

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ARŪNAS KLEIVA

DĖVIMŲ BIOMECHATRONINIŲ SISTEMŲ
VIBRACINIO ELEKTROS ENERGIJOS
ŠALTINIO KŪRIMAS IR TYRIMAS

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, mechanikos inžinerija (T 009)

2019, Kaunas

Disertacija rengta 2014–2018 metais Kauno technologijos universiteto Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultete, Mechatronikos institute.

Mokslinis vadovas:

Dr. Rolanas Daukševičius (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija, T 009).

Interneto svetainės, kurioje skelbiama disertacija, adresas:
<http://ktu.edu>

Redagavo:

Prof. dr. Gabija Bankauskaitė (Vilniaus universitetas, Kauno fakultetas, Literatūros ir vertimų studijų institutas)

© A. Kleiva, 2019

ISBN 978-609-02-1590-6

Leidinio bibliografinė informacija pateikiama Lietuvos nacionalinės Martyno Mažvydo bibliotekos Nacionalinės bibliografijos duomenų banke (NBDB).

TURINYS

SIMBOLIŲ IR SANTRUMPŲ SĄRAŠAS	5
TERMINŲ SĄRAŠAS.....	7
IVADAS.....	8
1. LITERATŪROS APŽVALGA	14
1.1. Įvadas į energijos generavimą	14
1.2. Įvadas į mechaninį elektros energijos generavimą	15
1.2.1. Pjezoelektriniai energijos generatoriai	17
1.2.2. Vibracinio energijos generavimo efektyvinimo metodai.....	20
1.3. Mechaninio dažnio aukštinimo pagrindu veikiantys vibraciniai pjezogeneratoriai	23
1.3.1. Esminiai elektromechaninės konversijos principai	23
1.3.2. Energijos generavimo taikant mechaninį dažnio aukštinimą apžvalga	24
1.3.3. Magnetinių mechaninio dažnio aukštinimo konfigūracijų apžvalga	28
1.4. Magnetinės sąveikos jėgų teorinės analizės apžvalga	30
1.4.1. Analitinių metodų taikymas.....	30
1.4.2. Skaitinių metodų taikymas	31
1.5. Skyriaus apibendrinimas.....	33
2. MAGNETINĖS SĄVEIKOS PJEZOGENERATORIUJE TEORINIS TYRIMAS	35
2.1. Magnetškai sužadinamas pjezoelektrinis energijos generatorius	35
2.1. Magnetinės sąveikos modeliavimas	37
2.1.1. Analitinis magnetostatinis modelis.....	37
2.1.2. Skaitiniai magnetinio lauko modeliai	41
2.2. Teorinių tyrimų rezultatai.....	42
2.2.1. Magnetinių jėgų impulsų savybės	42
2.2.2. Apskaičiuotų ir išmatuotų impulsų palyginimas	46
2.2.3. Magnetinio sužadinimo greičio ir tarpelio įtakos įvertinimas	46
2.3. Skyriaus apibendrinimas.....	48
3. MAGNETIŠKAI SUŽADINAMO PJEZOGENERATORIAUS EKSPERIMENTINIS TYRIMAS	49
3.1. Eksperimentinis stendas	49
3.2. Pjezogeneratoriaus pereinamojo atsako fazės ir veikimo režimai	51
3.2.1. Suminis pereinamasis atsakas ir jo fazės.....	51
3.2.2. Veikimo režimų apibūdinimas.....	54
3.3. Keitiklio elektromechaninių parametrų nustatymas	56
3.3.1. Dinamiškumo koeficiento įvertinimas.....	56
3.3.2. Suderintos varžos įvertinimas.....	57
3.4. Detali pjezogeneratoriaus veikimo analizė.....	60
3.4.1. Kvazistatinis ir pereinamasis režimai	60

3.4.2. Perėjimo į dinaminį režimą sąlygos.....	62
3.4.3. Dinaminio veikimo režimo stadijos.....	64
3.4.4. Efektyviausio magnetinio sužadavimo režimo ypatumai.....	65
3.4.5. Magnetinio tarpelio poveikio analizė	68
3.4.6. Daugiaciklio magnetinio sužadavimo analizė.....	68
3.5. Skyriaus apibendrinimas.....	70
4. BIOMECHANINIS PJEZOGENERATORIUS SU INTEGRUOTOMIS MAGNETINIO ĮGREITINIMO IR SINCHRONIZUOTO DAUGIAMAGNETINIO SUŽADINIMO POSISTEMĖMIS	73
4.1. Biomechaninio pjezogeneratoriaus maketo konstrukcija	73
4.1.1. Varančiųjų magnetų įgreitinimo posistemė	75
4.1.2. Sinchronizuoto daugiamagnetinio sužadavimo posistemė	76
4.2. Sinchronizuoto daugiamagnetinio sužadavimo ir magnetinio įgreitinimo procesų tyrimas.....	77
4.2.1. Skaitinis-analitinis magnetų įgreitinimo modelis	77
4.2.2. Magnetinio įgreitinimo proceso skaitinis-analitinis tyrimas	79
4.2.3. Eksperimentinis įgreitinimo posistemės efektyvumo patvirtinimas	80
4.3. Biomechaninio pjezogeneratoriaus dinamikos skaitinis tyrimas.....	82
4.3.1. Magnetodinaminis baigtinių elementų modelis.....	82
4.3.2. Modelio eksperimentinis verifikavimas ir analizė.....	83
4.4. SDS pagrindu veikiančio biomechaninio pjezogeneratoriaus tyrimas	86
4.4.1. Daugiamagnetinio sužadavimo analizė	87
4.4.2. Magnetinio sužadavimo greičio įtaka.....	89
4.4.3. Tarpelio įtaka daugiamagnetinio sužadavimo procese.....	90
4.5. Biomechaninio pjezogeneratoriaus maketo testavimas realiomis sąlygomis	93
4.6. Skyriaus apibendrinimas.....	94
IŠVADOS.....	96
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	98
PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS	108

SIMBOLIŲ IR SANTRUMPŲ SĄRAŠAS

Išraiška	Vienetai	Aprašymas
R_A	Ω	Išorinė elektrinė varža, prijungta prie pjezogeneratoriaus
R_{opt}	Ω	Optimali (teorinė) pjezogeneratoriaus elektrinė varža
R_{SV}	Ω	Konkrečiam pjezogeneratoriaus režimui suderinta elektrinė varža
t	s	Laikas (bendruoju atveju)
t^{VC}, t^{PV}, t^{LV}	s	Pjezogeneratoriaus viso ciklo, priverstinių virpesių ir laisvųjų virpesių trukmės, atitinkamai
V_{SV}	V	Išorinės grandinės įtampa, generuojama suderintos apkrovos rezistoriuje ($R_A = R_{SV}$)
$V_{t1}, V_{t2}, ..., V_{tn}$	V	Pjezogeneratoriaus sugeneruotų įtampos amplitudžių vertės
V_{rms}	V	Efektinė įtampa, gauta analizuojant įtampos signalus, sugeneruotus iki duotojo laiko momento t_k
V^{VC}, V^{PV}, V^{LV}	V	RMS įtampa, gauta analizuojant įtampos signalus, sugeneruotus t^{VC} , t^{PV} ir t^{LV} laiko intervaluose, atitinkamai
P	W	Elektrinė galia (bendruoju atveju)
P_{mom}	W	Generuojama momentinė galia (ties R_{SV})
f	Hz	Pjezokeitiklio rezonansinis dažnis (bendru atveju)
f_0	Hz	Pjezokeitiklio (be magnetinės masės) rezonansinis dažnis (pjezogeneratoriaus nagrinėjimo atveju)
P_{av}	W	Vidutinė galia, generuojama iki duotojo laiko momento t_k ($P_{av} = (V_{rms})^2 / R_{SV}$)
P^{VC}, P^{PV}	W	Vidutinė galia, generuota t_{VC} ir t_{PV} laiko intervaluose, atitinkamai ($P^{VC} = (V^{VC})^2 / R_{SV}$, $P^{PV} = (V^{PV})^2 / R_{SV}$)
P^{max}	W	Maksimali vidutinė galia (nustatoma iš $P_{av} = f(t)$ grafiko)
t^{Pmax}	s	Laiko intervalas, būtinas pasiekti P^{max} vertę
E	J	Bendra suminė energija, sugeneruota iki duotojo laiko momento t_k
E^{VC}, E^{PV}, E^{LV}	J	Bendra suminė energija, sugeneruota t^{VC} , t^{PV} ir t^{LV} laiko intervaluose, atitinkamai ($E^{VC} = E^{PV} + E^{LV}$)
Q_m	–	Pjezokeitiklio mechaninis kokybės rodiklis (matuota trumpojo jungimo sąlygomis)
ζ_m	–	Mechaninis slopinimo koeficientas ($\zeta_m \cong 1/2Q_m$)
ζ_e	–	Elektrinio slopinimo koeficientas

η	%	Elektromechaninės konversijos našumas (bendruoju atveju)
k^2	–	Elektromechaninio ryšio koeficientas (bendruoju atveju)
C_{PK}	F	Pjzokeitiklio elektrinė talpa
$w_{pzt}, t_{pzt}, l_{pzt}$	m	Pjzokeramikos sluoksnių plotis, storis ir ilgis, atitinkamai
p	V	Pjzokeitiklio poliarizacija (bendruoju atveju)
g_{31}	V·m/N	Pjzoelektrinis įtampos koeficientas
μ_0	H/m	Vakuomo magnetinė skvarba ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$)
μ_{oro}	H/m	Oro magnetinė skvarba ($\mu_{oro} = 1.256 \times 10^{-6}$)
$d_{PT} (v_{PT})$	m (m/s)	Pjzokeitiklio vibroposlinkio (vibrogreičio) pereinamasis atsakas (keitiklio gale)
$d_{t1}, d_{t2}, \dots, d_{tn}$	m	Pjzogeneratoriaus vibroposlinkių amplitudžių vertės
$v_{t1}, v_{t2}, \dots, v_{tn}$	V	Pjzogeneratoriaus sugeneruotų vibrogreičių amplitudžių vertės
r_s	m	Besisukančio eksperimentinio staliuko spindulys
ω_{rpm}	RPM	Eksperimentinio staliuko sukimosi greitis
$v_{\text{žad}}$	m/s	Varančiojo(-ių) magneto(-ų) linijinis greitis (sužadinimo greitis)
$d_{\text{žad}}$	mm	Atstumas tarp varančiojo(-ių) ir varomojo magnetų
d_{igr}	mm	Tarpelis tarp įgreitinimo ir vieno iš varančiųjų magnetų
d_m	mm	Tarpelis tarp varančiųjų magnetų daugiamaagnetinio sužadinimo atveju
t_m	s	Trukmė tarp pakartotinio pjzokeitiklio sužadinimo (daugiamaagnetinio sužadinimo atveju)
B	T	Magnetinio lauko srauto tankis
$t_{MI} (A_{MI})$	s (T)	Magnetinio (B) impulso trukmė (maksimali amplitudė)
$T^{PV} (f^{PV})$	s (Hz)	Periodas (dažnis), charakterizuojantis magnetinio sankybio atsaką
$T_t, \tau_t, (f_t)$	s (Hz)	Tikrinis pjzokeitiklio periodas, pusperiodis ir dažnis, atitinkamai (pjzogeneratoriaus nagrinėjimo atveju)
$F_x, F_y (M_x, M_y)$	N (Nm)	Magnetinės jėgos (momentai)
$t(PK)_K$	s	Pjzokeitiklio pereinamojo atsako kilimo trukmė
$t(F_x)_{MI}, t(F_x)_{UT}$	s	F_x magnetinio impulso trukmė ir jėgos užaugimo trukmė, atitinkamai
$t_{rev}, t(F_y)_{UT}$	s	F_y magnetinės jėgos krypties reversijos zonos trukmė ir užaugimo trukmė, atitinkamai
$t(B_x)_{MI}, t(B_x)_{UT},$	s	Matuoto B_x impulso trukmė ir jo užaugimo trukmė, atitinkamai

TERMINŲ SĄRAŠAS

Trumpinys	Aprašymas
ALE	Lagranžo-Oilerio skaičiavimo metodas (angl. <i>Arbitrary Lagrange-Eulerian</i>)
BE	Baigtiniai elementai
BST	Bevieliai sensoriniai tinklai
DSR	Dinaminio stiprinimo rodiklis (angl. <i>dynamic amplification factor</i>)
EG	Energijos generatorius
EM	Elektromechaninis (pvz. EM konversija, EM ryšio koeficientas, ...)
IPMK	Joniniai polimeriniai metalų kompozitai
K	Kilimo trukmė (angl. <i>rise time</i>)
LDV	Lazerinis Doplerio vibrometras
LFA	Magnetiniai lydiniai su formos atmintimi
LV	Laisvieji virpesiai
MDA	Mechaninis dažnio aukštinimas (angl. <i>mechanical frequency up-conversion</i>)
MEMS	Mikroelektromechaninės sistemos
MI	Magnetinis impulsas
M-PEG	Magnetiškai sužadintas pjezoelektrinis vibracinis energijos generatorius
PK	Pjezo keitiklis
PV	Priverstiniai virpesiai
PVDF	Inertiškas specifinis termoplastinis fluoropolimeras
P-VEG / PEG	Pjezoelektrinis vibracinis energijos generatorius
RMS	Efektinė įtampa
SDS	Sinchronizuotas daugiamagnetinis sužadinimas
SLS	Selektyvus sukietinimas lazeriu (angl. <i>selective laser sintering (SLS)</i>)
SPA	Suminis pereinamasis atsakas
UT	Užaugimo trukmė (angl. <i>ramping time</i>)
VEG	Vibracinis energijos generatorius

IVADAS

Temos aktualumas

Nuolat gausėjantys mokslo tiriamieji darbai, susiję su energijos surinkimo / generavimo tematika, atskleidžia, kad autonominių savikrovių (angl. *self-powered*) nepaliaujamai didėja elektroninių įrenginių poreikis [1-4]. Ryškus mikro / nano-technologijų ir ultra žemos galios elektronikos sričių progresas lemia įvairios paskirties nešiojamų, dėvimų bei implantuojamų išmaniųjų sistemų plėtrą. Absoliuti dauguma tokių sistemų veikia naudojamos tradicinės baterijas ar akumuliatorius, kurie funkcionalumo, komfortabilumo ir ekologiškumo atžvilgiu vis labiau nebetenkina dabartinės visuomenės poreikių. Elektrocheminiai energijos šaltiniai vartotojams asocijuojasi su nuolatiniiais baterijų keitimo ar akumuliatorių įkrovimo rūpesčiais. Be to, akivaizdu, kad tvaraus vartojimo kontekste būtinybė tinkamai utilizuoti elektrocheminių elementų kenksmingas atliekas yra rimta aplinkosauginė problema. Todėl pastaruosius 10–15 metų dedamos didelės pastangos siekiant realizuoti alternatyvius elektros energijos šaltinius – mikro energijos generatorius, kurie efektyviai konvertuotų šviesos, šiluminę, mechaninę ir kitų rūšių energiją į elektros energiją [3, 5-11]. Mus supančioje aplinkoje ypač gausu kinetinės energijos, taip pat ir biomechaninės energijos, perteikiamos žmogaus kūno dalių judesiais. Todėl vienais iš perspektyviausių yra laikomi vibraciniai energijos generatoriai su įterptomis sumaniosiomis medžiagomis. Didelio dėmesio sulaukia vibraciniai generatoriai, veikiantys pjezoelektrinių keitiklių pagrindu. Dėl nesudėtingos konstrukcijos (santykinai nesudėtingas miniatiūrizavimas) ir pakankamai aukšto pjezo medžiagų energetinio tankio pjezoelektriniai vibraciniai energijos generatoriai (pjezogeneratoriai) dažnai yra pranašesni mikro / mezo lygmenyje už analogiškus elektromagnetinius, elektrostatinis ar triboelektrinius įrenginius [1, 3, 10]. Inžinieriai susiduria su dideliais sunkumais siekdami sukurti efektyvumo, ergonomikos ir rentabilios gamybos reikalavimus tenkinančius biomechaninius pjezogeneratorius. Veikimo efektyvumo prasme esminis šių įrenginių trūkumas yra nepakankamas generuojamos elektrinės galios tankis realiomis eksploataavimo sąlygomis (laike kintantis įvairiakryptis žemadažnis sužadinimas). Tai lemia pjezoelektrinio keitiklio, kaip lengvai slopinamos dinaminės sistemos, atsako siauras dažnių juostos plotis (angl. *bandwidth*), t. y. didesni elektros energijos kiekiai, generuojami tik sistemai rezonuojant labai siaurame dažnių intervale. Ši problema ypač aktuali biomechaniniuose pjezogeneratoriuose, nes keitiklio sužadinimas labai žemo dažnio žmogaus kūno judesiais ($< 10 \text{ Hz}$) kartu reiškia ir nedidelę galią ($P \propto f^3$) bei žemą elektromechaninės konversijos našumą ($\eta \propto k^2 / \zeta_m$), kuris sumažėja dėl didelio mechaninio slopinimo laipsnio ($\zeta_m \propto 1 / f$). Vienas perspektyviausių pjezogeneratorių veikimo efektyvinimo metodų žemadažnėje aplinkoje yra *mechaninis dažnio aukštinimas* (MDA) (angl. *mechanical frequency up-conversion*), kai standus arba tamprus mechaninis elementas susižadina nuo žemadažnio poveikio ir kontaktinės arba bekontaktine (magnetine, inercine) sąveika impulsyviai sužadinami keitiklio aukštadažniai laisvieji virpesiai. Nors kontaktinį MDA realizuoti paprasčiau (mechaninis smūgis savaime generuoja staigų impulsinį

sužadinią), tačiau magnetinis MDA yra priimtinesnis konstrukcinio patvarumo atžvilgiu ir potencialiai leidžia lengviau pasiekti itin tylų arba net begarsį pjezogeneratoriaus veikimą, kuris būtinas komfortabiliam nešiojamų / dėvimų įrenginių naudojimui. Pjezogeneratoriaus veikimui maksimalia galia (kai generuojami aukštos amplitudės laisvieji virpesiai), efektyviai funkcionuojantis MDA mechanizmas turi užtikrinti staigų impulsinį sužadinią nepriklausomai nuo išorinio dinaminio poveikio dažnio. Tačiau palyginti su kontaktiniu MDA, magnetinio sankybio (angl. *magnetic coupling*) pagrindu realizuojamas keitiklio sužadinią yra sudėtingesnis mechaninės energijos perdavimo būdas dėl fizikinių magnetinių jėgų savybių [12]. Tiksliau, žemadažnio biomechaninio sužadinią atveju magnetai iš inercijos juda lėtai ir todėl labai sunku pasiekti staigų impulsinį keitiklio sužadinią, ypač kompaktiškame įrenginyje, kuris turi funkcionuoti autonomiškai be vartotojo intervencijos. Pjezogeneratoriaus su integruotu magnetiniu MDA mechanizmu veikimas galėtų būti efektyvinamas įrenginio konstrukcijoje naudojant papildomus mechanizmus, skirtus įgreitinti magnetus ir intensyvinti sužadinią. Tokių magnetinio sužadinią efektyvinimo priemonių kūrimas ir diegimas biomechaniniuose energijos generatoriuose yra dar itin ankstyvoje stadijoje. Pabrėžtina, kad ties tuo intensyviai dirba nemažai mokslininkų, taip pat ir vibracinių generatorių tyrimų pirmtakas ir pripažintas šios srities autoritetas prof. Shad Roundy [11].

Tyrimo tikslas ir uždaviniai

Tyrimo tikslas – suprojektuoti, pagaminti ir ištirti biomechatroninių sistemų pjezoelektrinę vibracinę energijos generatorių, praktiškai panaudojamą žemadažnio biomechaninio sužadinią sąlygomis.

Tikslo įgyvendinimui išsikelti uždaviniai:

1. Atlikti egzistuojančių biomechaninių vibracinių energijos generatorių literatūros apžvalgą, didžiausią dėmesį skiriant dažnio aukštinimo principu veikiančių pjezogeneratorių konstrukcijų ypatumams.
2. Sudaryti dažnio aukštinimo procese dalyvaujančios magnetinės sąveikos skaitinius modelius, atlikti jų analitinį ir eksperimentinį verifikavimą bei analizę, siekiant įvertinti sužadinią impulsų dinamines charakteristikas.
3. Taikant skaitinius ir eksperimentinius tyrimo metodus, ištirti magnetinio sankybio pagrindu funkcionuojantį vibracinio energijos generavimo procesą, siekiant nustatyti esminius dinamikos principus ir kiekybinius kriterijus, būtinus projektuojant praktiškai panaudojamus biomechaninius pjezogeneratorius.
4. Sudaryti ir verifikuoti projektuojamo biomechaninio pjezogeneratoriaus skaitinį dinaminį modelį ir atlikti skaičiavimus, siekiant įvertinti įrenginio vibracines ir elektrines charakteristikas.
5. Realizuoti ir ištirti magnetinio sužadinią (dažnio aukštinimo) proceso efektyvinimo būdus, siekiant padidinti biomechaninio pjezogeneratoriaus pagaminamos elektros energijos kiekį sudėtingomis žemadažnio sužadinią sąlygomis.

6. Suprojektuoti, pagaminti ir ištestuoti realiomis sąlygomis dėvimą pjezoelektrinių energijos generatorių, kuriame pritaikyti pasiūlyti efektyvinimo metodai.

Tyrimo metodai

Šis darbas buvo parengtas taikant teorinius ir eksperimentinius tyrimo metodus. Teoriniai tyrimai atlikti analitiniais ir skaitiniais metodais. Projektuota, modeliuota baigtiniais elementais ir rezultatai apdoroti šiomis programomis: SolidWorks, COMSOL Multiphysics ir Microsoft Excel su Visual Basic.

Eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti Kauno technologijos universiteto Mechatronikos institute. Keitiklio vibro-poslinkių / greičių matavimams atlikti buvo pasirinktas lazerinis Doplerio vibrometras Polytec OFV-505 + OFV-5000. Dinaminių sužadinimo parametrų stebėsenai naudoti šie prietaisai: rotacinis vibrometras Polytec RLV-500 + RLV-5000, greitaeigė kamera Phantom v711 ir magnetometras su Holo jutikliu Magnet-Physik FH-54 + HS-TGB5. Signalus registruoti naudotas skaitmeninis osciloskopas PICO 6403 su PicoScope 6 programine įranga. Keitiklių impedanso charakteristikos vertintos pasitelkus Wayne Kerr 6500B analizatorius. Pjezogeneratoriaus maketo bandymai buvo atlikti ant bėgimo takelio Zebris Rehawalk®.

Siekiant pagal galimybes minimizuoti maketo mazgų surinkimo operacijų apimtį, dėvimas biomechaninis pjezogeneratorius (taip pat ir tarpiniai variantai) buvo gaminamas pasitelkus 3D spausdinimo pranašumus – panaudojus selektyvaus sukietinimo lazerį (EOS Formiga P110) ir lydimo viela technologijas (Ultimaker 2).

Mokslinis naujumas

1. Atskleisti magnetinio sankybio pagrindu veikiančių pjezogeneratorių esminiai dinamikos dėsningumai ir, pritaikius bedimensinius kintamuosius parametrus, nustatyti ribinio ir veiksmingiausio magnetinio sužadinimo kiekybiniai kriterijai, kuriuos tenkinant pasiekama santykinai aukšta arba didžiausia elektrinė galia.
2. Sudaryti mažiau skaičiavimo resursų reikalaujantys magnetodinaminės bei magneto-pjezo-mechaninės sąveikos baigtinių elementų modeliai, kuriuos taikant kartu su identifikuotais kiekybiniais dinaminiais kriterijais, galima racionaliai projektuoti įvairios magnetinės konfigūracijos ir tikrinio dažnio magnetinio sankybio pagrindu veikiančius pjezogeneratorius, veikiančius didžiausios galios režimu.
3. Magnetinio sankybio pagrindu veikiančių pjezogeneratorių veikimui efektyvinti pasiūlyti magnetinio įgreitinimo ir sinchronizuoto daugiamagnetinio sužadinimo metodai, kurie užtikrina pakankamai tylų ir patikimą įrenginio veikimą didžiausios galios režimu (pareinamojo rezonanso aplinkoje) plačiame biomechaninio žadinimo parametrų intervale.

Ginamieji teiginiai

1. Pasitelkus kombinuotos skaitinės-eksperimentinės tyrimų metodiką įrodyta, kad maksimalus elektros energijos kiekis pagaminamas tada, kai keitiklis veikia pereinamojo rezonanso režimu, kai susilygina virpesių dažnis visuose pereinamojo atsako etapuose (priverstinių ir laisvųjų virpesių fazėse).
2. Daugiafizinis magneto-pjezo-mechaninis baigtinių elementų modelis sudaro galimybes nedideliais kompiuteriniais resursais pakankamai tiksliai prognozuoti įvairios sudėtingos magnetinės konfigūracijos, dažnio aukštinimo principu veikiančių pjezogeneratorių dinamines ir elektrines charakteristikas.
3. Magnetinio įgreitinimo metodas yra saugus (patvarus) ir veiksmingas bekontaktinio mechaninio sužadinimo būdas, užtikrinantis nagrinėjamo pjezogeneratoriaus veikimą didžiausios galios režimu (pereinamojo rezonanso aplinkoje), kai įrenginys yra žadinamas aktyviai judančio žmogaus rankų mostais.
4. Sinchronizuoto daugiamagnetinio sužadinimo metodas yra veiksmingas ir sudaro galimybes naudojant du varančiuosius magnetus trečdaliu padidinti generuojamos energijos kiekį kiekvieno įrenginio veikimo ciklo metu (palyginti su atveju, kai sužadinimui pasitelkiamas vienas magnetas).
5. Sukurtas dėvimas biomechaninis pjezogeneratorius yra originalios konstrukcijos, į kurią racionaliai integruotos magnetinio įgreitinimo ir sinchronizuoto daugiamagnetinio sužadinimo posistemės (netrukdo viena kitai tinkamai funkcionuoti), užtikrinančios pakankamai tylų įrenginio darbą didžiausios galios režimu įvairiomis biomechaninio sužadinimo sąlygomis.

Praktinė vertė

1. Baigtinių elementų modeliai ir identifikuoti kiekybiniai dinaminiai kriterijai yra naudingi kuriant įvairių konstrukcinių parametrų pjezogeneratorius, veikiančius magnetinio sankybio pagrindu.
2. Daugiakanalis nekontaktinių matavimų stendas, sinchroniškai registruojantis dinامينius ir elektrinius / magnetinius sistemos parametrus, gali būti naudojamas įvairios magnetinės konfigūracijos pjezogeneratorių eksperimentiniams tyrimams.
3. Magnetinio įgreitinimo ir sinchronizuoto daugiamagnetinio sužadinimo metodai gali būti pritaikomi efektyvinti magnetinį sužadinimą įvairiuose pjezogeneratoriuose, veikiančiuose magnetinio sankybio pagrindu.
4. Pasiūlytoji biomechaninio pjezogeneratoriaus konstrukcija gali būti miniatiūrizuota ir pritaikyta įkrauti akumuliatoriams įvairiuose nešiojamuose / dėvimuose elektronikos įrenginiuose (fiziologinės būklės stebėsenos prietaisuose, išmaniuosiuose įrenginiuose ir kt.).

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijoje pateikti tyrimų rezultatai buvo paskelbti penkiose publikacijose: dviejuose Web of Science duomenų bazėje referuojamuose leidiniuose su citavimo indeksu ir trijose publikacijose konferencijų pranešimų medžiagoje.

Tyrimų rezultatai pateikti trijose tarptautinėse konferencijose: EuroSimE 2019 (Hanoveris, Vokietija), Mechanika 2015, 2016 (Kaunas, Lietuva).

Daktaro disertacijos struktūra

Darbą sudaro įvadas, keturi skyriai, išvados, 132 literatūros šaltinių sąrašas, autoriaus publikacijų sąrašas. Disertacijos apimtis – 109 puslapių, 46 iliustracijos ir 5 lentelės.

Pirmame, literatūros apžvalgos, skyriuje pateikta bendroji mikroenergijos generatorių analizė, apžvelgti įvairūs biomechaninių generatorių tipai ir veikimo principai, aptarti jų trūkumai ir pranašumai. Toliau skyriuje koncentruojamasi ties vibraciniais energijos generatoriais, išryškinti esminiai jų trūkumai ir apžvelgtos tobulinimo galimybės. Skyriaus pabaigoje pateikti galimi magnetinio sankybio ir mechaninio dažnio aukštinimo principu veikiančio generatoriaus veikimo efektyvinimo metodai, galimos konfigūracijos, analitinių bei skaitinių įvertinimų metodikos.

Antrame skyriuje aptartas tiriamo pjezogeneratoriaus, veikiančio magnetinio sankybio (mechaninio dažnio aukštinimo) pagrindu, veikimo principas. Aprašyti sudaryti magnetostatinis ir magnetodinaminis baigtinių elementų modeliai, skirti analizuoti sąveiką tarp dviejų nuolatinių magnetų, atliktas modelių verifikavimas ir skaičiavimai, kuriais nustatomos svarbiausios sistemoje veikiančių magnetinių jėgų ypatybės, įvertintos sužadinimo impulsų laikinės ir amplitudinės charakteristikos.

Trečiame skyriuje pateikiamas atliktas išsamus magnetinio sankybio pagrindu veikiančio vibracinio energijos generavimo proceso tyrimas. Pritaikius eksperimentinius ir skaitinius metodus, sistemingai išnagrinėti pjezogeneratoriaus veikimo režimai įvairiomis magnetinio sužadinimo sąlygomis. Išanalizavus nekontaktinių matavimų stende išmatuotus pereinamuosius atsakus, nustatytos magnetinių jėgų deformuojamo keitiklio dinaminių ir elektrinių charakteristikų priklausomybės nuo sužadinimo parametrų. Matavimų duomenys papildyti skaičiavimų rezultatais ir, pasitelkus bedimensinius dydžius, apibūdinti svarbiausi pjezogeneratoriaus dinamikos ir energijos generavimo dėsningumai, identifikuotos ribinio ir efektyviausio sužadinimo sąlygos, aptarti daugiacyklio sužadinimo principai ir pateiktos rekomendacijos.

Ketvirtame skyriuje pateikiami pjezogeneratoriaus magnetinio sužadinimo efektyvinimo metodai: magnetinis įgreitinimas ir sinchronizuotas daugiamagnetinis sužadinimas. Aprašytas sudarytas daugiafizinis magneto-pjezo-mechaninis baigtinių elementų modelis, atliktas eksperimentinis jo verifikavimas. Apibūdinta kombinuota skaitinė-analitinė modeliavimo metodika, skirta įvertinti magnetinio įgreitinimo charakteristikas. Pateiktas pagal matematinius modelius suprojektuotas ir pagamintas dėvimo biomechaninio pjezogeneratoriaus maketas su integruotomis sužadinimo efektyvinimo posistemėmis. Pateikti maketo laboratorinių bandymų

rezultatai, gauti imitavus realias įrenginio eksploatavimo sąlygas, išnagrinėtos išmatuotos dinaminės ir elektrinės charakteristikos.

Disertacijos išvadose apibendrinami svarbiausi atliktų teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Įvadas į energijos generavimą

Aplinkos energijos surinkimas ir konvertavimas į naudingą elektros energiją yra apibrėžiamas kaip „*energijos surinkimo / generavimo*“ (angl. *energy harvesting, energy scavenging*) principas. Apskritai, šis terminas yra plačiai taikomas įvairiose ir itin skirtingose srityse [13] bei apima aplinkos energijos panaudojimo technologijas tiek didelio mastelio (pvz., saulės, vėjo ar vandens energija), tiek mažo mastelio (vibracinė energija) sistemose. Šioje disertacijoje koncentruojamasi į kinetinius / vibracinius mikroenergijos generatorius (EG), skirtus maitinti nedidelės elektrinės galios elektroninius įrenginius ar atskirus jų komponentus [3]. Šiame kontekste nagrinėjamų generatorių energijos tankio ribos apytiksliai kinta nuo nW/cm^2 iki mW/cm^2 . Įprastai tokie mikro energijos šaltiniai yra sudaryti iš kelių dalių: EG modulio, galios valdymo grandinės ir įkraunamų akumuliatorių ir / ar superkondensatorių. EG, veikdamas kaip energijos „rinkiklis“, paverčia aplinkoje esančią kinetinę energiją (pvz., statinių ar įrenginių virpesius) į elektrinę.

Autonomiškai funkcionuojantys energijos generatoriai yra aktualūs daugeliu atvejų, kai periodiškai pakrauti ar pakeisti panaudotus išsikrovusius akumuliatorius (pvz., bevieliuose sensoriniuose tinkluose (BST), implantuotuose biomediciniuose įrenginiuose) yra problematiška ir / ar neekonomiška. Ypač komplikotas yra akumuliatorių panaudojimas patikimumo reikalaujančiose ilgo veikimo bevielėse sistemose, kurios yra lokalizuotos itin sunkiai pasiekiamose ar pavojingose vietose (pvz., naftos, dujų, kasybos, kosmoso panaudojimo srityse). Dėl to atsiradusios energijos generavimo technologijos ne tik leido palengvinti naudojamų įrenginių aptarnavimo procesą (prailgindamos jų veikimo trukmę be pakartotinio įkrovimo), bet ir suteikė galimybę atsisakyti išorinių maitinimo šaltinių.

Energijos generatoriai, kaip autonominiai energijos šaltiniai, itin naudingai gali būti pritaikyti:

i) Aplinkos stebėsenai autonominiuose BST, gamybos, sveikatos, transporto, žemės ūkio, saugumo, aplinkosaugos ir kitose sferose. BST sudaro jutiklių masyvas. Kiekvienas jutiklis turi nuosavą maitinimo šaltinį (bateriją). Jutikliai išdėstomi įvairiose terpėse (pvz., statiniuose, įrenginiuose), kuriose realiu laiku atliekami įvairių fizikinių dydžių matavimai. Itin našių mikroelektronikos jutiklių elektrinės galios poreikis yra apie 10–100 μW , kurį iš dalies gali tiekti EG įrenginiai [3-6].

ii) Dėvimuose ir implantuojamuose biomedicinos įrenginiuose [14], [7], išmaniuose tekstiliniuose audiniuose [15] ir bevieliuose kūno srities tinkluose (angl. *wireless body area networks*) [16]. Lanksčių EG įrenginių plėtojimas šiuo metu sulaukia didžiulio susidomėjimo, viena iš to priežasčių yra lėta baterijų vystymosi raida, kuri stabdo tolimesnį progresą dėvimos elektronikos srityse.

Naudinga energija gali būti surinkta ir konvertuota į elektrinę pasitelkus įvairias aplinkos energijos rūšis. Pagrindinės rūšys [1]:

-
- mechaninė energija (virpesiai, slėgio svyravimai, statinės deformacijos),
 - šiluminė energija (erdviniai arba laikiniai temperatūros gradientai),
 - šviesos energija (saulės ar vidaus apšvietimas),
 - radijo dažnio elektromagnetinė energija (WiFi siųstuvų, mobiliųjų, radijo, TV ryšių spinduliuotė).
-

Rečiau pasitaikančios, bet taip pat pritaikomos rūšys EG įrenginiuose [1]:

-
- magnetinių laukų (indukcijos) energija [17],
 - akustinė energija [18],
 - cheminė energija (pvz., fermentinės kuro celės) [19],
 - mikrobinio aktyvumo energija [20],
 - medžiagų apykaitos energija [21],
 - natūraliai pasitaikantys pH skirtumai [22],
 - atvirkštinio elektrodrėkinimo energija (angl. *reverse electrowetting*) [23],
 - dirbtinės fotosintezės energija [24].
-

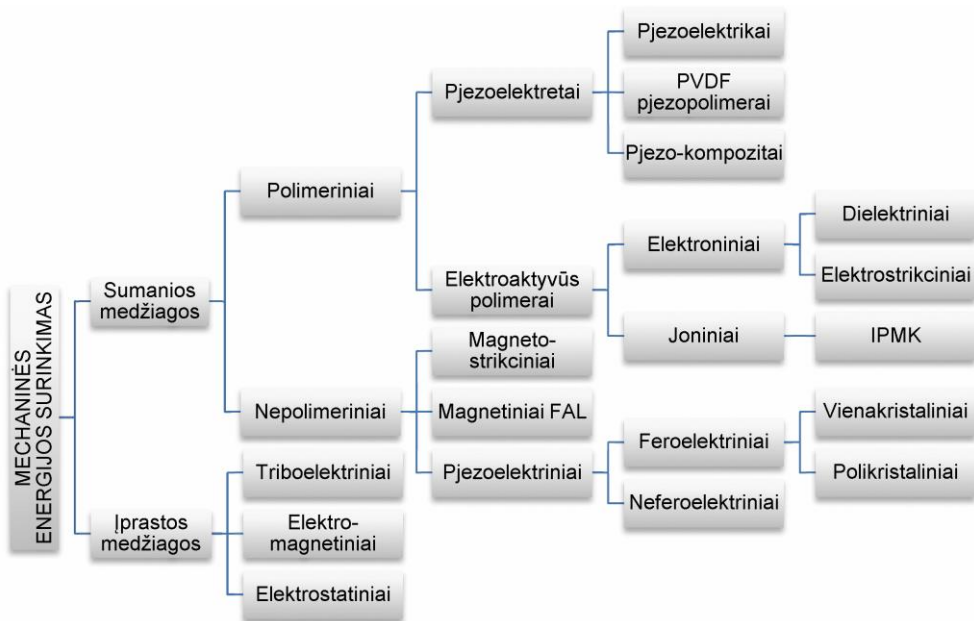
1.2. Įvadas į mechaninį elektros energijos generavimą

Bene dažniausiai energijos generavimo įrenginiuose naudojami mechaniniai virpesiai dėl jų paplitimo įvairiose terpėse (natūralioje aplinkoje, inžinerinėje infrastruktūroje ir pan.). Inžinerinėje infrastruktūroje pasitaikantys mechaninės energijos šaltiniai, tokie kaip gamybinės mašinos [52], transporto infrastruktūra ar kita, dažniausiai skleidžia labai žemo lygio atsitiktines vibracijas, kurias sudėtinga efektyviai surinkti ir konvertuoti į elektros energiją. Žmogaus ar gyvūno ultražemo dažnio judesiai taip pat dažnai naudojami konvertuojant mechaninę energiją į elektrinę [7]. *Mechaniniai energijos generatoriai* gali būti klasifikuojami į [25, 26]:

-
- *vibracinius energijos generatorius* (VEG), kurie veikia esant dinaminiam keitiklio sužadinimui inercinėmis jėgomis (kinematinis sužadinimas) arba tiesiogiai pridėtomis jėgomis (pvz., sužadinimas magnetinėmis jėgomis);
 - *deformacinius energijos generatorius*, kurie veikia esant tiesioginiam cikliniam keitiklio konstrukcijos deformavimui.
-

Mechaninės energijos generavimas dažniausiai realizuojamas VEG pagrindu. Siekiant padidinti gaminamos elektrinės energijos kiekį, generatoriaus konstrukcija turi būti pritaikyta konkrečioms vibracinės aplinkos sąlygoms. Pavyzdžiui, būtina atsižvelgti į sužadinimo pobūdį, kuris gali būti harmoninis, atsitiktinis, pereinamasis / impulsinis ar mišrus. Mechaninės energijos transformavimas į naudingą elektrinę energiją gali būti realizuotas naudojant įvairius elektromechaninės konversijos būdus (1.1. pav.). Pavyzdžiui, generatoriai, naudojančys sumaniąsias medžiagas apkraunant jas statinėmis arba dinaminėmis jėgomis. Daug įvairių medžiagų pasižymi dideliu elektro- arba magneto-mechaniniu ryšio koeficientu, dėl kurio jos yra efektyviai naudojamos norint mechaninę energiją konvertuoti į elektrinę.

Vienas iš plačiausiai taikomų yra tiesioginis pjezoelektrinis efektas naudojant elektroaktyvias medžiagas (pjezokeramika, pjezopolimerai ir pjezokompozitai). Magnetostrikcinių medžiagų ir magnetinių lydinių su formos atmintimi panaudojimas kol kas yra gana ribotas dėl menko efektyvumo. Svarbu paminėti, kad kuriami hibridiniai energijos generatoriai, panaudojantys kelis elektromechaninės konversijos būdus, pvz., magnetostrikcinį ir pjezoelektrinį, magnetostrikcinį ir indukcinį ir pan. [27] Generatoriai, nenaudojantys sumaniųjų medžiagų (1.1 pav.), veikia dėl santykinų poslinkių, atsirandančių tarp sąveikaujančių aktyvių sistemos elementų, pavyzdžiui, tarp magneto ir ritės (elektromagnetinis), tarp įkrautų kintančios talpos kondensatoriaus plokščių / elektrodų (elektrostatinis), kontakto ir skirtumo tarp dviejų medžiagų su skirtingu krūvio pasiskirstymu (triboelektrinis). 1.1 lentelėje pateikti svarbiausi skirtingų mechaninių energijos generatorių tipų pranašumai ir trūkumai [1-4]. Pabrėžtina, kad VEG elektrinę galią tiesiogiai lemia įrenginio tūris ir masė, todėl kuriant komfortabilius, kompaktiškus įrenginius ir miniatiūrizuojant jų matmenis, galia neišvengiamai mažėja [13].



1.1 pav. Mechaninių energijos generatorių klasifikavimas (LFA – magnetiniai lydiniai su formos atmintimi, IPMK – joniniai polimeriniai metalų kompozitai, PVDF – inertiškas specifinis termoplastinis fluoropolimeras [1-4])

Biomechaninių energijos generatorių poreikis pastaruoju metu itin jaučiamas dėl gausėjančių išmaniųjų įrenginių, biomedicininės stebėsenos sistemų ir pan. [28] Įvairūs žmogaus kūno judesiai (galūnių mostai, kvėpavimas ir kt.) gali būti potencialiai panaudoti generuoti energiją. Pasirinkus vieną iš būdų, būtina įvertinti generuojamos energijos ir įrenginio ergonomiško naudojimo sąlygas, kurios dažnai yra itin glaudžiai susijusios. Pabrėžtina, kad elektros energija turi būti generuojama surenkant tokią biomechaninę energiją, kuri priešingu atveju būtų tiesiog iššvaistyta

(prarasta). Energijos surinkimo / generavimo procesas neturi sukelti diskomforto vartotojui ir turi vykti savaime be specialių vartotojo pastangų (pavyzdžiui, rankiniuose laikrodžiuose su automatinio užvedimo mechanizmu). Kitaip sakant, nagrinėjamu atveju mikroenergijos generatorius privalo autonomiškai (be žmogaus intervencijos) surinkti biomechaninę energiją, o ne „įdarbinti“ vartotoją, pavyzdžiui mechanškai įkraunamą prožektorių žmogus turi jį specialiai judinti tam, kad būtų generuojama energija.

