos nuostolių mažinimas visoje sistemoje.

Literatūra

- Bouchouicha, D.; Dupont, F.; Latrach, M.; Ventura, L. 2010. Ambient RF energy harvesting, in *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, 23–25 March 2010, Granada, Spain.

- Bouendeu, E.; Greiner, A.; Smith, P. J.; Korvink, J. G. 2009. An efficient low cost electromagnetic vibration harvester, in *Proceedings of PowerMEMS*, 1–4 December 2009, Washington DC, USA.
- Feenstra, J.; Granstrom, J.; Sodano, H. 2008. Energy harvesting through a backpack employing a mechanically amplified piezoelectric stack, *Mechanical Systems and Signal Processing* 22(3): 721–734.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2007.09.015>
- Priya, S. 2007. Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers, *Journal of Electroceramics* 19(1): 167–184. <http://dx.doi.org/10.1007/s10832-007-9043-4>
- Roundy, S.; Wright, R. K.; Rabaey, J. 2003. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes, *Computer Communications* 26(11): 1131–1144.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0140-3664\(02\)00248-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-3664(02)00248-7)
- Stevens, J. 1999. Optimized thermal design of small thermoelectric generators, in *Proceedings of 34th Intersociety Energy Conversion Eng. Conference*, 2–5 August 1999, Vancouver, British Columbia. Society of Automotive Engineers.
- Varadrajan, E.; Bhanusri, M. 2013. Design and simulation of uni-morph piezoelectric energy harvesting system, in *COMSOL Conference in Bangalore*, 17–18 October 2013, Bangalore, India.
- Zhu, D.; Tudor, M. J.; Beeby, S. P. 2010. Strategies for increasing the operating frequency range of vibration energy harvesters: a Review, *Measurement Science and Technology* 21(2). 29 p.

PIEZOELECTRIC SYSTEMS AS AN ALTERNATIVE ENERGY SOURCE

A. Čeponis, D. Mažeika

Abstract

The article gives an overview of the problems and solutions related to energy harvesting systems used for power supply of low power electronics systems. Power density is the main parameter describing the efficiency of energy harvesting systems. Piezoelectric energy harvesting systems demonstrate a high value of power density, and therefore the article presents an overview of piezoelectric energy harvesting systems and their components. Also, a summary of the terms that affect the efficiency of piezoelectric energy harvesting systems has been presented.

Keywords: energy harvesting, piezoelectric effect, piezoelectric transducers, low-power electronics.