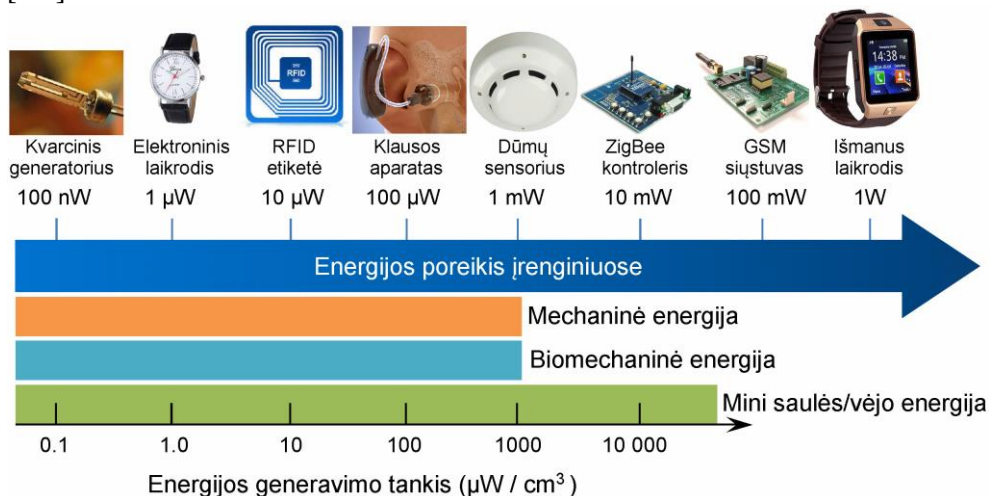
1.1 lentelė. Pagrindinių elektromechaninės konversijos būdų, naudojamų energijai generuoti, palyginimas

Perdavimo mechanizmas	Privalumai	Trūkumai
Pjezoelektrinis	Aukštas energijos tankis Santykinai aukšta įtampa Santykinai brandžios mikrotechnologijos Nebūtinai išorinis maitinimas Santykinai nesudėtinga konstrukcija Aukštas elektromechaninio ryšio koeficientas (vienkristalėje pjezokeramikoje – labai aukštas)	Žemesnis elektromechaninio ryšio koeficientas plonuose pjezo sluoksniuose Pjezokeramika labai trapi Medžiagų savybių nuovargis (nusidėvėjimas, depoliarizacija) Dideli pjezokeramikos gamybos kaštai (ypač vienkristalės)
Elektrostatinis	Aukšta įtampa Brandžios mikrotechnologijos Reguliuojamas elektromechaninio ryšio koeficientas	Būtinai išorinis maitinimas (išankstinis elektrinis įkrovimas) Reikalingi poslinkių ribotuvai
Elektromagnetinis	Aukštas energijos tankis makro / mezo lygmenyje Nebūtinai išorinis maitinimas Žema suderintoji elektrinė varža Efektyvus žemame dažnyje	Žema generuojama įtampa Žemas energijos tankis mikrolygmenyje Neefektyvus mikrolygmenyje (nebrandžios mikromagnetų gamybos technologijos) Sudėtinga integruoti MEMS Dideli gabaritai (magnetai, ritės)
Magnetostrikcinis	Itin aukštas elektromechaninis ryšio koeficientas (<0.9) Didelis mechaninis lankstumas Tinkamas aukštadažniuose pritaikymuose Nėra depoliarizacijos	Reikalingos ritės Būtinai magnetas išoriniam magnetiniam laukui Sudėtinga integruoti į MEMS Netiesiniai reiškiniai

1.2.1. Pjezoelektriniai energijos generatoriai

Pastaraisiais dešimtmečiais stebimas ypač ryškus progresas mikro / nanotechnologijų ir ultra žemos galios elektronikos grandynų srityse. Tai lemia spartų nešiojamų, dėvimų ir implantuojamų įrenginių paplitimą (pvz., sveikatos priežiūros, sveikatinimo sektoriuose. Tačiau dažnu atveju tokie įrenginiai yra maitinami išorinėmis baterijomis /akumuliatoriais, o jų trūkumai susiję su žemu energijos tankiu, reguliariu krovimu, nuolatiniu akumuliatoriaus lygio stebėjimu, trumpaamžiškumu, kenksmingomis atliekomis ir aukšta rūšiavimo / utilizavimo kaina. Tokie įrenginiai vis mažiau priimtini ergonomiškam, ekologiškam ir tvariam vartojimui [3-11]. Dauguma žmogaus kūno generuojamos mechaninės energijos gali būti potencialiai panaudojama gaminti elektros energiją. Pavyzdžiui, generatoriaus

elektrinės galios tankis gali siekti $10\text{--}100\ \mu\text{W}/\text{cm}^3$, kurio pakanka reguliariai maitinti nemažai specialios paskirties šiuolaikinių dėvimų įrenginių (1.2 pav.) [29]. Be to, šių technologijų aktualumą parodo pastaruoju metu matomas didelis biomechaninių energijos šaltinių tematikos tyrimų pagausėjimas įvairiuose moksliniuose darbuose [5-7].



1.2 pav. Elektrinės energijos poreikio ir energijos generatorių panaudojimo galimybės smulkiojoje elektronikoje [29]

Nagrinėjant šios disertacijos tyrimų objektą – *pjezoelektrinę vibracinę energijos generatorių* (P-VEG), – be jo pranašumų, būtina įvertinti ir pagal galimybes išvengti neigiamų biomechaninio sužadinimo sąlygų poveikį. Pirmiausia, šie generatoriai yra sudaryti iš aukštu dažniu (įprastai $>100\ \text{Hz}$) veikiančio pjezoelektrinio keitiklio (pjezokeitiklio), todėl dėl tiesioginio labai žemo dažnio ($1\text{--}10\ \text{Hz}$) biomechaninio sužadinimo neįmanoma pasiekti aukštos elektrinės galios, o P-VEG galia nusakoma išraiška: $P_{\max} \propto f^3$, čia $P_{\max}$ ir f^3 – maksimali galima generatoriaus galia ir tikrinis dažnis, atitinkamai [9,10, 30, 31]. Taip pat žmogaus kūno dalims būdingi didelės amplitudės ir / ar kintančios krypties judesiai (pvz., galūnių: kojų, rankų), kurių įprastiniai vienkrypčiai ir mažais poslinkiais veikiantys generatoriai negali efektyviai panaudoti [11, 31]. Norint realizuoti P-VEG, naudojamos tiek pjezokeraminės, tiek pjezopolimerinės medžiagos, kurias apkrovus mechanine jėga dėl jose susidariusių įtempių generuojamas elektrinis krūvis. Pjezoelektriniai generatoriai yra plačiai naudojami ir tobulinami dėl santykinai paprastos konstrukcijos, aukšto energijos tankio, aukštos generuojamos įtampos ir galimybės juos miniatiūrizuoti bei panaudoti mikrosistemose. Pvz., palyginti su elektromagnetiniais generatoriais, pastarieji nepasižymi tokiomis miniatiūrizavimo perspektyvomis ir energijos tankiu, žemesniu nei $\sim 0.5\ \text{cm}^3$ [32]. VEG naudojami įvairūs pjezoelektriniai keitikliai, kurie gali būti klasifikuojami pagal skirtingas panaudotas medžiagas:

-
- Feroelektrinė pjekzokeramika:
 - a) PZT šeimos medžiagos: „minkštoji“ (pvz. PZT-5H) arba „kietoji“ (pvz., PZT-4).
 - b) Turinčios švino: polikristalinė (pvz. PZT, PbTiO_3) arba vienakristalinė (pvz., PZT, PMN-PT, PZN-PT).
 - c) Neturinčios švino [33]: pvz., BaTiO_3 , LiNbO_3 , $\text{K}_{1-x}\text{Na}_x\text{NbO}_3$ (KNN) arba $\text{Na}_{1-x}\text{K}_x\text{NbO}_3$ (NKN).
 - Ne feroelektrinės pjeko medžiagos: pvz., AlN, ZnO, GaN, CdS, InN.
 - Pjekoelktriniai polimerai ir (nano)kompozitai [38-40].
-

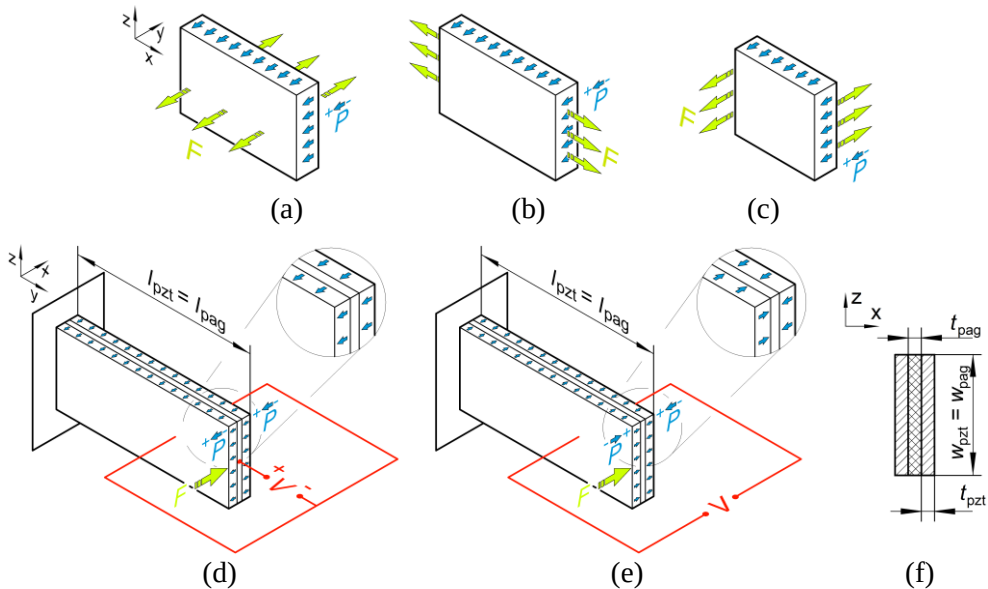
Priklausomai nuo deformuojamame pjekzokeramikos sluoksnyje susidariusių įtempių krypties (medžiagos poliškumo ir elektrinio lauko krypties atžvilgiu), P-VEG naudojamo pjekoelktrinio veikimas gali būti nusakomas trimis skirtingais režimais (1.3 (a-c) pav.) [30, 34, 35, 37]:

- i) Skersinis veikimo režimas (plačiausiai naudojamas), kurį nusako d_{31} pjekzokoefficientas. Keitikliui dirbant šiuo režimu, išorinės apkrovos nulemtų įtempių kryptis σ yra statmena poliarizacijos p ir susidariusio elektrinio lauko kryptims ($d_{ij} = p / \sigma$) [41].
- ii) Išilginis veikimo režimas, kurį nusako d_{33} pjekzokoefficientas. Šiuo atveju, įtempių kryptis yra lygiagreči poliarizacijos ir elektrinio lauko kryptims [42].
- iii) Šlyties režimas (rečiausiai naudojamas), kurį nusako d_{15} pjekzokoefficientas. Čia įtempių kryptis yra lygiagreči poliarizacijos, bet statmena elektrinio lauko kryptims [40].

P-VEG projektuojamas kaip tiesinis vibracinis generatorius (t. y. tiesinė antrosios eilės dinaminė sistema), susidedantis iš uni-/bi-morfinio (t. y. vieno ar dviejų pjeko sluoksnių) gembinio pjekoelktrinio ir konstrukcijos gale įtvirtintos masės [43]. Gembinė konstrukcija pasižymi santykinai dideliais įtempiais, palyginti su kitokios konfigūracijos konstrukcijomis, todėl yra populiarūs [44]. Lenkiamo bimorfinio pjekoelktrinio vienas pjekzoslauksnis yra gniuždomas, o kitas tempiamas. Daugiasluoksniai pjekoelktriniai pasižymi aukštu generuojamu elektriniu krūviu, tačiau kiekvienas papildomas sluoksniu padidina konstrukcijos standumą, dėl to padidėja tikrinis dažnis ir tokio pjekoelktrinio negalima tiesiogiai panaudoti žemadažnėje vibracinėje aplinkoje. Bimorfinio keitiklio atskirus pjekzoslauksnius taip pat galima pajungti lygiagrečiu arba nuosekliu elektrinio jungimo būdais (1.3 (d-f) pav.). T. y. kiekvienas pjekzoslauksnis generuoja elektrinę įtampą ir srovę nepriklausomai vienas nuo kito. Atskirai sujungus abiejų sluoksnių išorinius elektrodus su tarpiniu pagrindo elektrodu, abiejų sluoksnių generuojama srovė sumuojasi (lygiagretus jungimo būdas). O sujungus abiejų sluoksnių elektrodus vienas su kitu – sumuojasi (arba dauginasi iš pjeko sluoksnių skaičiaus) generuojama įtampa (nuoseklus jungimo būdas) [45]. Generuojama įtampa lygiagrečiu ir nuosekliu jungimo būdais išreiškiama $V = 3Fl_{\text{pzt}}g_{31} / 8w_{\text{pzt}}t_{\text{pzt}}$ ir $V = 3Fl_{\text{pzt}}g_{31} / 4w_{\text{pzt}}t_{\text{pzt}}$, atitinkamai. Čia F – apkrovos jėga, w_{pzt} ir t_{pzt} pjekzokeramikos sluoksnių plotis ir storis, g_{31} – pjekoelktrinis įtampos koeficientas, nusakantis mechaninių įtempimų ir jų sąlygojamo elektrinio lauko santykį [46]. Jungimo tipą laisvai parenka projektuotojas

pagal tai, koks elektrinis signalas pageidaujamas. Galiausiai, nepriklausomai nuo jungimo būdo galutinė generatoriaus elektrinė galia nekinta [47]. Tiesinio P-VEG (t. y. kinematiškai harmoniniu dėsniu sužadinama antrosios eilės dinaminė sistema) maksimalus galingumas pasiekiamas, kai jis yra sužadinamas rezonansiniu (arba jam labai artimu) dažniu. Tačiau realioje aplinkoje neretai generatorius yra sužadinamas laike kintančio dažnio jėgomis, tai labai apsunkina efektyvų mechaninės energijos konvertavimą į elektrinę. Dėl to yra taikomi įvairūs generavimo efektyvinimo metodai.

Kiti pjezoelektriniai generatoriai, sudaryti iš ypač lanksčių ir lengvų elementų, taip pat sulaukia didelio mokslininkų susidomėjimo. Apskritai, lankstūs elementai pasižymi komfortiškesniu panaudojimu, palyginti su nelanksčiais (pvz., uždėjus tiesiogiai ant raumenų ar organo paviršiaus), bešvinės medžiagos leidžia generatoriui suteikti daugiau galimybių saugiai naudoti juos organizmo viduje. Tačiau jų panaudojimą dėvimuose ar implantuojamuose biomechaniniuose generatoriuose stabdo žemas elektromechaninis ryšio koeficientas, kuris lemia žemą energijos tankį mikro / nanolygmenyje [48, 49].



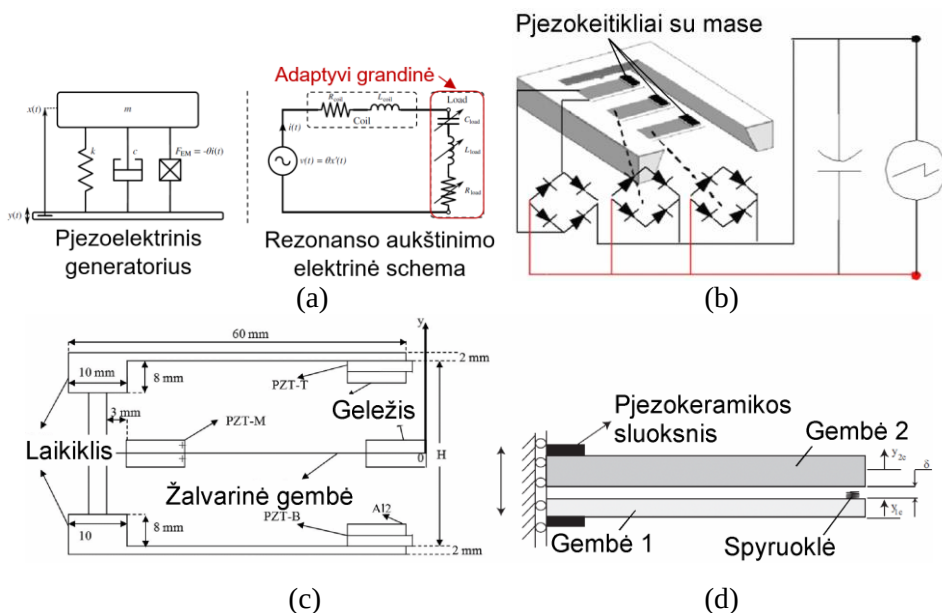
1.3 pav. Pjezokeitiklių veikimo režimai: (a) išilginis (d33), (b) skersinis (d31), (c) šlyties (d15) ir (d) lygiagretus, (e) nuoseklus pjezosluoksnių elektrinio pajungimo būdai, (f) pjezokeitklio pjūvis; čia F ir p – jėgos ir poliarizacijos kryptys, atitinkamai

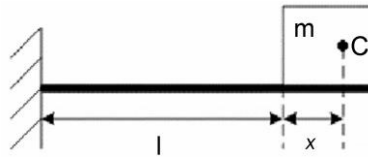
1.2.2. Vibracinio energijos generavimo efektyvinimo metodai

Tiesinis VEG yra jautrus sužadinimo dažnio pokyčiui, o generatorius efektyviausiai veikia rezonansiniu režimu, pvz., kai gembės tipo pjezo keitiklis virpa tikriniu dažniu. Aukštas keitiklio dinamiškumas (t. y. mažo slopinimo sąlygojamas siauras dažnio juostos plotis) dažnai sąlygoja ir žemą veikimo efektyvumą realiomis aplinkos sąlygomis, kai sužadinimo dažnis net neženkiai nukrypsta nuo keitiklio

rezonansinio dažnio (dauguma realių vibracinių šaltinių generuoja atsitiktinius, laike kintančių dažnių virpesius). Didžiausi energijos generavimo sunkumai pasireiškia VEG veikiant žemu (0–100 Hz) [50] arba biomechaninio naudojimo atveju – itin žemu (<1–10 Hz) dažniu. Efektyvumo sumažėjimas taip pat gali pasireikšti dėl nesuderintų ar gamybos metu neužtikrintų reikiamų sistemos parametrų (t. y. gaminant daugiakomponentes medžiagas ar konstrukcijas sudėtinga užtikrinti jų dinamines savybes, kurios turi tiksliai atitikti konkretų sužadinimo atvejį). Todėl pasaulyje pastaraisiais metais intensyviai vykdomi plataus masto moksliniai tyrimai siekiant didinti VEG plačiajuosčio veikimo efektyvumą (angl. *wideband performance*) ir pagal galimybes išvengti / sušvelninti neigiamą kintančio išorinio sužadinimo dažnio įtaką [60, 61]. Siekiant padidinti plačiajuosčio energijos generavimo efektyvumą, taikomi įvairūs metodai:

- rezonanso aukštinimas naudojant adaptyvias elektrines grandines (angl. *resonance tuning*) (1.4 (a) pav.) [53,62];
- daugiadažniai keitiklių masyvai (angl. *multi-frequency arrays*) (1.4 (b) pav.) [63];
- mechaninio dažnio aukštinimas (angl. *frequency up-conversion*) (1.7-1.10 pav.) [64];
- daugiamodalinis energijos generavimas (angl. *multimodal*) (1.4 (c) pav.) [65];
- netiesinės dinamikos efektų išnaudojimas (angl. *nonlinear*) (1.4 (d) pav.) [66];
- rezonanso derinimas naudojant mechaninius elementus (angl. *frequency adjusting*) (1.4 (e) pav.) [60].





(e)

1.4 pav. Pjezoelektrinių generatorių efektyvinimo metodai: a – rezonanso aukštinimas adaptyvia elektrine grandine, b – daugiadažnių keitiklio masyvų naudojimas, c – daugiamodalinis energijos generavimas, d – netiesinės dinamikos efektų išnaudojimas, e – rezonanso derinimas naudojant kintančio masės centro padėties elementus [53, 60, 62-66]

VEG keitiklio rezonansinio dažnio pasyvus arba aktyvus derinimas yra realizuojamas naudojant mechaninius (pvz., įveržimai), magnetinius arba pjezoelektrinius metodus [60, 61]. Tačiau tokie generatoriaus dažnio derinimo metodai yra neretai neveiksmingi greitai laike kintančio dažnio vibraciniam poveikiui (pvz., nereguliarūs, nuolat kintantys, įvairaus kryptingumo žmogaus judesiai) ir yra nepatogūs dėl naudojamų išorinių, būtinų suderinti, konstrukcinių (ir maitinimo) elementų. Pvz., 1.4 (e) pav. pateiktas rezonanso suderinimo mechanizmas su kintančia sunkio masės m svorio centro pozicija c . Čia x ir l nurodo masės svorio centro padėtį, kuri gali kisti priklausomai nuo sužadinimo dažnio [60]. 1.4 (a) pav. pateiktas rezonanso aukštinimo mechanizmas, kai pjezokeitikliui su sunkio mase m pradėjus virpėti žemo dažnio virpesiais, adaptyvi elektrinė grandinė, sudaryta iš reguliuojamų rezistorinės, talpinės ir induktyvinės elementų, prisitaiko prie sužadinimo sąlygų ir lemia efektyvų pjezogeneratoriaus veikimą [62].

Daugiadažnių keitiklio masyvų naudojimas yra nesudėtingas ir gana tiesmukas būdas praplėsti VEG atsako dažnių juostos plotį, nes neišvengiamai padidėja generatoriaus svoris ir tūris, atitinkamai sumažėja įrenginio energijos tankis. Pabrėžtina, kad tokiam metodui taikyti būtina sudėtinga elektrinės galios valdymo grandinė, kuri leistų išvengti nepageidaujamo generuojamos įtampos mažėjimo dėl priešfazių signalų sumavimo. Pvz., 1.4 (b) pav. pateiktas generatoriaus pavyzdys su trimis pjezokeitikliais, kurie elektriškai sujungti taip, kad veiktų kaip vienas. Kiekvienas pjezokeitiklis pasižymi skirtingu tikriniu dažniu ir priklausomai nuo sužadinimo atitinkamai funkcionuoja tik vienas iš jų [63]. Tokiam VEG būtina sudėtinga elektrinė valdymo sistema, kuri išlygintų visų keitiklių įtampą ir neleistų keitikliams slopinti vienas kito generuojamos įtampos jiems svyruojant skirtingomis kryptimis (pvz., vienam kylant, o kitam leidžiantis). Panašus daugiamodalinio efektyvinimo metodas pateiktas 1.4 (c) pav., kai naudojami trys skirtingos formos pjezokeitikliai. Paveiktas išorinio sužadinimo, keitiklis (ir PZT-M) kontaktuoja su PZT-T ir PZT-B, taip priversdamas juos virpėti skirtingu dažniu ir generuoti elektrinę įtampą.

Pastaruoju metu itin intensyviai pradėti kurti netiesiniai VEG [50, 67, 76], kuriuose netiesinės dinamikos efektai sistemoje sukelti siekiant realizuoti plačiąjuostį atsaką. Tai atliekama keliais būdais: panaudojant įvairius stabdiklius (spyruokles, standžias plokšteles) (1.4 (d) pav.) [68] arba išnaudojant magnetinės

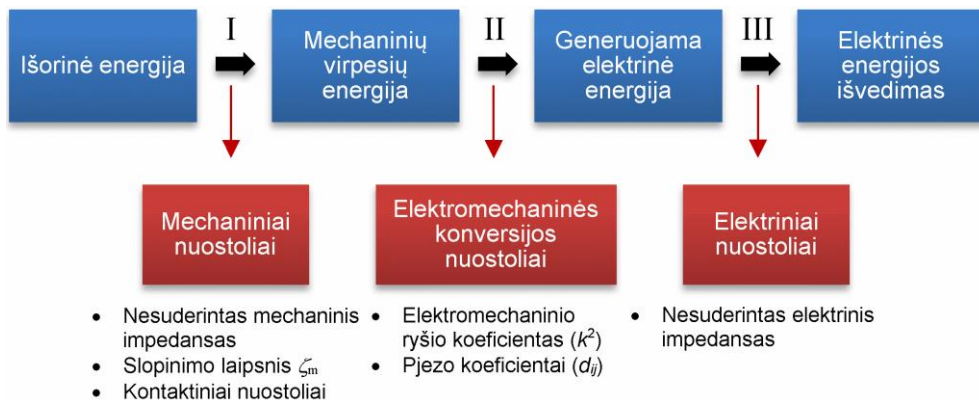
sąveikos jėgas, kurios yra skirtos nustatyti daugiastabilias generatoriaus konfigūracijas [69, 70]. Itin sudėtingas netiesinių VEG veikimas vis dar nėra pilnai ištirtas ir tai komplikuoja praktinį jų panaudojimą [67].

Mechaninio dažnio aukštinimo metodas yra vienas iš perspektyviausių sprendimo variantų, tinkančių efektyvinti VEG veikimą esant žemam sužadinimo dažniui (< 50 Hz). Paprastai toks metodas sudarytas iš kelių skirtingo dažnio elementų, kai nuo aplinkos poveikio judėdamas pirminis žemo dažnio elementas paveikia (sužadina) antrąjį aukšto dažnio elementą, taip sukeldamas jo tikrinius virpesius [10]. Tolimesniuose disertacijos skyriuose bus nuodugniau apžvelgti P-VEG, kurie veikia mechaninio dažnio aukštinimo pagrindu.

1.3. Mechaninio dažnio aukštinimo pagrindu veikiantys vibraciniai pjezogeneratoriai

1.3.1. Esminiai elektromechaninės konversijos principai

P-VEG pasiekia maksimalų galimą energijos tankį, kai yra suprojektuotas kaip lengvai slopinama dinaminė sistema, veikianti tikriniu (arba artimu tikriniam) dažniu. Žemu dažniu veikiančio VEG generuojama elektrinė galia žymiai sumažėja dėl mažo mechaninės galios kiekio, kuris perduodamas iš virpesių šaltinio į generatorių ($P_{\max} \propto f^3$ su sąlyga, kad sužadinimo virpesių amplitudė nekinta) ir žemo elektromechaninės (EM) konversijos našumo [10, 30, 37]. Pastarasis nusakomas santykiu tarp išeinančios elektrinės ir įeinančios mechaninės energijų ($\eta = E_{\text{is}} / E_{\text{i}}$). Bendruoju atveju generatoriaus elektrinė galia gali būti didinama maksimizuojant: i) santykį tarp EM ryšio koeficiento k^2 ir mechaninio slopinimo laipsnio ζ_m ($\eta \propto k^2 / \zeta_m$); ii) elektrinio slopinimo koeficientą ζ_e ($\eta = \zeta_e / (\zeta_m + \zeta_e)$) [71-73]. Pavyzdžiui, kritinis slopinimas apskaičiuojamas $c_k = 2m\omega_t$, čia m ir ω_t nagrinėjamos sistemos masė ir tikrinis dažnis, atitinkamai. Tada mechaninio slopinimo koeficientas apskaičiuojamas pagal: $\zeta_m = c / c_k$, t. y. faktinio slopinimo c ir kritinio slopinimo c_k konstantų santykis. Taigi ζ_m yra atvirkščiai proporcingas tikriniam dažniui. Dėl to žemu dažniu rezonuojantis keitiklis patiria didesnę mechaninį slopinimą, krenta elektromechaninės konversijos našumas (mažėja elektrinė galia / energija). *Mechaninio dažnio aukštinimo* (MDA) metodas yra naudojamas η padidinimui sumažinant ζ_m , kai VEG yra žadinamas žemu dažniu [75, 77]. Bendruoju atveju, P-VEG sistemoje energijos generavimo procesas vyksta taip, kaip pavaizduota 1.5 pav. [74]. Galima išskirti tris pagrindinius etapus: I) mechaninės energijos perdavimas iš išorinio virpesių šaltinio į P-VEG, II) mechaninės energijos konversija į elektrinę naudojant tiesioginį pjezoeftą, III) elektrinės energijos apdorojimas ir kaupimas. P-VEG elektrinės energijos tankis priklauso nuo surinktos mechaninės energijos kiekio ir nuostolių, atsirandančių kiekvieno etapo metu (pvz., mechaniniai nuostoliai dėl mechaninio impedanso nesutapimo, elektromechaniniai ryšio nuostoliai).



1.5 pav. Energijos surinkimo / generavimo proceso etapai ir nuostoliai.

I – mechaninės energijos surinkimas iš išorinio šaltinio, II – mechaninės energijos konversija į elektrinę naudojant tiesioginį pjezoeftą, III – elektrinės energijos apdorojimas ir kaupimas [10, 74]

1.3.2. Energijos generavimo taikant mechaninį dažnio aukštinimą apžvalga

Įprastai MDA metodas yra sudarytas iš dviejų posistemių, kurioje nereznuojantis [77-85] arba reznuojantis [12, 64, 86-92] pirminis mechaninis elementas, paveiktas žemo dažnio išorinio dinaminio poveikio, kontaktiniu [64, 77, 81-88], nekontaktiniu [12, 78-80, 89-92] arba hibridiniu [77, 93] būdu impulsyviai sužadina antrinio elemento (t. y. pjezokeitiklio) aukšto dažnio laisvuosius virpesius (1.6 pav.). Apibendrintai galima teigti, kad reznuojantis pirminis mechaninis elementas (tamprioji konstrukcija, pvz., liauna gembė) sudaro galimybes pasiekti santykinai aukštą P-VEG galią siaurame žadinimo dažnių intervale. O nereznuojantis pirminis elementas (standžioji konstrukcija, pvz., šratas) leidžia pasiekti santykinai mažesnę galią platesniame dažnių intervale. Taigi MDA leidžia sugeneruoti aukštadažnius pjezokeitiklio virpesius esant kintančiam žemadažniui sužadinimui.

Kontaktinis MDA gali būti realizuotas taikant smūginį [83-86], užgavimo (angl. *plucking*) [81,82,76, 88] arba kombinuotą smūginį-užgavimo [87] būdus (1.6 pav.). Smūginio sužadinimo atveju standus kūnas [83-85] arba reznuatorius [64,86] po kontakto su pjezokeitikliu atšoka atgal. Užgavimo atveju pirminis elementas (pvz., plokštelės [81, 76]) kontaktuoja su keitikliu lenkia jį iki tam tikros krašutinės padėties tol, kol atsiduria kitoje keitiklio pusėje, taip paleisdamos jį laisvai virpti (t. y. taip užgaunamos stygos muzikos instrumentuose). Tiesioginio fizinio kontakto (smūgio) metu keitiklio sužadinimas yra savaime gana staigus (impulsyvus), todėl pasitelkus kontaktinį MDA, lengviau sugeneruoti švarius aukštos amplitudės laisvuosius keitiklio virpesius [91, 94]. Magnetinis MDA yra pranašesnis dėl tiesioginio kontakto nebuvimo. Taip maksimaliai sumažėja nuolatinis medžiagų fizinis dėvėjimasis (dilimas) veikimo metu. Nors kontaktinio keitiklio elementai gali būti dengiami specialiais apsauginiais sluoksniais, tačiau fizinio kontakto potenciali žala (kaip ir skleidžiamas garsas) vis tiek nėra pilnai eliminuojami [82, 91, 95]. Bekontaktis MDA, realizuojamas inercinėmis ar magnetinėmis jėgomis, yra savaime saugesnis

sužadinimo būdas, kuris taip pat leidžia pasiekti itin tylų arba net begarsį generatoriaus veikimą, būtiną nešiojamiems / dėvimiems įrenginiams dėl komfortabilumo.

Literatūroje yra aprašyta įvairių P-VEG, kurie veikia dažnio aukštinimo režimu. Pvz., D. Alghisi pristatė elektros energijos generatorių su 6 pjezokeitikliais, kurie kontaktiniu būdu yra sužadinami aukšto dažnio virpesiais varomojo rutulio judėjimu (1.7 (a) pav.). Didžiausias šio generatoriaus privalumas tas, kad jis gali veikti visomis galimomis išorinio sužadinimo kryptimis, tačiau kartu yra sunkiai pritaikomas nešioti / dėvėti dėl didelių gabaritų ir nuolatinio triukšmo, kai rutulys kontaktuoja su sienelėmis ir pjezokeitikliais.

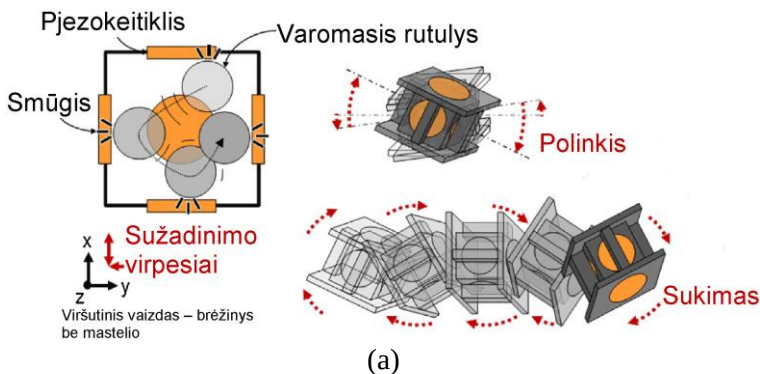
Įprastas gembės tipo kontaktinis mechaninio dažnio aukštinimo metodo pritaikymas siekiant generuoti elektros energiją pateiktas 1.7 (b-c) pav., kai žemadažnis pirminis elementas nuolatinio kontaktiniu būdu juda su aukšto dažnio pjezokeitikliu ir lemia jo susietuosius virpesius (1.7 (b) I), arba smūginio kontakto atveju, kai žemadažnė gembinė tamprioji konstrukcija po kontakto su pjezokeitikliu atsitraukia leisdama pastarajam laisvai virpėti (1.7 (b) II ir 1.7 (c) pav.). Pirmuoju atveju gaunama gana ilga pjezokeitiklio virpėjimo fazė žemesniu nei tikrinio dažniu. Antruoju atveju sugeneruojami gęstantys tikrinio dažnio pjezokeitiklio virpesiai, kurių trukmė yra maža. Tokiu atveju generatorius gali veikti efektyviai tik esant pakankamai dažnam pakartotiniam sužadinimui (trumpiausiam laiko tarpui tarp užgesusių virpesių pabaigos ir kito sužadinimo pradžios). Be tokios galimybės nuolatinis kontaktinis žemadažnio elemento judėjimas su pjezokeitikliu leidžia pasiekti ilgesnę virpesių trukmę (t. y. sutrumpinti laiko trukmę, kai keitiklis nevirpa) ir išvystyti didesnę galią. Apibendrinant abu atvejus (I ir II) teigtina, kad generatorius, veikdamas tinkamai suderintu smūginio režimu, yra efektyvesnis nei tinkamai suderintas nuolatinio kontakto režimas. Esminis abiejų režimų trūkumas yra pastovus fizinis kontaktavimas, kuris mažina įrenginio ilgaamžiškumą ir patikimumą. Dėvimuose energijos generatoriuose nėra priimtinas ir kontakto metu kylantis triukšmas. Kontakto MDA atveju sužadinimo smūgis turi būti pakankamai staigus, kad sukelti pjezokeitiklio virpesiai nebūtų varžomi paties kontaktuojančio elemento.

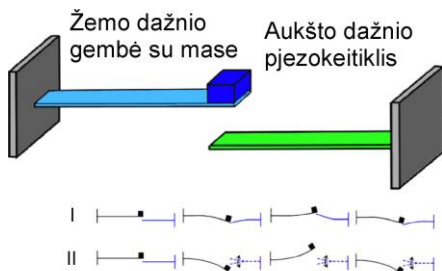


1.6 pav. Pjezoelektrinių vibracinių energijos generatorių, veikiančių mechaninio dažnio aukštinimo režimu, kvalifikavimas

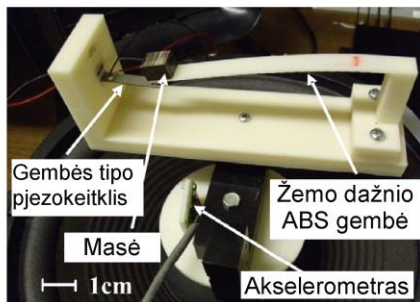
Nestabiliu magnetinio MDA pagrindu veikiantis energijos generatorius pavaizduotas 1.8 pav. Generatoriaus konstrukcija susideda iš pagrindinio varomojo magneto ir varančiųjų magnetų. Magnetai yra išdėstyti taip, kad abu suvaržymo magnetai stumtų varantįjį nuo savęs. Pjzokeitiklių magnetų polių kryptis sutampa su varančiojo. Varantysis magnetas susižadina nuo žemadažnio išorinio dinaminio poveikio ir jam judant tarp suvaržymo magnetų sukuriamas nestabilus magnetinis sankybis tarp pjzokeitiklio magnetų, kurie sukelia keitiklių aukštadažnius virpesius [78]. Šios konstrukcijos trūkumas tas, kad sugeneruoti pjzokeitiklių virpesiai yra skirtingo dažnio, todėl siekiant užtikrinti generatoriaus veikimą maksimalios elektrinės galios režimu, būtina adaptyti elektroninę valdymo sistema, skirta suderinti išorinės grandinės varžą. Tokį energijos generatorių sudėtinga realizuoti dėvimuose įrenginiuose ir dėl komplikotos konstrukcijos.

1.9 pav. pateikti du analogiški biomechaninio pjzogeneratoriaus realizavimo variantai, kai vienu atveju naudojamas kontaktinio užgavimo (1.9 (a ir c) pav.), o kitu – magnetinio sužadinimo (1.9 (b ir d) mechaninio dažnio aukštinimo metodai. Kontaktinio užgavimo atveju vidiniame žiede išdėstyti pjzokeitikliai yra palenkiami ant išorinio žiedo išdėstytų plokštelių ir paleidžiami laisvai virpėti. Palyginti su smūginiu (1.7 (b) II pav.), šis būdas yra pranašesnis, nes pjzokeitikliai visada yra palenkiami iki tos pačios nustatytos krašutinės padėties (dėka suderintų lanksčių plokštelių). Tačiau tiesioginio kontakto trūkumai (medžiagų nuovargis, triukšmas) nepašalinti. O magnetinio sužadinimo atveju pjzokeitikliai yra lenkiami magnetinės sąveikos jėgų (magnetai išdėstyti taip, kad veiktų stūmos režimu) [47, 92, 96]. Taip eliminuojamas triukšmas ir panaikinamas tiesioginis medžiagų dėvėjimasis, įrenginys veikia ilgiau. Deja, bet kartu su bekontaktinio sužadinimo pranašumais neišvengiamai susiduriama su magnetinės sąveikos sunkumais. T. y. palyginti su kontaktiniu atveju, vienu metu sudėtingiau pasiekti staigų magnetinio sužadinimo impulsą ir užtikrinti, kad varantieji magnetai nesukibtų / neužstrigtų su / prie varomųjų magnetų. Palyginti su kontaktinio užgavimo atveju, magnetinio sužadinimo atvejis yra jautresnis rotorius sukimosi greičiui, dėl to išorinio biomechaninio sužadinimo metu yra sudėtinga pasiekti aukštą rotorius sukimosi greitį.



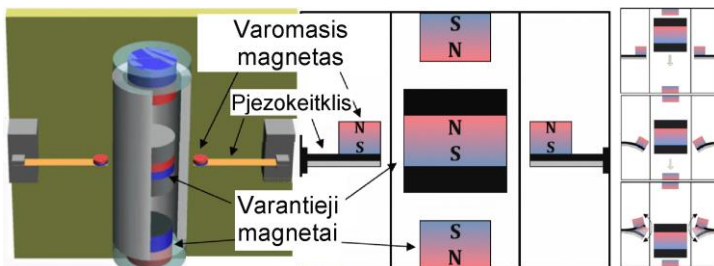


(b)

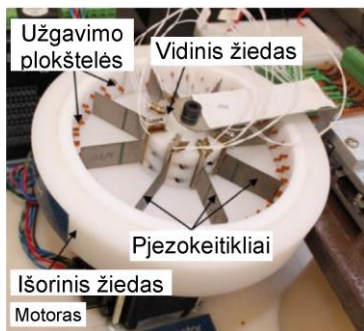


(c)

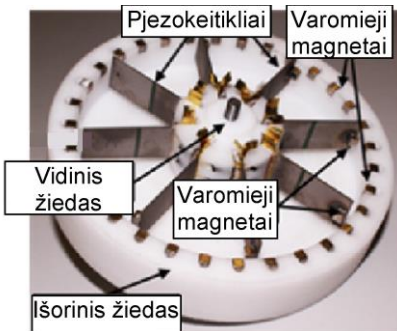
1.7 pav. Realizuoti mechaninio dažnio aukštinimo metodai: a – daugiakryptis kontaktinis pjezogeneratorius [84], b – dviejų skirtingo dažnio gembių kontaktinio susietų virpesių I ir smūginio (laisvųjų virpesių) II metodų principinė schema [87], c – dviejų skirtingo dažnio gembių smūginio sužadavimo eksperimentinio tyrimo vaizdas [64]



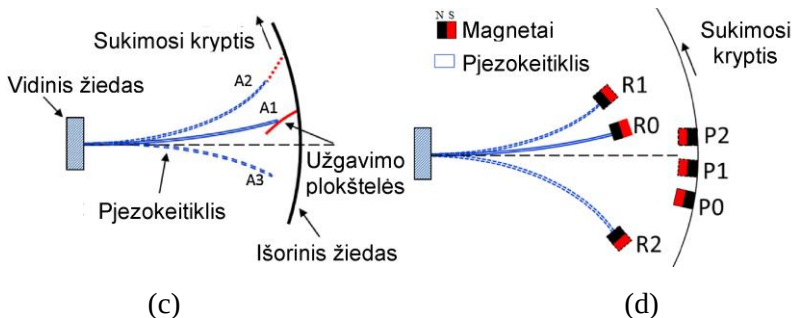
1.8 pav. Pjezoelektrinio energijos generatoriaus, veikiančio nestabilaus mechaninio dažnio aukštinimo metodu, principinė schema [78]



(a)



(b)



1.9 pav. Kontaktinio (a) ir nekontaktinio (b) energijos generatoriaus mechaninio dažnio aukštinimo vaizdas, (c) ir (d) principinės schemos, atitinkamai [47] ir [92]

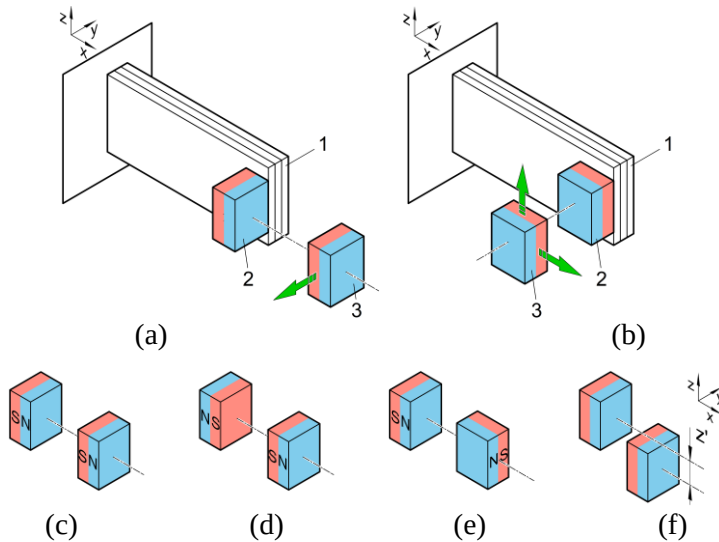
1.3.3. Magnetinių mechaninio dažnio aukštinimo konfigūracijų apžvalga

Dažniausiai magnetinio MDA metodą išnaudojančio pjezoelektrinio generatoriaus veikimas yra pagrįstas judančiais magnetais (prtvirtintais ant žemo dažniu judančių kūnų), kurie magnetinės sąveikos jėgomis paveikia ant gembinio pjezokeitlikio prtvirtintus (fero)magnetinius elementus. Taip pjezokeitiklis yra palenkiamas ir paleidžiamas rezonuoti (t. y. užgaunamas) [12, 78-80, 90-92]. Tam, kad P-VEG veiktų maksimalia galia (t. y. būtų generuojami aukštos amplitudės gęstantys laisvieji virpesiai), efektyviai funkcionuojantis MDA mechanizmas turi užtikrinti staigų impulsinį jo sužadinimą nepriklausomai nuo išorinio dinaminio poveikio dažnio [12, 77-92]. Tačiau magnetinio sankybio (angl. *magnetic coupling*) paveiktas sužadinimas yra pakankamai sudėtingas mechaninės energijos perdavimo būdas dėl fizikinių magnetinių jėgų savybių (sudėtingos formos magnetinių jėgų impulsai) [12]. Todėl yra labai sudėtinga realizuoti kompaktišką magnetinio MDA pagrindu veikiančią P-VEG, kuris nuolat funkcionuotų impulsiniu režimu. Pavyzdžiui, žemo dažnio biomechaniniu judesiu sunku pasiekti pakankamą varančiojo magneto greitį, kad būtų užtikrintas staigus (t. y. magnetiškai nevaržomas / neslopinamas) pjezokeitlikio paleidimas iš magnetiškai deformuotos padėties. Ši problema galėtų būti sprendžiama įrenginyje P-VEG pritaikant tarpinius sužadinimo greičio didinimo (įgreitinimo) mechanizmus, tačiau mokslinėje literatūroje jie nėra aprašyti.

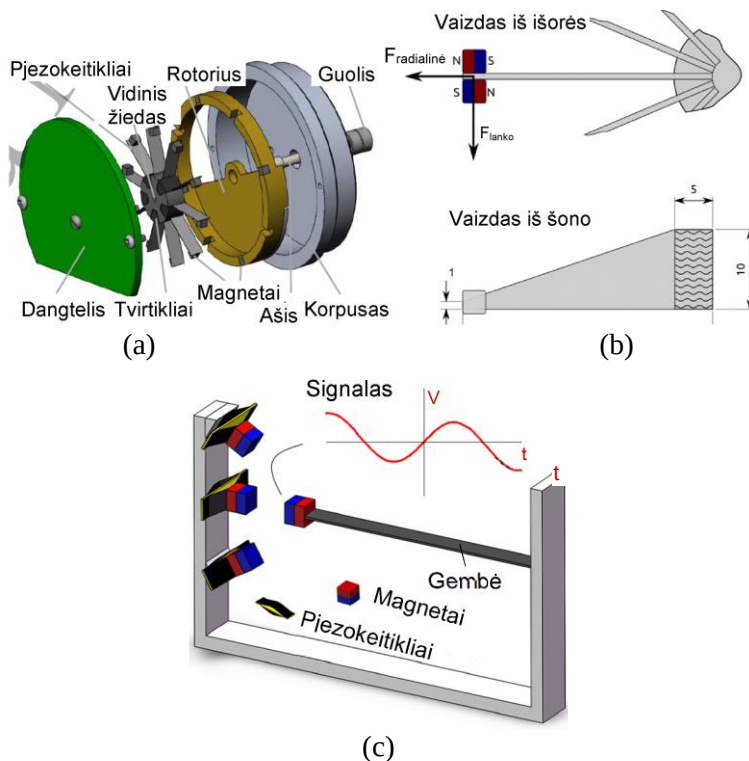
Magnetinio MDA režimą išnaudojančio P-VEG veikimas gali būti efektyvinamas skirtingomis magnetinėmis MDA konfigūracijomis, kai: i) pjezokeitiklis lenkiamas varančiojo magneto judėjimo kryptimi (xy plokštuma) – *plokštuminė konfigūracija* (1.10 (a) pav.), arba ii) varančiojo magneto statmena judėjimo kryptimi (zx plokštuma) – *ortogonalioji konfigūracija* (1.10 (b) pav.) [11, 12]. Iš esmės abiem konfigūracijomis galima pasiekti staigų impulsinį pjezokeitlikio sužadinimą ir paleidimą, išgaunant aukštos amplitudės laisvuosius virpesius. Šias konfigūracijas galima detalčiau nagrinėti magnetų tarpusavio padėties atžvilgiu (t. y. varantysis ir varomasis magnetai gali būti centruoti arba persislinkę z ašies kryptimi (1.10 (f) pav.). Ortogonalioji konfigūracija yra patogi realizuojant kelis keitikius viename lygyje [97], kai siekiant padidinti generuojamą elektrinę galią naudojami keli pjezokeitikliai (tokia konfigūracija yra perspektyvinė projektuojant ją P-VEG diegimui į mikrosistemas).

Be magnetų išdėstymo ir jų judėjimo krypties, magnetinio MDA konfigūracija dar gali būti nagrinėjama magnetinės poliarizacijos atžvilgiu. Pavyzdžiui, magnetai gali būti pozicijuoti taip, kad veiktų traukos, stūmos arba ortogonalios traukos / stūmos režimais, 1.10 (c-e) pav. atitinkamai. Daug autorių skiria pirmenybę tiesioginiam stūmos režimui (1.10 (d) pav.) dėl paprastesnio realizavimo galutiniame įrenginyje siekiant išvengti magnetų sukibimo (užstrigimo). Iš esmės, visų konfigūracijų magnetinės sąveikos jėgos yra nusakomos ašinės ir skersinės jėgų dedamosiomis, kurių kryptys stūmos ir traukos atvejais yra priešingos.

Siekiant padidinti pjezogeneratoriaus galią galutiniuose įrenginiuose, imta naudoti kelias magnetų konfigūracijas. 1.9 (b,d) ir 1.11 (a) pav. pateiktuose generatorių pavyzdžiuose naudojami aukšto standumo pjezokeitkliai, kurių magnetiškai sukeliami laisvieji virpesiai greitai užgęsta. Siekiant minimizuoti keitiklio statinės būsenos trukmę (kai keitiklis nevirpa) ir padidinti sužadinimo ciklą skaičių, realizuojamas daugiau nei vienas varantysis magnetas. Tokiuose generatoriuose magnetai išdėstyti taip, kad pakartotinis pjezokeitiklių sužadinimas prasidėtų užgesus pirminio sužadinimo sukeltiems virpesiams [11, 91, 96, 98]. Kitomis daugiamagnetinėmis konfigūracijomis kiti tyrėjai siekia sukurti nestabilias pjezokeitiklio būsenas ar skirtingas magnetinio lauko (impulso) formas (1.11 pav.). Tačiau detalesnio daugiamagnetinio sužadinimo ir platesnių jų panaudojimo galimybių įvertinimo literatūroje pasigendama.



1.10 pav. Pjezoelektrinio vibracinio energijos generatoriaus galimos mechaninio dažnio aukštinimo (a – plokštuminė, b – ortogonalioji, žalia rodyklė rodo galima varančiojo magneto judėjimo kryptį) ir magnetinės poliarizacijos orientavimo (c – traukos, d – stūmos, e – ortogonalioji traukos / stūmos, f – bet kuri poliarizacijos konfigūracija persislinkusi z ašies kryptimi) konfigūracijos: 1 – pjezokeitiklis, 2 – varomasis magnetas, 3 – varantysis magnetas; žalios rodyklės žymi varančiojo magneto judėjimo kryptis



1.11 pav. Bekontakčiai pjezoelektriniai mikrogalios generatoriai, naudojantys dažnio aukštinimo metodą keliais magnetais pakartotinam (a), stipresniam (b), nestabiliam (c) sužadanimui [11, 91, 96, 98]

1.4. Magnetinės sąveikos jėgų teorinės analizės apžvalga

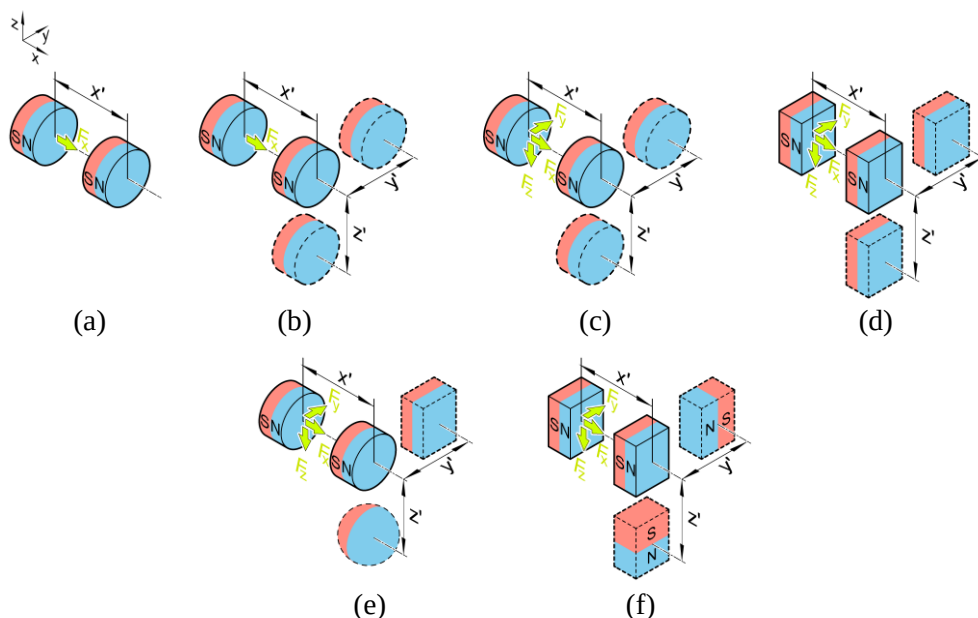
1.4.1. Analitinių metodų taikymas

Magnetinės sąveikos MDA mechanizme gali būti įvertintos keliais skirtingais būdais. Ašinė jėga tarp dviejų magnetinių diskų gali būti nesudėtingai išvesta pagal Furlani naudojant elektrinių krūvių metodą [99]. Autorius konstatuoja, kad nuolatiniai magnetai buvo sumodeliuoti kaip ekvivalentinio magnetinio krūvio pasiskirstymas, tada tarp tų krūvių elementų apskaičiuotos magnetinės jėgos. Slobadan [100] ir Ravaud [101] iškėlė hipotezę, kad cilindriniai magnetai gali būti traktuojami kaip plonos ritės. Tokiu atveju, pasitelkus „Kuloninius“ ir „Amperinius“ modeliavimo metodus, buvo realizuotas Lorencio jėgų ir, atitinkamai, ašinės magnetinės jėgos apskaičiavimas. Šio metodo privalumas tas, kad jis gali būti taikomas analizuojantis mikromagnetų (mikroričių) miniatiūrizavimą. Nepaisant to, visi aptarti metodai tinka analizuoti tik cilindriniams magnetams su ašiniu (x ašies kryptimi) persislinkimu (1.12 (a) pav.). Vokoun ir kiti [102] pasiūlė racionalią pagrįstą prielaidą, jog traktuojant, kad abu magnetai turi vienodą (tolyginę) poliarizaciją, ašinė jėga tarp magnetų gali būti apskaičiuota jiems pasislinkus x ašine ir / arba y skersine kryptimis (1.12 (b) pav.). Agashe ir Arnold [103] išvedė analitinę Kelvino formulę, skirtą apskaičiuoti magnetines jėgas tarp skirtingų geometrinių formų magnetų:

stačiakampio gretasienio ir cilindro (1.12 (c-d) pav.). Šiuo išvedimu taip pat galima apskaičiuoti ašinę F_x ir skersinę F_y jėgas tarp magnetų, o anksčiau minėtų autorių pasiūlytomis analitinėmis priklausomybėmis galima apskaičiuoti tik ašinę F_x jėgą. Juo labiau, magnetai gali būti persislinkę ašine x ir skersine y kryptimis. Pabrėžtina, kad Agashe ir Arnold metodas yra sudėtingas ir nepatogus taikyti dėl komplikuoto analitinio išvedimo, kuriame naudojamas apytikris elipsinis integralas. Vokoun ir Beleggia [104] pristatė naują nuolatinių magnetų skaičiavimo vektorinį metodą ir pateikė analitines priklausomybes magnetinių jėgų apskaičiavimui tarp cilindrinų, sferinių ir stačiakampio gretasienių magnetų (1.12 (e) pav). T. Y., šis metodas leidžia apskaičiuoti magnetines jėgas tarp skirtingos geometrijos magnetų (cilindras-sfera, sfera-stačiakampis gretasienis ir kt.). Krasilnikov [105, 106] ir Allag [107] pateikė analitinį stačiakampio gretasienio magnetų jėgų skaičiavimo metodą, pagrįstą Kulono dėsniu. Allag išvedimas yra tinkamas bet kokiam magnetų išdėstymui ir bet kokiai magnetų poliarizacijos kryptiai (1.12 (f) pav.). Vienas pirmųjų pasiūlytų ir plačiai taikomų magnetinių jėgų skaičiavimo metodų (tarp stačiakampio gretasienio formos magnetų) buvo išvestas Akoun ir Yonnet [108]. Statinių jėgų skersinės F_x ir ašinės F_y komponentės gali būti apskaičiuojamos magnetams pasislinkus ašine x ir skersine y kryptimis (1.12 (f) pav.). Šis metodas yra tikslus ir nereikalauja daug skaičiavimo. Jis yra patogus adaptuoti, kai norima modifikuoti tiriamą magnetų konfigūraciją (pvz., magnetų matmenis, išdėstymą, įmagnetinimo stiprį ir kt.). Dėl šių Akoun ir Yonnet pasiūlyto metodo pranašumų tolimesniuose skyriuose, siekiant analitiniškai įvertinti magnetines jėgas, bus pasitelktas šis metodas (verifikuoti COMSOL baigtinių elementų modelius). Detalesnis modelis, su analitinių priklausomybių išvedimu, pateiktas 2 sk.

1.4.2. Skaitinių metodų taikymas

Baigtinių elementų (BE) metodas yra labai plačiai taikomas sprendžiant įvairias fizikines užduotis įvairiose srityse. Didžiausias pažangių BE įrankių pranašumas yra galimybė spręsti susietuosius fizikos (daugiafizikinius) uždavinius. Pavyzdžiui, komplikotos konstrukcijos vibracinės energijos generavimo sistemos analizuojamos sujungiant mechaninę, elektrinę ir kitas fizikos sritis. Rinkoje yra nemažai BE programinės įrangos paketų (pvz., COMSOL Multiphysics, ANSYS, ABAQUS ir kitos). Tiesinės analizės atveju, šiais skaitiniais įrankiais galima paprastai ir greitai apskaičiuoti pjezoelektrinių elementų atsaką į harmoninį sužadinimą (pvz., įvertinti analizuojamo elemento amplitudės dažninę charakteristiką), kai pereinamieji procesai, vykstantys tik pradedant virpėti elementui, yra nevertinami. BE analizė tampa netiesinė ir sudėtingesnė, kai į nagrinėjamą sistemą įvedamos magnetinės jėgos. Siekiant nuodugiai įvertinti sistemos dinamiką, taikomi pereinamųjų virpesių skaičiavimai (skaičiavimai laiko srityje). P-VEG srityje dirbančių autorių žiniomis, nėra daug žinomų šaltinių, kuriuose būtų pateikti BE pagrindu sukurti pilnai susieti elektro-magneto-mechaniniai modeliai, kurie kartu sujungtų dinaminį (pereinamąjį) magnetinio sužadinimo poveikį pjezogeneratoriui [109]. Tokio modelio skaitinį sudėtingumą lemia žymiai didesnė magnetų judėjimo amplitudė nei vienas oro srities baigtinis elementas.



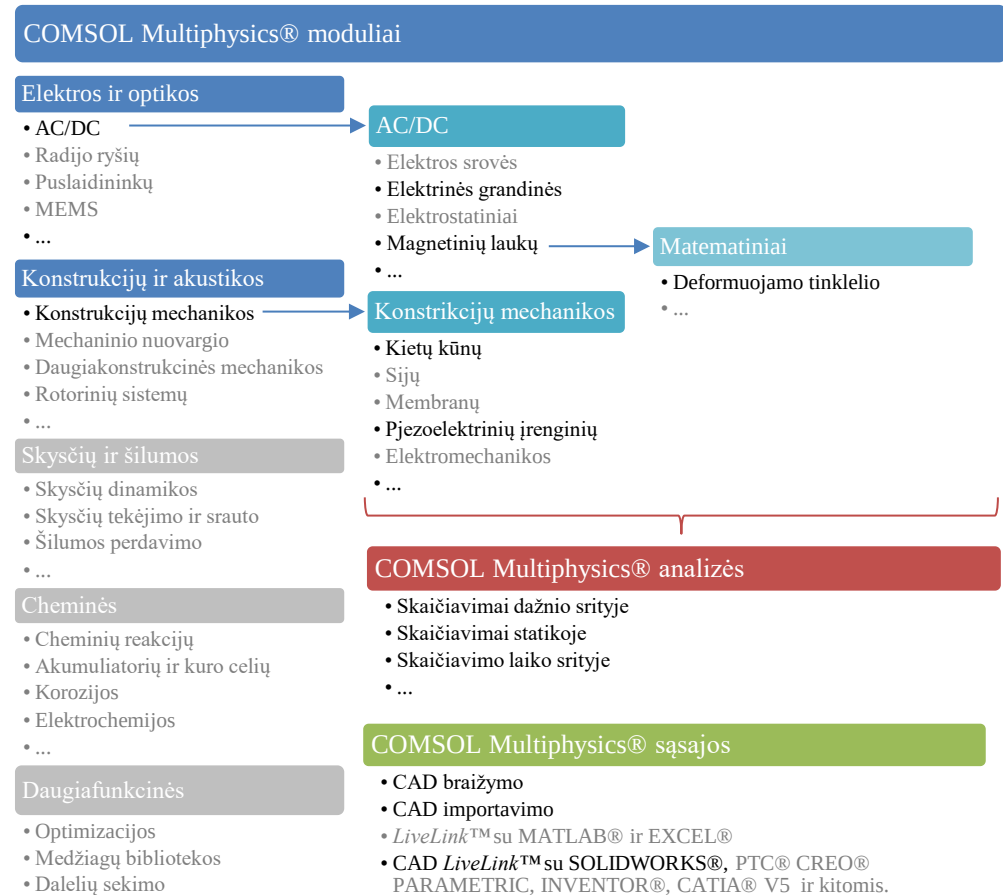
1.12 pav. Magnetinių jėgų analitinio skaičiavimo konfigūracijos: F_x – ašinė magnetinės jėgos komponentė, F_y ir F_z – skersinės magnetinės jėgos komponentės, x' – magnetų persislinkimas ašine kryptimi, y' ir z' – magnetų persislinkimas skersinėmis kryptimis

Tokia elementų disproporcija lemia sudėtingus ir ilgus skaičiavimus. Tam tikros BE modelių realizacijos reikalauja labai didelių skaičiavimo resursų, pvz., atliekant pereinamąją (t. y. magnetodinaminę) analizę 3D erdvėje. Konkrečiu atveju, magnetodinaminei analizei reikia dinaminio BE tinklelio, kuris nuolat performuojamas skaičiuojant magnetines jėgas oro srityje. Erdvinio BE modelio atveju tai itin prailgina skaičiavimo laiką. Siekiant sumažinti skaičiavimo resursų poreikį, esant galimybei, racionalu vietoje 3D naudoti 2D modeliavimo metodiką [110].

Skaitiniams tyrimams šiame darbe pasirinktas BE modeliavimo metodas naudojant COMSOL Multiphysics® programinį paketą, kuris yra viena galingiausių ir universaliausių daugiafizikinės analizės programų (1.2 lent.). Šiuo programiniu paketu sukurtus modelius galima nesudėtingai koreguoti (adaptuoti) pagal pasikeitusias tyrimo sąlygas. Pvz., pasirinktas modeliavimo metodas leido tiesiogiai keisti 3D modelio konstrukcinius parametrus atsižvelgiant į gautus skaitinės analizės rezultatus. Galimybė tiesiogiai susieti išorines modeliavimo programas (pvz., SolidWorks®) leido realiu laiku įvertinti magnetinių laukų pasiskirstymą projektuojamame įrenginyje. Kuriant integruotą pjezogeneratoriaus modelį, buvo panaudoti keturi COMSOL fizikiniai moduliai, skirti įvertinti: i) gembės tipo PZT keitiklio pjezoelektrines savybes, ii) magnetų magnetinius laukus, iii) išorinę elektros grandinę. Skaitiniai tyrimai buvo atliekami skaičiuojant statikoje ir dinamikoje (skaičiavimai dažnio ir laiko srityje). Konkrečiu atveju, skaitiniame modeliavime

naudojama skirtinga fizikinių modulių kombinacija, todėl tolimesniuose skyriuose bus pateiktas detalus kiekvieno modelio aprašymas.

1.2 lentelė. COMSOL Multiphysics® daugiafizikinių modulių panaudojimo galimybės ir atskirų modulių panaudojimas modeliuojant pjezogeneratorių [111]



1.5. Skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje pateikta biomechaninių vibracinių energijos generatorių ir jų efektyvinimo metodų literatūros apžvalga, išryškinti jų privalumai ir trūkumai.

Atsižvelgus autonominių generatorių pritaikomumą dėvimuose įrenginiuose, didžiausias dėmesys buvo skirtas vibraciniams energijos generatoriams. Apžvelgtos įvairios jų konstrukcijos. Dėka aukšto energijos tankio ir miniatiūrizavimo galimybių detalai išnagrinėti pjezo medžiagų pagrindu veikiantys generatoriai. Išryškinti jų trūkumai veikiant žemo dažnio režimu (esant žemo dažnio 1–10 Hz įvairios krypties biomechaninių judesių žadinimui), kai generatoriaus $P_{\max} \propto f^3$. Išanalizavus įvairius efektyvinimo metodus, pasirinktas ir detalai pateiktas bekontaktis mechaninio dažnio

aukštinimo principas kaip potencialiausias (efektyvumo prasme) ir komfortabiliausias (ergonomine prasme) sprendimas dėvimuose įrenginiuose.

Pateiktos dvi galimos magnetinės mechaninio dažnio aukštinimo konfigūracijos: i) plokštuminė ir ii) ortogonalioji, kai magnetinis sankybis gali veikti j) traukos, jj) stūmos, jjj) ortogonaliosios traukos / stūmos. Sankybio jėgų įvertinimui pasirinkta analitinis ir skaitinis metodai, kurie nagrinėjami tolimesniame 2 sk. siekiant užtikrinti skaitinių metodų adekvatumą.

2. MAGNETINĖS SĄVEIKOS PJEZOGENERATORIUJE TEORINIS TYRIMAS

2.1. Magnetiškai sužadinamas pjezoelektrinis energijos generatorius

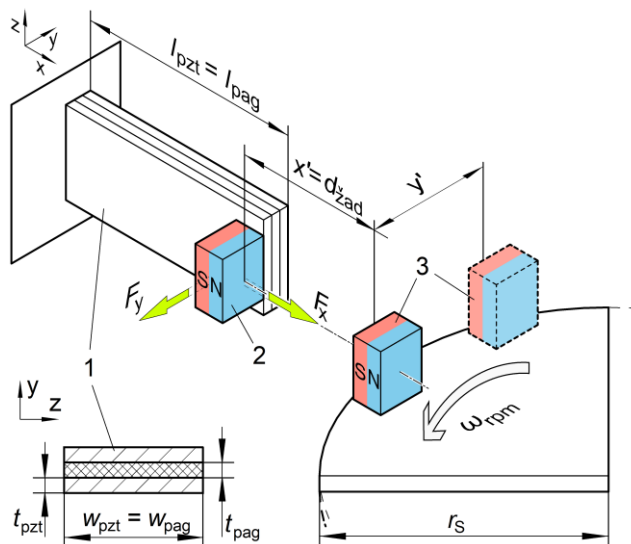
Analizuojamo magnetiškai sužadinamo pjezoelektrinio energijos generatoriaus (pjezogeneratoriaus) konfigūracija ir parametrai pateikti 2.1 pav. ir 2.1 lent. Pjezogeneratoriaus realizavimui pasirinktas komerciškai prieinamas gembės tipo bimorfinis pjezokeraminis (PZT-5A) keitiklis, pasižymintis aukštu elektromechaninio ryšio koeficientu, aukšta generuojama įtampa, todėl jis puikiai tinka naudoti generatorių ir jutiklių elementuose. Prie įtvirtinto keitiklio (matmenys $57.2 \text{ mm} \times 31.8 \text{ mm}$) galo pritaisytas $5 \times 5 \times 3 \text{ mm}$ dydžio stačiakampio gretasienio formos neodimio N52 magnetas (varomasis magnetas). Varančiajam magnetui judant greta varomojo, indukuojamos magnetinio sankybio jėgos, kurios deformuoja keitiklį, taip priversdamos jį virpėti aukšto dažnio laisvaisiais virpesiais. Eksperimento metu varančiojo magneto judėjimui buvo panaudotas besisukantis staliukas, kurio spindulys parinktas pakankamai didelis ($r_s = 80 \text{ mm}$), kad magneto judėjimą galima būtų traktuoti kaip tiesiaeigį, todėl visi geometriniai, dinaminiai ir kiti parametrai, aprašyti šiame darbe, pateikti naudojant Dekarto koordinačių sistemą. O eksperimento metu matuotas kampinis staliuko sukimosi greitis ω_{rpm} perskaičiuotas į linijinį pagal 1 formulę.

Analizuojamas magnetinio sužadinimo komponentų išdėstymas leidžia realizuoti keitiklio lenkimą varančiojo magneto judėjimo plokštumoje (xy plokštuma) – *plokštuminis sužadinimas* (angl. *in-plane plucking* [12]). Pjezogeneratorius išnaudoja tiesioginę magnetinę konfigūraciją, pagal kurią abu magnetai yra sulygiuoti pagal z ašį (be persislinkimo z kryptimi). Pagrindinis šią magnetinę konfigūraciją apibrėžiantis parametras yra *tarpelis* d_{zad} , kuris nusako atstumą tarp magnetų x ašies kryptimi, kai jų pozicija sutampa pagal y ašį (t. y. be persislinkimo pagal y ašį). Priklausomai nuo varančiojo ir varomojo magnetų polių orientacijos, sužadinimo konfigūracija gali būti arba traukiančioji, arba stumiančioji (abiem atvejais magnetai yra orientuoti erdvėje taip, kad jų magnetinės ašys būtų lygiagrečios x ašiai).

Analizei buvo laisvai pasirinkta traukos konfigūracija, nes teoriškai idealiau atveju abi konfigūracijos sukelia analogišką magnetinį sužadinimą, tik generuojamos magnetinės jėgos yra priešingos krypties (t. y. keičiant konfigūraciją iš traukos į stūmos, magnetinių jėgų impulsas yra apverčiamas x ašies atžvilgiu). Dėl pakankamai didelio besisukančio staliuko spindulio vertinama, kad sužadinimo metu varantysis magnetas praskrieja pro varomąjį tiesiaeige trajektorija, todėl jo judėjimo greitis (magnetinio sužadinimo greitis) apskaičiuojamas:

$$v_{\text{zad}} = r_s \omega_{\text{rpm}} (2\pi / 60) \quad (1)$$

čia r_s – besisukančio staliuko spindulys, ω_{rpm} – sukimosi greitis. Taip pjezogeneratoriaus *magnetinio sužadinimo režimas* nusakomas v_{zad} ir d_{zad} parametrais, kurie lemia mechaninio dažnio aukštinimo (MDA) sąlygas ir vibracinio energijos generavimo proceso efektyvumą.



2.1 pav. Principinė magnetiškai sužadinamo pjezogeneratoriaus schema (plokštuminė konfigūracija): 1 – bimorfinis gembinis keitiklis, 2 – magnetinė masė (varomasis magnetas), 3 – varantysis magnetas

Sistemų teorijos kontekste magnetiškai žadinamas pjezogeneratoriaus keitiklis yra priskiriamas antrosios eilės lengvai slopinamai ($\zeta_m \approx 0.015$) dinaminei sistemai, kurią periodiškai veikia pereinamasis sužadinimas. Todėl, bendruoju atveju, keitiklio pereinamojo atsako charakteristikos priklauso nuo indukuojamų magnetinių jėgų impulsų: i) formos ypatybių įskaitant jėgos krypties pokyčius (pvz., pusės ciklo ar pilno ciklo impulsas, jo asimetrijos laipsnis); ii) amplitudinių ir laikinių charakteristikų, kurios nusakomos impulso trukmėmis, jėgos užaugimo ir / arba kritimo trukmėmis (angl. *force ramping/decay times*) [112]. Kuo mažesnė jėgos impulso trukmė (t. y. kuo siauresnis impulsas), tuo didesnis jėgos užaugimo tempas. Palyginti su tradiciškesniais pereinamojo sužadinimo atvejais (pvz., kinematinis / seisminis žadinimas), sužadinimas magnetinio sankybio jėgomis gali būti priskirtas prie sudėtingesnių apkrovimo atvejų, kadangi indukuojamų magnetinių jėgų komponentės veikia skirtingose ašyse, o patys jėgų impulsai yra skirtingos formos [12]. Magnetinių jėgų poveikį į keitiklį sužadinimo metu apsprendžia tiek v_{zad} , tiek d_{zad} reikšmės. Tačiau pereinamojo sužadinimo pobūdį (t. y. ar impulsinis, ar kvazistatinis), o kartu ir keitiklio pereinamojo atsako charakteristikas pirmiausiai lemia v_{zad} dydis (žr. 2.2. sk.). Impulsinis sužadinimas šiuo atveju suprantamas kaip pakankamai staigus magnetinis sužadinimas (t. y. pakankamai aštrus jėgos impulsas), dėl kurio keitiklis pakankamai staigiai deformuojamas ir paleidžiamas laisvai virpėti taip, kad patirtų minimalų judesį varžantį magnetinio sankybio poveikį (t. y. neženklaus „magnetinis slopinimas“). Todėl projektuojant pjezogeneratorių siekiama jo darbo metu užtikrinti pakankamą magnetinių jėgų užaugimo tempą, t. y. realizuoti tokią santykinai nedidelių matmenų įrenginio konstrukciją, kurioje indukuojamos magnetinės jėgos galėtų didėti / mažėti gana sparčiai neilgame varančiojo magneto

judėjimo kelyje. Bendruoju atveju vertinama, kad keitiklio, traktuojamo kaip antrosios eilės dinaminės sistemos (angl. *second-order dynamic system* [54-56]) pereinamasis atsakas priklauso nuo santykio tarp magnetinės jėgos užaugimo tempo ir sistemos atsako greičio, kurį apsprendžia tikrinis dažnis f_t ir slopinimo laipsnis ζ_m . Keitiklio atsako greitį patogiu išreikšti pereinamojo atsako *kilimo trukme* $t(\text{PK})_K$ (angl. *rise time*). Pjezogeneratoriaus keitiklis yra lengvai slopinama dinaminė sistema, todėl jo kilimo trukmė gali būti apytiksliai prilyginta:

$$t(\text{PK})_K \cong 0.5 \tau_t \cong 0.25 T_t \quad (2)$$

čia T_t , τ_t – tikrinis periodas ir pusperiodis, atitinkamai. Pagal klasikinę virpesių teoriją antrosios eilės slopinamos dinaminės sistemos pereinamojo atsako kilimo trukmė apskaičiuojama [113]:

$$\omega_s = \omega_t \sqrt{1 - \zeta} \quad (3)$$

$$T_K = \frac{\arctan(-\omega_d / \delta)}{\omega_d}; \quad (4)$$

čia T_K – sistemos kilimo trukmė, $\delta = \zeta \omega_t$ – logaritminis slopinimo dekrementas, ζ – slopinimo koeficientas, ω_t – tikrinis dažnis, ω_s – slopinamos sistemos dažnis.

2.1. Magnetinės sąveikos modeliavimas

Magnetinė varančiojo ir varomojo magnetų sąveikos teorinė analizė leidžia ištirti magnetinio sužadinimo fizikinį poveikį, kuris priklauso nuo ašinės F_x ir skersinės F_y magnetinių jėgų komponentų. Kadangi magnetų sąveika (magnetinis sankybis) yra stipriausia(s) esant mažam tarpusavio atstumui (< 5 mm), o sukimosi staliukas yra santykinai didelis ($r_s/5 > 16$), vertinama, kad varomasis magnetas priartėjęs prie varomojo juda tiesia eigiū dėsniu (varomojo magneto atžvilgiu). T. y. toliau disertacijoje aprašant magnetų judėjimo pobūdį ir jėgų kryptį pasitelkta Dekarto koordinatų sistema. Svarbu įvertinti jėgų pokyčio priklausomybę nuo kintančio tarpelio tarp magnetų x ir y ašių kryptimis, t. y. $x' = d_{\text{žad}}$ ir y' , atitinkamai (2.1 pav.). Magnetinių jėgų impulsų svarbiausių laikinių charakteristikų įvertinimas bus atliktas apskaičiavus dinaminių jėgų priklausomybes.

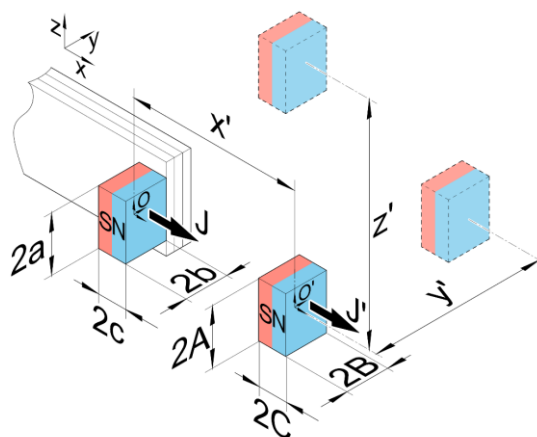
2.1.1. Analitinis magnetostatinis modelis

Siekiant apskaičiuoti magnetines jėgas tarp lygiagrečiai lygiuotų stačiakampio gretasienio formos magnetų, kurių magnetinės poliarizacijos kryptys taip pat lygiagrečios, pritaikytas tikslus Akoun ir Yonnet išvestas „Kuloninis“ modelis [108, 114]. Skaiciavimuose pritariama, kad magnetinė poliarizacija yra idealiai tolygi ir yra vienodo stiprumo visuose magnetų paviršiuose. Ši prielaida adekvati, nes pjezogeneratoriuje naudojami aukštos kokybės nuolatiniai neodimio (NdFeB) magnetai, kurie pasižymi itin aukštu magnetizacijos vientisumu. Šis analitinėmis formulėmis grįstas modelis tinka atlikti magnetostatinę analizę, nes sudaro galimybę

įvertinti visų trijų magnetinių jėgų komponentių reikšmes: F_x (ašinė jėga), F_y (skersinė jėga) ir F_z (vertikali jėga).

2.1 lentelė. Pjezogeneratoriaus matmenų, medžiagų ir veikimo parametrai [57-58]

Parametrai	Mat. vnt.	Keitiklis	Magnetai
Kompozitai	–	Švino cirkonato titanatas	Neodimio geležies boras
Trumpinys	–	PZT-5A	NdFeB
Pjezokeramikos parametrai:			
d_{31}	m/V	-19×10^{-11}	–
d_{33}	m/V	39×10^{-11}	–
g_{31}	V·m/N	-11.6×10^{-3}	–
g_{33}	V·m/N	24×10^{-3}	–
Pjezokeramikos elektromechaninio ryšio koeficientai:			
k_{31}	–	0.35	–
k_{33}	–	0.72	–
Pjezokeramikos sluoksniai:			
ilgis ℓ_{pzt}	mm	57.2	–
plotis w_{pzt}	mm	31.8	–
storis t_{pzt}	mm	0.265	–
Pasyvus (žalvaris) sluoksnis:			
ilgis ℓ_{pag}	mm	57.2	–
plotis w_{pag}	mm	31.8	–
masė t_{pag}	mm	0.14	–
Varomasis magnetas:			
ilgis ℓ_{KM}	mm	–	5
plotis w_{KM}	mm	–	5
storis t_{KM}	mm	–	3
masė m_{KM}	g	–	0.57
Varantysis magnetas:			
ilgis ℓ_{VM}	mm	–	5
plotis w_{VM}	mm	–	5
storis t_{VM}	mm	–	3
masė m_{VM}	g	–	0.57
Jungo modulis:			
E_{pag}	GPa	120	
$E_{KM} = E_{VM}$	GPa		160
Keitiklio (be magnetinės masės) rezonansinis dažnis f_0	Hz	110	–
Elektrinė talpa C_{PK}	nF	200	–
Mechaninis kokybės rodiklis Q_m (slopinimo laipsnis $\zeta_m \cong 1/2Q_m$), matuota trumpojo jungimo sąlygomis (keitiklis su magnetine mase)	–	33 (0.015)	–



2.2 pav. Magnetinių jėgų skaičiavimuose naudotų magnetų principinė išdėstymo schema; kairysis magnetas traktuojamas kaip nejudamai įtvirtintas (keitiklis pavaizduotas išimtinai dėl vizualizacijos tikslų); varančiojo (dešiniojo) magneto poslinkis nusakomas taip: x' – ašine, y' – skersine, $z' = 0$ vertikalia kryptimis

2.2 lentelė. Sąveikaujančių magnetų parametrai [59]

Medžiaga	NdFeB
Magnetinė poliarizacija	N52
Liekamoji magnetizacija, B_r	1.42 – 1.47 T
Koercinis lauko stipris, bH_c	860 – 995 kA/m
$2a = 2A$	5 mm
$2b = 2B$	5 mm
$2c = 2C$	3 mm
x'	-10 to 10 mm
y'	-10 to 10 mm
z'	0 mm

Pagal 2.2 pav. magnetai sulygiuoti taip, kad atitinkamos kraštinės būtų lygiagrečios. Kiekvienas magnetas turi nuolatinę ir vientisą magnetinę poliarizaciją J ir J' , kurių kryptys yra lygiagrečios su x ašimi. Pjzogeneratoriuje naudojamų magnetų sąveikai įvertinti buvo pasirinkta traukos konfigūracija (J ir J' vienodos krypties). Kairysis (varomasis) magnetas, kurio matmenys $2a \times 2b \times 2c$, yra centruotas ant pradinės koordinatų ašies O ir traktuojamas kaip nejudamas (įtvirtintas). Dešinysis (varantysis) magnetas, kurio matmenys $2A \times 2B \times 2C$, yra centruotas ant O' ir yra pasislinkęs ašine x' ir skersine y' kryptimis, be pasislinkimo z' kryptimi. Skaičiavimuose poliarizacija J ir J' pakeista „magnetinio krūvio“ pasiskirstymu poliuose („Kuloninis“ metodas), kai krūvių tankis $\sigma = J \times \mathbf{n}$ ($\sigma = J$, $\sigma' = J'$). Energija tarp varomojo magneto sąveikaujančios plokštumos $2a \times 2b$ ir lygiagrečios varančiojo magneto plokštumos $2A \times 2B$ apskaičiuojama pagal [108, 114]:

$$W = \int_{-a}^{+a} dx \int_{-b}^{+b} dy \int_{-A}^{+A} dX \int_{-B}^{+B} dY \frac{\sigma\sigma'}{4\pi\epsilon_0 r}, \quad (5)$$

$$r = \sqrt{(x' + X - x)^2 + (y' + Y - y)^2 + z'^2}; \quad (6)$$

čia μ_0 – vakuumo magnetinė skvarba ($\mu_0 = 1.256 \times 10^{-6}$ H/m); X, Y ir x, y nusako pasislinkusių varančiojo ir varomojo magnetų magnetinių polių centrų koordinatas O koordinačių sistemos atžvilgiu, atitinkamai. Veikiančios magnetinės jėgos apskaičiuojamos pagal tiesioginę energijos lygtį [108, 114]:

$$\mathbf{F} = -\text{grad} \cdot W, \quad (7)$$

$$\mathbf{F} = \frac{JJ'}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 \sum_{l=0}^1 \sum_{p=0}^1 \sum_{q=0}^1 (-1)^{i+j+k+l+p+q} \phi(u_{ij}, v_{kl}, w_{pq}, r). \quad (8)$$

Magnetinių jėgų F_x (ašinė), F_y (skersinė) ir F_z (vertikali) komponentės išreiškiamos pagal [108, 114]:

$$F_x = 0.5(v^2 - w^2) \ln(r - u) + uv \ln(r - v) + v \arctan(uv/rw) + 0.5ru, \quad (9)$$

$$F_y = 0.5(u^2 - w^2) \ln(r - v) + uv \ln(r - u) + u \arctan(uv/rw) + 0.5rv, \quad (10)$$

$$F_z = -uw \ln(r - u) - vw \ln(r - v) + v \arctan(uv/rw) - rv, \quad (11)$$

čia:

$$u(i, j) = x' + (-1)^j A(-1)^i a, \quad (12)$$

$$v(k, l) = y' + (-1)^l B - (-1)^k b, \quad (13)$$

$$w(p, q) = z' + (-1)^q C - (-1)^p c, \quad (14)$$

$$r(u, v, w) = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}. \quad (15)$$

Magnetinių jėgų apskaičiavimui iš viso panaudotos 256 išraiškos. F_x, F_y ir F_z jėgos taip pat gali būti įvertintos kaip viena jėgų atstojamoji:

$$|F_{ats}| = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}. \quad (16)$$

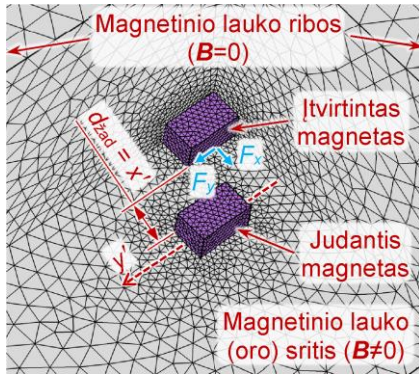
Šis analitinis modelis buvo panaudotas atlikti parametrinę magnetinių jėgų analizą, taip įvertinant erdvinio magnetų išsidėstymo (poslinkių $y' = -10 - 10$ mm ir $x' = 1 - 8$ mm) poveikį F_x ir F_y jėgų amplitudėms. Analitiniai rezultatai taip pat buvo panaudoti verifikuojant sukurta magnetostatinį baigtinių elementų modelį (3 sk.).

Rezultatų aptarimas pateiktas 2.3. sk., atsižvelgus į abiejų (analitinių ir skaitinių) modelių rezultatus.

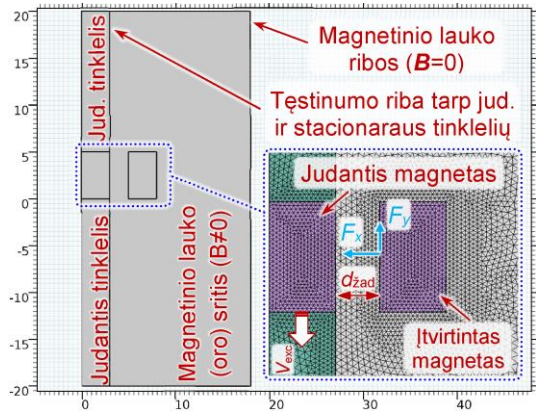
2.1.2. Skaitiniai magnetinio lauko modeliai

Magnetostatiniam ir magnetodinaminiam baigtinių elementų (BE) modeliams (2.3 pav.) sudaryti ir analizuoti buvo pasirinkta COMSOL Multiphysics® programinė įranga. Skaitiniais tyrimais siekiama įvertinti sąveiką tarp vienas kitą traukiančių nuolatinių neodimio magnetų. Buvo priimta, kad jų magnetinė poliarizacija (N52) yra nuolatinė ir vientisa bei lygiagrečiai orientuota x ašies atžvilgiu, analogiškai analitiniam modeliui (2.1.1. sk.). Magnetų parametrai pateikti 2.2 lentelėje. Realizuotas magnetostatinis BE modelis yra trimatis, o magnetodinaminis – dvimatis. Pastarojo modelio redukavimas į 2D leido našiau atlikti magnetodinaminius skaičiavimus. Abiejų BE modelių rezultatai bus nagrinėjami kartu siekiant nuodugniau atskleisti magnetinės sąveikos ypatumus.

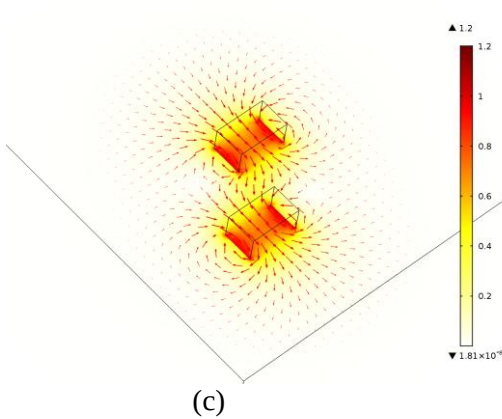
BE modeliai sudaryti panaudojus COMSOL “AC/DC” funkcinį modulį “Magnetic Fields, No Currents”. Papildomai magnetodinaminiam modelyje buvo panaudotas “Moving Mesh” modulis, kuris yra pagrįstas Lagranžo-Oilerio skaičiavimo metodu (angl. *Arbitrary Lagrange-Eulerian (ALE)*). Magnetai patalpinti stačiakampėje oro srityje (2.3 pav.), kuri būtina siekiant įvertinti magnetinių laukų pasiskirstymą erdvėje / plokštumoje. Kartu oro srities ribos apibrėžia suvaržymo sąlygas, t. y. magnetinių laukų izoliavimo ribas (magnetinio lauko srauto tankio normalė lygi nuliui: $\mathbf{n} \cdot \mathbf{B} = 0$). Oro srities dydis (pvz., 50×50×50 mm magnetostatiniam modelyje) parinktas atsižvelgus į: i) magnetinių lauko linijų pasiskirstymo plotį, ii) varančiojo magneto poslinkio ribas skersine ir ašine kryptimis. Magnetostatinio modelio tinklelis yra sudarytas iš ketursienių baigtinių elementų, o suminis modelio laisvės laipsnių skaičius siekia ~235 000. Magnetodinaminis modelis sudarytas iš trikampių elementų ir sudaro ~50 000 laisvės laipsnių sistemą. Magnetodinaminiam modelyje judantis tinklelis nuo stacionaraus tinkelio yra atskirtas testinumo riba (angl. *Continuity boundary*), kuri leidžia perduoti magnetinio lauko B vertes iš vieno magnetinio lauko ribos į kitą. Abiem atvejais vidutinio tankio tinklelis išoriniuose oro srities kraštuose buvo smulkiau diskretizuotas ties magnetais. Racionalus tinklelio tankis buvo nustatinėjamas palaipsniui siekiant priimtino derinio tarp rezultatų tikslumo ir skaičiavimo trukmės.



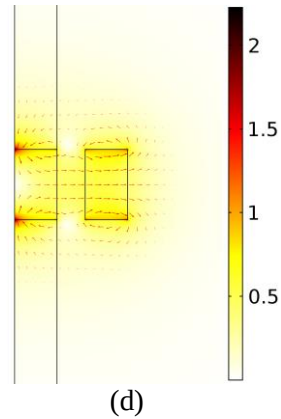
(a)



(b)



(c)



(d)

2.3 pav. Dviejų magnetų magnetostatinis (a) ir magnetodinaminis (b) BE modeliai, (c) ir (d) B -lauko pasiskirstymo vizualizacijos, atitinkamai; judantis ir įtvirtintas magnetai atitinka pjezogeneratoriaus varantįjį ir varomąjį magnetus

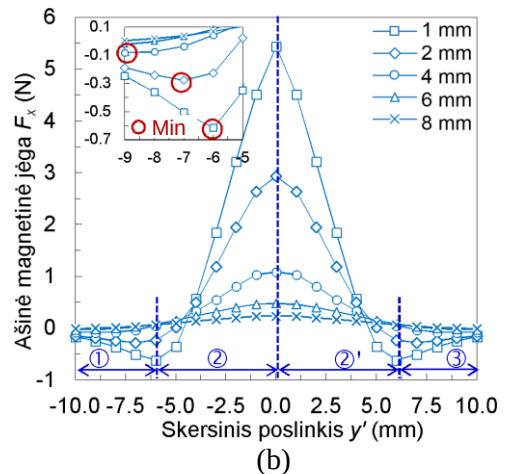
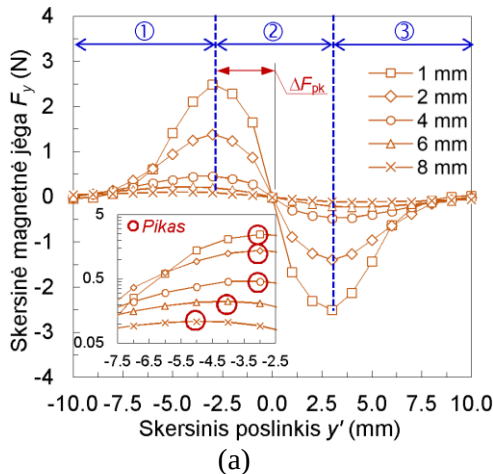
2.2. Teorinių tyrimų rezultatai

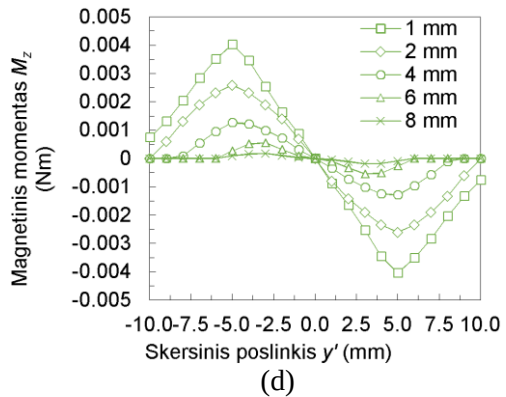
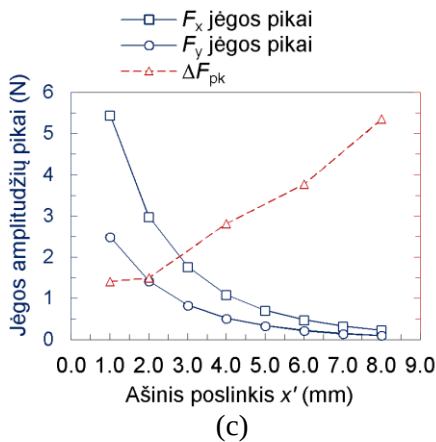
2.2.1. Magnetinių jėgų impulsų savybės

Plokštuminio magnetinio sužadinimo atveju, kai varantysis magnetas praskrieja pro varomąjį, veikiančio pereinamojo sužadinimo sąlygas lemia tiek skersinės F_y , tiek ir ašinės F_x jėgų poveikis (2.4.–2.6. pav.). Jos kartu nusako indukuojamos magnetinės sąveikos (sankybio) savybes, kurios daro didžiausią įtaką keitiklio pereinamajam atsakui. Plokštuminio sužadinimo atveju F_y yra dominuojanti komponentė, kuri tiesiogiai lenkia keitiklį, o F_x stengiasi pasukti keitiklio magnetą (varomąjį) apie jo ašį ir taip palenkti keitiklį. F_x taip pat veikia keitiklį kaip tempimo jėga traukos sąveikos atveju (didina gembinės konstrukcijos standumą) arba gniuždymo jėga stūmos atveju (mažina konstrukcijos standumą). Magnetinių momentų poveikis keitiklio dinaminiam atsakui gali būti nevertinamas dėl santykinai didelio keitiklio ilgio. Skaitinio modeliavimo rezultatai patvirtina, kad M_x ir M_y momentų įtaka yra

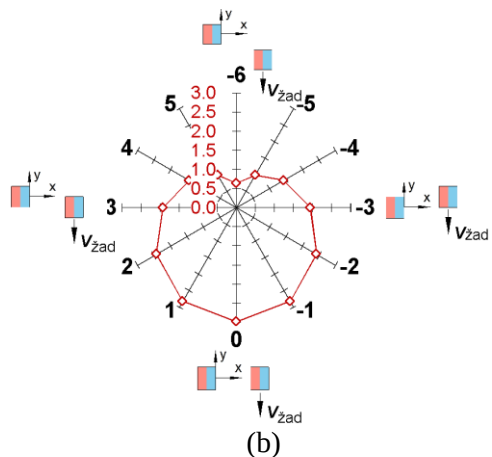
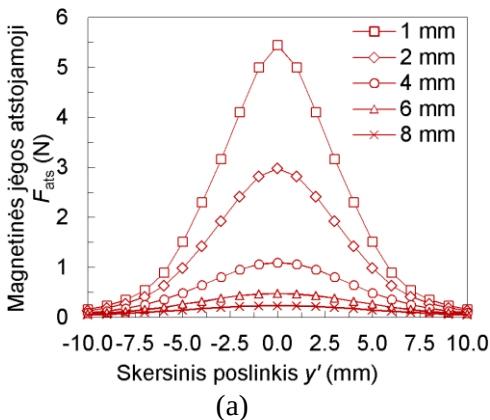
nereikšminga atsižvelgus į tai, kad M_z poveikis keitiklio lenkimui yra daug mažesnis nei jėgų poveikis (pvz., ~20 kartų mažesnis, kai $x' = d_{\text{žad}} = 1$ mm).

Siekiant nustatyti svarbiausius magnetinių jėgų kitimo dėsningumus, buvo atlikti statiniai ir dinaminiai parametriniai skaičiavimai. 2.4 (a-b) pav. iliustruoja pereinamojo sužadavimo metu indukuojamų F_y ir F_x jėgų kitimo priklausomybę nuo varančiojo magneto skersinio poslinkio y' ašies kryptimi. Magnetinių jėgų kitimo grafike galima identifikuoti tris charakteringas zonas: ① *aktyvacija*, ② *krypties reversija* ir ③ *deaktyvacija*. Reversijos zona atitinka jėgos amplitudės šuolį iš maksimalios teigiamos vertės į maksimaliai neigiamą (arba atvirkščiai) kertant nulinę padėtį (x -ašį). F_y jėgos kitimo pobūdis rodo, kad šios magnetinės jėgos impulsas gali būti klasifikuojamas kaip simetrinis pilno ciklo impulsas (angl. *full-cycle impulse* [112]). Jis susideda iš dviejų identišκών pusciklių, tačiau kiekvienas pusciklis atskirai yra nesimetriškas dėl nevienodų jėgos užaugimo ir kritimo trukmių, t. y. priekinis ir galinis impulso pusciklio frontai yra skirtingo statumo (2.4 (a) pav.). Pažymėtina, kad F_y reversijos zonoje magnetinė jėga kinta sparčiau nei (de)aktyvacijos zonose. F_y jėgos amplitudės yra vienodo dydžio teigiamoje ir neigiamoje y ašies pusėse. Kitimo metu skersinė jėga F_y kerta nulinę padėtį ($y' = 0$), kuri sutampa su F_x piku. F_x pikas yra šiek tiek didesnis (~8 %) už F_y dvigubos amplitudės (angl. *peak-to-peak*) vertę (2.4 (c) pav.). Ašinės jėgos F_x grafike (2.4 (b) pav.) taip pat stebime krypties reversiją (kertama x ašis), tačiau jėgos amplitudė neigiamoje x ašies pusėje yra net ~5 kartus mažesnė nei pagrindinis pikas teigiamoje ašies pusėje, kai varančiojo magneto padėtis nusakoma $y' = 0$. Todėl galima pritarti, kad F_x labiau atitinka simetrišką pusės ciklo impulsą (angl. *half-cycle impulse* [112]), kurį galima apytiksliai išreikšti varpo formos kreivę generuojančia funkcija, pavyzdžiui Gauso skirstiniu ar pusės sinuso funkcija.





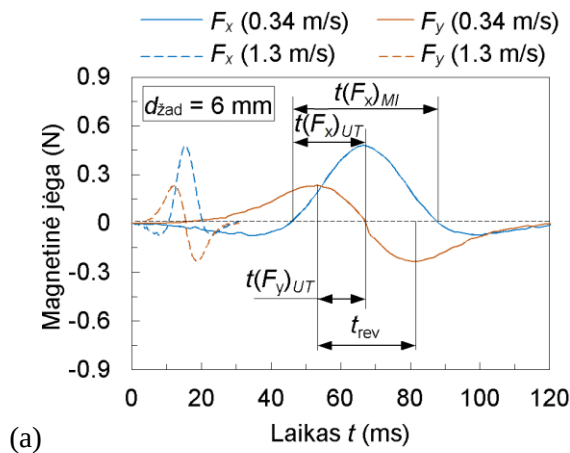
2.4 pav. Magnetostatiniu modeliavimu sudarytos (a) skersinio ir (b) ašinio magnetinių jėgų komponentių priklausomybės nuo varančiojo magneto skersinio poslinkio (kai $x' = d_{zad} = 1 - 8$ mm), išdidintas vaizdas: dalis grafiko iliustruojanti viršūnių pasislinkimą su kintamu x' . (c) Apskaičiuota magnetinių jėgų maksimalių amplitudžių ir ΔF_{pk} (žiūrėti (a)) priklausomybė nuo ašinio varančiojo magneto poslinkio. Jėgos impulso zonos: ① aktyvacija, ②, ②' jėgos krypties reversija) ir ③ deaktivacija. (d) Skaitiniu metodu įvertintos magnetinių momentų (z ašies atžvilgiu) kitimo priklausomybės nuo skersinio poslinkio ($x' = d_{zad} = 1 - 8$ mm)

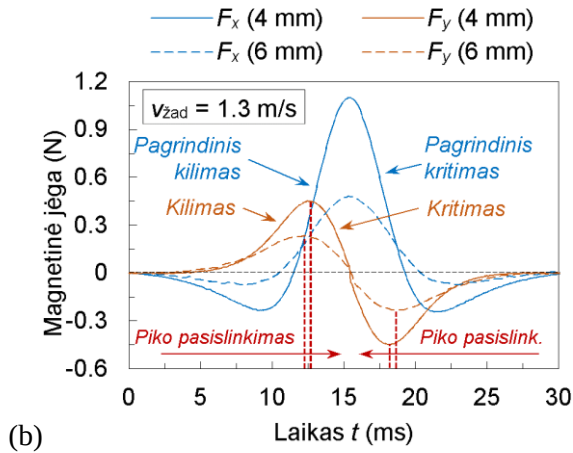


2.5 pav. (a) Analitiškai įvertinta atstojamosios magnetinės jėgos F_{ats} priklausomybė nuo skersinio varančiojo magneto poslinkio ($x' = 1 - 8$ mm). (b) Radarinio tipo grafikas vaizduojantis analitiškai įvertintos atstojamosios magnetinės jėgos F_{ats} priklausomybę nuo $y' = -6 - 5$ mm, kai $x' = 2$ mm

Apibendrintai galima teigti, kad aprašyti skirtumai tarp skersinių ir ašinių magnetinių jėgų impulsų savybių ir lemia sąveikos tarp indukuojamų magnetinių jėgų ir tamprumo jėgų deformuojamame keitiklyje pobūdį. Pavyzdžiui, mokslinėje literatūroje yra minima, kad plokštuminio sužadinimo atveju skersinė jėga F_y

reversijos metu gali iššaukti netiesinės dinamikos reiškinių pradinėje keitiklio pereinamojo atsako stadijoje – virpesių amplitudės *šuoļį* (angl. *jump phenomenon*), kuris, savo ruožtu, leidžia sugeneruoti „švarius“ (magnetiskai neslopinamus) laisvuosius keitiklio virpesius [12]. Pabrėžtina, kad nagrinėjamu atveju pjezogeneratoriaus veikimą iš esmės lemia skersinė jėga F_y , nes ji dominuoja keitiklio deformavimo procese. Tačiau ortogonaliojo magnetinio sužadavimo atveju dominuojanti deformuojanti jėga būtų ašinė, todėl bendrumo dėlei yra pravartu įvertinti tiek F_y , tiek ir F_x impulsų laikines charakteristikas bei jų formų ypatybes. Varpo formos F_x impulsas gali būti charakterizuojamas *impulso trukme* $t(F_x)_{MI}$ ir / arba jėgos *užaugimo trukme* $t(F_x)_{UT} \cong 0.5 t(F_x)_{MI}$ (2.6 (a) pav.). Kuo mažesnė impulso trukmė (jėgos užaugimo trukmė), tuo siauresnis impulsas ir tuo spartesnis jėgos kitimas priekiniame ir galiniame simetrinio impulso frontuose. Jis sukelia staigesnį pereinamąjį žadinimą. Laikinės F_y impulso charakteristikos yra siūlomos atsižvelgus į [12] publikuotas išvalgas ir darant prielaidą, kad krypties reversijos zonos trukmė – čia vadinama F_y *reversijos trukme* t_{rev} (2.6 (a) pav.), turėtų daryti lemiamą įtaką pjezogeneratoriaus dinamikai. Atitinkamai, F_y *užaugimo trukmė* yra lygi $t(F_y)_{UT} = 0.5 t_{rev}$. Pažymėtina, kad t_{rev} ir $t(F_x)_{MI}$ trukmės yra panašios prie mažo tarpelio tarp magnetų, pvz., skirtumas mažesnis nei 2 %, kai $x' = d_{žad} = 1$ mm. Tačiau skirtumas didėja kartu su augančiu $d_{žad}$ dėl nevienodo skersinės ir ašinės jėgos kitimo tempo, pvz., prie 6 mm (eksperimentuose naudotas tarpelis) t_{rev} vertės yra ~15 % mažesnės nei $t(F_x)_{MI}$ prie to pačio tarpelio.





2.6 pav. Skersinių ir ašinių magnetinių jėgų impulsai, apskaičiuoti keičiant (a) varančiojo magneto judėjimo greitį v_{zad} ir (b) magnetinį tarpelį d_{zad}

2.2.2. Apskaičiuotų ir išmatuotų impulsų palyginimas

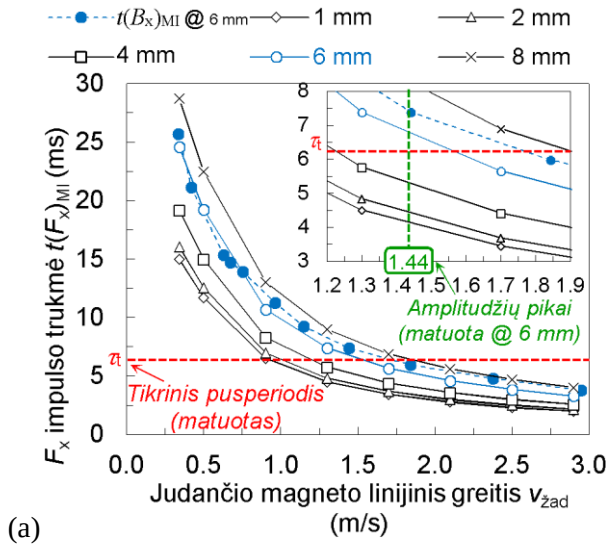
BE metodu apskaičiuotos impulsų trukmės $t(F_x)_{MI}$ buvo palygintos su eksperimentinėmis $t(B_x)_{MI}$ trukmėmis prie $x' = d_{zad} = 6 \text{ mm}$. Skaitinės impulso trukmės buvo nustatytos iš F_x impulsų, apskaičiuotų prie skirtingų greičių v_{zad} (pvz. 2.6 (a) pav.) ir iš pamatuotų B_x signalų (3 sk.), atitinkamai. Iš 2.7 (a) pav. matyti, kad didėjant greičiui v_{zad} , $t(F_x)_{MI}$ ir $t(B_x)_{MI}$ mažėja vienoda mažėjančia tendencija. Išmatuoto $t(B_x)_{MI}$ signalo trukmė yra $\sim 10\%$ didesnė, palyginti su $t(F_x)_{MI}$. Svarbu akcentuoti, kad ši skirtumą nulėmė ne modelio netikslumas, o magnetometrinių matavimų procedūros tikslumo ribos (3.1. sk.). Pažymėtina, kad toks neatitikimas yra visiškai priimtinas ir nedaro neigiamos įtakos kitame skyriuje pateikiamų eksperimentinių magnetinio sužadinimo rezultatų aiškinimui. Tai grindžiama tuo, kad magnetinio sužadinimo ir pjezogeneratoriaus dinamikos procesus lemia parametras v_{zad} , kuris buvo labai tiksliai išmatuotas vibrometru. Šis 10 % neatitikimas aiškinamas erdvinio taškų, kuriuose F_x ir B_x buvo apskaičiuoti ir pamatuoti, nesutapimu. Magnetometriniai matavimai buvo atlikti maždaug per vidurį tarp varančiojo ir varomojo magnetų, o modeliuojant buvo įvertintos magnetinės jėgos, kurios tiesiogiai veikė patį varomąjį magnetą (t. y. tai tiksliai reprezentuoja tikrąsias magnetinio sužadinimo sąlygas). Taigi skaitinės jėgos impulsų trukmių reikšmės yra patikimos ir gali būti analizuojamos kartu su B_x reikšmėmis siekiant korektiško eksperimentinių rezultatų interpretavimo.

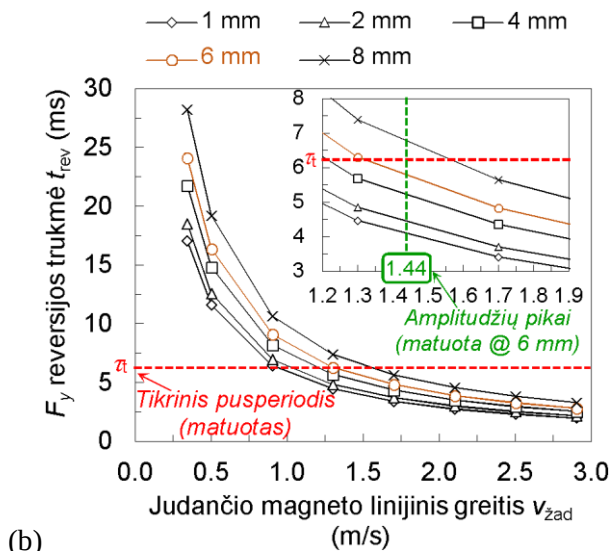
2.2.3. Magnetinio sužadinimo greičio ir tarpelio įtakos įvertinimas

Magnetodinaminių skaičiavimų rezultatai buvo panaudoti nustatyti magnetinių jėgų impulsų laikinių charakteristikų priklausomybę nuo v_{zad} ir $x' = d_{zad}$. 2.6 (a) pav. stebime, kad greitėjant varančiajam magnetui F_x ir F_y impulsai siaurėja, o 2.7 pav. pateiktos grafines priklausomybės rodo, kad trukmės $t(F_x)_{MI}$ ir t_{rev} mažėja netiesiškai lėtėjančiu tempu. Pažymėtina, kad vieta ant v_{zad} ašies, kur teorinės $t(F_x)_{MI}$ ir t_{rev} kreivės susikerta su $\tau_t = 0.5T_t$ linija, yra netoli $v_{zad} = 1.44 \text{ m/s}$, prie kurio eksperimentuose buvo užregistruota didžiausia generuojama galia. Jei pritariama, kad $t(PK)_K \cong 0.5 \tau_t \cong$

$0.25T_t$, $t(F_x)_{UT} \cong 0.5t(F_x)_{MI}$ ir $t(F_y)_{UT} = 0.5t_{rev}$, tada galima teigti, kad pjezogeneratoriaus išvystoma elektrinė galia priartėja prie maksimalių reikšmių, kai F_x ir F_y jėgų užaugimo trukmės $t(F_x)_{UT}$ ir $t(F_y)_{UT}$ tampa artimos keitiklio pereinamojo atsako kilimo trukmei $t(PK)_K$.

Modeliavimo rezultatai rodo, kad tarpelio d_{zad} kitimas tarp magnetų keičia F_x ir F_y impulsų savybes ir jų tarpusavio sąryšį. Pavyzdžiui, 2.4 (a) pav. stebime, kad x ašies intervalas ΔF_{pk} tarp F_x ir F_y pikų siaurėja, kai mažėja d_{zad} (2.4 (c) pav.). Svarbu akcentuoti, kad d_{zad} mažėjimas ne tik lemia netiesinį F_x ir F_y jėgų amplitudžių padidėjimą (2.4 (c) pav.), bet ir daro įtaką laikinėms impulsų charakteristikoms. Tiksliau, magnetostatinės F_y kitimo kreivės parodo (2.4 (a) pav.), kad sumažėjus d_{zad} , F_y (de)aktyvuojasi arčiau neutralios pozicijos $y' = 0$ ir pasireiškia kaip F_y maksimalios amplitudės padėties pasislinkimas link $y' = 0$ (t. y. intervalas ΔF_{pk} trumpėja). Magnetodinaminame režime tai reiškia, kad F_y impulso atveju jėga aktyvuojasi vėliau ir deaktyvuojasi anksčiau, tai atsispindi jėgos amplitudžių pikų padėties pasislinkime (2.6 (b) pav.). Apibendrinant galima teigti, kad mažėjant d_{zad} (v_{zad} pastovus), kartu neženkiai mažėja ir F_y reversijos ir užaugimo trukmės ($t(F_y)_{UT} = 0.5t_{rev}$), t. y. jėgos impulsas siaurėja, tai reiškia truputį staigesnį pereinamąjį žadinimą prie mažesnių tarpelių tarp magnetų. Analogiškai, tie patys d_{zad} mažėjimo nulemti efektai taip pat stebimi ir x ašies jėgos F_x kitimo atveju (2.4 (b) pav.).





2.7 pav. (a) Eksperimentinių (B_x) ir skaitinių (F_x) sužadinimo impulsų trukmių priklausomybė nuo linijinio magneto greičio ($x' = d_{\text{zad}} = 1 - 8$ mm). (b) Apskaičiuotos F_y amplitudės reversijos trukmės priklausomybė nuo magneto greičio. Išdidintame grafike priartinta v_{zad} zona, kuri apima eksperimentais nustatytus efektyviausius magnetinio sužadinimo greičius ($\sim 1.44 - 1.84$ m/s prie $d_{\text{zad}} = 6$ mm)

2.3. Skyriaus apibendrinimas

Šiame skaitiniame tyrime buvo analizuojami tiek labiau įprasti pusės ciklo simetriniai varpo formos impulsai, tiek ir sudėtingesni pilno ciklo impulsai su jėgos krypties reversija ir formos asimetrijomis, t. y. nevienodas jėgos kitimas skirtinguose impulso frontuose / stadijose.

Magneto-statinis / dinaminis BE modeliai buvo sukurti ir verifikuoti jėgų kitimo dėsningumams ištirti. Modeliavimas atskleidė, kad sužadinimo greičio padidėjimas lemia netiesinį jėgos impulso trukmės ir nuo jo susijusios jėgos užaugimo trukmės sumažėjimą. Tarpelio sumažėjimas sustiprina magnetinę sąveiką ir lemia greitesnę jėgos užaugimo trukmę, t. y. norint pasiekti maksimalias vibroposlinkių ir vibrogreičių vertes, prie mažesnio tarpelio būtinas mažesnis sužadinimo greitis.

3. MAGNETIŠKAI SUŽADINAMO PJEZOGENERATORIAUS EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

Šiame skyriuje pateiktas eksperimentinio magnetiškai sužadinto pjezogeneratoriaus tyrimas. Skaitiniais ir eksperimentiniais metodais detaliai ištirtos magnetinio sužadinimo impulso ir pjezokeitliklio dinaminio bei pereinamojo atsakų charakteristikos. Išanalizuotos jų priklausomybės nuo sužadinimo greičio, magnetų konfigūracijos, orientavimo erdvėje ir apkrovos varžos.

3.1. Eksperimentinis stendas

Pjezogeneratorius buvo testuojamas matuojant dinامينius, elektrinius ir magnetinius pereinamuosius atsakus. Buvo sudarytas eksperimentinis stendas, kuris susideda iš trijų posistemių: magnetinio sužadinimo, matavimų ir duomenų apdorojimo (3.1 pav.).



3.1 pav. Pjezogeneratoriaus dinaminų, elektrinių ir magnetinių charakteristikų matavimo stendo principinė schema: 1 – keitiklis (Piezo Systems T226-A4-503Y), 2 – magnetinė masė (varomasis magnetas), 3 – varantysis magnetas; 4 – besisukantis staliukas, 5 – mikropozicionavimo stalas, 6 – nuolatinės srovės variklis, 7 – maitinimo šaltinis (Mastech HY3020E), 8 – LDV jutiklis (Polytec OFV-505), 9 – rotacinis LDV jutiklis (Polytec RLV-500), 10 – LDV valdiklis (Polytec OFV-5000 ir RLV-5000), 11 – 4 kanalų skaitmeninis osciloskopas (PICO 6403); 12 – magnetometras (Magnet-Physik FH-54); 13 – magnetometro zondas (Holo jutiklis HS-TGB5); 14 – reguliuojamos varžos blokas (IET LABS RS-200-SC); 15 – šviesą atspindinti juosta

Magnetinio sužadinimo posistemė susideda iš varančiojo magneto, pritaisyto ant specialaus besisukančio staliuko ($r_s = 80$ mm), kurio sukimosi greitis valdomas maitinimo šaltinio ir nuolatinės srovės variklio. Eksperimento metu sukimosi greitis ω_{rpm} buvo reguliuojamas 12 – 350 rpm intervale, kuris atitinka tiesiaeigį sužadinimo greitį $v_{\text{žad}} = 0.10 - 2.93$ m/s. Varomasis magnetas buvo pritaisytas pjezokeraminio

bimorfinio keitiklio (Piezo Systems T226-A4-503Y) gale. Siekiant 4 – 8 mm intervale tiksliai reguliuoti magnetinį tarpelį $d_{\text{žad}}$, keitiklis buvo primontuotas prie mikropozicionavimo staliuko.

Matavimų posistemė susideda iš nekontaktinio virpesių ir magnetinio lauko matavimo prietaisų. ω_{rpm} buvo registruojamas naudojant Polytec rotacinį lazerinį Doplerio vibrometrą (LDV), kuris susideda iš dviejų dalių: jutiklio RLV-500 ir valdiklio RLV-5000. Deformuojamo keitiklio laisvojo galo vibroposlinkis d_{PK} ir vibrogreitis v_{PK} buvo matuojami naudojant antrąjį Polytec LDV, susidedantį iš automatiškai fokusuojančio jutiklio OFV-505 ir valdiklio OFV-5000. Šviesą atspindinti juosta buvo priklijuota prie staliuko ir keitiklio, siekiant užtikrinti atsispindėjusio lazerio spindulio sklaidos surinkimo kokybę. Magnetinio lauko intensyvumas (magnetinio lauko srauto tankis ašies kryptimi B_x) buvo matuojamas naudojant magnetometrą su Halo jutikliu, kuris rankiniu būdu buvo įterptas į vidurį tarp varančiojo ir varomojo magnetų. Nors nagrinėjamu sužadinimo atveju, kai keitiklis yra lenkiamas varančiojo magneto judėjimo plokštumos kryptimi (plokštuminis sužadinimas), F_y yra dominuojanti lenkimo jėga, tačiau Halo jutiklio (zondo) matmenys ir labai mažas tarpelis $d_{\text{žad}}$ tarp sąveikaujančių magnetų neleido tiksliai išmatuoti B_y signalo. Reikia akcentuoti, kad magnetometru matuoto B_x impulso tikslumas yra pakankamas, bet dalinai ribotas dėl jutiklio stacionarios padėties tarp dviejų judančių magnetų (t. y. varantysis magnetas slenka, o varomasis magnetas pradeda virpėti sužadinimo metu). Idealiu atveju, Halo jutiklis turėtų būti pozicionuotas toje pačioje vietoje, kaip ir varomasis magnetas, bet tokiu atveju būtų reikėję pašalinti keitiklį su magnetine mase, o tai būtų neleidę sinchroniškai matuoti visus dominančius parametrus. Todėl kaip kompromisas jutiklis buvo įterptas į tarpelio vidurį tarp magnetų. Tai leido: i) magnetometru užfiksuoti minimaliai iškreiptą magnetinį lauką, t. y. varančiojo magneto B_x impulsą (įterpus Halo jutiklį arčiau varomojo magneto, jo magnetinis laukas stipriai iškraipo B_x impulso matavimo rezultatus) ir ii) pasiekti, kad jutiklis nekliudytų magnetų ir keitiklio judėjimui. Apibendrinant galima teigti, kad išmatuotas B_x impulso signalas yra pakankamai tikslus ir naudingas eksperimento rezultatų interpretavimui, tačiau pilnai necharakterizuoja realių magnetinio sužadinimo sąlygų, nes magnetometras matuoja magnetinio lauko srauto tankį, o ne tikrąsias magnetines jėgas, kurios indukuojasi magnetinio sužadinimo metu. Taigi, siekiant užtikrinti tolimesnės eksperimentinės analizės patikimumą, buvo vadovautasi tiek išmatuotomis, tiek skaitiniu modeliavimu nustatytais magnetinių parametrų reikšmėmis. 3.4. sk. įrodoma, kad tokia analizės metodika yra tinkama, nes magnetiškai sužadinimo pjezogeneratoriaus eksperimentiniai ir modeliavimo rezultatai atitinka gerai žinomus dinaminių sistemų atsako dėsningumus pereinamojo sužadinimo atveju.

Matavimo duomenų surinkimo posistemė susideda iš 4 kanalų skaitmeninio osciloskopo, kuris fiksavo įtampos signalus, perduodamus LDV valdiklių, magnetometro ir pjezogeneratoriaus. Keitiklis buvo prijungtas prie reguliuojamos varžos bloko, siekiant eksperimentų metu valdyti pjezogeneratoriaus varžą R_A . Signalai iš osciloskopo buvo perduoti į kompiuterį naudojant PicoScope 6 duomenų apdorojimo programinę įrangą. Signalai buvo matuoti 1000 ms laiko intervale naudojant 10 kHz diskretizavimo dažnį. Visi matavimai buvo atlikti pjezogeneratorių

prijungus prie eksperimentiškai nustatytos *suderintos varžos* R_{SV} (3.3. sk.), todėl buvo galima analizuoti energijos generatoriaus veikimą maksimalios elektrinės galios režimu.

3.2. Pjezogeneratoriaus pereinamojo atsako fazės ir veikimo režimai

3.2.1. Suminis pereinamasis atsakas ir jo fazės

Eksperimentinio tyrimo objekto – pjezogeneratoriaus – dinaminės ir elektrinės charakteristikos priklauso nuo magnetinio sužadinimo režimo sąlygų, kurias nusako $v_{\text{žad}}$ ir $d_{\text{žad}}$ dydžiai. Pilną įrenginio veikimo ciklą apibūdina keitiklio *suminis pereinamasis atsakas* (SPA), kuris sugeneruojamas po kiekvieno pereinamojo magnetinio sužadinimo, įvykstančios tada, kai varantysis magnetas praskrieja greta keitiklio (3.2–3.3 pav.). Iki duotojo laiko momento t_k sugeneruota efektinė (RMS) įtampa, vidutinė galia ir suminė energija apskaičiuojama pagal:

$$V_{\text{rms}} = V_{\text{rms}}(t_k) = \sqrt{\frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^k V_{SV}^2(t_i) \right)}, \quad (16)$$

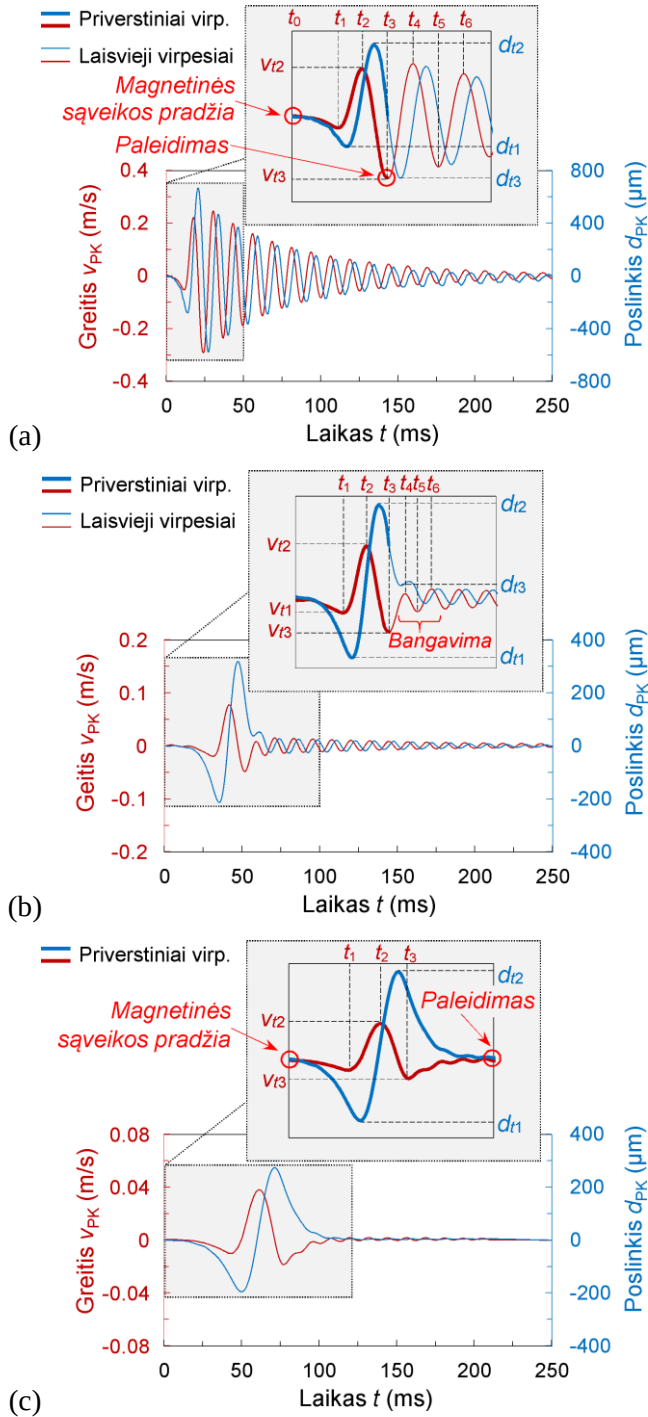
$$P_{\text{vid}} = P_{\text{vid}}(t_k) = \frac{V_{\text{rms}}^2(t_k)}{R_{SV}}, \quad (17)$$

$$E = E(t_k) = \sum_{i=1}^k \frac{V_{SV}^2(t_i)}{R_{SV}} \Delta t; \quad (18)$$

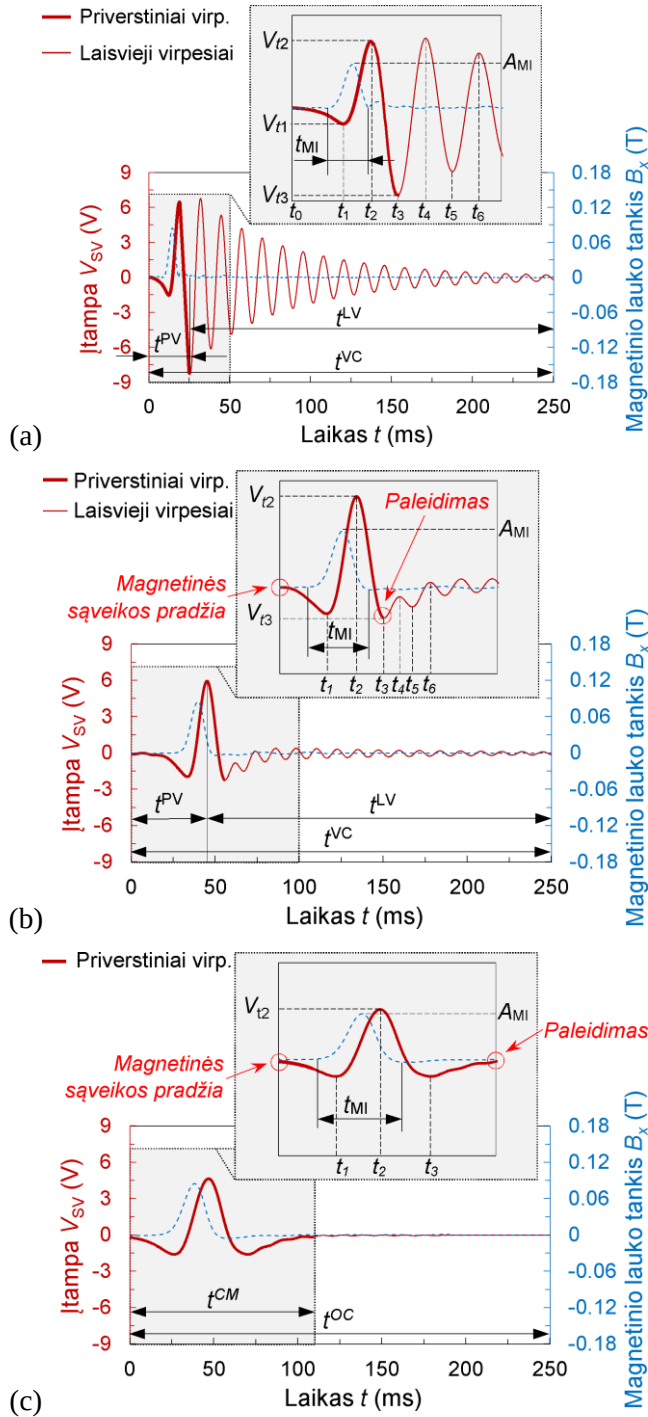
čia $V_{SV}(t_i)$ – momentinė įtampa ($R_A = R_{SV}$), k – analizuotų V_{SV} verčių skaičius, Δt – matavimo žingsnio (iteracijos) intervalas.

Pilno veikimo ciklo trukmė nusakoma $t_k = t^{\text{VC}}$, o apskaičiuotos viso ciklo elektrinės charakteristikos žymimos P^{VC} ir E^{VC} (3.2 (b) pav.). Generuojama energija E , apskaičiuojama kaip momentinės galios laike integralas, leidžia kiekybiškai įvertinti, kiek elektrinės energijos pjezogeneratorius pagamina iki tam tikro veikimo ciklo momento. V_{rms} , P_{vid} ir E skaičiavimams buvo pasirinktas laiko intervalas $t^{\text{VC}} = 250$ ms, kadangi per šį laiko tarpą keitiklio pereinamasis atsakas praktiškai visiškai užgęsta prie visų nagrinėjamų sužadinimo sąlygų (taikomas plačiai paplitęs užgesimo kriterijus: ± 2 % liekamojo atsako nuo maksimalios virpesių amplitudės dydžio [113]).

Bendruoju atveju, magnetinio sužadinimo režimo sąlygos lemia, ar SPA sudarys tik viena virpesių fazė (t. y. priverstiniai virpesiai), ar dvi skirtingos fazės (t. y. priverstiniai virpesiai ir paskesni laisvieji virpesiai). Siekiant paaiškinti detaliau, 3.2–3.4 pav. pateikti tipinio SPA, turinčio abi virpesių fazes, dinaminiai (d_{PK} , v_{PK}), elektriniai (V_{SV} , P_{vid} , E) ir magnetiniai (B_x) signalai bei juos apibūdinantys atitinkami parametrai. Pažymima, kad visuose disertacijos tyrimuose, kai kalbama apie laiko momentus t_i ir intervalus τ_i , turimas omenyje keitiklio vibrogreičio / įtampos pereinamasis atsakas (vibrogreičio ir įtampos signalai yra sinfaziniai).



3.2 pav. Pereinamieji vibrogreičio ir vibroposlinkio atsakai, sugeneruoti keitikliui veikiant (a) dinaminiu ($v_{\text{žad}} = 1.44$ m/s), (b) pereinamuoju ($v_{\text{žad}} = 0.62$ m/s) ir (c) kvazistatiniu ($v_{\text{žad}} = 0.41$ m/s) režimais (visai atvejais $d_{\text{žad}} = 6$ mm)



3.3 pav. Pereinamieji įtampos ir magnetinio lauko intensyvumo atsakai, sugeneruoti keitikliui veikiant (a) dinaminio ($v_{zad} = 1.44$ m/s), (b) pereinamuoju ($v_{zad} = 0.62$ m/s) ir (c) kvazistatiniu ($v_{zad} = 0.41$ m/s) režimais (visais atvejais $d_{zad} = 6$ mm)

Pjezogeneratoriaus veikimo ciklą nusakantis SPA visada prasideda nuo *priverstinių virpesių* (PV) fazės, kurioje veikia sužadavimo metu indukuojamos magnetinio sankybio jėgos (šios fazės trukmė $t_k = t^{PV}$). Ši virpesių fazė apibūdinama įvairiomis *veikimo charakteristikomis*: laikinėmis ($t^{PV}, t_1 \dots t_3, \tau_1 \dots \tau_3$), dinaminėmis ($d_{t1} \dots d_{t2}, v_{t1} \dots v_{t3}$) ir elektrinėmis ($V_{t1} \dots V_{t3}, P^{PV}, E^{PV}$). PV fazę pereina į *laisvųjų virpesių* (LV) fazę, kai pereinamasis magnetinis sužadimas yra pakankamai staigus (impulsinis), t. y. kai žadinančios jėgos impulsai pakankamai siauri (mažos impulso ir jėgos užaugimo trukmės, 2 sk.). LV fazės trukmė $t_k = t^{LV}$ ir ją sudaro keitiklio laisvieji virpesiai, kurių dažnis $f_t = 80$ Hz. Apskritai, vibroposlinkio ir vibrogreičio reikšmės PV fazės pabaigoje lemia LV fazės charakteristikas: laikines ($t^{LV}, t_4 \dots t_6, \tau_4 \dots \tau_6$), dinamines ($d_{t3} \dots d_{t6}, v_{t4} \dots v_{t6}$) ir elektrines ($V_{t4} \dots V_{t6}, E^{LV}$).

Jėgos (de)aktyvacijos ir krypties reversijos stadijos F_y impulso atveju (2 sk.) nurodo, kad keitiklio priverstinių virpesių atsaką taip pat sudaro kelios atskiros vibracinės stadijos. Dinaminių charakteristikų dydžiai šiose stadijose lemia paskesnių laisvųjų virpesių dažnines ir amplitudines charakteristikas. Todėl yra būtina detaliau apibūdinti dinaminį procesą, vykstantį PV fazėje (žr. 3.2–3.4 (a) pav.). Varančiajam magnetui praskriejus pro varomąjį, skersinės magnetinės traukos sąveikos jėgos F_y pradeda lenkti keitiklį iš jo pradinės padėties t_0 link artėjančio magneto. Varančiajam magnetui toliau artėjant, keitiklis yra toliau deformuojamas iki kraštinės padėties t_1 (šios stadijos trukmė yra $\tau_1 = t_1 - t_0$). Magnetui kirtus neutralią poziciją ties $y' = 0$, F_y jėga reversuoja, kartu priversdama keitiklį peršokti į kitą kraštinę padėtį t_2 , kuri yra priešingoje pusėje pusiausvyros padėties atžvilgiu (žr. amplitudės šuolis 2.2.1. sk.). Taigi dinaminis atsakas taip pat reversuoja iš teigiamos į neigiamą pusę. Šios stadijos trukmė yra $\tau_2 = t_2 - t_1$. 2.4 (a) pav. matyti, kad po F_y krypties reversijos jėgos amplitudė palaipsniui mažėja (deaktyvacijos zona), tai reiškia, kad magnetinių jėgų sąveika negali staiga išnykti ties t_2 . Todėl magnetinės jėgos deaktyvacijos zonos įtaka keitiklio dinamikai daugiau ar mažiau pasireiškia (priklausomai nuo $v_{\text{žad}}$) bent iki laiko momento t_3 . Jėgos deaktyvacijos lemiamos PV stadijos trukmė $\tau_3 = t_3 - t_2$. Siekiant nuosekliai ir sistemingai interpretuoti tolimesnius eksperimentinius rezultatus, traktuojama, kad visame nagrinėjamame $v_{\text{žad}}$ intervale laiko momentu t_3 magnetinio sankybio jėgų poveikis pilnai išnyksta, tai reiškia PV fazės pabaigą (t. y. $t^{PV} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$).

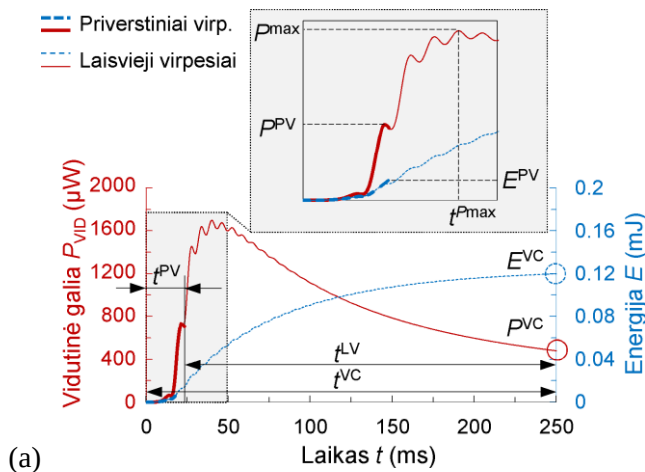
3.2.2. Veikimo režimų apibūdinimas

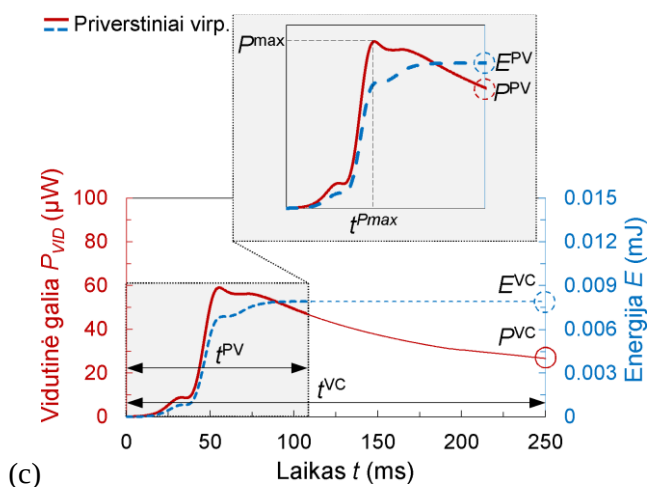
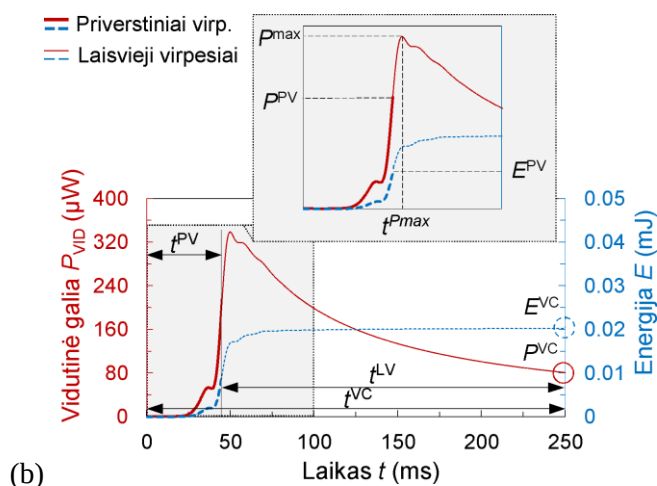
Visi pjezogeneratoriaus veikimo atvejai gali būti apibūdinti trimis *veikimo režimais*: *dinaminio*, *kvazistatiniu* ir *pereinamuoju*. Dinaminis režimas pasiekiamas tada, kai santykinai aukštas sužadavimo greitis $v_{\text{žad}}$ sugeneruoja impulsinio tipo pereinamąjį sužadimą (3.2–3.4 (a) pav.). Sužadavimo impulsyvumą taip pat dalinai stiprina mažesnis tarpelis $d_{\text{žad}}$, todėl neženkiai mažėja impulso ir magnetinės jėgos užaugimo trukmės (2.2.3. sk.). Dinaminio veikimo režimui būdingi „švarūs“ (magnetiškai neslopunami ar minimaliai slopinami) eksponentiškai gėstantys laisvieji virpesiai, kurių dažnis visos LV fazės eigoje labai artimas arba lygus pirmajam tikriniam keitiklio dažniui $f_t = 80$ Hz. Prie daugumos žadinimo greičių $v_{\text{žad}}$, pradinėse LV fazės stadijose (keletas svyravimo periodų po PV stadijos τ_3) laisvieji virpesiai

bent minimaliai yra veikiami magnetinio lauko jėgų. Sutariama, kad pjezogeneratoriaus dinaminio veikimo režimo metu magnetinio sankybio jėgos daug mažiau slopina laisvuosius virpesius, palyginti su magnetinio slopinimo mastu kvazistatiniame ir pereinamajame režimuose.

O prie santykinai žemo v_{zad} pjezogeneratorius veikia mažiausiai efektyviu kvazistatiniu režimu, kurio metu keitiklio virpesiai būna suvaržyti magnetinio sankybio per visą veikimo ciklą (SPA). Šiame režime nepasireiškia staigi reversija tarp t_1 ir t_2 (3.2–3.3 (c) pav.). Keitiklio atsakas iki t_1 yra tokios pačios prigimties, kaip ir dinaminio režimo metu. Toliau varantysis magnetas ir generuojama jėga F_y reversijos metu lėtai traukia keitiklį iš vienos pusės į kitą (pusiausvyros padėties atžvilgiu) iki t_2 . Varančiajam magnetui tolstant nuo keitiklio, magnetinis atsikabinimas vyksta palengva, taip versdamas keitiklį lėtai grįžti į pusiausvyros padėtį (jėgos deaktyvacijos zona). Todėl kvazistatiniame veikimo režime keitiklio SPA yra sudarytas tik iš PV fazės ir laisvieji virpesiai nestebimi.

Galiausiai, galima santykinai išskirti ir tarpinį pjezogeneratoriaus veikimo režimą, kai v_{zad} yra aukštesnis nei kvazistatiniame režime, bet nėra pakankamai aukštas, kad pasiektų tikrąjį impulsinį sužadinimą, kuris leidžia įrenginiui dirbti efektyviausiu dinaminio režimu. Šiame pereinamajame režime (3.2–3.3 (b) pav.) keitiklio paleidimas iš deformuotos padėties (PV fazės pabaiga) yra staigesnis nei kvazistatiniame režime, tačiau ir po paleidimo (ties t_3) magnetinės sąveikos jėgos toliau daro didelę įtaką keitiklio laisviesiems virpesiams. Po PV fazės, tarp t_3 ir t_6 , keitiklis pradeda neintensyviai virpėti mažomis amplitudėmis silpnėjančiame magnetiniame lauke. Pažymėtina, kad šių, tarp t_3 ir t_6 stebimų labai mažos amplitudės magnetiškai suvaržytų virpesių („raibuliavimo“) dažnis žemesnis nei f_t (3.9 pav.). Galiausiai, šis „raibuliavimas“ pereina į mažo intensyvumo laisvuosius virpesius. Laiko intervalai $\tau_4 = t_4 - t_3$, $\tau_5 = t_5 - t_4$ ir $\tau_6 = t_6 - t_5$ bus panaudoti 3.4. sk. atliekant išsamų kiekybinį pjezogeneratoriaus veikimo tyrimą.





3.4 pav. Pereinamieji vidutinės galios ir suminės energijos atsakai apskaičiuoti keitikliui veikiant (a) dinaminiu ($v_{\text{žad}} = 1.44$ m/s), (b) pereinamuoju ($v_{\text{žad}} = 0.62$ m/s) ir (c) kvazistatiniu ($v_{\text{žad}} = 0.41$ m/s) režimais (visai atvejais $d_{\text{žad}} = 6$ mm)

3.3. Keitiklio elektromechaninių parametrų nustatymas

3.3.1. Dinamiškumo koeficiento įvertinimas

Piezogeneratoriaus generuojama elektrinė galia priklauso nuo keitiklio generuojamos įtampos ir išorinės apkrovos varžos. Suderintos apkrovos varža, mechaninis dinamiškumo koeficientas, Relėjaus (proporcingojo) slopinimo koeficientas ($\beta = 1/2\pi f_i Q$) ir kiti parametrai buvo įvertinti iš eksperimentiškai matuotų keitiklio pereinamųjų vibroposlinkio, vibrogreičio ir įtampos signalų. Suminis dinamiškumo koeficientas buvo nustatytas keičiant prie keitiklio prijungtos apkrovos varžą nuo 0 iki 10 M Ω (t. y. pereinant nuo trumpos elektrinės grandinės į atvirą) pagal:

$$Q = \frac{1}{2\zeta_r} = \frac{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}}{2\delta}; \quad (19)$$

čia: ζ_r – slopinimo laipsnis, δ – logaritminis slopinimo dekrementas, kuris apskaičiuojamas pagal:

$$\delta = \frac{1}{k} \ln \frac{y_{amp}}{y_k}; \quad (20)$$

čia: y_{amp} – virpesių piko amplitudė, y_k – virpesių piko amplitudė po k periodų, k – pikų skaičius.

Eksperimentiniai duomenys rodo, kad keitiklis turėtų būti prijungtas prie 9.5 kΩ varžos (suderintos apkrovos), siekiant maksimalios generuojamos galios. Dinamiškumo koeficiento ir apkrovos varžos priklausomybė pateikta 3.1 lent.

3.1 lentelė. Priklausomybė tarp pjezokeraminio keitiklio dinamiškumo koeficiento ir elektrinės apkrovos varžos

Apkrovos varža	Dinamiškumo koeficientas
1.0 Ω	33.04 ↓
1.0 kΩ	20.15 ↓
2.0 kΩ	15.02 ↓
4.0 kΩ	10.55 ↓
6.0 kΩ	8.52 ↓
8.0 kΩ	8.40 ↓
8.5 kΩ	8.35 ↓
9.0 kΩ	8.30 ↓
9.5 kΩ (suderinta varža)	8.20
9.75 kΩ	8.32 ↑
10.0 kΩ	8.38 ↑
10.5 kΩ	8.41 ↑
11.0 kΩ	8.45 ↑
12.0 kΩ	8.50 ↑
14.0 kΩ	9.01 ↑
18.0 kΩ	11.57 ↑
40.0 kΩ	17.43 ↑
100.0 kΩ	26.02 ↑
1.0 MΩ	32.10 ↑
10.0 MΩ	33.57 ↑

3.3.2. Suderintos varžos įvertinimas

Bendruoju atveju, energijos konversijos našumas keitiklyje, kai energija transformuojama iš mechaninės į elektrinę, nusakoma pagaminamos elektrinės energijos ir tiekiamos mechaninės energijos santykiu ($\eta = E_{el} / E_m$). Tradicinio vibracinio pjezogeneratoriaus atveju η gali būti išreikšta pagal [90, 30,72]:

$$\eta = \frac{\zeta_e}{\zeta_T} = \frac{\zeta_e}{\zeta_m + \zeta_e}, \quad (21)$$

$$\zeta_e = \frac{(C_{PK} \omega_t R_A) k_e^2}{\left(C_{PK} \omega_t R_A \left(\frac{\omega_{zad}}{\omega_t} \right) + \pi/2 \right)^2}; \quad (22)$$

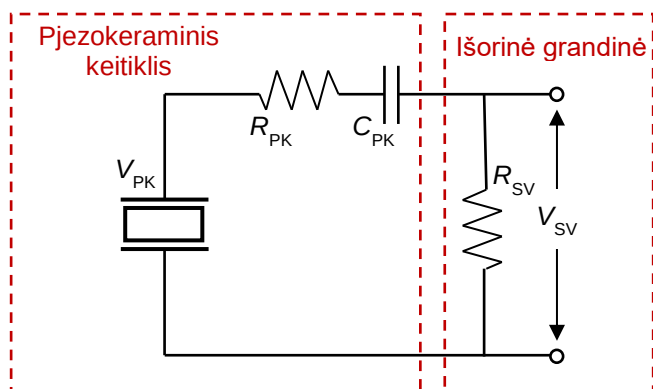
čia ω_t ir ω_{zad} yra kampinis tikrinis ir sužadavimo dažniai, atitinkamai; C_{PK} ir k_e^2 yra keitiklio talpa ir elektromechaninio ryšio koeficientas, atitinkamai; ζ_m , ζ_e , ζ_T yra mechaninis, elektrinis ir suminis slopinimo laipsniai, atitinkamai.

Didelė dalis į nagrinėjamą pjezogeneratorių paduodamos mechaninės energijos E_m yra prarandama šiluminių nuostolių pavidalu, pavyzdžiui: i) nuostoliai pjezoelektrinėje medžiagoje (t. y. elastiniai, dielektriniai ir pjezoelektriniai [36]); ii) vidinis slopinimas keitiklio konstrukciniuose sluoksniuose (substratas, klijai, elektrodai); iii) įvairūs mechaniniai nuostoliai (pvz., trinties nuostoliai besisukančiame staliuke); iv) įvairūs elektriniai nuostoliai (pvz., srovės nutekėjimai). (20) ir (21) formulėse nurodoma, kad kuo mažesnis mechaninis (vidinis) slopinimas ir stipresnis elektromechaninis ryšys pjezoelektriniame keitiklyje, tuo aukštesnis energijos konversijos (generavimo) našumas. Nagrinėjant (21) formulę pjezogeneratoriaus atveju yra laikoma, kad R_A ir ω_{zad} yra kintantys parametrai, kurių dydžiai priklauso nuo magnetinio sužadavimo režimo; kai ω_t , C_{PK} ir k_e^2 yra konstantos. Elektriniu požiūriu, pjezoelektrinis keitiklis gali būti nagrinėjamas kaip idealus srovės šaltinis, kurio vidinė talpa C_{PK} [10]. Pjezokeraminiai sluoksniai keitiklyje, yra sujungti lygiagrečiai, dėl to abiejų sluoksnių generuojama įtampa sumuojasi. Pjezogeneratoriaus elektrinės grandinės schema pateikta 3.5 pav., o jos suderinta varža apskaičiuojama pagal $R_{SV} = R_{opt} = 1/\omega_{zad} C_{PK}$ ($\omega_{zad} = \omega_t$, t. y. traktuojama, kad keitiklis virpa pirmuoju tikriniu dažniu). Pjezogeneratoriuje elektrinis slopinimas ζ_e itin priklauso nuo sužadavimo greičio v_{zad} , kuris lemia deformuojamo keitiklio vibrogreitį v_{PK} . Apskritai, priklausomybė tarp ζ_e ir v_{PK} yra sudėtinga, kadangi keitiklio SPA sudaro skirtingos vibracinės fazės. Priklausomai nuo v_{zad} , kiekviena SPA fazė gali būti sudaryta iš skirtingo dažnio virpesių (t. y. skirtingos SPA stadijos gali turėti skirtingas dažnines / laikines charakteristikas), kurios lemia suderintos varžos R_{SV} dydį.

Šiame darbe buvo atlikta maksimalios vidutinės galios eksperimentinė analizė, kuri leido nustatyti, su kokia apkrovos varža pasiekama maksimali vidutinė galia kiekvienu pjezogeneratoriaus veikimo režimu. Siekiant šio tikslo, R_{SV} vertė buvo nustatyta apskaičiuojant P_{av} kaip funkciją nuo R_A (3.6 (a) pav.) kiekvienam sužadavimo režimui atskirai:

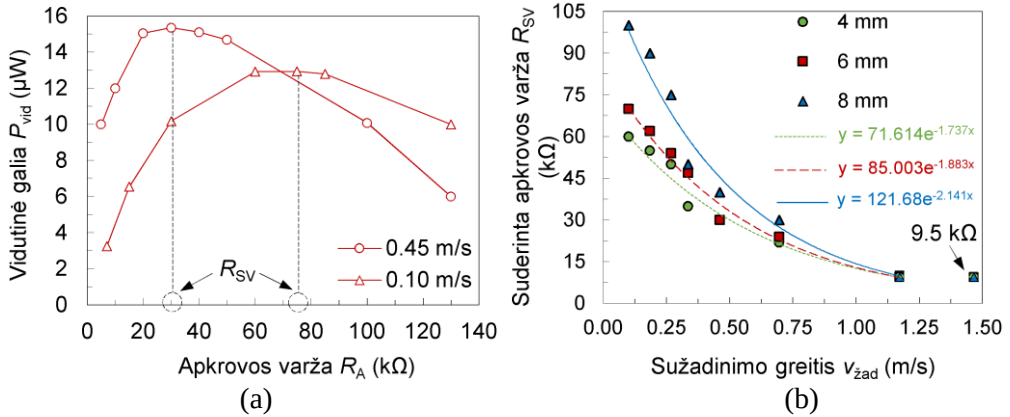
$$P_{av} = \frac{V_{rms}^2}{R_L} = \frac{1}{R_L} \left(\sqrt{\frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^k V^2(t_i) \right)} \right)^2, \quad (23)$$

čia $V(t_i)$ – momentinė įtamos amplitudė, k – skaičiavimuose įvertintų įtamos amplitudžių skaičius.



3.5 pav. Pjezokeraminio keitiklio ekvivalentinė elektrinė schema, čia R_{PK} ir C_{PK} – keitiklio vidinė varža ir talpa, atitinkamai, V_{PK} – keitiklio pjezo sluoksnių generuojama įtampa, R_{SV} – išorinė suderinta apkrovos varža, V_{SV} – išorinės grandinės įtampa, generuojama suderintos apkrovos rezistoriuje

Santykinai staigaus sužadinimo metu ($v_{\text{žad}} \geq 1.17$ m/s), R_{SV} dydis nusistovėjo ties ~ 9.5 k Ω prie visų nagrinėtų $d_{\text{žad}}$ (3.5 (b) pav.). O lėto sužadinimo metu ($v_{\text{žad}} = 0.10 - 1.17$ m/s) R_{SV} didėja skirtingu tempu mažėjant sužadinimo greičiui. T. y. R_{SV} mažėja su mažėjančiu $d_{\text{žad}}$. Tai priklauso nuo magnetinės jėgos užaugimo trukmių $t(F_y)_{UT}$, $t(F_x)_{UT}$ mažėjimo, palyginti su keitiklio pereinamojo atsako kilimo trukme $t(PK)_K$. Didėjantis magnetinio sužadinimo greitis $v_{\text{žad}}$ aukština virpesių dažnį tiek PV, tiek LV fazėse; tai mažina R_{SV} ($R_{SV} = 1/\omega_{\text{žad}}C_{PK}$). Pjezogeneratoriui veikiant dinaminio režimu ir esant impulsiniam magnetiniam sužadinimui, LV fazės indėlis (energetiniu požiūriu) į suminį pereinamąjį atsaką yra didesnis nei PV fazės indėlis. Pavyzdžiui, pjezogeneratoriui veikiant dinaminio režimu prie $v_{\text{žad}} = 1.44$ m/s (3.2 (a)–3.4 pav.), LV fazė, kurioje virpesių dažnis $f_t = 80$ Hz, energetiškai dominuoja, nes šios fazės metu pagaminama $E^{LV}/E^{VC} = 93$ % visos elektrinės energijos, kurią įmanoma pagaminti per visą veikimo ciklą t^{VC} (3.7 (a) pav.). Taigi $R_{SV} = 9.5$ k Ω (3.6 (b) pav.) ir, kaip galima tikėtis, ši reikšmė yra artima teorinei $R_{opt} = 1/2\pi f_t C_{PK} = 9.95$ k Ω . Pažymėtina, kad pastaroji teorinė varžos reikšmė galioja pjezogeneratoriui, veikiančiam tradiciniu tiesinio rezonanso režimu (t. y. kinematinis keitiklio žadinimas). Kitaip tariant, tai atitinka apkrovos varžą, kuri tinkamai suderinta su rezonuojančio keitiklio impedansu, sutarus, kad keitiklis iš esmės yra kondensatorius, apibūdinamas talpine varža $X_c = 1/2\pi f C_{PK}$. Jei nagrinėjamas priešingas atvejis, kai pjezogeneratorius veikia kvazistatiniu režimu prie nedidelio žadinimo greičio $v_{\text{žad}} = 0.41$ m/s (3.2 (c) pav.), tada keitiklio SPA sudaro tik PV fazė, kuri yra charakterizuojama laiko intervalais $\tau_1 = t_1 - t_0 = 26.3$ ms, $\tau_2 = t_2 - t_1 = 16.7$ ms ir $\tau_3 = t_3 - t_2 = 14.8$ ms (3.9 pav.). Šie laiko intervalai yra žymiai didesni, palyginti su tais, kurie buvo išmatuoti LV fazėje prie $v_{\text{žad}} = 1.44$ m/s (dinaminis veikimo režimas), t. y. $\tau_3 = \tau_4 = \tau_5 = \tau_6 = \tau_n = T_t/2 = 6.25$ ms ($T_t = 1/f_t = 12.5$ ms). Kitaip tariant, kvazistatiniame režime keitiklio pereinamojo atsako virpesių dažnis ženkliai mažesnis, todėl pagal $R_{SV} = 1/\omega_{\text{žad}}C_{PK}$ išauga ir suderintos varžos dydis, pvz., $R_{SV} \approx 39.3$ k Ω prie $v_{\text{žad}} = 0.41$ m/s ir $d_{\text{žad}} = 6$ mm (3.5 (b) pav.).



3.6 pav. (a) Išmatuotos vidutinės galios priklausomybė nuo apkrovos varžos prie skirtingų sužadinimo greičių v_{zad} ($d_{zad} = 6 \text{ mm}$). (b) Išmatuotos suderintos varžos priklausomybė nuo v_{zad} prie skirtingų d_{zad}

3.4. Detali pjezogeneratoriaus veikimo analizė

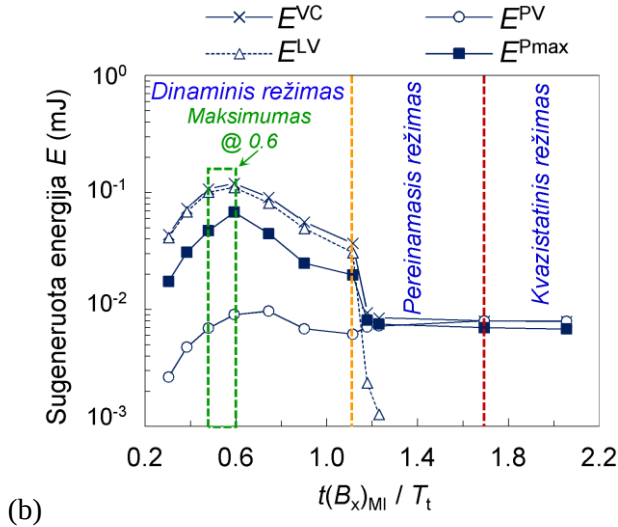
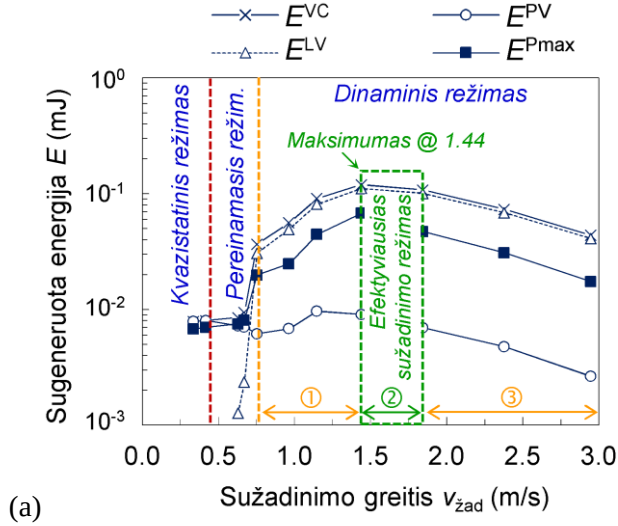
Pjezogeneratoriaus veikimą lemia sudėtinga priklausomybė tarp keitiklio dinaminų charakteristikų (tikrinio dažnio f_t , slopinimo laipsnio ζ_m) ir magnetinės sąveikos sąlygų. Šio sąlygos priklauso nuo daugelio tarpusavyje susijusių veiksnių, tokių kaip magnetinio sužadinimo režimas (v_{zad} ir d_{zad}), tarpusavyje sąveikaujančių varančiojo ir varomojo magnetų forma, matmenys, medžiagos savybės, magnetų erdvinis išsidėstymas atsižvelgiant į jų poliarizacijos kryptį ir erdvinę orientaciją. Toliau darbe išsamiai tiriami pjezogeneratoriaus darbo dėsningumai įvairiais magnetinio sužadinimo režimais nekeičiant jau išvardintų sąlygų.

Siekiant tiksliau įvertinti magnetinio sužadinimo sąlygas ir energijos generavimo procesų priklausomybes, buvo atlikti pereinamojo atsako matavimai keičiant v_{zad} nuo 0.33 iki 2.93 m/s ir d_{zad} nuo 4 iki 8 mm. Didžioji dalis tyrimo rezultatų pateikiama esant kintančiam v_{zad} , kai $d_{zad} = 6 \text{ mm}$. Siekiant apibendrinto ir sisteminio pjezogeneratoriaus veikimo charakteristikų įvertinimo, įvedamas santykis $t(B_x)_{MI} / T_t$ (bedimensinė B_x impulse trukmė), kurį patogiu naudoti kaip kintamą dydį pereinamojo sužadinimo atveju. Taigi ištirtas veikimo diapazonas $v_{zad} = 0.33 - 2.93 \text{ m/s}$ atitinka $0.3 < t(B_x)_{MI} / T_t < 2.1$. $t(B_x)_{MI}$ trukmės buvo nustatytos panaudojus eksperimentinius B_x matavimo rezultatus, kurie pateikti 2.7 (a) pav. Pažymėtina, kad dėl B_x matavimų procedūros netikslumų, eksperimentinės $t(B_x)_{MI} / T_t$ reikšmės yra $\sim 10 \%$ didesnės, palyginti su skaitiniais rezultatais, gautais skaičiuojant magnetines jėgas.

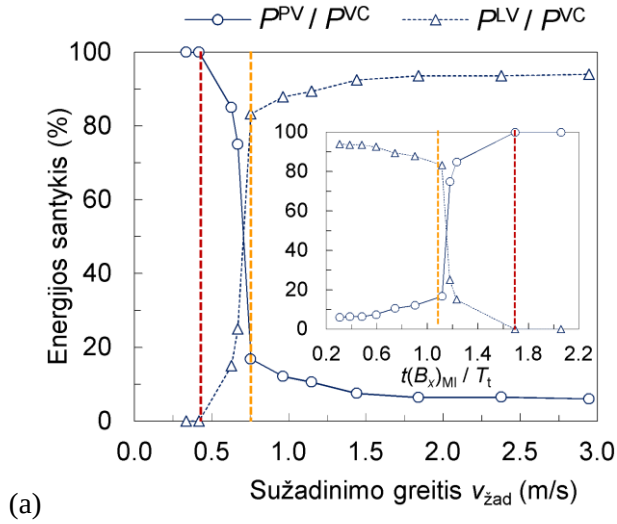
3.4.1. Kvazistatinis ir pereinamasis režimai

Matavimo rezultatai 3.7–3.10 pav. atskleidžia, kad pjezogeneratorius veikia kvazistatiniu režimu, kai sužadinimo greitis yra žemesnis nei $\sim 0.4 \text{ m/s}$ arba $t(B_x)_{MI} / T_t > 1.7$. Neįmanoma vienareikšmiškai identifikuoti tikslaus magnetinio sužadinimo greičio, kai kvazistatinis režimas pereina į pereinamąjį. Traktuojama, kad tai įvyksta tada, kai keitiklio pereinamajame atsake tarp laiko momentų t_3 ir t_6 fiksuojami mažo intensyvumo virpesiai („raibuliavimai“), kurie nusakomi intervalais τ_4 , τ_5 ir τ_6 (3.9

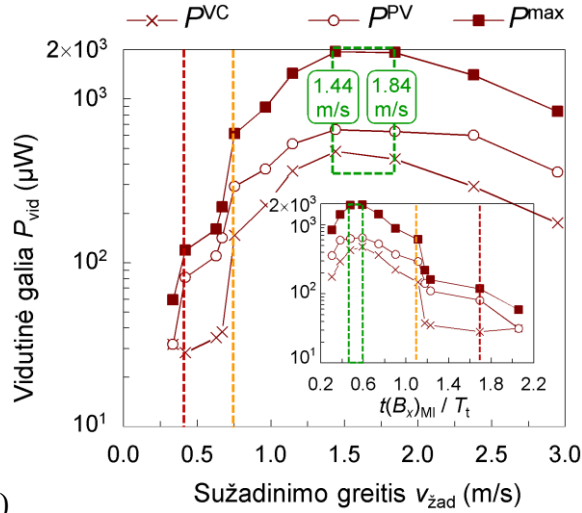
pav.). Šių dviejų režimų detalesnis tyrimas nėra aktualus dėl ženkiai mažesnio kvazistatinio ir pereinamojo režimų efektyvumo, pvz., E^{VC} ir P^{VC} reikšmės kvazistatiniame ir pereinamajame režimuose yra atitinkamai ~15 ir ~3 kartų mažesnės (pvz., 3.7 (a) ir 3.8 (b) pav.) nei efektyviausio sužadinimo režimo atveju, kai $v_{\text{žad}} = 1.44$ m/s, atitinkantis $t(B_x)_{\text{MI}} / T_t = 0.6$. Taigi magnetiškai žadinamas energijos generatorius turėtų būti projektuojamas taip, kad realiomis eksploataavimo sąlygomis nenaudotų šių neefektyvių veikimo režimų.



3.7 pav. Išmatuotos suminės energijos (sugeneruotos laiko intervaluose t^{VC} , t^{PV} , t^{LV} ir $t^{P_{\text{max}}}$) priklausomybė nuo (a) sužadinimo greičio ir (b) bedimensinės B_x impulso trukmės ($d_{\text{žad}} = 6$ mm). Generavimo efektyvumo stadijos dinaminiam veikimo režime: ① augimo, ② stacionarinė ir ③ kritimo



(a)



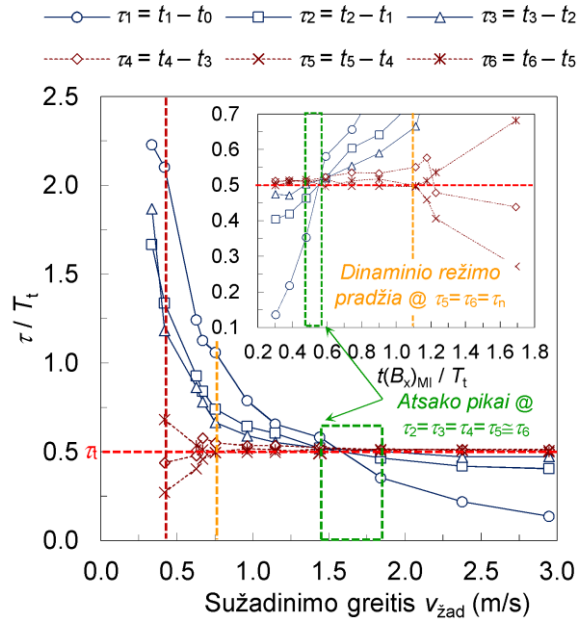
(b)

3.8 pav. Išmatuotos (a) suminės energijos santykio ir (b) vidutinės galios (sugeneruotos laiko intervaluose t^{VC} , t^{PV} , t^{Pmax}) priklausomybė nuo sužadavimo greičio (išdidintas grafikas: priklausomybė nuo bedimensinės B_x impulso trukmės) ($d_{zad} = 6$ mm)

3.4.2. Perėjimo į dinaminį režimą sąlygos

Mechaninio dažnio aukštinimo pagrindu veikiantis vibracinis energijos generatorius turėtų būti suprojektuotas taip, kad veiktų aukšto efektyvumo dinamiu režimu. Todėl itin svarbu identifikuoti ribines sužadavimo sąlygas, kurioms esant baigiasi pereinamasis režimas ir prasideda pjezogeneratoriaus dinaminis veikimo režimas. Pagal virpesių teoriją [113], bendruoju atveju yra traktuojama, kad pereinamasis mechaninis sužadinimas yra klasifikuojamas kaip impulsinis (angl. *shock*), kai veikiančios jėgos užaugimo trukmė tampa truputį mažesnė nei pusė

konstrukcijos pirmojo tikrinio periodo, t. y. $t(F_x)_{UT} / T_t \lesssim 0.5$ tradicinio (varpo formos) impulso atveju [115]. Nagrinėjamoju atveju sutariama, kad B_x užaugimo trukmė $t(B_x)_{UT} = 0.5 t(B_x)_{MI}$, kadangi išmatuotas B_x impulsas gali būti priskirtas simetriniam varpo formos impulsui (3.3 (a) pav.). Tada ribinis impulsinio sužadinimo kriterijus gali būti performuluotas kaip $t(B_x)_{MI} / T_t \lesssim 1$, t. y. galima tikėtis, kad magnetinis sužadinimas taps impulsiniu, kai B_x impulso trukmė taps lygi ar šiek tiek mažesnė už keitiklio pirmąjį tikrinį periodą.



3.9 pav. Išmatuotų bedimensinių laiko intervalų tarp nuoseklių V_{sv} atsako pikų priklausomybė nuo sužadinimo greičio (išdidintas grafikas: priklausomybė nuo bedimensinės B_x impulso trukmės) ($d_{zad} = 6 \text{ mm}$)

3.6–3.9 pav. pateiktuose grafikuose matyti ryškūs pjezogeneratoriaus veikimo charakteristikų pokyčiai intervale $v_{zad} = 0.7 - 0.8 \text{ m/s}$ ir $t(B_x)_{MI} / T_t = 1.1 - 1.2$. Grafikuose 3.7 (a–b) pav. ir 3.8 (b) pav. akivaizdu, kad sugeneruota suminė energija E ir vidutinė galia P_{vid} ženkliai padidėjo (apie 4 kartus) šiame santykinai nedideliame sužadinimo intervale. Kreivų E^{PV}/E^{VC} ir E^{LV}/E^{VC} sankirta 3.8 (a) pav. aiškiai žymi priverstinių virpesių fazės dominavimo veikimo cikle pabaigą ir laisvųjų virpesių fazės dominavimo pradžią, t. y. LV fazės indėlis energijos generavimo procese padidėjo nuo 25 % iki 85 %. Akivaizdu, kad minėtame sužadinimo intervale perėjimas tarp skirtingų veikimo režimų vyksta itin sparčiai. Šios tendencijos taip pat aiškiai atsispindi ir vibrogreičio (3.10 (a) pav.) bei vibroposlinkio (3.10 (b) pav.) amplitudžių kitimo grafikuose. Maksimalios absoliutinės amplitudės reikšmės keitiklio vibroposlinkio / greičio SPA yra vadinamos „maximax“ atsaku [112]. Pavyzdžiui, 3.10 (a) pav. stebime, kad v_{i3} pradeda viršyti v_{i2} ties $t(B_x)_{MI} / T_t = 1.1$. Tai rodo, kad keitikliui pereinant iš vieno veikimo režimo į kitą, „maximax“ atsakas pasislenka į vėlesnį laiko momentą PV fazėje. Be to, 3.10 (b) stebime, kad prie mažesnių reikšmių

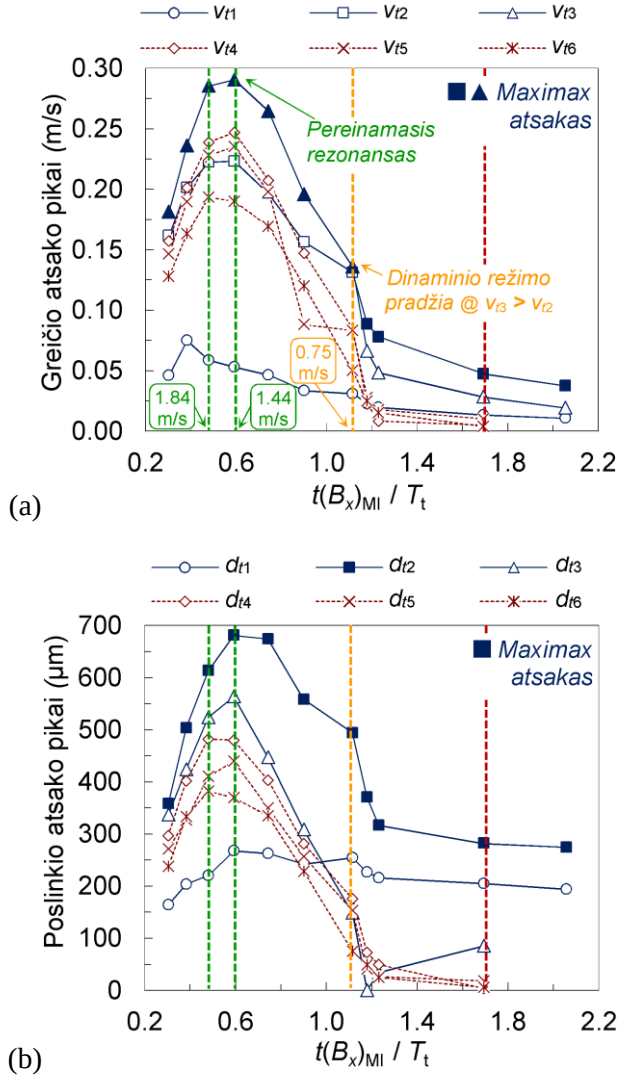
nei $t(B_x)_{MI} / T_t = 1.2$, vibroposlinkio pikai $d_{t1} - d_{t6}$ pradeda sparčiau didėti. 3.9 pav. grafikas papildomai atskleidžia, kad didėjantis sužadinimo greitis $v_{\text{žad}}$ lemia laiko intervalų τ_5 ir τ_6 reikšmių artėjimą link tikrinio pusperiodžio $\tau_n = 6.25$ ms, kol jie maždaug susilygina ties $t(B_x)_{MI} / T_t = 1.1$. Tai rodo, kad švarūs laisvieji f_t dažnio virpesiai didinant $v_{\text{žad}}$ pradeda susigeneruoti vis ankstesnėse SPA stadijose, nes didėja pereinamojo magnetinio sužadinimo impulsyvumas. Tad aptarti eksperimentiniai rezultatai veda link išvados, kad $t(B_x)_{MI} / T_t = 1.1 - 1.2$ atitinka pjezogeneratoriaus pereinamojo veikimo režimo pabaigą ir dinaminio režimo pradžią. Atitinkamai, sužadinimo greitis $v_{\text{žad}} = 0.7 - 0.8$ m/s gali būti laikomas *ribiniu sužadinimo greičiu*. Galiausiai, jei šioje analizėje panaudojame magnetinės jėgos F_y modeliavimo rezultatus ir jų pagrindu apskaičiuotas šios jėgos krypties reversijos trukmės t_{rev} reikšmės (2.7 (b) pav.), gauname rezultatą, kad perėjimas į dinaminį režimą įvyksta kai bedimensinė reversijos trukmė, lygi $t_{\text{rev}} / T_t = 0.9 - 1.0$. Todėl, turėdami omenyje, kad F_y yra dominuojanti keitiklio deformavimo (lenkimo) jėga plokštuminio sužadinimo atveju (2.2.1. sk.), galime daryti išvadą kad minėtasis ribinis impulsinio sužadinimo kriterijus [115] taip pat galioja ir nagrinėjamam magnetinio sužadinimo atvejui. Tai patvirtina, kad šiame darbe pasiūlytas laikinis parametras t_{rev} (ir t_{rev} / T_t) yra adekvatus, nes iš esmės lemia SPA charakteristikas ir kartu energijos generavimo efektyvumą plokštuminio magnetinio sužadinimo atveju.

3.4.3. Dinaminio veikimo režimo stadijos

Atsižvelgus į didėjančio sužadinimo greičio $v_{\text{žad}}$ (mažėjančio $t(B_x)_{MI} / T_t$) įtaką pjezogeneratoriaus dinaminėms ir elektrinėms charakteristikoms, dinaminis veikimo režimas gali būti santykinai padalintas į tris charakteringas stadijas: *augimo*, *stacionarinės* ir *kritimo* (jos 3.7 (a) pav. pažymėtos ①, ② ir ③). Augimo stadijos metu sugeneruota suminė energija ir vidutinė galia didėja apytiksliai pastoviu tempu iki maksimalios reikšmės ties 1.44 m/s. Racionalu priimti, kad stacionarinės stadijos metu pjezogeneratorius veikia *efektyviausiu magnetinio sužadinimo režimu*, kuris yra pasiekiamas maždaug tada, kai $1.44 < v_{\text{žad}} < 1.84$ m/s ($0.48 < t(B_x)_{MI} / T_t < 0.6$). Šios kraštinės intervalo reikšmės pasirinktos todėl, kad šiame darbe 1.44 m/s ir 1.84 m/s atitinka matavimo taškus. Kai $v_{\text{žad}}$ pradeda viršyti apytiksliai 1.84 m/s (t. y. $t(B_x)_{MI} / T_t \lesssim 0.48$, $t(F_y)_{UT} / t(PK)_K \lesssim 0.73$), energija ir vidutinė galia pradeda kristi didesniu tempu nei stacionarinėje stadijoje (3.7 ir 3.8 (b) pav.). Taigi, dinaminio veikimo režimo kritimo stadijoje stebimas energijos generavimo efektyvumo mažėjimas. 3.9 pav. matyti, kad šioje stadijoje laiko intervalų $\tau_1 - \tau_3$ reikšmės pradeda tolti nuo $\tau_t = 6.25$ ms (τ_1 , τ_2 , τ_3 mažėja sparčiausiu, vidutiniu ir lėčiausiu tempais, atitinkamai). Sužadinimo greičiui viršijus ~ 1.84 m/s ($t(B_x)_{MI} / T_t \lesssim 0.48$), stebimą spartų elektrinių signalų mažėjimą kritimo stadijoje lemia staiga sumažėjusios vibrogreičio ir vibroposlinkio atsako amplitudės (3.10 pav.). Jos mažėja todėl, kad $t(B_x)_{MI} / T_t$ mažėjimas reiškia, jog kartu mažėja ir veikiančios magnetinės jėgos užaugimo trukmė, kuri dinaminio režimo kritimo stadijoje jau tampa pernelyg maža, palyginti su keitiklio pereinamojo atsako kilimo trukme, t. y. pereinamasis sužadinimas tampa per daug staigus, palyginti su keitiklio natūraliu dinamiškumu (t. y. atsako greičiu, kurį nusako $t(PK)_K = 0.5 \tau_t = 0.25 T_t$).

3.4.4. Efektyviausio magnetinio sužadavimo režimo ypatumai

3.10 pav. grafikai rodo, kad pjezogeneratoriui veikiant dinaminio režimu, keitiklio vibroposlinkio ir vibrogreičio atsakai stiprėja mažėjant $t(B_x)_{MI} / T_t$ iki maksimalių reikšmių, o toliau atsakai pradeda silpnėti. SPA pikai ties $t(B_x)_{MI} / T_t = 0.6$



3.10 pav. (a) Vibrogreičio v_{PK} ir (b) vibroposlinkio d_{PK} pereinamojo atsako pikų (amplitudžių) priklausomybės nuo bedimensinės B_x impulso trukmės ($d_{exc} = 6$ mm)

(1.44 m/s) sutampa su elektrinių signalų pikais (3.7 ir 3.8 (b) pav.). Padalinę kiekvieną vibroposlinkio atsako amplitudės reikšmę iš amplitudės reikšmės, gautos kvazistatinio režimo pradžioje prie $v_{zad} = 0.34$ m/s (t. y. laikome tai keitiklio statinio įlinkio reikšmę), gauname *dinaminio stiprinimo rodiklį* DSR (angl. dynamic

amplification factor), kurio reikšmė ~ 2.4 ties 1.44 m/s (t. y. $DSR = d_{t2} / d_{t2@0.34 \text{ m/s}}$). Pažymėtina, kad pagal [112] $DSR > 2$ yra būdingas lengvai slopinamoms antrosios eilės dinaminėms sistemoms, kurios yra sužadinamos pilno ciklo impulsu (t. y. impulsas su jėgos krypties reversija). Tai dar kartą patvirtina, kad nagrinėjamo plokštuminio sužadinimo atveju pjezogeneratoriaus pereinamąjį atsaką iš esmės lemia skersinė magnetinė jėga F_y , kurios kitimo pobūdis atitinka pilno ciklo impulsą (2.2.1. sk.). Akivaizdu, kad 3.10 pav. grafikuose stebimas nuo sužadinimo greičio priklausantis vibroposlunkio / greičio pereinamųjų atsakų stiprėjimo ir paskesnio silpnėjimo procesas, kuris atitinka *pereinamąjį rezonansą* (angl. *transient resonance*). Atsižvelgus į dinaminių sistemų kontekstą, šis reiškinys ypač aktualus rotorinėse mašinose, kuriose jis yra pavojingas (pvz., dėl rotorių nesubalansuotumo) ir pasireiškia tada, kai nuo rotoriaus sukimosi greičio priklausantis sužadinimo jėgos dažnis prie tam tikro (kritinio) greičio sutampa su vibrosistemos tikriniu dažniu (pvz., taip ženkliai sustiprindamas rotoriaus skersinius virpesius) [116-119]. Iš esmės, nagrinėjamas pjezogeneratoriaus stendas ir yra rotorinė sistema, sudaryta iš standaus varančiojo sukiojo mechanizmo – besisukančio staliuko su magnetu, kuris dėl magnetinio sankybio „pumpuoja“ energiją į tamprią konstrukciją – pjezoelektrinį keitiklį. Tad darytina išvada, kad efektyviausio magnetinio sužadinimo režimu pjezogeneratorius veikia tada, kai yra sužadinamas pereinamasis rezonansas, kuris užtikrina įrenginio veikimą maksimalia elektrine galia. Kritinis greitis $v_{\text{žad}} = 1.44 \text{ m/s}$, prie kurio pasiekiamas pereinamasis rezonansas gali būti vadinamas *rezonansiniu magnetinio sužadinimo greičiu*. Atitinkamos magnetinių jėgų impulsų laikinių charakteristikų reikšmės – *rezonansinė impulso trukmė* ($t(F_x)_{\text{MI}}$), *rezonansinė reversijos trukmė* t_{rev} ir *rezonansinė jėgos užaugimo trukmė* ($t(F_x)_{\text{UT}}$, $t(F_y)_{\text{UT}}$).

Toliau nagrinėjamos magnetinio sužadinimo sąlygos, svarbios pasiekti pereinamąjį rezonansą ir taip maksimizuoti energijos generavimo efektyvumą. Tam tikslui pasitelkti tiek eksperimentinių, tiek skaitinių tyrimų rezultatai. Kiekybinei analizei atlikti panaudotos magnetinių jėgų impulsų laikinių charakteristikų skaitinės reikšmės (2.7 pav.). Vietoje išmatuotų $t(B_x)_{\text{MI}}$ reikšmių naudodami paskaičiuotas $t(F_x)_{\text{MI}}$ reikšmes, gauname, kad efektyviausio magnetinio sužadinimo režimo ribos impulsų trukmių atžvilgiu atitinka $0.42 < t(F_x)_{\text{MI}} / T_t < 0.54$. Turint omenyje, kad $t(F_x)_{\text{UT}} = 0.5 t(F_x)_{\text{MI}}$ ir $t(\text{PK})_K = 0.25 T_t$, gaunamas rezultatas, kad užaugimo trukmių atžvilgiu tai apytiksliai atitinka $0.84 < t(F_x)_{\text{UT}} / t(\text{PK})_K < 1.09$. Taigi tai parodo, jog dinaminio režimu pjezogeneratorius veikia efektyviausiai tada, kai ašinės magnetinės jėgos F_x impulso trukmė (arba užaugimo trukmė) tampa panaši į keitiklio tikrinį pusperiodį τ_t (arba kilimo trukmę). Pažymėtina, kad šiame efektyviausiame magnetinio sužadinimo režime visi laiko intervalai $\tau_1 - \tau_6$ tampa apytiksliai lygūs $\tau_t = 6.25 \text{ ms}$ (3.9 pav.), ir tai žymi, kad įrenginys dirba pereinamojo rezonanso sąlygomis. Kitais žodžiais tariant, rezonanso metu keitiklio PV ir LV fazių virpesių dažnis apytiksliai lygus f_t . Atkreiptinas dėmesys į tai, kad šis rezultatas paaiškina pjezogeneratoriaus suderintos varžos R_{SV} nusistovėjimą ties $\sim 9.5 \text{ k}\Omega$ (3.3.2. sk.), kai sužadinimo greitis priartėja prie rezonansinio ($v_{\text{žad}} = 1.44 \text{ m/s}$). Taigi, pjezogeneratoriui veikiant pereinamajame rezonanse, jo elektrinė galia gali būti maksimizuojama naudojant pastovią R_{SV} ir taip išvengiant komplikuoatų, elektros nuostolius didinančių, maksimalios galios siekimui skirtų elektroninių valdymo

schemų naudojimo [120]. Pažymėtina ir tai, kad pereinamojo rezonanso metu susilygina laiko intervalai $\tau_2 - \tau_5$ (τ_6 yra tik šiek tiek trumpesnis). Priešingai nei $\tau_4 - \tau_6$ intervalų atveju, $\tau_1 - \tau_3$ reikšmės toliau mažėja dinaminio režimo kritimo stadijoje, kai $v_{\text{žad}} > 1.84$ m/s, ir tampa trumpesnės nei tikrinis pusperiodis τ_i . Tai rodo, kad šioje kritimo stadijoje magnetinės sąveikos pobūdis keitiklio paleidimo iš deformuotos padėties metu (t. y. PV fazės pabaigoje τ_3) pasikeičia iš iki tol veikusio magnetinio slopinimo poveikio į keitiklio deformavimą spartinantį magnetinio forsavimo poveikį, kuris verčia keitiklį judėti greičiau nei jis gali dėl savo natūralaus dinamiškumo (tikrinio dažnio f_i).

Įvertinus skaitinius F_y rezultatus (2.7 (b) pav.) gauta, kad efektyviausiais magnetinio sužadinimo režimas ties $1.44 < v_{\text{žad}} < 1.84$ m/s atitinka $0.36 < t_{\text{rev}} / T_i < 0.46$ arba $0.73 < t(F_y)_{\text{UT}} / t(\text{PK})_K < 0.93$. Maksimalūs elektriniai signalai generuojami tada, kai $t_{\text{rev}} / T_i = 0.46$ arba $t(F_y)_{\text{UT}} / t(\text{PK})_K = 0.93$. Taip galima apibrėžti kriterijų, kurį tenkinant bus užtikrintas efektyviausias plokštuminio magnetinio sužadinimo režimas: vibracinio pjezogeneratoriaus efektyvumas maksimizuojamas tada, kai skersinės jėgos krypties reversijos trukmė t_{rev} (ar, atitinkamai, užaugimo trukmė $t(F_y)_{\text{UT}} = 0.5t_{\text{rev}}$) yra nežymiai trumpesnė nei keitiklio tikrinis pusperiodis τ_i (ar, atitinkamai, kilimo trukmė $t(\text{PK})_K = 0.5\tau_i = 0.25T_i$). Toliau didinamas sužadinimo greitis (šiuo atveju didesnis nei ~ 1.84 m/s) pernelyg sumažina jėgos užaugimo trukmę $t(F_y)_{\text{UT}}$ keitiklio kilimo trukmės $t(\text{PK})_K$ atžvilgiu, tai lemia vibroposlinkio / greičio pereinamųjų atsakų (1-osios formos skersinių virpesių amplitudžių) silpnėjimą (3.10 pav.) ir krentantį energijos generavimo efektyvumą (žr. kritimo stadija 3.7 ir 3.8 (b) pav.). Kartu su sužadinimo greičiu didėjantis veikiančių magnetinių jėgų užaugimo tempas dinaminio režimo kritimo stadijoje mažina 1-osios skersinių virpesių formos atsaką, tačiau intensyvina 2-osios skersinių virpesių formos atsaką. Siekiant užtikrinti efektyvų pjezogeneratoriaus veikimą aukštesnėmis virpesių formomis, būtina racionaliai segmentuoti keitiklio pjezoelektrinius sluoksnius [121, 129].

Bedimensinės magnetinių jėgų užaugimo trukmės $t(F_x)_{\text{UT}} / t(\text{PK})_K$ ir $t(F_y)_{\text{UT}} / t(\text{PK})_K$ gali būti traktuojamos kaip pamatiniai dinaminiai parametrai, nusakantys pjezogeneratoriaus veikimo efektyvumą. Bendruoju atveju, keitiklio deformavimo procese dominuojanti magnetinės jėgos komponentė kinta priklausomai nuo konkrečiame generatoriuje naudojamos magnetinės sužadinimo konfigūracijos tipo (plokštuminis ar ortogonalus [12]). Dėl to konkrečiam sužadinimo atvejui taikytina jėgos užaugimo trukmė turi būti nustatoma įvertinus dominuojančios deformavimo jėgos impulso pobūdį. Pavyzdžiui, varpo formos impulso atveju (F_x šiuo atveju), užaugimo trukmė yra nusakoma kaip jėgos (pagrindinio) užaugimo trukmė priekiniame impulso fronte $t(F_x)_{\text{UT}} = 0.5 t(F_x)_{\text{MI}}$ (2.2.1. sk., 2.6 (b) pav.). O pilno ciklo impulso atveju (F_y šiuo atveju), analizėje taikytina užaugimo trukmė atitinka $\frac{1}{2}$ jėgos krypties reversijos trukmės $t(F_y)_{\text{UT}} = 0.5t_{\text{rev}}$, t. y. trukmė, per kurią jėgos amplitudė sumažėja nuo pirmo piko iki nulio (2.6 (b) pav.). Akcentuojama, kad išnagrinėti efektyviausio magnetinio sužadinimo režimo esminiai principai ir kriterijai vienodai galioja tiek magnetinės traukos, tiek ir stūmos konfigūracijoms.

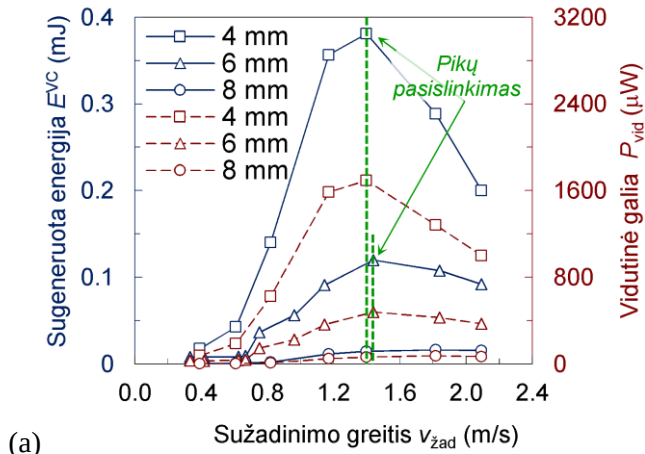
3.4.5. Magnetinio tarpelio poveikio analizė

Mažesnis tarpelis tarp varančiojo ir varomojo magneto padidina jų tarpusavio sąveikos jėgas (2.2.1. sk., 2.4 pav.), kurios lemia didesnius pjezokeitlikio vibroposlinkius, kartu su didesne elektrine galia. Pvz., sumažėjęs tarpelis d_{zad} nuo 6 mm iki 4 mm padidina elektrinę galią daugiau nei tris kartus (3.11 (a) pav.). d_{zad} kitimas keičia stacionarinės stadijos formą, kai, pvz., mažesnis d_{zad} apsprendžia smalesnį pereinamojo rezonanso grafiką, nurodantį didesnę jautrumą sužadavimo greičio v_{zad} pokyčiui. Didesnis d_{zad} sumažina jautrumą sužadavimo greičiui, t. y. leidžia padidinti pjezogeneratoriaus veikimo dažnio plotį, bet kartu lemia mažesnę generuojamą elektrinę galią. O mažėjantis d_{zad} šiek tiek paslenka amplitudes kairėn. Tai reiškia, kad norint pasiekti maksimalias generuojamos elektrinės galio vertes esant mažesniai tarpeliui tarp magnetų, reikia mažesnio sužadavimo greičio. Tai paaiškinama greitesniu jėgos užaugimu ties mažesniu d_{zad} , kai $t(F_x)_{\text{MI}}$ ir t_{rev} trumpėja (2.2.3. sk., 2.7 pav.). Galiausiai, mažėjantis d_{zad} ir didėjantis v_{zad} lemia $t^{P_{\text{max}}}$ trumpėjimą (3.2.1. sk., 3.3 (b) pav.), kurio metu pasiekama P^{max} (3.11 (c) pav.)

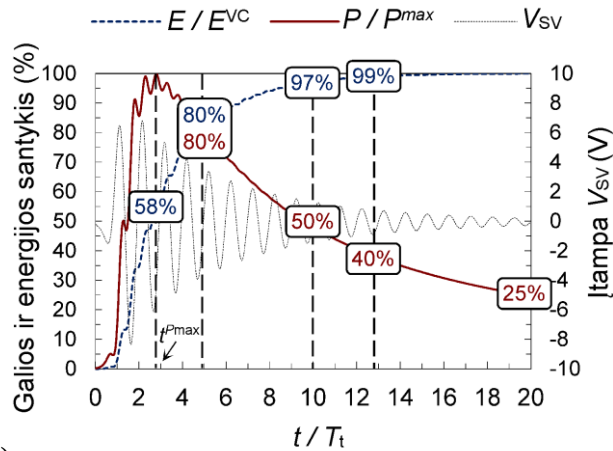
3.4.6. Daugiacyklio magnetinio sužadavimo analizė

Maksimalios elektrinių signalų reikšmės gautos pjezogeneratoriui veikiant pereinamajame rezonanse yra tokios (3.7 (a), 3.8 (b)): $P^{\text{PV}} = 650 \mu\text{W}$ ($E^{\text{PV}} = 0.01 \text{ mJ}$), $P^{\text{VC}} = 480 \mu\text{W}$ ($E^{\text{VC}} = 0.12 \text{ mJ}$) ir $P^{\text{max}} = 1940 \mu\text{W}$ ($E^{P_{\text{max}}} = 0.07 \text{ mJ}$). Akivaizdu, kad didžiausia dalis visos energijos (~93 %) yra sugeneruojama laisvųjų virpesių fazės metu. Jei veikimo ciklas yra nutraukiamas ties $t^{P_{\text{max}}}$ (maksimalios vidutinės galios pasiekimo momentas), visa sugeneruota energija iki to momento yra lygi šiek daugiau nei pusei ($E^{P_{\text{max}}} = 56 \%$) visos vieno veikimo ciklo energijos E^{VC} kiekio (3.10 (b) pav.). Priešingu atveju, jei energija yra generuojama viso t^{VC} metu, tada atitinkamai vidutinės galios praradimas yra žymiai didesnis ($P_{\text{av}} = P^{\text{max}} / P^{\text{VC}} = 4$), palyginti su energijos nuostoliais prieš tai aptartu atveju. Apie 80 % ir 99 % E^{VC} yra sugeneruojama atitinkamai $1/4t^{\text{VC}}$ (~ $5T_i$) ir $2/3t^{\text{VC}}$ (~ $13T_i$) laiko intervaluose, o atitinkama P_{av} yra lygi apie 80 % ir 40 % nuo P^{max} . Pavyzdžiui, jei kitas magnetinio sužadavimo įvykis prasidėtų viduryje nagrinėjamo ciklo $1/2t^{\text{VC}}$ ($10T_i$), tada pjezogeneratorius pagamintų apie 97 % nuo E^{VC} , kartu pasiekdamas $P_{\text{av}} = 0.5 P^{\text{max}}$ (3.11 (b) pav.). Tai leidžia teigti, kad projektuojamame biomechaninio pjezogeneratoriaus įrenginyje, veikiančiame pereinamojo rezonanso ir daugkartinio (sužadavimo dar kartą) sužadavimo režimu, neracionalu pilnai naudoti visos LV fazės (t. y. atsako fazės su palyginti silpnais beveik užgesusiais laisvaisiais virpesiais) ir galima būtų keitklį dar kartą sužadinti dar pilnai neužgesus laisviesiems virpesiams. T. y. būtų efektyviau racionaliai parinkti laiko intervalus tarp pakartotinių sužadimų taip, kad būtų pasiektas pageidaujamas kompromisas tarp pjezogeneratoriaus vidutinės galios ir energijos. Neabejotinai, yra rizika, kad pernelyg ankstyvas pakartotinis sužadimas (t. y. kai LV atsako amplitudės vis dar yra santykinai didelės, palyginti su PV atsako amplitudėmis) gali būti žalingas paskesnio sužadavimo proceso ir energijos generavimo efektyvumui. Pavyzdžiui, vibroposlinkio amplitudės ties ~ $5T_i$, ~ $10T_i$ ir ~ $13T_i$ yra atitinkamai ~2, ~6 ir ~17 kartų mažesnės, palyginti su maksimaliomis pereinamojo atsako amplitudėmis d_{i3} . Todėl daugiacyklio magnetinio

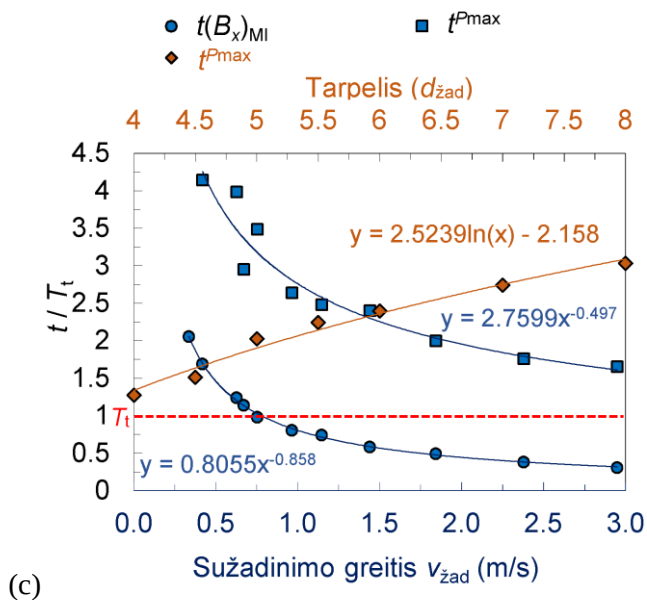
sužadavimo atveju laiko momentą $2/3t^{VC}$ ($\sim 13T_t$) galima rekomenduoti kaip santykinai saugų momentą pakartotiniam sužadinimui, kuris leidžia pasiekti $\sim 99\%$ visos galimos energijos kiekviename atskirame veikimo cikle (SPA).



(a)



(b)



3.11 pav. (a) Viso veikimo ciklo t^{VC} metu sugeneruotos visos energijos ir vidutinės galios priklausomybė nuo sužadavimo greičio ir skirtingų tarpelių d_{zad} . (b) Vidutinės galios ir visos energijos santykio priklausomybė nuo bedimensinių laiko intervalų santykio ($v_{zad} = 1.44$ m/s). (c) Bedimensinių laiko intervalų santykio priklausomybė nuo sužadavimo greičio ir tarpelio

3.5. Skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje, pasitelkus kombinuotą skaitinę-eksperimentinę tyrimų metodiką, nuodugniai išnagrinėti magnetinio sankybio pagrindu funkcionuojančio vibracinio energijos generavimo proceso pagrindiniai dėsningumai ir nustatyti kiekybiniai kriterijai, kuriais vadovaujantis buvo kuriamas dėvimo biomechaninio generatoriaus maketas (4 sk.).

Pagrindiniai skyriaus rezultatai:

1. Sudarytas daugiakanalis nekontaktinių matavimų stendas su pusiau automatiniu duomenų apdorojimu MS Excel aplinkoje, skirtas vykdyti magnetinio sankybio pagrindu veikiančių pjezogeneratorių kompleksinius eksperimentinius tyrimus, tam panaudojant sinchroniškai registruojamus dinامينius ir elektrinius / magnetinius sistemos parametrus.
2. Pjezogeneratoriaus veikimo režimams analizuoti ir juos apibūdinančioms priklausomybėms sudaryti buvo įvesti bedimensiniai kintamieji sužadavimo parametrai (dalinant iš keitiklio tikrinio periodo arba kilimo trukmės), kurie apskaičiuoti taikant tiek matavimų duomenis (bedimensinė magnetinio impulso trukmė), tiek ir modeliavimo rezultatus (bedimensinės magnetinių jėgų impulsų ar reversijos trukmės bei jėgų užaugimo trukmės). Bedimensinėje formoje pateikti keitiklio dinamikos ir energijos generavimo tyrimo rezultatai gali būti nesunkiai pritaikomi kuriant efektyvius įvairios magnetinės konfigūracijos bei skirtingo

tikrinio dažnio pjezogeneratorius, kurie veikia bekontaktinio mechaninio dažnio aukštinimo principu.

3. Keičiant plokštuminio magnetinio sužadinimo režimo parametrus – varančiojo magneto greitį ir tarpelį – buvo nustatyti svarbiausi magnetinio sužadinimo dinamikos principai bei įvesti ir apskaičiuoti tiek ribinio, tiek efektyviausio sužadinimo kiekybiniai kriterijai, kuriuos tenkinant pjezogeneratorius pasiekia santykinai aukštą arba maksimalią galią:

- 3.1 Siekiant išvengti itin neefektyvaus pjezogeneratoriaus veikimo (t. y. kvazistatinio / pereinamojo režimų), būtina pasiekti tokį ribinį varančiojo magneto greitį, kuris sudarytų impulsinio tipo pereinamojo sužadinimo sąlygas, t. y. būtina pasiekti, kad skersinės jėgos reversijos ir ašinės jėgos impulso bedimensinės trukmės (atitinkamai, t_{rev} / T_t ir $t(F_x)_{MI} / T_t$) taptų mažesnės už vienetą. Tenkinant šią ribinę sužadinimo sąlygą, pjezogeneratorius pradeda veikti dinaminio režimu, taip gamindamas santykinai didelę elektros energijos kiekį.

- 3.2 Norint pasiekti efektyviausią magnetinio sužadinimo režimą (keitiklio pereinamąjį rezonansą) ir taip maksimizuoti pjezogeneratoriaus galią, varančiojo magneto greitis turi užtikrinti, kad skersinės jėgos reversijos ir ašinės jėgos impulso trukmės būtų tik neženkliai mažesnės už keitiklio tikrinį pusperiodį arba bedimensinės jėgos užaugimo trukmės $t(F_y)_{UT} / t(PK)_K$ ir $t(F_x)_{UT} / t(PK)_K$ būtų tik neženkliai mažesnės už vienetą (ne mažiau už ~ 0.9). Nustatyta, kad efektyviausio sužadinimo režime generuojama vidutinė galia ir suminė energija yra iki ~ 15 ir ~ 3 kartų didesnė nei, atitinkamai, kvazistatiniame ir pereinamajame režimuose.

- 3.3 Dinaminių ir elektrinių pjezogeneratoriaus charakteristikų matavimo rezultatų palyginimas leido identifikuoti, kad efektyviausias magnetinio sužadinimo režimas pasiekiamas keitikliui veikiant pereinamajame rezonanse, kurio metu generuojamos maksimalios vibroposlinkio / greičio atsako amplitudės ir kartu didžiausia galima sistemos elektrinė galia. Nustatyta, kad pereinamojo rezonanso metu keitiklio virpesių dažnis pereinamojo atsako priverstinių ir laisvųjų virpesių fazėse iš esmės tampa lygus keitiklio pirmosios skersinių virpesių formos dažniui f_1 . Tai rodo, kad pjezogeneratoriui veikiant pereinamajame rezonanse, jo elektrinė galia gali būti maksimizuojama naudojant tik vieną pastovią suderintą varžą, taip apsieinant be sudėtingo elektroninio apkrovos varžos reguliavimo (t. y. nebūtinai maksimalios galios režimo automatinis palaikymas).

- 3.4 Pjezogeneratorius veikdamas pereinamajame rezonanse suderintos varžos sąlygomis pasiekia ~ 2 mW galią ir tuo metu gamina ~ 0.07 mJ elektros energijos. Akcentuojama, kad tokiu atveju didžiausia dalis visos energijos (~ 93 %) yra sugeneruojama laisvųjų virpesių fazės metu. Eksperimentų rezultatai rodo, kad pjezogeneratoriuje, veikiančiame pereinamojo rezonanso ir daugkartinio (pakartotinio) sužadinimo režimu, neracionalu pilnai naudoti visą laisvųjų virpesių fazę. Rekomenduojama keitiklį pakartotinai sužadinti dar pilnai neužgesus laisviesiems virpesiams, pavyzdžiui, laiko momentu, atitinkančiu ~ 13 tikrinių periodų, taip

sugeneruojant absoliučią daugumą (~99 %) energijos, kurią įmanoma pagaminti per vieną įrenginio veikimo ciklą.

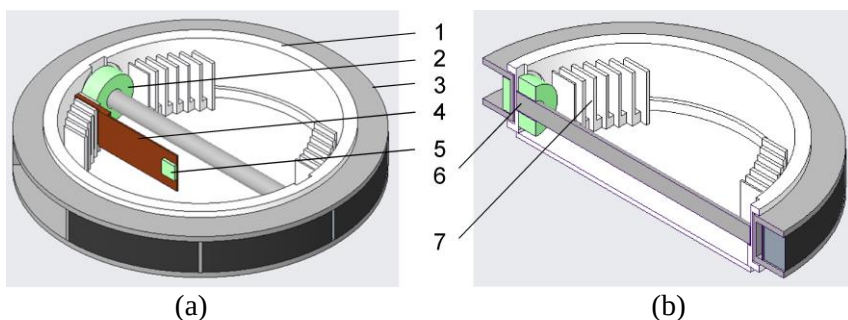
4. Eksperimentinių ir skaitinių tyrimų duomenų pagrindu atskleisti magnetinio sužadinimo ypatumai rodo, kad magnetinis sužadinimas yra kompleksinis pereinamojo sužadinimo atvejis, kurį nusako sudėtingos formos magnetinių jėgų impulsai. Jiems būdingos didesnio ar mažesnio masto jėgos krypties reversijos bei formos asimetrijos (nevienodas jėgos kitimo tempas skirtinguose impulso frontuose / stadijose). Nustatyta, kad skersinės magnetinės jėgos impulso deaktivacijos stadija, kurios metu vyksta varančiojo ir varomojo magneto lėtas atsikabinimas, daro neigiamą įtaką energijos generavimo efektyvumui, kadangi pasireiškia kaip papildomas virpesių slopinimas. Šis magnetinio slopinimo efektas veikia plačiame sužadinimo greičių intervale ir trukdo pasiekti aukštesnį sužadinimo impulsyvumą, kuris būtinas didelės amplitudės laisviesiems virpesiams generuoti (pasiekti dinaminį pjezogeneratoriaus veikimo režimą).

4. BIOMECHANINIS PJEZOGENERATORIUS SU INTEGRUOTOMIS MAGNETINIO ĮGREITINIMO IR SINCHRONIZUOTO DAUGIAMAGNETINIO SUŽADINIMO POSISTEMĖMIS

Šiame skyriuje pateiktas skaitinis magneto-pjezo-mechaninis baigtinių elementų modelis, skirtas visapusiškai daugiafiziškinių charakteristikų nustatymui projektuojamame sinchronizuotame daugiamagnetinio sužadavimo (SDS) pjezogeneratoriuje. Siekiant įvertinti magnetų įgreitinimo posistemę, pateikta kombinuota magnetostatinio skaičiavimo metodika, sujungianti skaitinio ir analitinio modeliavimo metodus. Pagal skaitinius rezultatus pagamintas ir ištestuotas pjezogeneratoriaus maketas, sujungiantis SDS ir magnetų įgreitinimo efektyvinimo metodus, jis verifikuotas ir detaliai ištirtas skaitinio modeliavimo pagrindu. Pateiktos magnetinio sužadavimo impulso ir pjezokeitiklio dinaminio bei pereinamojo atsakų charakteristikos, išanalizuotos jų priklausomybės nuo sužadavimo greičio ir atstumo tarp sužadavimo magnetų.

4.1. Biomechaninio pjezogeneratoriaus maketo konstrukcija

Suprojektuoto ir pagaminto biomechaninio vibracinio pjezoelektrinio generatoriaus (pjezogeneratoriaus) maketo konstrukcija pavaizduota 4.1 pav. Pagrindiniai komponentų parametrai pateikti 4.1 lent. Įrenginio veikimas pagrįstas energijos generavimu pasitelkiant PZT-5A pagrindu, realizuotu ir magnetinio sankybio jėgų deformuojamu pjezoelektriniu keitikliu (keitikliu). Tiksliau, tam naudojamas bekontaktis virpesių dažnio aukštinimo (angl. *frequency up-conversion*) metodas, kuriame panaudoti du žiediniai varantieji magnetai (išorinis diametras $\varnothing 15$ mm, vidinis $\varnothing 6$ mm, plotis 6 mm) ir vienas stačiakampio gretasienio formos varomasis ($5 \times 2.5 \times 2$ mm) magnetas. Tai leidžia efektyviai sužadinti keitiklį aukštos amplitudės gėstančiais laisvaisiais virpesiais ultrazemadažnio (1-10 Hz) biomechaninio žadinimo metu. Esant santykinai lėtiems žmogaus kūno dalių judesiams, šis pjezogeneratorius visada pasiekia dinaminį veikimo režimą, kai keitiklis veikia pereinamojo rezonanso aplinkoje ir užtikrina maksimalią elektrinę galią (3.4. sk.). Varančiųjų ir įgreitinimo magnetų matmenys parinkti atsižvelgus į jų stiprumą, jie būtini siekiant aukšto varančiųjų magnetų judėjimo greičio. Parinktų magnetų dydis lėmė bendrą įrenginio aukštį, o jų skleidžiamų magnetinio lauko ribos – bendrą projektuojamo pjezogeneratoriaus diametrą (detaliau žiūrėti 4.2.1. skyriuje). Siekiant maksimaliai išnaudoti projektuojamo pjezogeneratoriaus konstrukcijos tūrį, parinktas didžiausių matmenų (28.6×17.7 mm) telpantis, komerciškai pasiekiamas pjezo keitiklis, pasižymintis aukštu elektromechaninio ryšio koeficientu ir aukšta generuojama įtampa.



4.1 pav. Suprojektuoto pjezogeneratoriaus 3D modelis (a) ir (b) jo pjūvis: 1 – stacionarus korpusas, 2 – varantysis magnetas, 3 – inercinis rotorius, 4 – keitiklis, 5 – keitiklio (varomasis) magnetas, 6 – įgreitinimo magnetų grupė pritvirtinta aplink išcentrinio rotoriaus perimetrą, 7 – keitiklio tvirtinimo lizdai $d_{\text{žad}}$ reguliavimui (žr. principinę schemą 4.2 pav.)

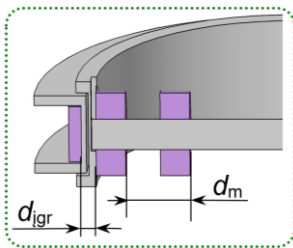
4.1 lentelė. Pjezogeneratoriaus matmenų, medžiagų ir veikimo parametrai [130-132].

Parametrai	Mat. vnt.	Keitiklis	Magnetai
PZT-5A sluoksniai:			
ilgis ℓ_{pzt}	mm	28.6	–
plotis w_{pzt}	mm	17.7	–
storis t_{pzt}	mm	0.134	–
Pasyvus (žalvaris) sluoksnis:			
ilgis ℓ_{pag}	mm	28.6	–
plotis w_{pag}	mm	17.7	–
storis t_{pag}	mm	0.123	–
Varomasis magnetas:			
ilgis ℓ_{KM}	mm	–	5
plotis w_{KM}	mm	–	2.5
storis t_{KM}	mm	–	2
masė m_{KM}	g	–	0.19
Varantysis magnetas:			
Išorinis diameteras D_{IS}	mm	–	15
Vidinis diameteras D_{VID}	mm	–	6
storis t_{VM}	mm	–	6
masė m_{VM}	g	–	6.8
Įgreitinimo magnetas:			
ilgis ℓ_{IM}	mm	–	10
plotis w_{IM}	mm	–	10
storis t_{IM}	mm	–	2
masė m_{IM}	g	–	1.5
Jungo modulis:			
E_{pag}	GPa	120	
$E_{\text{KM}} = E_{\text{VM}}$	GPa		160
Keitiklio dažnis f_0 (be magnetinės masės)	Hz	270	–
Elektrinė talpa C_{PK}	nF	80	–
Mechaninis dinamiškumo koeficientas Q_m (slopinimo laipsnis $\zeta_m \approx 1/2Q_m$) matuotas trumpos grandinės sąlygomis	–	28.55 (0.018)	–

Pjezogeneratoriaus konstrukcijose racionaliai integruotos trys posistemės, kurios atlieka tokias funkcijas: I) elektros energijos generavimas keitiklyje dėl tiesioginio pjezoefekto, II) varančiojo(-ų) magnetų įgreitinimas (angl. *velocity amplification*), III) SDS. Daug autorių yra pateikę energijos generavimo įrenginius ar eksperimentinius tyrimo standus, kuriuose energijos generavimo procese pasitelkiamas vienkartinis magnetinis sužadinimas vieno ciklo metu naudojant tik vieną varantįjį magnetą [12, 122, 123]. Mokslinėje literatūroje labai menkai ištirtas pakartotinio sužadinimo poveikis, tačiau tai yra labai svarbus įrenginio veikimo aspektas, kuris iš esmės lemia įrenginio efektyvumo lygį. Pavyzdžiui, pjezogeneratoriuje realizuotas SDS metodas leidžia varomiesiems magnetams pakartotinai sužadinti keitiklį kelis kartus per vieną veikimo ciklą (vieną biomechaninį judesį). Šis pakartotinio sužadinimo metodas yra ypač naudingas norint padidinti keitiklio virpesių amplitudę ir prailginti jos trukmę. O pasiūlytasis ir pjezogeneratoriuje įdiegtas magnetinio įgreitinimo metodas suteikia pakankamai aukštą ir beveik pastovų varančiojo magneto greitį (tolyginis tiesiaiegis judėjimas), kuris užtikrina keitiklio veikimą pereinamajame rezonanse plačiame biomechaninio sužadinimo parametų intervale.

Pjezogeneratorius sudarytas iš: stacionariame korpuse pritvirtinto keitiklio, kurio gale uždėta magnetinė masė (varomasis magnetas); centrine ašimi slankiojančio varomojo magneto, kurio judėjimą lemia aplink išcentrinio rotoriaus perimetrą pritvirtinta įgreitinimo magnetų grupė (4.1 pav.).

4.1.1. Varančiųjų magnetų įgreitinimo posistemė



4.2 pav. Pjezogeneratoriaus magnetinio įgreitinimo posistemės parametrai:

d_{igr} – tarpelis tarp įgreitinimo ir varančiojo magnetų, d_m – tarpelis tarp varančiųjų magnetų SDS atveju

Pjezogeneratoriaus posistemę, kuri realizuoja pasiūlytą magnetinio įgreitinimo metodą, sudaro aplink išcentrinį rotorių apklijuoti kvadratiniai ($10 \times 10 \times 2$ mm) įgreitinimo magnetai (4.1 pav.). Magnetų poliarizacija parinkta tokia, kad pasisukus rotorui, įgreitinimo ir varančiojo (SDS atveju – varančiųjų) magnetų poliai stumtų vienas kitą. Tokiu atveju varantysis(-ieji) magnetai pradeda judėti iš savo pozicijos dideliu greičiu, kuris priklauso nuo magnetinės stūmos jėgos, o ši – nuo magnetų parametų ir tarpelio d_{igr} (4.2 pav). Taip galima pasiekti pakankamai aukštą ir beveik pastovų varančiojo magneto (sužadinimo) greitį esant plačiam išcentrinio rotoriaus sukimosi greičio intervalui. Šis įgreitinimo metodas leidžia pasiekti pjezogeneratoriaus dinaminį veikimo režimą, kurio metu generuojamų magnetinių jėgų impulsų laikinių charakteristikų reikšmės (jėgų užaugimo trukmės) užtikrina sistemoje pereinamojo rezonanso (ar jam artimas) sąlygas, t. y. keitiklio virpesių amplitudės maksimaliai išauga, o virpesių dažnis pereinamojo atsako priverstinių ir laisvųjų virpesių fazėse iš esmės susilygina (t. y. tampa lygus keitiklio 1-osios skersinių virpesių formos dažniui (šiuo atveju $f_i = 157$ Hz)). Kitas pasiūlytos pjezogeneratoriaus konstrukcijos esminis pranašumas yra

galimybė naudoti pastovią suderintą apkrovos varžą visiems biomechaninio žadinimo atvejams (3.4.4. sk.).

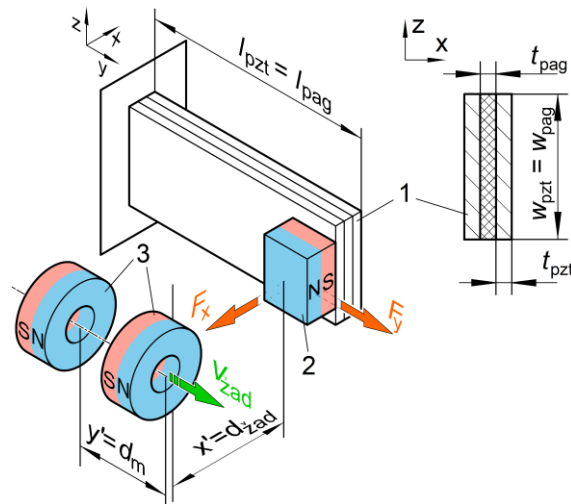
4.1.2. Sinchronizuoto daugiamagnetinio sužadinimo posistemė

4.3 pav. pateikta įrenginyje realizuoto sinchronizuoto daugiamagnetinio sužadinimo metodo veikimo principinė schema, kurioje keitiklis lenkiamas statmenai varančiojo magneto judėjimo kryptiai xy plokštumoje (ortogonalioji konfigūracija) dėl kelių varomųjų magnetų poveikio. Visų magnetų geometriniai centrai sulygiuoti pagal z ašį (be pasislinkimo z ašies kryptimi). Pagrindiniai geometriniai parametrai, apibūdinantys SDS posistemę, yra tarpeliai $d_{\text{žad}}$ ir d_m . $d_{\text{žad}}$ – atstumas tarp keitiklio (varomojo) magneto ir varančiųjų magnetų paviršių x ašies kryptimi, kai vienas iš varančiųjų magnetų yra sulygiuotas su keitiklio magnetu y ašimi. Nagrinėjamo ortogonaliojo magnetinio sužadinimo atveju vienu metu sąveikauti gali tik viena magnetų pora, t. y. varantysis magnetas ir vienas iš varomųjų magnetų. d_m – atstumas tarp varančiųjų magnetų, kai magnetai sulygiuoti x ašies ir persislinkę y ašies kryptimis. Geometriniai ($d_{\text{žad}}$, d_m) ir kinematinis ($v_{\text{žad}}$) parametrai lemia magnetinio sužadinimo režimą ir kartu dažnio aukštinimo proceso sąlygas, generuojamo pereinamojo atsako charakteristikas, tarp jų – pagrindines įrenginio elektrines charakteristikas: generuojamą vidutinę galią ir suminę pagaminamą energiją.

Siūlomas SDS metodas – pakartotinis sužadinimas su keliais ($n = 1, 2$) varomaisiais magnetais – yra sudėtingas žadinimo būdas, nulemtas kelių skirtingų bei skirtingose ašyse (nagrinėjamu atveju x ir y) veikiančių magnetinių jėgų komponentių. Tinkamo SDS metodo panaudojimo sudėtingumą lemia šie veiksniai: i) būtina užtikrinti tinkamai sinchronizuotą keitiklio sužadinimą (t. y. užtikrinti, kad SDS posistemė efektyviai atlieka pagrindinę savo funkciją), ii) būtina pasiekti staigų impulsinį magnetinį sužadinimą su visais varomaisiais magnetais, iii) būtina minimizuoti / eliminuoti galimą neigiamą magnetų įtaką, kai veikiantys magnetiniai laukai gali slopinti keitiklio laisvuosius virpesius. Sužadinimo sinchronizacijos lygis reguliuojamas atstumu d_m tarp varančiųjų magnetų, kuris turi būti parinktas tiksliai įvertinus keitiklio dinaminio atsako priklausomybes nuo $v_{\text{žad}}$ ir $d_{\text{žad}}$ parametrų, t. y. būtina įvertinti magnetinių jėgų amplitudines ir laikines charakteristikas.

Tradicinio (tiesinio) vibracinio generatoriaus atveju yra naudojamas nusistovėjęs kinematinis žadinimas harmoniniu dėsniu $F(t) = F_0 e^{i(\omega t + \phi)}$ arba $F(t) = F_0 \sin(\omega t + \phi)$, čia F_0 – maksimali apkrovos amplitudė, ω – žadinimo dažnis, ϕ – harmoninio žadinimo fazė. Tokiu atveju keitiklio harmoninio atsako efektinė įtampa pagal klasikinę elektrotechnikos teoriją yra lygi $V_{\text{rms}} = V_{\text{pik}} (1 / \sqrt{2})$, čia V_{pik} – sugeneruotos įtampos amplitudės reikšmė. Dinamikos kontekste galutinė generuojama galia priklauso nuo harmoninio sužadinimo dažnio ir amplitudės, o elektrotechniniu atžvilgiu – nuo išorinės elektrinės apkrovos sąlygų (ar tinkamai suderinta apkrovos varža). Bendruoju atveju, maksimali kinematiškai žadinamo pjezogeneratoriaus galia pasiekama rezonanso režime kartu užtikrinant tai, kad keitiklio harmoninio atsako amplitudės yra saugios medžiagų atsparumo prasme [124]. Nagrinėjamo pereinamojo (impulsinio) sužadinimo atveju minėti teoriniai principai gali būti tinkamai adaptuoti SDS atvejui, t. y. šį procesą galima realizuoti

taip, kad keitiklis būtų žadinamas keliais vienas po kito veikiančiais impulsais, kurių bendra forma atitiktų sinuso arba jam artimą dėsnį [125]. Toliau nagrinėjami ir tarpusavyje lyginami tradicinis *vienamagnetinis* ir pasiūlytas *daugiamagnetinis* keitiklio sužadinimo atvejai. Pastarasis pjezogeneratoriaus makete yra realizuotas su dviem varomaisiais magnetais (4.3 pav.), tačiau pats metodas gali būti praplėstas panaudojant didesnį skaičių magnetų. Taigi keliama hipotezė, kad SDS metodas leis efektyviai sužadinti keitiklį kelis kartus per vieną veikimo ciklą, dėl to keli magnetinio sužadinimo impulsai sustiprins pereinamąjį atsaką, palyginti su vienamagnetiniu sužadinimu, o tai, savo ruožtu, padidins generuojamą vidutinę galią ir suminę energiją.



4.3 pav. Synchronizuoto daugiamagnetinio sužadinimo metodo principinė schema: 1 – bimorfinis keitiklis, 2 – magnetinė masė (varomasis magnetas), 3 – varantieji magnetai (v_{zad} – tiesinis varančiųjų magnetų greitis, d_{zad} – atstumas tarp varomojo ir varančiųjų magnetų, d_m – atstumas tarp varančiųjų magnetų, l_{pzt} ir w_{pzt} – keitiklio ilgis ir plotis, t_{pzt} – pjezokeraminio sluoksnio storis, t_{pag} – pasyviojo konstrukcinio sluoksnio storis)

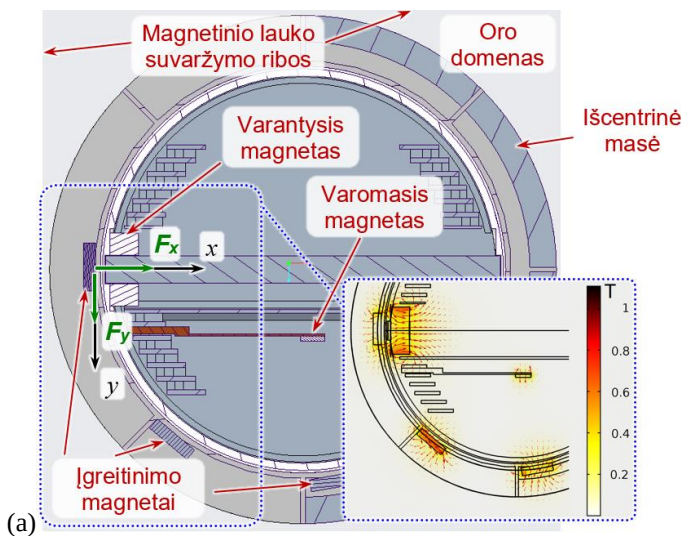
4.2. Synchronizuoto daugiamagnetinio sužadinimo ir magnetinio įgreitinimo procesų tyrimas

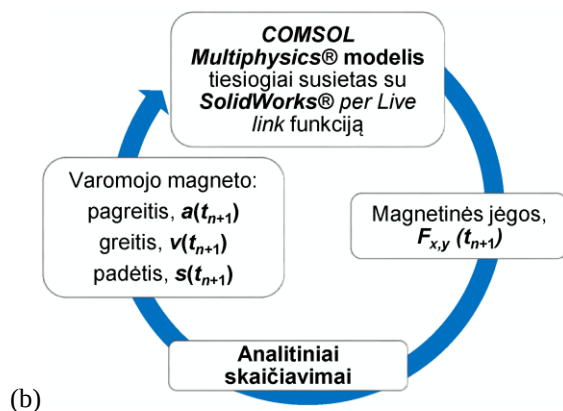
4.2.1. Skaitinis-analitinis magnetų įgreitinimo modelis

Siekiant įvertinti magnetų įgreitinimo posistemę, buvo pasitelkta kombinuota magnetostatinio skaičiavimo metodika, sujungianti skaitinio ir analitinio modeliavimo metodus. Pagal 4.4 (b) pav. pateiktą šios metodikos schemą SolidWorks® terpėje buvo sudarytas 3D pjezogeneratoriaus konstrukcijos modelis, kuris per „Live Link“ funkciją buvo integruotas į COMSOL Multiphysics® (4.4 (a) pav.). Modeliavimas per „Live Link“ leido ne tik tiesiogiai realiu laiku keisti 3D modelio konstrukcinius parametrus atsižvelgiant į tolimesnius skaitinės analizės rezultatus, tačiau ir suteikė galimybę įvertinti magnetinių laukų pasiskirstymą

projektuojamame įrenginyje. Skaitiniame 3D magnetostatiniame modelyje panaudotas “AC/DC: Magnetic Fields, No Current” modulis. Modelis leido sudaryti F_x ir F_y magnetinių jėgų kitimo priklausomybes nuo magnetų poslinkio pasislinkimo x ir y ašių kryptimis (4.4 (a) pav. kai $z = 0$). SolidWorks® programoje parengtas erdvinis konstrukcijos modelis patalpintas $150 \times 150 \times 80$ mm oro srityje, kuri taip pat apibrėžia magnetinio lauko izoliacijos ribas ($\mathbf{n} \cdot \mathbf{B} = 0$). Oro srities dydis parinktas toks, kad jame tilptų suprojektuoto įrenginio modelis. Magnetostatinio modelio tinklelis sudarytas iš apytiksliai 900 000 tetraedrinių baigtinių elementų, kurių dydis artėjant prie magnetinių komponentų paviršių buvo palaipsniui sumažintas. Ašinė F_x ir skersinė F_y jėgų impulsų formų žemėlapiai analizuoti x kryptimi nuo 0 iki 10 mm, y kryptimi nuo -25 iki 25 mm.

Toliau skaičiuotas įgytas varančiojo magneto pagreitis. Pasitelkus kombinuoto skaitinio-analitinio modeliavimo schemą (4.4 (b) pav.), atsižvelgus į įgreitinimo ir varančiojo magnetų tarpusavio padėtį ir jėgų žemėlapių vertes, apskaičiuojamas įgytas varančiojo magneto pagreitis pagal dinamikos lygtį $a(t_n) = F(t_n)/m$, čia $a(0)$ – varančiojo magneto pagreitis įgytas pradiniu momentu, $F(0)$ – magnetinės jėgos vertė pradiniu momentu, m – varančiojo magneto masė. Kadangi analizuojamoje sistemoje dominuoja magnetinės jėgos, o varančiojo magneto judėjimas įrenginyje santykinai trumpas, slydimo trinties ir sunkio jėgos nuostoliai nebuvo vertinami. Toliau magneto greitis ir padėtis apskaičiuojami pagal $v(t_{n+1}) = v(t_n) + a(t_{n+1}) \times t_{n+1}$ ir $s(t_{n+1}) = s(t_n) + t_{n+1}/2 \times (v(t_n) + v(t_{n+1}))$, čia $v(t_n)$ – pradinis varančiojo magneto greitis; $v(t_{n+1})$ – greitis įgytas po Δt , $s(t_n)$ – pradinė magneto padėtis, $s(t_{n+1})$ – magneto padėtis po Δt , t_{n+1} – laiko intervalo žingsnis Δt . Atlikus n iteracijų apskaičiuojamas judančio magneto greitis ir padėtis laike nuo įgreitinimo pradžios.

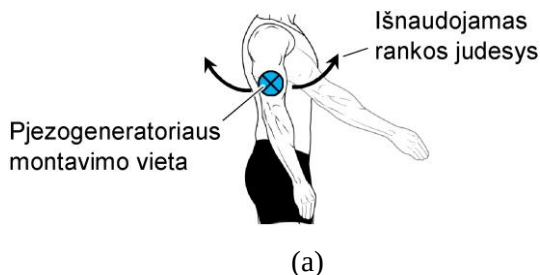


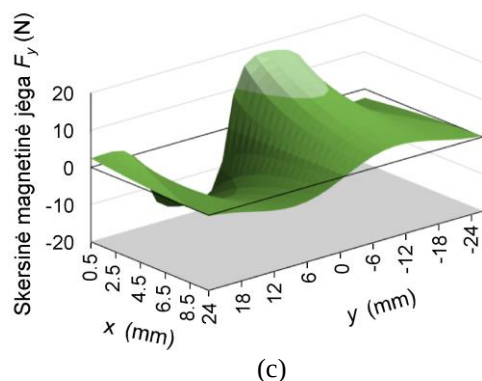
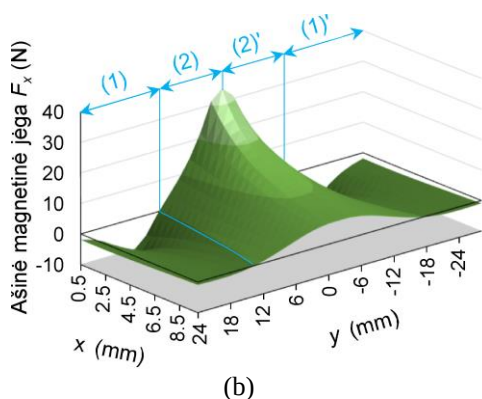


4.4 pav. (a) Pjezogeneratoriaus konstrukcijos erdvinis modelis, integruotas COMSOL aplinkoje su pavaizduotu magnetinio lauko srauto tankio B pasiskirstymu erdvėje. (b) Varančiojo magneto įgreitinimo proceso tyrimui skirtos kombinuotos skaitinės-analitinės magnetostatinio modeliavimo metodikos schema. F_x ir F_y – ašinė ir skersinė magnetinės jėgos, atitinkamai

4.2.2. Magnetinio įgreitinimo proceso skaitinis-analitinis tyrimas

4.5 pav. iliustruoja kombinuoto skaitinio-analitinio skaičiavimo rezultatus – įgreitinimo magneto jėgų F_x ir F_y impulsų formų priklausomybę nuo varančiojo magneto padėties x ir įgreitinimo magneto padėties y atžvilgio. Kadangi svari magnetų sąveika prasideda esant mažam tarpusavio atstumui, traktuojama, kad ant besisukančio rotoriaus priklijuotas įgreitinimo magnetas priartėjęs prie varančiojo nagrinėjamas kaip tiesinė linija – y kryptimi – judantis kūnas. Priartėjęs įgreitinimo magnetas generuoja kintančias (netiesiškai didėjančias) jėgų komponentes, kurios nustumia varantįjį magnetą. Magneto įgreitinimą lemia tik F_x jėgos komponentė, o F_y priešinasi rotoriaus sukimuisi. Efektyviai funkcionuojančiame įrenginyje išcentrinis rotorius turi įveikti maksimalią $F_y = 17.5$ N jėgą (realizuoto generatoriaus maketo atveju). Įvertinus pjezogeneratoriaus konstrukciją (pvz., rotoriaus išcentrinio korpuso skersmenį), montavimo ant kūno poziciją ir tos kūno dalies (pvz., žasto) judėjimo pobūdį (4.5 (a) pav.) [126, 127] į pjezogeneratoriuje paruoštas korpuso ertmes buvo įmontuota 200 gramų pusbėnulių formos išcentrinė masė.





4.5 pav. (a) Pjezogeneratoriaus montavimo vieta ant kūno, skaitiniu-analitiniu metodu apskaičiuotų (b) F_x ir (c) F_y jėgų žemėlapiai. F_x jėgos zonos nusakančios įgreitinimo posistemės veikimo stadijas: (1) aktyvacijos zona – varančiojo magneto pritraukimas į pradinę įgreitinimo padėtį, (2) ir (2)' reversinė zona – varančiojo magneto įgreitinimas, ir (1)' aktyvacijos zona rotorui sukantis priešinga kryptimi

Iš 4.5 (b-c) pav. matyti, kad F_x jėga yra didžiausia tada, kai magnetai susilygina ašimis ($y = 0$ mm). Magnetinės sąveikos procesas, kai (1) zonoje įgreitinimo magnetas pirmiausia pritraukia varantįjį magnetą prie savęs (nuo $y = -25$ iki $y = -12$ mm), o tik po to (2) zonoje pradeda stumti, užtikrina, kad varantysis magnetas visada bus pradinėje padėtyje prieš įgreitinimo procesą. T. y. įrenginyje varantysis magnetas galėtų pasislinkti iš pradinės padėties nuo atsitiktinio biomechaninio judesio, o norint pasiekti staigų varančiojo magneto įgreitinimą, itin svarbu užtikrinti vienodą nustatytą x poslinkį kiekvieno įgreitinimo metu. Būtent šis aptartas procesas, kai F_x keičia kryptį, padeda išspręsti minėtą problemą, nes varantysis magnetas pritraukiamas į pradinę padėtį ir taip užtikrinamas nuolatinis efektyvus įgreitinimo posistemės veikimas. Svarbu akcentuoti, kad varantysis magnetas įgyja vienodą greitį neatsižvelgiant į tai, kuria kryptimi yra sukamas išcentrinis rotorius, kadangi F_x impulsas yra simetrinis (t. y. (1)=(1)' aktyvacijos ir (2)=(2)' reversijos).

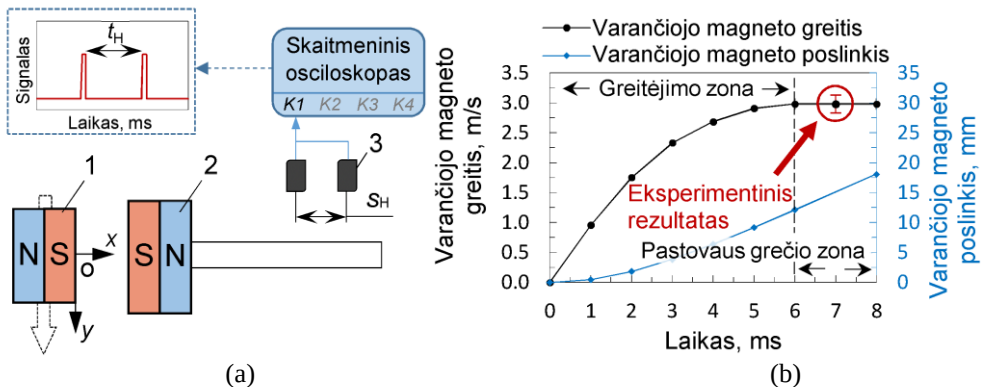
Siekiant apskaičiuoti varančiojo magneto greitį, pasitelkta kombinuota skaitinė-analitinė magnetostatinio modeliavimo metodika. Galimybė tiesiogiai per „Live Link“ susieti projektavimo programą SolidWorks su COMSOL leido sparčiai koreguoti įrenginio konstrukcijos parametą d_{igr} siekiant nustatyti pagrindinį išeities parametą $v_{žad}$. Buvo svarbu ištirti magnetinių laukų pasiskirstymą įrenginyje siekiant išvengti nepageidaujamo slopinamojo magnetinių laukų poveikio, t. y. buvo analizuojama, kaip užtikrinti, kad rotoriaus įgreitinimo magnetai nesąveikautų su pjezogeneratoriaus varomuoju magnetu ir neslopintų keitiklio laisvųjų virpesių. Galutiniame pjezogeneratoriaus maketo variante buvo pasiekta, kad keitiklis generuotų magnetiškai neslopinamą maksimalių amplitudžių pereinamąjį atsaką.

4.2.3. Eksperimentinis įgreitinimo posistemės efektyvumo patvirtinimas

Pagal skaitinę-analitinę modeliavimo metodiką apskaičiuotas varančiojo magneto pasiektas greitis yra 2.98 m/s (4.6 (b) pav.). Varančiojo magneto greičio

kitimo grafikas gali būti apibūdinamas dviem greičio zonomis: greitėjimo I ir pastovaus greičio II. Įgyjamas varančiojo magneto greitis didėja maždaug iki 6-tos ms nuo įgreitinimo pradžios (esamos 4.4 (a) pav. konfigūracijos atveju, kai $d_{igr} = 1.5$ mm, magnetų parametrai 2.1 lent.), vėliau magnetinių jėgų sąveika tarp įgreitinimo ir varančio magnetų nuslopsta dėl pernelyg didelio atstumo nutolusio varančiojo magneto ($d_{igr} > \sim 6$ mm). Varančio magneto įgytas greitis eksperimentiškai nustatytas pagal 4 (a) pav. pateiktą principinę schemą. Magnetų išdėstymas atitinka suprojektuotą pjezogeneratoriaus konstrukciją, kuri imituoja rotoriaus sukimąsi. Du Holo jutikliai buvo sumontuoti tokiu atstumu, kad varančiojo magneto greitis būtų nustatytas pastovaus greičio zonoje II (4.6 (b) pav.). Holo jutikliai per elektroninę grandinę prijungti prie skaitmeninio osciloskopo. Varančiajam magnetui praskriejus abu Holo jutiklius, išmatuotas laiko tarpas t_H tarp signalų pikų. Žinant atstumą tarp Holo jutiklių, s_H vidutinis greitis apskaičiuotas pagal $v_{vid} = s_H / t_H$. Varančiojo magneto pasiektas greitis eksperimentų metu varijuoja 2.83 – 3.13 m/s intervale (4.6 (b) pav.). Dėl rotoriaus sukimosi greičio pasireiškė greičio reikšmių išsibarstymas, t. y. greičiau priartėjantis įgreitinimo magnetas prie $y = 0$ mm šiek tiek stipriau (didesniu greičiu) išsviedžia varantįjį magnetą. Galutinio pjezogeneratoriaus konstrukcija parengta taip, kad keitiklis būtų sužadinamas būtent zonoje II, o pasiektas varančiojo(-ių) magneto(-ų) greitis užtikrintų keitiklio (beveik) rezonansinį atsaką.

Apibendrinant galima teigti, kad judėjimo greitį lemia magnetų stiprumas ir tarpelio d_{igr} dydis tarp įgreitinimo ir varančiojo magnetų. Pjezogeneratoriaus konstrukcijoje palikta galimybė reguliuoti tarpelį $d_{igr} = 2 - 6$ mm intervale ir taip, esant poreikiui, reguliuoti varančiojo magneto greitį efektyviausioms pjezogeneratoriaus sužadinimo sąlygoms pasiekti (pvz., pakeitus įrenginyje naudojamą keitiklio tipą ir / ar magnetinę masę).



4.6 pav. (a) Įgreitinimo eksperimentinio tyrimo stendo principinė schema ir (b) įgreitinto magneto greičio ir poslinkio priklausomybė nuo laiko. 1 – įgreitinimo magnetas, 2 – varantysis magnetas, 3 – Holo jutikliai, s_H – atstumas tarp Holo jutiklių, t_H – laiko intervalas tarp Holo jutiklių pikų, I – varančiojo magneto greitėjimo zona, II – pastovaus greičio zona

4.3. Biomechaninio pjezogeneratoriaus dinamikos skaitinis tyrimas

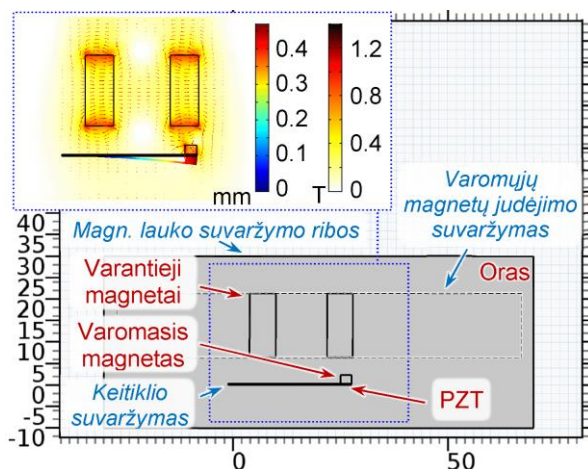
4.3.1. Magnetodinaminis baigtinių elementų modelis

COMSOL programos terpėje buvo sudarytas pjezogeneratoriaus 2D dinaminis pjezoelektrinis BE modelis. Sumodeliuota magnetinio sužadavimo konfigūracija pateikta 4.7 pav., komponentų parametrai – 2.1 lent. Nagrinėjamame pjezogeneratoriuje panaudotas bimorfinis keitiklis, kurio kairysis galas įtvirtinamas, o dešiniajame gale uždedamas papildomas svoris, kuris atitinka ant keitiklio priklijuoto varomojo magneto svorį ir kitus parametrus (analogiškus eksperimentiniam tyrimui), būtinus norint įvertinti pilno magnetinės sąveikos paveikto keitiklio dinaminį atsaką. Keitiklis sudarytas iš elektriškai įžemintų elektrodų pasyviame sluoksnyje ir dviejų išorinių elektrodų pjezokeraminiuose sluoksniuose (sujungimo ir elektrinė schemos analogiškos 1.3 (d) ir 3.5 pav., atitinkamai). Tokia konfigūracija leidžia gauti vienodo ženklo įtampą išoriniuose elektroduose, nors lenkimo metu gauti įtempimai sluoksniuose yra priešingo ženklo. T. y. kai viena sluoksnio dalis tempiama, kita – gniuždoma. Kadangi magnetinio sužadavimo (magnetinės sąveikos) charakteristikos kinta per laiką, todėl pjezogeneratorius analizuotas atliekant laiko skaičiavimus.

Sumodeliuoti du galimi pjezogeneratoriaus atvejai: 1M) generatorius su vienu varomuoju magnetu, 2M) generatorius, veikiantis SDS režimu, t. y. su dviem varomaisiais magnetais. Šių BE modelių realizavimui panaudoti keturi COMSOL fizikiniai moduliai: i) konstrukcinės analizės modulis (angl. *Solid Mechanics*), ii) pjezoelektrinis modulis (angl. *Piezoelectric Effect*), iii) “AC/DC” modulis, iv) elektrinių grandinių modulis (angl. *Electrical Circuit*). Keitiklis buvo standžiai įtvirtintas kairiajame gale (4.7 pav.). Varomojo(-ųjų) magneto(-ų) jėgų poveikis keitikliui daromas varomojo magneto(-ų) judesio y ašies kryptimi, o x ašimi judėjimas buvo suvaržytas. Magnetodinaminei sąveikai įvertinti į “AC/DC” fizikinį modulį buvo integruotas papildomas „Judančio tinklelio“ (angl. *Moving mesh*) funkcinis papildinys su jame įdiegtu Lagranžo-Oilerio skaičiavimo metodu (angl. *Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)* [128]). Šio papildinio reikėjo norint atlikti rezultatyvius skaičiavimus, kuriuose kieto kūno (varančiojo magneto) judesio amplitudžių reikšmės labai didelės, palyginti su oro srities tinklelio elementų matmenimis. Analogiškai 3 skyriui, keitiklio elektrinės charakteristikos įvertintos atsižvelgiant į jo varžos $R_{opt} = 1/2\pi f_c C_{PK}$ ir talpos $C_{PK} = (1/2t_{pzt}) \epsilon_0 \epsilon_{33} W_{pzt} l_{pzt}$ parametrus elektrinės grandinės modulyje.

Modeliuojamas keitiklis su magnetais buvo patalpintas stačiakampėje oro srityje, kuri taip pat apibrėžia magnetinių laukų suvaržymo ribas ($\mathbf{n} \cdot \mathbf{B} = 0$). Oro srities dydis yra 60×40 mm, kad jame tilptų du varomieji magnetai su nagrinėjamu tarpeliu d_m , kuriems užtektų pakankamai vietos judėjimui 50 mm y -ašies kryptimi. Taip pat reikėjo palikti pakankamai laisvos vietos nuo modeliuotų magnetų kraštinių iki oro suvaržymo ribos siekiant išvengti netikslių magnetinio lauko B verčių koncentracijos arti suvaržymo ribos. Svarbu paminėti, kad oro sritis buvo atjungta “Solid Mechanics” modulyje siekiant išvengti oro srities BE tinklelio performavimo kiekvienu keitiklio poslinkio perskaičiavimo iteracijos metu ir taip sutaupyti daug laiko resursų, skirtų skaičiavimuose. Šis oro srities atjungimas neturėjo esminės įtakos skaičiavimų

tikslumui. Apskritai paėmus, magnetodinaminiai skaitiniai tyrimai atlikti trimis tarpusavyje susijusiais etapais: 1) magnetinių jėgų amplitudinių ir laikinių parametrų apskaičiavimas (naudojamas “Moving Mesh”), 2) apskaičiuotų magnetinių jėgų poveikio keitikliui įvertinimas ir 3) keitiklio elektrinių charakteristikų įvertinimas. Svarbu paminėti, kad nagrinėjamas modelis skaičiuoja magnetines jėgas dvimatėje erdvėje, dėl to magnetų geometriniai parametrai turėjo būti atitinkamai modifikuoti (pvz., žiedo formos varantysis magnetas dvimačiu atveju transformavosi į stačiakampį gretasienį). Toks modifikavimas pasiteisino nes, atlikus palyginimą su eksperimentiškai verifikuotu magnetostatiniu 3D modeliu atliktais skaičiavimais, nustatyta, kad supaprastintas 2D modelis tiksliai atspindi realias magnetinio sužadinimo sąlygas. 2D BE modelio tinklelis sudarytas iš ~2200 trikampių elementų, kurių bendras laisvės laipsnių skaičius ~5300. Trikampių elementų dydis sumažintas ties magnetų sąveikos taškais ir keitiklio įtvirtinimo vietose, kur keitiklio įtempių koncentracija didžiausia. Skaičiavimai buvo atlikti 0.21 ms dydžio laiko diskrete. Naudoto keitiklio su magnetine mase pirmasis tikrinis dažnis $f_1 = 157$ Hz, todėl toks diskretizavimo žingsnis leido įvertinti daugiau nei 30 sprendinių kiekviename virpesių periode.



4.7 pav. 2D Skaitinis magneto-dinaminis pjezogeneratoriaus modelis

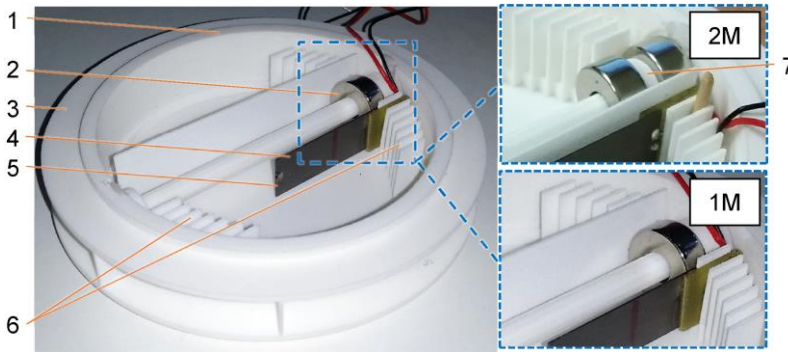
4.3.2. Modelio eksperimentinis verifikavimas ir analizė

Siekiant pagal galimybes išvengti tradicinių apdirbimo operacijų ir minimizuoti rankinio surinkimo operacijų skaičių, įrenginio maketo plastikinių komponentų gamybai buvo pritaikyta 3D spausdinimo technologija – selektyvus sukietinimas lazeriu (angl. *selective laser sintering (SLS)*), atliktas spausdintuvu EOS Formiga P110 panaudojus polimero PA11 (nailono) miltelius.

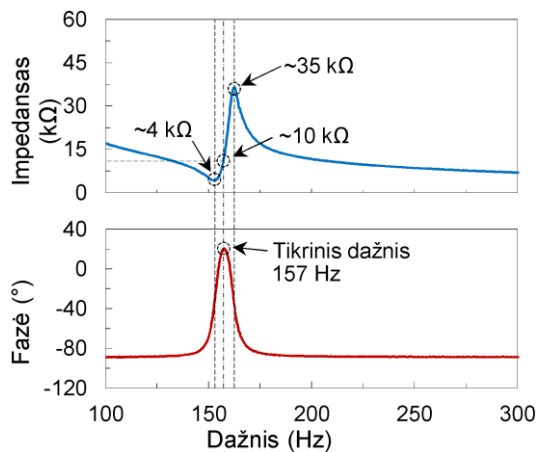
Pirminiai eksperimentiniai bandymai buvo atlikti su pjezogeneratoriaus įrenginio maketu, pavaizduotu 4.8 pav. Pjezoelektrinis bimorfinis keitiklis (28.6×17.7 mm, T215-A4-303Y, Piezo Systems, Inc.) buvo patalpintas į vieną iš tvirtinimo lizdų, kurie leidžia reguliuoti atstumą $d_{\text{žad.}}$. Ant keitiklio galo priklijuotas varomasis magnetas, kurio matmenys: 5×2.5×2 mm, įmagnetinimo stipris – 44H. Keitiklis patalpintas į

įrenginio stacionarų korpusą taip, kad varomojo magneto centras sutaptų su korpuso centru (t. y. įvykdyta pagrindinė sąlyga, kad varomasis magnetas būtų lokalizuotas įgreitintų varomųjų magnetų pastovaus greičio zonoje (4.2.3 sk.), o atstumas tarp varomojo ir varančiųjų magnetų būtų $d_{\text{žad}} = 6 \text{ mm}$. Pirminių pjezogeneratoriaus sužadinimo bandymų metu išcentrinis rotorius sukamas ranka, kad įgreitinimo magnetai įgreitintų varantįjį / varančiuosius magnetus ir deformuotų keitiklį. Taip tiriama vienas pjezogeneratoriaus veikimo ciklas matuojant jo suminį pereinamąjį atsaką.

Elektriniai pjezogeneratoriaus parametrai išmatuoti naudojant Wayne Kerr 6500B impedanso analizatorių. Priklausomybės tarp keitiklio dažnio, impedanso ir fazių pateiktos 4.9 pav. Taip nustatyta, kad tikrinis 1-osios skersinių virpesių formos dažnis yra 157 Hz, o fazei keičiant kryptį keitiklio impedansas siekia apie 10 kΩ.



4.8 pav. Pagamintas pjezogeneratoriaus maketas su (1M) vienu varomuoju ir (2M) dviem varomaisiais magnetais: 1 – stacionarus korpusas, 2 – varantysis magnetas, 3 – inercinis rotorius, 4 – keitiklis, 5 – keitiklio (varomasis) magnetas, 6 – keitiklio tvirtinimo lizdai $d_{\text{žad}}$ reguliavimui, 7 – varomųjų magnetų tarpiklis d_{igr} reguliavimui



4.9 pav. Tiriama keitiklio su magnetine mase impedanso grafikas

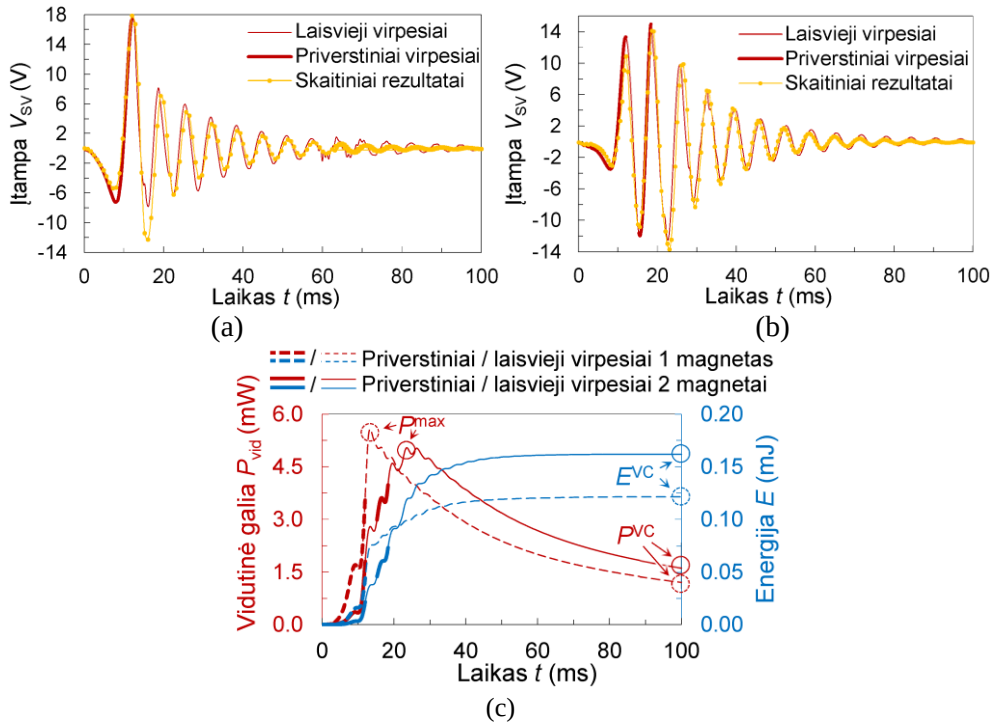
Duomenų rinkimui buvo panaudotas skaitmeninis osciloskopas PICO 6403, kuris registravo sugeneruotos įtampos rezultatus iš deformuojamo keitiklio, kuris buvo prijungtas prie išorinės $R_A = 10 \text{ k}\Omega$ varžos. Kadangi keitiklis virpa tikriniu dažniu pereinamojo atsako priverstinių ir laisvųjų virpesių fazėse, galima teigti, kad prie $R_A = 10 \text{ k}\Omega$ keitiklis veikia suderintos varžos režimu abiejose atsako fazėse išvystydamas maksimalią elektrinę galią. Įtampos signalai apdoroti osciloskopo programine įranga PicoScope 6, naudojant 1000 ms laiko intervalą ir 10 kHz dažnį signalų diskretizavimui. Deformuojamo keitiklio poslinkiai nebuvo matuoti dėl komplikotos įrenginio konstrukcijos, tačiau magnetiškai sužadinamo keitiklio dinamikos ypatumai jau buvo nustatyti 3 sk. Todėl testuojant įrenginio maketą siekiama įvertinti jo elektrines charakteristikas, kurias lemia pjezogeneratoriaus veikimo efektyvinimui skirtos magnetinio įgreitinimo ir SDS posistemės.

Pjezogeneratoriaus veikimo ciklas yra nusakomas SPA (3.2.1 sk.), t. y. keitiklio atsaku į vienamagnetinį (4.10 (a) pav.) ir daugiamagnetinį (4.10 (b) pav.) sužadinimą. Efectinė įtampa, vidutinė galia ir suminė energija, kurios yra sugeneruojamos iki laiko momento t_k veikimo cikle, apskaičiuojamos pagal (15)–(17) formules (3.2.1. sk.). Pjezogeneratoriaus vieno veikimo ciklo trukmė nusakoma $t_k = t^{VC}$, o vidutinė galia ir suminė energija ciklo pabaigoje – atitinkamai P^{VC} ir E^{VC} (4.11 pav.). V_{rms} , P_{vid} ir E skaičiavimai buvo atlikti parinkus $t^{VC} = 100 \text{ ms}$.

Magnetodinaminio BE modelio eksperimentinis verifikavimas kai vienas žadinantysis magnetas judėdamas $v_{\text{žad}} = 3 \text{ m/s}$ greičiu deformuoja keitiklį prie $d_{\text{žad}} = 6 \text{ mm}$ pateiktas 4.10(a) pav. Palyginimas buvo atliktas vertinant eksperimentinius įtampos signalus. Akivaizdu, kad modelis pakankamai tikslus, nes skaitiniai ir eksperimentiniai rezultatai labai artimi tiek keitiklio laisvųjų virpesių dažnio, tiek amplitudžių (t. y. mechaninio ir elektrinio slopinimo) atžvilgiu. Skaitiniai įtampos signalai neženkliai nukrypsta pereinamojo atsako priverstinių virpesių fazėje, kurioje sudarytas BE modelis neįvertina varomojo magneto sukeliama slopinimo jėgų, kurios realiaame įrenginyje pristabdo varomąjį magnetą (t. y. magnetinio slopinimo efektas, žr. 3.2.2. sk.). Kitaip sakant, varančiajam magnetui judant pro keitiklį, varančiojo magneto judėjimas yra stabdomas varomojo magneto pasipriešinimo jėgų. Šio priešinimosi neįvertinimas modelyje lemia ~15 % neatitikimą tarp eksperimentinių ir skaitinių rezultatų viso ciklo metu. O SDS atveju paklaida yra mažesnė (tik ~5 %), nes didesnė dviejų varomųjų magnetų masė ir jos sukurta inercija nėra tokia jautri keitiklio magneto jėgos įtakai.

Skaitinio SDS tyrimo metu gauti pereinamieji įtampos signalai pateikti 4.10 (b) pav. Įtampos signalo suminės (angl. *peak-to-peak*) amplitudės maksimali reikšmė naudojant SDS su dviem varančiaisiais magnetais padidėjo nuo ~25 V iki ~27.5 V (~10 %). Skaitiniai rezultatai rodo, kad per analizuojamą pjezogeneratoriaus veikimo ciklą (100 ms laiko intervalas) su vienu varančiuoju magnetu sugeneruota $E^{VC} = 0.12 \text{ mJ}$ energijos, o SDS atveju du varantieji magnetai pagaminamos energijos kiekį padidino iki $E^{VC} = 0.16 \text{ mJ}$ (t. y. ~33%). Vidutinė elektrinė galia padidėjo atitinkamai – nuo $P^{VC} = 1.22$ iki 1.62 mW (4.10 (c) pav.). Pagrindinė skaitinio tyrimo užduotis yra išnagrinėti priverstinių virpesių fazę ir jos pabaigą, kuri lemia likusius keitiklio vibro-poslinkius / greičius laisvųjų virpesių fazėje ir kartu generuojamų elektrinių signalų dydį. 4.10 pav. pateikta, kad energetiškai dominuojanti

generuojamų signalų zona yra iki ~40 ms, kai priverstiniai ir laisvieji virpesiai yra intensyviausi. Tolimesnėse keitiklio pereinamojo atsako zonose amplitudės yra santykinai mažos ir nedaro reikšmingos įtakos gaminamos energijos pricaugui (žr. 3.4.5. sk.).



4.10 pav. Eksperimentinis ir skaitinis (a) vienamagnetinio ir (b) sinchronizuoto daugiagamagnetinio sužadavimo režimais veikiančio pjezogeneratoriaus įtamos signalai ir (c) atitinkami vidutinės galios ir suminės energijos priklausomybės (eksperimentiniai rezultatai gauti pasukant inercinį rotorių rankiniu būdu)

4.4. SDS pagrindu veikiančio biomechaninio pjezogeneratoriaus tyrimas

Suprojektuoto ir pagaminto biomechaninio pjezogeneratoriaus veikimo charakteristikos priklauso nuo keitiklio dinaminių charakteristikų (tikrinio dažnio f_i , slopinimo laipsnio ζ_m) ir sudėtingos daugiagamagnetinės sąveikos sąlygų, kurias lemia magnetinio sužadavimo režimas ($v_{igr} = v_{zad}$, d_{zad} ir d_m), dominuojančios keitiklio deformavimo jėgos impulso formos ypatybės (2.2.1. sk.), tarpusavyje sąveikaujančių magnetų matmenys, medžiagų savybės, erdvinė orientacija ir išdėstymas magnetinės poliarizacijos krypties atžvilgiu, o SDS atveju – pakartotinio sužadavimo laikinės (sinchroniškumo) charakteristikos. Toliau darbe pjezogeneratoriaus veikimas detalai analizuojamas naudojantis skaitiniais ir eksperimentiniais metodais nustatyti (4.2.3. sk.) artimu efektyviu ir magnetinės įgreitinimo posistemės pasiektu sužadavimo greičio diapazonu $v_{zad} = 2.83 - 3.13$ m/s. Ištirta ir kintančio atstumo tarp sužadavimo magnetų d_m įtaka ($d_{zad} = 6$ mm).

4.4.1. Daugiamagnetinio sužadavimo analizė

4.11 (a-c) pav. pateiktos skaitinės keitiklio vibroposlinkio atsako priklausomybės nuo d_m , kadangi kartu vaizduojamos magnetinės sąveikos ašinės F_x ir F_y jėgų (varančiojo magneto atžvilgiu 4.3 pav.) tiksliausiai atspindi tiesioginį keitiklio lenkimo poveikį, o šiame etape svarbu pateikti skirtingas magnetinio sužadavimo jėgų impulsų formas. O $v_{\text{žad}}$ greičio poveikis išreikštas generuojamos įtampos signalu dėl jautresnio keitiklio elektrinio atsako į lenkimo greitį (4.12 pav.). Svarbu pažymėti, kad pjezogeneratorius tiriamas tik dinaminiam veikimo režime (pereinamojo rezonanso aplinkoje), kai generuojami didelių amplitudžių pereinamieji virpesiai tikriniu dažniu $f_t = 157$ Hz, kurie lemia maksimalią generatoriaus gaminamą vidutinę galią ir suminę energiją.

Pjezogeneratoriaus veikimo ciklas prasideda nuo PV fazės, kurią lemia magnetinio sankybio jėgos (ji trunka $t_k = t^{\text{PV}}$). Daugiamagnetinio sužadavimo metu ši fazė pasireiškia ir nutrūksta tiek kartų, kiek žadinamųjų magnetų yra naudojama. Pavyzdžiui, pjezogeneratoriaus maketas tirtas naudojant vieną arba du varančiuosius magnetus, kurių susietos judėjimo fazės (t. y. fazės, kurių metu keitiklis yra lenkiamas magnetinių jėgų) pavadintos PV ir PV2, o jų poveikis apibūdinamas laikinėmis (t^{PV} , t^{PV2} , $t_1 - t_2$, $t_3 - t_4$) ir elektrinėmis ($V_{t1} - V_{t2}$, $V_{t3} - V_{t4}$) charakteristikomis. LV fazė trunka $t_k = t^{\text{LV}}$ ir pasireiškia tarp PV ir PV2 fazių ir tęsiasi po paskutinės PV fazės imtinai (t. y. po paskutinės PV2 fazės keitiklis pradeda laisvai virpėti tikriniu dažniu $f_t = 157$ Hz. LV fazės laikinės ir elektrinės charakteristikos atitinkamai nusakomos t^{LV} , t^{LV2} , $t_2 - t_3$, $t_4 \dots t_n$, ir $V_{t2} - V_{t3}$, $V_{t4} \dots V_{tn}$, (4.11 (a-c) pav.).

Magnetinių jėgų (de)aktyvacija ir krypties reversija lemia sužadavimų keitiklio priverstinių virpesių amplitudines ir laikines charakteristikas. Tiriamuoju atveju keitiklio virpesiai sužadunami varančiajam magnetui (arba magnetų porai SDS atveju) paveikus ant keitiklio galo priklijuotą varomąjį magnetą. Priartėjus varančiajam magnetui link keitiklio, jis yra lenkiamas ašinės magnetinės jėgos F_x iš pusiausvyros padėties t_0 link artėjančio magneto. Varančiajam magnetui judant toliau keitiklis yra deformuojamas iki kraštutinės padėties ties t_1 (šio etapo trukmė $\tau_1 = t_1 - t_0$). Varančiajam magnetui toliau judant ir kirtus neutralią poziciją $y = 0$, F_y jėga keičia kryptį (reversija, žr. 2.2.1. sk.) ir keitiklis yra atlenkiamas iki kitoje pusiausvyros pusėje esančios kraštinės padėties t_2 (šio etapo trukmė $\tau_2 = t_2 - t_1$). Pakartotinio sužadavimo atveju antrajam varančiajam magnetui priartėjus prie keitiklio, galimi keli scenarijai:

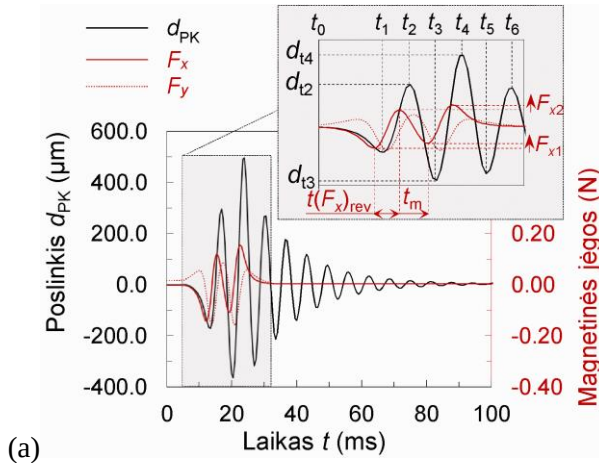
1. Keitiklis pradeda laisvai virpėti iš kraštutinės deformuotos teigiamos padėties, tačiau priartėjęs varantysis magnetas stengiasi pritraukti keitiklį prie savęs priešinga kryptimi (4.11 (b) pav.). Tokiu atveju keitiklio virpesiai nuslopunami magnetinės sąveikos jėgų ir pradedamas naujas sužadavimo ciklas.
2. Du varantieji magnetai yra per arti vienas kito, dėl to gautas magnetinio sužadavimo jėgos impulsas yra plataus varpo formos, t. y. abiejų varomųjų magnetų laukai suformuoja vientisą magnetinį lauką ir pjezogeneratorius veikia vienamagnetinio sužadavimo režimu (4.11 (c) pav.). Pagal 3 sk. pateiktas įžvalgas taip gautas platus sužadavimo impulsas (t. y. didelė jėgos

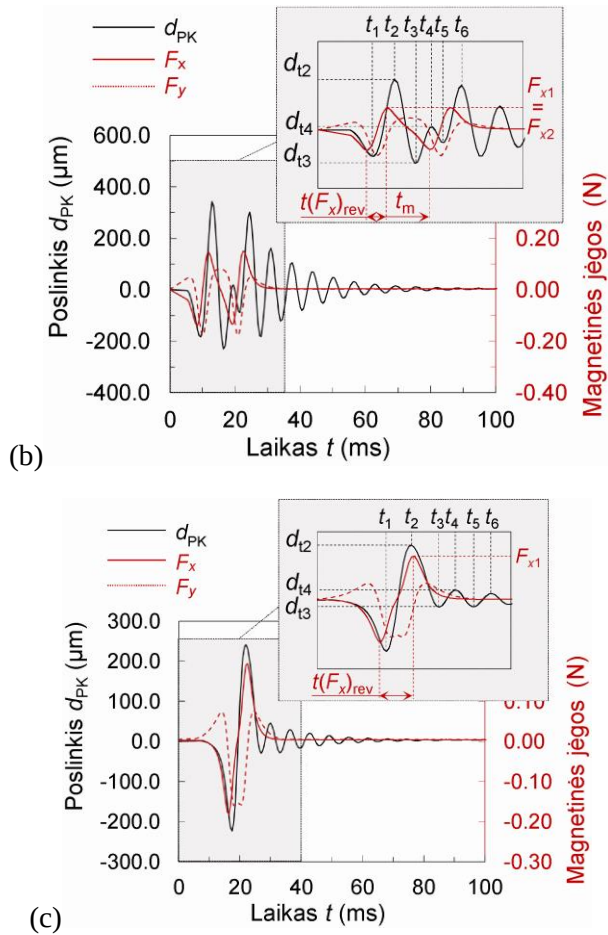
užaugimo trukmė) negeneruoja impulsyvaus pereinamojo sužadavimo, būtino aktyvuoti dinaminį veikimo režimą.

3. Keitiklis judėdamas laisvųjų virpesiu režimu nuo pusiausvyros padėties link krašutinės teigiamos padėties dar yra patraukiamas priartėjusio ir toliau judančio varančiojo magneto link t_3 (4.11 (a) pav.). Toliau taip, kaip ir vieno magneto sužadavimo atveju, keitiklis juda kartu su varančiuoju magnetu iš krašutinės teigiamos į krašutinę neigiamą padėtį t_4 (trukmė $\tau_4 = t_4 - t_3$). Taip keitiklis palenkiamas stipriau nei pirmosios PV fazės metu. Traktuojama, kad po τ_4 zonos prasideda švarūs (magnetiškai neslopunami) laisvieji virpesiai.

4.11 (a) pav. rodo, kad antrojo varomojo magneto F_x jėgos amplitudės mažėjimas (deaktyvacijos zona) gali daryti poveikį keitiklio judėjimui iki t_5 (deaktyvacijos trukmė $\tau_5 = t_5 - t_4$). 3 skyriuje traktuota, kad τ_3 (išskirtinai vienamagnetinio sužadavimo atveju) nusako magnetinės sąveikos pabaigą (magnetinio slopinimo zona), kurioje keitiklio virpesiai gali būti slopinami magnetiniuose varančiojo ir varomojo magnetų laukuose. Pagaminto pjezogeneratoriaus atveju pritariame, kad įgreitinimo posistemės įgreitinto varančiųjų magnetų greitis yra pakankamai aukštas, todėl jie greitai nutolsta nuo varomojo magneto nesudarydami pastebimo slopinimo poveikio keitiklio virpesiams. Šios disertacijos prielaidų kontekste darytina išvada, kad pjezogeneratoriuje pasiekiamas aukštas sužadavimo greitis ($v_{\text{žad}} = 2.83 - 3.13 \text{ m/s}$) lemia tai, kad τ_5 zonoje esantys virpesiai yra laisvieji (t^{FV} ir t^{FV2} – SDS atveju).

4.11 pav. pateikti rezultatai atskleidžia, kad pjezogeneratorius SDS režimu veikia efektyviai, kai magnetinio sankybio metu antro varančiojo magneto jėgos amplitudė buvo didesnė už pirmojo ($F_{x2} > F_{x1}$), o keitiklio poslinkio virpesių atsako $d_{t4} > d_{t2}$.





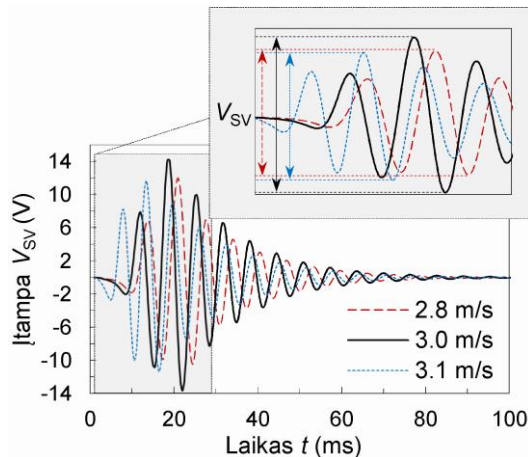
4.11 pav. Magnetodinaminio BE modeliu apskaičiuoti SDS pagrindu veikiančio pjezogeneratoriaus pereinamieji vibroposlinkio ir lenkime dominuojančios ašinės F_x ir skersinės F_y jėgų atsakai, kai (a) $d_m = 18$ mm, (b) $d_m = 28$ mm, (c) $d_m = 8$ mm ($v_{\text{žad}} = 3$ m/s, $d_{\text{žad}} = 6$ mm)

4.4.2. Magnetinio sužadinimo greičio įtaka

Siekiant tiksliau įvertinti magnetinio sužadinimo sąlygas ir energijos generavimo procesus, atlikta skaitinė pereinamojo atsako analizė keičiant $v_{\text{žad}}$ nuo 2.83 iki 3.13 m/s, kai $d_{\text{žad}} = 6$ mm ir $d_m = 18$ mm. Sistemingas veikimo charakteristikų įvertinimas atliktas pasitelkus 3 sk. įvestą bedimensinę reversijos trukmę $t(F_x)_{\text{rev}} / T_t$, kuri nagrinėjamos pjezogeneratoriaus konstrukcijos atveju apytiksliai lygi 0.36 – 0.55 (kai $v_{\text{žad}} = 2.83 - 3.13$ m/s). Pažymėtina, kad kitaip nei 3 sk., čia nagrinėjamo pjezogeneratoriaus magnetinė konfigūracija yra tokia, kad dominuojanti keitiklio deformavimo jėga (generuojanti pilno ciklo impulsą su krypties reversija) yra žymima F_x . 3.4.4. sk. buvo nustatyta, kad pereinamasis rezonansas pasiekiamas tada, kai $t_{\text{rev}} / T_t \cong 0.46$, t. y. kai magnetinės jėgos reversijos trukmė prilygsta ar tampa neženkiai

mažesnė už keitiklio tikrinį pusperiodį τ . Todėl galima tvirtinti, kad suprojektuotas biomechaninis pjezogeneratorius su įdiegtomis magnetinio įgreitinimo ir SDS posistemėmis dirba efektyviausiu magnetinio sužadavimo režimu, kadangi keitiklis veikia pereinamojo rezonanso aplinkoje, t. y. įgreitinti varomieji magnetai leidžia pasiekti labai artimą rezonansiniam sužadavimo greitį, taip užtikrindami labai artimą maksimaliai įrenginio elektrinę galią. Tyrimo rezultatai rodo, kad laiko intervalai $\tau_2 - \tau_6$ tapo apytiksliai lygūs $\tau_t = 3.18$ ms, o tai patvirtina, kad sužadinti priverstiniai ir laisvieji virpesiai PV, PV2 ir LV, LV2 zonose apytiksliai lygūs $f_t = 157$ Hz.

Pjezogeneratoriaus, veikiančio SDS režimu, įtampos signalo suminės amplitudės maksimalios reikšmės yra 22.46, 27.80 ir 23.11 V prie 2.8, 3.0 ir 3.1 m/s, atitinkamai. O energija E^{VC} varijuoja nuo 0.13 iki 0.16 mJ, atitinkamai galia P^{VC} nuo 1.31 iki 1.62 mW. Atsižvelgus į faktą, kad įgreitinimo posistemės suteiktas greitis varantiesiems magnetams gali kisti 2.83 – 3.13 m/s intervale, galios ir energijos didžiausias galimas sumažėjimas nukrypęs nuo efektyviausio greičio (~ 3 m/s) yra tik ~ 19 %.



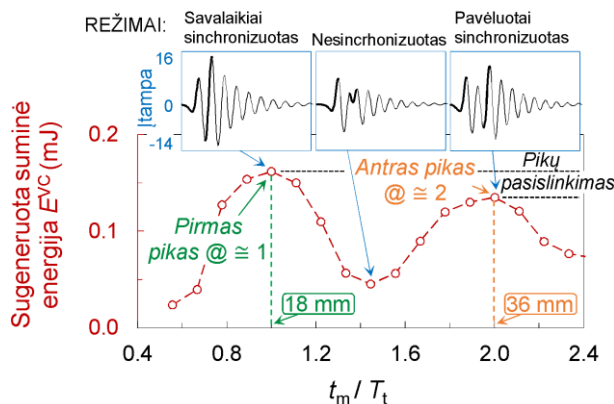
4.12 pav. Skaitinis SDS pjezogeneratoriaus pereinamieji įtampos signalai, kai $d_{\text{žad}} = 6$ mm, $d_m = 18$ mm, o $v_{\text{žad}} = 2.8, 3.0$ ir 3.1 m/s

4.4.3. Tarpelio įtaka daugiamagnetinio sužadavimo procese

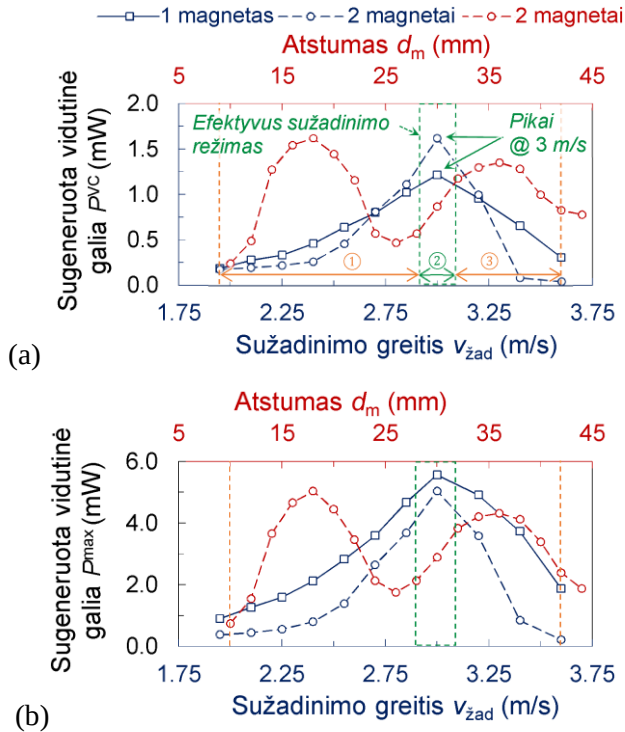
SDS efektyvumą lemia tarpusavyje susiję $v_{\text{žad}}$ ir d_m parametrai. Pavyzdžiui, pakeitus keitiklio standumą ir / ar uždėjus kitokio dydžio magnetinę masę (t. y. keičiantis keitiklio tikriniam dažniui), būtina atitinkamai priderinti varančiojo magneto greitį $v_{\text{žad}}$, pagal kurį reikia pakoreguoti atstumą tarp varančiųjų magnetų d_m . $d_{\text{žad}}$ atstumą ir magnetų savybes taip pat svarbu įvertinti, tačiau jų daroma įtaka nėra tokia jautri minėtiems keitiklio pokyčiams. O magnetinio žadinimo impulso amplitudinės charakteristikos nusakomos pastovia ašine F_x ir skersine F_y jėgomis. Laikines jėgos impulso charakteristikas iš esmės lemia varomo magneto greitis. Norint efektyviai pakartotinai sužadinti keitiklį SDS proceso metu, yra būtina sinchronizuoti žadinimo režimus su keitiklio tikriniu dažniu, kad antrojo varančiojo magneto pakartotinis sužadavimas neigiamai nepaveiktų (neužslopintų) pirmojo magneto prieš tai sugeneruotų virpesių. Šiame skyriuje, analizuojant atstumo d_m įtaką

pjezogeneratoriaus veikimo charakteristikoms, išskiriami trys galimi įrenginio veikimo režimai: 1) laiku sinchronizuotas, 2) nesinchronizuotas, 3) pavėluotai sinchronizuotas (4.13 pav.). Pavyzdžiui, esant mažam atstumui tarp magnetų d_m , antrojo varančiojo magneto magnetinis laukas neleidžia pasiekti švarių keitiklio laisvųjų virpesių dėl didelės magnetinės jėgos užaugimo trukmės (plataus sužadinimo impulso) (4.11 (c) pav.). O pernelyg didelis d_m dalinai nugesina laisvuosius keitiklio virpesius taip pradėdamas naująjį sužadinimą (4.11 (b) pav.). Abu šie atvejai priskiriami asinchroniniam SDS proceso veikimo režimui.

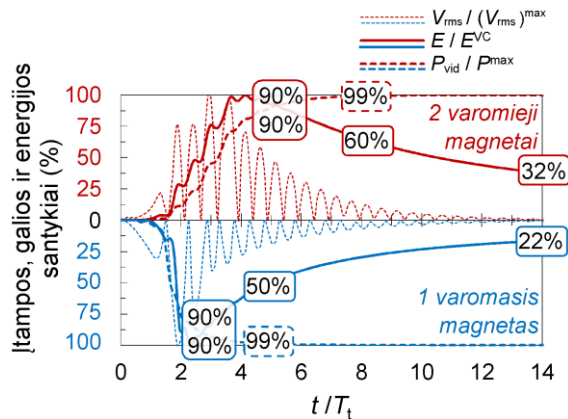
Toliau analizuojamos elektrinės pjezogeneratoriaus charakteristikos, kai $d_{\text{žad}} = 6 \text{ mm}$, $v_{\text{žad}}$ kinta nuo 1.95 iki 3.6 m/s, o d_m – nuo 10 iki 44 mm. Maksimalios generuojamos galios ir energijos reikšmės gautos prie 3 m/s vienamagnetinio ir daigiamagnetinio sinchronizuoto sužadinimo atvejais yra pateiktos 4.14 pav. $P^{\text{VC}} = 1.22 \text{ mW}$ ir $E^{\text{VC}} = 0.12 \text{ mJ}$ sužadinus keitiklį vienu varomuoju magnetu, o $P^{\text{VC}} = 1.62 \text{ mW}$ ir $E^{\text{VC}} = 0.16 \text{ mJ}$ SDS atveju (4.14 (a) pav.). Tačiau pasiekta maksimali galia $P^{\text{max}} = 5.57 \text{ mW}$ su vienu varomuoju magnetu yra didesnė (apie 9.5 %) už dviejų varančiųjų magnetų pasiektą maksimalią galią $P^{\text{max}} = 5.04 \text{ mW}$ (4.14 (b) pav.). Apibendrinant rezultatus teigtina, kad pjezogeneratorius, veikiantis SDS režimu, sugeneruoja apie 33 % didesnę vidutinę galią ir suminę energiją viso ciklo $t^{\text{VC}} = 100 \text{ ms}$ metu (t. y. $t/T_t = 14$), tai sudaro ~32 % nuo maksimalios galimos galios P^{max} , kuri pasiekama ties $t/T_t = 4.4$ (4.15 pav.). Vienas sužadinimo magnetas leidžia pasiekti ~22 % nuo maksimalios galios ties $t/T_t = 2.4$. Tai rodo, kad SDS metodas prailgina didesnių amplitudžių pereinamojo atsako zoną nuo $2.4 < t/T_t < 4.4$. 4.15 pav. pateikta, kad SDS atveju nebūtina laukti visiško laisvųjų virpesių užgesimo iki kito sužadinimo momento (3.4.5. sk.), t. y. naudingiau sutrumpinti veikimo ciklo trukmę iki $t/T_t = \sim 5$, kai pasiekama apie 90 % maksimalios vidutinės galios ir suminės energijos (t. y. 4.54 mW ir 0.14 mJ). Bendruoju atveju, žinant efektyvų žadinimo greitį ir naudojamo keitiklio tikrinį dažnį f_t , atstumas tarp pakartotinio žadinimo magnetų gali būti apskaičiuojamas pagal $d_m = v_{\text{žad}} T_t$. Nagrinėjamu atveju $v_{\text{žad}} = 2.83 - 3.13 \text{ m/s}$, $T_t = 6.37 \text{ ms}$. Apskaičiuotas $d_m = 18.0 - 19.9 \text{ mm}$ ($t_m \cong T_t$).



4.13 pav. Apskaičiuota pjezogeneratoriaus suminės sugeneruotos energijos priklausomybė nuo bedimensinio santykio tarp trukmės tarp pakartotinių magnetinių sužadinimų impulsų ir keitiklio tikrinio periodo, kai $d_{\text{žad}} = 6 \text{ mm}$, $v_{\text{žad}} = 1.95 - 3.6 \text{ m/s}$, $d_m = 10 - 44 \text{ mm}$



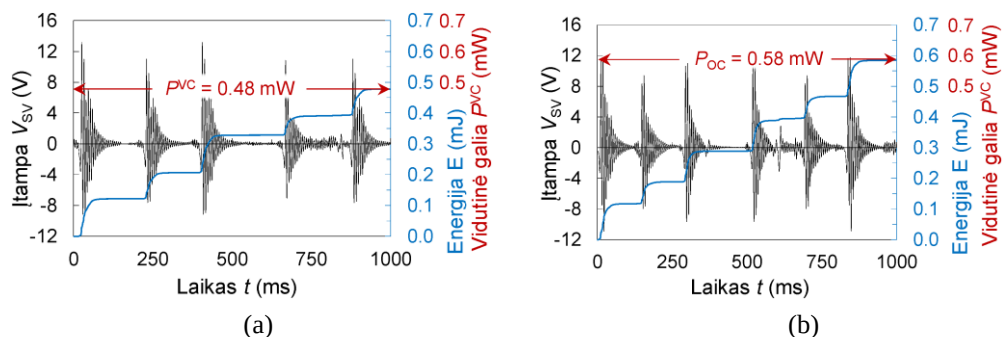
4.14 pav. Apskaičiuota pjezogeneratoriaus sugeneruotos suminės energijos ir vidutinės galios priklausomybė nuo sužadavimo greičio ir atstumo tarp varančiųjų magnetų, kai $d_{\text{žad}} = 6$ mm, $v_{\text{žad}} = 1.95 - 3.6$ m/s, $d_m = 10 - 44$ mm. (a) Sugeneruota galia viso ciklo metu P^{VC} ir (b) maksimali galima galia P^{max} . Galios ir energijos kitimo zonos: ① augimo, ② stacionarinė ir ③ kritimo

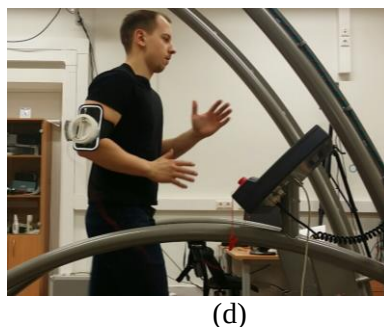
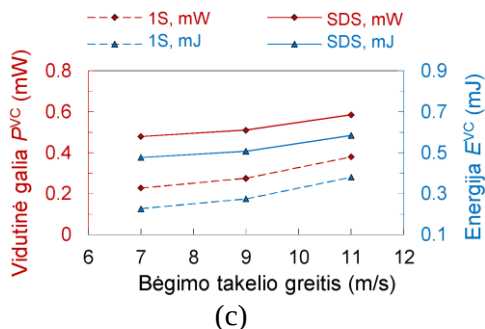


4.15 pav. Apskaičiuota pjezogeneratoriaus efektinės įtamos, vidutinės galios ir suminės energijos pereinamųjų reikšmių santykio su maksimaliomis jų reikšmėmis priklausomybė nuo bedimensinio trukmės tarp laiko ir keitiklio tikrinio periodo santykio, kai $d_{\text{žad}} = 6$ mm, $v_{\text{žad}} = 3$ m/s, $d_m = 18$ mm

4.5. Biomechaninio pjezogeneratoriaus maketo testavimas realiomis sąlygomis

Realizuotas biomechaninio pjezogeneratoriaus maketas su magnetinio įgreitinimo posisteme ir SDS posistemis buvo testuojami ant bėgimo takelio imituojant realias įrenginio eksploataavimo sąlygas. Šiems bandymams naudoto pjezogeneratoriaus konstrukcija ir duomenų rinkimo metodika pateikta 4.3.2. skyriuje. Generuojamos įtampos signalai apdoroti skaitmeniniu osciloskopu 1000 ms laiko intervale naudojant 10 kHz diskretizavimo dažnį. Pjezogeneratoriaus efektinės įtampos, vidutinės galios ir suminės energijos reikšmės apskaičiuotos pagal 1–3 formules (3.2.1. sk.). Ant eksperimento dalyvio žasto uždėtas pjezogeneratorius testuotas bėgant 7, 9 ir 11 km/h greičiu ir sužadinimui naudojant vieną (1S) arba du (SDS režimas) varomuosius magnetus. 4.16 pav. pateikti įtampos pereinamieji signalai (matuota suderintos varžos sąlygomis) ir per visą veikimo ciklą sugeneruotos vidutinės galios ir suminės energijos reikšmės. SDS atveju pjezogeneratoriaus vidutinė galia P^{VC} ir bendra energija E^{VC} vidutiniškai išauga apie 1.8 karto sulig kiekvienu bėgimo greičio padidiniu 2 km/h. Iš esmės, bėgimo takelio greitis neturėjo reikšmingos įtakos sugeneruotos įtampos pereinamojo atsako amplitudžių dydžiui. 4.16 pav. pateikti grafikai rodo, kad suminės įtampos amplitudės yra panašios (užfiksuotas skirtumas yra ~15 %) tiek prie 7, tiek prie 11 km/h greičio. Šie amplitudžių skirtumai aiškinami nevienodomis (atsitiktinai kintančiomis) biomechaninio sužadinimo sąlygomis kiekvieno ciklo metu. Vertinant bandymų metu atsižvelgiama į tai, kad pjezogeneratoriuje esantis keitiklis nėra visiškai izoliuotas nuo išorinių biomechaninių veiksnių, t. y. nors keitiklio atsakas iš esmės yra nulemtas magnetinio sužadinimo sąlygų, tačiau išoriniai veiksniai (pvz., nevienodi rankos mostai, pasukimai ir pan.) turi pastebimos įtakos keitiklio atsakui. Taigi judėjimo greitis ant bėgimo takelio yra susijęs su sužadinimo ciklų skaičiumi ir atitinkamai lemia tai, kiek veikimo ciklų (SPA) pateks į matavimo intervalą. Pavyzdžiui, prie 7 km/h greičio (maketas uždėtas ant žasto) 1000 ms intervale galimi 5 pilni veikimo ciklai, o prie 11 km/h – 6. Atitinkamai yra sugeneruojama ir didesnė vidutinė galia bei suminė energija.





4.16 pav. Pjezogeneratoriaus maketo testavimas ant bėgimo takelio naudojant (a) 7 km/h ir (b) 11 km/h greitį ($d_{\text{žad}} = 6$ mm, $v_{\text{žad}} = 3$ m/s, $d_m = 18$ mm). (c) Generuojamos vidutinės galios ir suminės energijos priklausomybė nuo takelio greičio (1S – vienamagnetinis sužadinimas su vienu varomuoju magnetu, SDS – sinchronizuotas daugiamagnetinis sužadinimas su dvejais varomaisiais magnetais. (d) Eksperimentinio tyrimo atlikimo vaizdas

4.6. Skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje pateiktas sukurtas dėvimas biomechaninio generatoriaus maketas, atsižvelgus į 3 skyriuje aptartą skaitinę-eksperimentinę tyrimų metodiką. Papildomai buvo sudarytas pjezo-magneto-dinaminis modelis, skirtas visapusiškai įvertinti konkretaus generatoriaus maketo veikimą, taip pat kombinuota analitinė-skaitinė metodika, tinkama nustatyti pagrindinius magnetų įgreitinimo posistemės kinematinis parametrus.

Atsižvelgus į pagaminto pjezogeneratoriaus skaitinius ir eksperimentinius rezultatus, pateikiamos šios skyriaus išvados:

1. Panaudojus 3D spausdinimo technologijų pranašumus, pagamintas dėvimo biomechaninio generatoriaus maketas, kurio veikimo duomenys pusiau automatinio būdu apdoroti MS Excel aplinkoje. Pagamintame makete realizuoti pjezogeneratoriaus SDS ir varančiųjų magnetų įgreitinimo efektyvinimo metodai.
2. Pjezogeneratoriaus veikimo režimams analizuoti ir juos apibūdinančioms priklausomybėms sudaryti buvo įvestas bedimensinis kintamasis parametras (dalinant iš keitiklio tikrinio periodo), kuris apskaičiuotas taikant modeliavimo rezultatus (bedimensinės trukmės tarp pakartotinių magnetinių jėgų impulsų). Bedimensinėje formoje pateikti keitiklio energijos generavimo tyrimo rezultatai gali būti nesunkiai pritaikomi kuriant kitos magnetinės konfigūracijos bei skirtingo tikrinio dažnio pjezogeneratorius, kurie taip pat veikia bekontakčio mechaninio dažnio aukštinimo principu.
3. Keičiant ortogonalus magnetinio sužadinimo režimo parametrus – varančiojo magneto greitį ir tarpelį tarp varančiųjų magnetų – buvo nustatyti svarbiausi SDS pagrindu veikiančio pjezogeneratoriaus dinamikos principai bei įvesti efektyviausio sužadinimo kriterijai, kuriuos tenkinant pjezogeneratorius pasiekia aukštą galią:

- 3.1 Pagal 3 sk. pateiktas hipotezes, siekiant išvengti neefektyvių kvazistatinio ir pereinamojo veikimo režimų, sukurtas varančiųjų magnetų įgreitinimo mechanizmas, kuris leidžia išvystyti tokį varančiųjų magnetų greitį ($2.83 - 3.13 \text{ m/s}$), kurio pakanka, kad pasiekti impulsinio sužadinimo režimo zoną. Šis režimas pasiekiamas kai ašinės jėgos reversijos ir skersinės jėgos impulso bedimensinės trukmės (atitinkamai, t_{rev} / T_t ir $t(F_y)_{\text{MI}} / T_t$) tampa mažesnės už vienetą. Įvykdžius šią ribinę sužadinimo sąlygą, sukurtas dėvimas biomechaninis pjezogeneratorius veikia dinaminio režimu, taip gamindamas ženkliai daugiau elektros energijos nei veikiant kitais režimais.
- 3.2 Realizuoto SDS metodo veikimas gali būti apibūdinamas laiku sinchronizuotu (SDS), nesinchronizuotu arba pavėluotai sinchronizuotu veikimo režimais. Efektyviausiu SDS režimu sugeneruojama apie 72 % ir 20 % daugiau vidutinės galios ir suminės energijos, nei nesinchronizuotu ir pavėluotai sinchronizuotu režimais, atitinkamai (viso ciklo $t^{\text{VC}} = 100 \text{ ms}$ metu) maksimizuojant pjezogeneratoriaus galią.
- 3.3 Siekiant realizuoti efektyviausią SDS metodą, būtina užtikrinti aukštą ir pastovų sužadinimo greitį ir tinkamą nuo jo priklausomą atstumą tarp varančiųjų magnetų d_m . Kartu abu parametrai lemia $t_m = d_m / v_{\text{žad}}$, kuris, savo ruožtu, prilygsta keitiklio tikriniam periodui: $t_m / T_t \sim 1$.
- 3.4 Pjezogeneratorius, veikdamas pereinamajame rezonanse ir veiksmingai išnaudodamas įgreitinto SDS metodą, pasiekia $\sim 1.62 \text{ mW}$ galią ir gamina tuo metu $\sim 0.16 \text{ mJ}$ elektros energijos suderintos varžos sąlygomis, t. y. apie 33 % didesnę vidutinę galią ir suminę energiją viso ciklo $t^{\text{VC}} = 100 \text{ ms}$ metu nei su vienu varomuoju magnetu. Eksperimentiniai ir modeliavimo rezultatai rodo, kad vidutinė galia po viso ciklo $t/T_t = 14$ sudaro $\sim 32 \%$ nuo maksimalios galimos galios P^{max} , kuri pasiekiamą ties $t/T_t = 4.4$. Vienas sužadinimo magnetas leidžia pasiekti $\sim 22 \%$ nuo maksimalios galios ties $t/T_t = 2.4$. Tai atskleidžia, kad SDS metodas ne tik padidina virpesių amplitudę, bet ir prailgina jos pereinamojo atsako zoną nuo $2.4 < t/T_t < \text{iki } 4.4$.
4. Eksperimentinių tyrimų duomenimis, testuojant generatoriaus maketo veikimą laboratorinėmis sąlygomis ir imituojant realias sąlygas ant bėgimo takelio, nustatyta, kad pasiūlyti varančiųjų magnetų įgreitinimo ir SDS efektyvinimo metodai leidžia pasiekti efektyvų ir beveik pastovų (su $\sim 15 \%$ sklaida) keitiklio sužadinimą esant nepastovioms biomechaninio žadinimo sąlygoms. Biomechaninis dažnis judėjimo metu lemia sužadinimo ciklų skaičių (SPA), kuris patenka į matavimo intervalą, bet ne generuojamos amplitudės dydį. Dėl šių efektyvinimo metodų pagamintas generatoriaus maketas yra pranašesnis už literatūroje pateiktus variantus.

IŠVADOS

1. Išsami egzistuojančių biomechaninių energijos generatorių literatūros apžvalga atskleidė, kad vibraciniai pjezogeneratoriai dėl aukšto energijos tankio ir miniatiūrizavimo galimybių turi plačias perspektyvas būti panaudoti šiuolaikiniuose autonominiuose dėvimuose ar nešiojamuose elektroniniuose įrenginiuose. Veikimo efektyvumo prasme esminis pjezogeneratorių trūkumas yra tas, kad juose didesni elektros energijos kiekiai yra gaminami tik rezonanso aplinkoje aukštesnių dažnių intervale. Tačiau, biomechaniniai pjezogeneratoriai yra žadinami itin žemo dažnio žmogaus kūno judesiais (< 10 Hz), o tai reiškia, kad įrenginio elektrinė galia yra labai nedidelė ($P \propto f^3$). Šiame darbe išnagrinėtas magnetinis dažnio aukštinimo metodas yra vienas perspektyviausių pjezogeneratorių veikimo efektyvinimo žemadažnėje aplinkoje būdų.
2. Sudarytais matematiniais modeliais įvertintos svarbiausios statinės ir dinaminės magnetinės sąveikos charakteristikos. Nustatyta, kad magnetinės jėgos reversijos trukmė t_{rev} , o kartu ir jėgos užaugimo trukmė $t_{UT} = 0.5t_{rev}$ yra pagrindiniai sužadinimo parametrai, kurie nusako nagrinėjamo dažnio aukštinimo proceso funkcionavimo sąlygas.
3. Gauti eksperimentiniai ir skaitiniai rezultatai leido atskleisti svarbiausius energijos generavimą lemiančius dinamikos dėsningumus:
 - 3.1 Siekiant realizuoti pjezogeneratoriaus veikimą dinaminiam (impulsinio sužadinimo) režime, būtina naudoti aukštą varančiojo magneto greitį, kuris užtikrintų tai, kad bedimensiniai magnetinio sužadinimo parametrai tenkintų sąlygą $t_{rev} / T_t < 1$ ($t_{UT} / t_K < 2$). Nustatyta, kad dinaminiam režime generuojama vidutinė galia ir suminė energija yra iki ~ 15 ir ~ 3 kartų didesnė nei, atitinkamai, kvazistatiniame ir pereinamajame režimuose.
 - 3.2 Veiksmingiausias impulsinio magnetinio sužadinimo režimas pasiekiamas keitikliui veikiant pereinamajame rezonanse, kurio metu generuojama didžiausia elektrinė galia. Pereinamasis rezonansas pasiekiamas tada, kai t_{rev} yra šiek tiek trumpesnė už keitiklio tikrinį pusperiodį, t. y. $t_{rev} / T_t \cong 0.45 - 0.5$ ($t_{UT} / t_K \cong 0.9 - 1.0$). Rezonanso metu keitiklio virpesių dažnis priverstinių ir laisvųjų virpesių fazėse tampa lygus keitiklio pirmosios skersinių virpesių formos dažniui f_t , o tai rodo, kad elektrinė galia gali būti maksimizuojama naudojant vienodo dydžio suderintą varžą.
 - 3.3 Atskleisti efektyvų energijos generavimą lemiantys magnetinio sužadinimo principai ir bedimensinėje formoje pateikti kiekybiniai sužadinimo kriterijai pritaikomi projektuojant įvairios magnetinės konfigūracijos ir skirtingo tikrinio dažnio pjezogeneratorius, kurie veikia magnetinio sankybio (mechaninio dažnio aukštinimo) pagrindu.
4. Realizuotas pjezogeneratoriaus maketo skaitinis BE modelis (nenaudojantis didelių skaičiavimo resursų reikalaujančio judančio tinkelio metodo) leido nustatyti magnetinių jėgų deformuojamo keitiklio dinaminių ir elektrinių charakteristikų priklausomybes nuo sužadinimo parametrų su mažesne nei ~ 10 % paklaida.

5. Pjezogeneratorius, veikdamas pereinamajame rezonanse ir išnaudodamas įgreitinto SDS metodą, pasiekia apie 33 % didesnę vidutinę galią ir suminę energiją suderintos varžos sąlygomis nei įrenginys sužadinimui naudojantis vieną varomąjį magnetą. Siekiant, kad SDS metodas būtų veiksmingas, būtina naudoti aukštą ir pastovų sužadinimo greitį ir tinkamą nuo jo priklausomą atstumą tarp varančiųjų magnetų d_m . Šis greitis užtikrina impulsinį sužadinimą tuomet, kai keitiklio lenkime dominuojančios ašinės jėgos reversijos ir skersinės jėgos impulso bedimensinės trukmės (atitinkamai, t_{rev} / T_t ir $t(F_y)_{MI} / T_t$) tampa mažesnės už vienetą. Kartu abu parametrai lemia trukmę tarp pakartotinių sužadinimų $t_m = d_m / v_{zad}$, kuri turi būti artima keitiklio tikriniam periodui ($t_m / T_t = \sim 1$).
6. Atlikus pagaminto pjezogeneratoriaus maketo veikimo bandymus ant bėgimo takelio, imituojant realias eksploatacines sąlygas, nustatyta, kad pasiūlyti varančiųjų magnetų įgreitinimo ir SDS metodai yra veiksmingi nes užtikrina pakankamai pastovų impulsinį keitiklio magnetinį sužadinimą esant kintamo dažnio biomechaninio žadinimo sąlygoms (generuojamų įtampos signalų amplitudžių sklaida neviršija $\sim 15\%$).

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. DAUKŠEVIČIUS R., BRIAND D. Energy harvesting // Material-integrated intelligent systems: technology and applications / edited by Stefan Bosse, Dirk Lehmhus, Walter Lang, and Matthias Busse. Weinheim: Wiley-VCH, 2018. ISBN 9783527336067. eISBN9783527679249. pp. 479-528. doi: 10.1002/9783527679249.ch21.
2. SIANG J., LIM MH., SALMAN L. M. Review of vibration based energyharvesting technology: Mechanism and architectural approach. *Int J Energy Res.* 2018;1–28. doi: 10.1002/er.3986.
3. Briand D., Yeatman E., Roundy S. *Micro Energy Harvesting*, First Edition. © Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2015 byWiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. doi: 10.1109/UPEC.2016.8114023.
4. GAMMAITONI L., CHIUCHIÚ D., MADAMI M., CARLOTTI G. Towards zero-power ICT. *Nanotechnology* 27 319501. 2016, 1-10 doi: 10.1088/0957-4484/26/22/222001.
5. DAGDEVIREN C., LI Z., WANG ZL. Energy harvesting from the animal/human body for self-powered electronics. *Annu. Rev. Biomed. Eng.*19. 2017, 85-108. doi: 10.1146/annurev-bioeng-071516-044517.
6. CHOI Y-M., LEE MG., JEON Y. Wearable Biomechanical Energy Harvesting Technologies. *Energies* 10. 2017, 1483. doi: 10.3390/en10101483.
7. ROMERO E. Powering biomedical devices (Elsevier Inc.). Elsevier Inc. 2013, 15-56. doi: 10.1016/C2012-0-06126-1.
8. TODARO MT., GUIDO F., MASTRONARDI V., DESMAELE D., EPIFANI G., ALGIERI L., DE VITTORIO M. Piezoelectric MEMS vibrational energy harvesters: Advances and outlook. *Microelectron. Eng.* 183-184. 2017, 23-36. doi: 10.1016/j.mee.2017.10.005.
9. WEI C., JING X. A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 74. 2017, 1-18. doi: 10.1016/j.rser.2017.01.073.
10. PRIYA S., INMAN JD. *Energy Harvesting Technologies*. New York: Springer. 2009, 9-34. doi: 10.1007/978-981-10-3815-0_2.
11. XUE T., YEO H G., TROLIER-MCKINSTRY S., ROUNDY S. Wearable Inertial Energy Harvester with Sputtered Bimorph Lead Zirconate Titanate (PZT) Thin-film Beams, *Smart Mater. Struct.* 27:8. 2018, doi: 10.1088/1361-665X/aad037.
12. XUE T., ROUNDY S. On magnetic plucking configurations for frequency up-converting mechanical energy harvesters. *Sensors Actuators A-Phys.* 253. 2017, 101-11. doi: 10.1016/j.sna.2016.11.030.
13. STEINGART D., ROUNDY S., WRIGHT P.K., EVANS J.W. Micropower materials development for wireless sensor networks. *MRS Bulletin*, 33 (4). 2008, 408–409. doi: 10.1557/mrs2008.81.
14. LEONOV V. Energy harvesting for self-powered wearable devices, in *Wearable Monitoring Systems* (eds. A. Bonfiglio and D. De Rossi). Springer

- Science+Business Media, LLC. 2011, 27–49. doi: 10.1007/978-1-4419-7384-9_2.
15. LEMEY S., DECLERCQ F., ROGIER H. Textile antennas as hybrid energy-harvesting platforms. *Proceedings of the IEEE*, 102 (11). 2014, 1833–1857. doi: 10.1109/JPROC.2014.2355872.
 16. VALLEJOS DE SCHATZ C.H., MEDEIROS H.P., SCHNEIDER F.K., ABATTI P.J. Wireless medical sensor networks: design requirements and enabling technologies. *Telemedicine and E-Health*, 18 (5). 2012, 394–399. doi: 10.1089/tmj.2011.0169.
 17. BHUIYAN R.H., DOUGAL R.A., ALI M. A miniature energy harvesting device for wireless sensors in electric power system. *IEEE Sensors Journal*, 10 (7). 2010, 1249–1258. doi: 10.1109/JSEN.2010.2040173.
 18. HOROWITZ S.B., SHEPLAK M., CATTAFESTA L.N., NISHIDA T. A MEMS acoustic energy harvester. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 16 (9). 2006m 174–181. doi: 10.1088/0960-1317/16/9/S02.
 19. LUZ R.A.S., PEREIRA A.R., DE SOUZA J.C.P., SALES F.C.P.F., CRESPILO F.N. Enzyme biofuel cells: thermodynamics, kinetics and challenges in applicability. *Chemelectrochem*, 1 (11). 2014, 1751–1777. doi: 10.1002/celc.201402141.
 20. EWING T., PHUC T.H., BABAUTA J.T., TANG N.T., HEO D., BEYENAL H. Scale-up of sediment microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 272. 2014, 311–319. doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.08.070.
 21. HIMES C., CARLSON E., RICCHIUTI R.J., OTIS B., PARVIZ B.A. Ultralow voltage nanoelectronics powered directly, and solely, from a tree. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 9 (1). 2010, 2–5. doi: 10.1109/TNANO.2009.2032293.
 22. BHUYAN S. HU J. A natural battery based on lake water and its soil bank. *Energy*, 51. 2013, 395–399. doi: 10.1371/journal.pone.0002963.
 23. KRUPENKIN T. TAYLOR J.A. Reverse electrowetting as a new approach to high-power energy harvesting. *Nature Communications*, 2. 2011, 448. doi: 10.1038/ncomms1454.
 24. KIM D., SAKIMOTO K.K., HONG D., YANG P. Artificial photosynthesis for sustainable fuel and chemical production. *Angewandte Chemie-International Edition*, 54 (11). 2015, 3259–3266. doi: 10.1002/anie.201409116.
 25. CHEW Z.J., RUAN T., ZHU M. Strain Energy Harvesting Powered Wireless Sensor System Using Adaptive and Energy-Aware Interface for Enhanced Performance. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* Vol. 13:6. 2017. doi: 10.1109/TII.2017.2710313.
 26. CHEW Z.J., RUAN T., ZHU M. Strain Energy Harvesting Powered Wireless Sensor Node for Aircraft Structural Health Monitoring. *Procedia Engineering* Vol. 168. 2016, 1717-1720. doi: 10.1016/j.proeng.2016.11.498.
 27. KANGQI F., QINXUE T., HAIYAN L., YINGMIN Z., WEIDONG W., DAXING Z. Hybrid piezoelectric-electromagnetic energy harvester for scavenging energy from low-frequency excitations. *Smart Materials and Structures*, Vol. 27-8. 2018. doi: 10.1088/1361-665X/aaae92.

28. BUTLER M.S., LUEBBERS P.E. Wearable Technologies: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications. Information Resources Management Association (USA) Vol. 3. 2018, 30-50. doi: 10.4018/978-1-5225-5484-4.
29. TODARO M.T. Biocompatible, Flexible, and Compliant Energy Harvesters Based on Piezoelectric Thin Films. IEEE transactions on nanotechnology, Vol. 17-2. 2018. doi: 10.1109/TNANO.2017.2789300.
30. YANG Z., ERTURK A., ZU J. On the efficiency of piezoelectric energy harvesters. Extreme Mechanics Letters 15. 2017, 26-37. doi: 10.1016/j.eml.2017.05.002.
31. FU H., YEATMAN E.M. Effective Piezoelectric Energy Harvesting Using Beam Plucking and a Synchronized Switch Harvesting Circuit. Smart Mater. Struct. 2018. doi: 10.1088/1361-665X/aac0ba.
32. KIM S.G., PRIYA S. KANNO I. Piezoelectric MEMS for energy harvesting. MRS Bulletin, 37 (11). 2012, 1039–1050. doi: 10.1088/1742-6596/660/1/012001.
33. ROEDEL J., JO W., SEIFERT K.T.P., ANTON E.-M., GRANZOW T., DAMJANOVIC D. Perspective on the development of lead-free piezoceramics. Journal of the American Ceramic Society, 92 (6). 2009, 1153–1177. doi: 10.1111/j.1551-2916.2009.03061.x.
34. BOWEN C.R., KIM H.A., WEAVER P.M., DUNN S. Piezoelectric and ferroelectric materials and structures for energy harvesting applications. Energy & Environmental Science 7 (1). 2014, 25–44. doi: 10.1039/c3ee42454e.
35. AKTAKKA, E.E., PETERSON, R.L., AND NAJAFI, K. High stroke and high deflection bulk-PZT diaphragm and cantilever micro actuators and effect of pre-stress on device performance. Journal of Microelectromechanical Systems, 23 (2). 2014, 438–451. doi: 10.1109/.
36. LIU G., ZHANG S., JIANG W. Cao W. Losses in Ferroelectric Materials. Mater Sci Eng. R Rep. 2015, 89. 1-48. doi: 10.1016/j.mser.2015.01.002
37. WEI C., JING X. A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization. Renewable Sustainable Energy Rev. 2017, 74: 1-18. doi: 10.1016/j.rser.2017.01.073
38. RAMADAN K.S., SAMEOTO D., EVOY S. A review of piezoelectric polymers as functional materials for electromechanical transducers. Smart Materials and Structures 2014, 23 (3). doi: 10.1088/0964-1726/23/3/033001
39. BAUR C., APO D.J., MAURYA D., PRIYA S., VOIT W. Advances in piezoelectric polymer composites for vibrational energy harvesting in Polymer Composites for Energy Harvesting, Conversion, and Storage (eds L. Li, W. WongNg, J. Sharp), ACS Symposium Series 1161. 2014, 1–27.
40. CROSSLEY S., WHITER R. A., KAR-NARAYAN S. Polymer-based nanopiezoelectric generators for energy harvesting applications. Materials Science and Technology. 2014, 30 (13A), 1613–1624. doi: 10.1179/1743284714Y.0000000605
41. MARZENCKI M., AMMAR Y., BASROUR S. Integrated power harvesting system including a MEMS generator and a power management circuit. Sensors and Actuators A-Physical. 2008, 145: 363–370. doi: 10.1016/j.sna.2007.10.073

42. TANG G., YANG B., LIU J.Q., XU B., ZHU H.Y., YANG C.S. Development of high performance piezoelectric d(33) mode MEMS vibration energy harvester based on PMN-PT single crystal thick film. *Sensors and Actuators A-Physical*. 2014, 205: 150–155. doi: 0.1016/j.sna.2013.11.007
43. ELFRINK R., KAMEL T.M., GOEDBLOED M., MATOVA S., HOHLFELD D., VAN ANDEL Y., VAN SCHAIJK R. Vibration energy harvesting with aluminum nitride-based piezoelectric devices. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2009, 19 (9) 095005. doi: 10.1088/0960-1317/19/9/094005
44. ROUNDY S. WRIGHT P.K. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics. *Smart Materials and Structures*. 2004, 13 (5). 1131–1142. doi: 10.1088/0964-1726/13/5/018
45. Piezo | Pjezo katalogas [paskutinį kartą žiūrėta 2018 04 03]. Internetinė nuoroda <http://www.piezo.com/catalog8.pdf%20files/Cat8.22,23,24,25,62,63&64.pdf>
46. Piezo | Pjezo režimai [paskutinį kartą žiūrėta 2018 04 03]. Internetinė nuoroda <http://www.piezo.com/tech1terms.html#perf>
47. KUANG Y. Design study of a mechanically plucked piezoelectric energyharvester using validated finite element modelling, *Sensors and Actuators A*. 2017, 263, 510–520. doi: 10.1016/j.sna.2017.07.009
48. SIDDIQUIA S., KIM D., DUYA L.T., NGUYENA M.T., MUHAMMAD S., YOON W.S., NAE E.L. High-performance flexible lead-free nanocomposite piezoelectric nanogenerator for biomechanical energy harvesting and storage. *Nano Energy Volume 15*. 2015, 177-185. doi: 10.1016/j.nanoen.2015.04.030
49. ZHENG Q., SHI B., LI Z., WANG Z.L. Recent Progress on Piezoelectric and Triboelectric Energy Harvesters in Biomedical Systems. *Advance Science*. 2017, 4:1700029. doi: 10.1002/advs.201700029
50. LI H., TIAN C., DENG Z.D. Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials. *Applied Physics Reviews*, 1, 041301. 2014 doi:
51. Mechanical Analysis of Human Motion. [paskutinį kartą žiūrėta 2018 08 26]. Internetinė nuoroda http://downloads.lww.com/wolterskluwer_vitalstream_com/sample-content/9780781791281_Hamill/samples/Hamill_ch08_299-336.pdf
52. OSTAŠEVIČIUS V., JURĖNAS V., ŽUKAUSKAS M. Article: Investigation of energy harvesting from high frequency cutting tool vibrations. *MECHANIKA* 2014, 20(5): 500–505. doi: 10.5755/j01.mech.20.5.7902
53. CAMMARANO A., BURROW S. G., BARTON D. A. W., CARRELLA A., CLARE L. R. Tuning a resonant energy harvester using a generalised electrical load. *Smart Materials and Structures*. 2010, 19(5):055003, DOI: 10.1088/0964-1726/19/5/055003
54. PFEIFFER F. *Mechanical systems dynamics*. Springer 2008. ISBN: 978-3-540-79436-3. DOI: 10.1007/978-3-540-79436-3
55. ANGELES J. *Dynamic response of Linear Mechanical Systems. Modeling, Analysis and Simulation*. Springer 2012. ISBN: 978-1-4419-1026-4. DOI: 10.1007/978-1-4419-1027-1
56. OSTAŠEVIČIUS V., DAUKSEVIČIUS R. *Microsystems Dynamics*. Springer 2011. ISBN: 978-90-481-9701-9. DOI: 10.1007/978-90-481-9701-9

57. Piezo material properties [paskutinį kartą žiūrėta 2019 02 18]. Internetinė nuoroda <https://support.piezo.com/article/62-material-properties>
58. SuperMagnete.de [paskutinį kartą žiūrėta 2019 02 18]. Internetinė nuoroda <https://www.supermagnete.de/eng/faq/What-are-neodymium-ferrite-and-AlNiCo-magnets-made-of>
59. SuperMagnete.de [paskutinį kartą žiūrėta 2019 02 18]. Internetinė nuoroda https://www.supermagnete.de/eng/block-magnets-neodymium/block-magnet-5mm-x-5mm-x-3mm-neodymium-n52-nickel-plated_Q-05-05-03-N52N
60. ZHU D., TUDOR M.J., AND BEEBY S.P. Strategies for increasing the operating frequency range of vibration energy harvesters: a review. *Measurement Science and Technology*. 2010, 21 (2), 022001. doi: 10.1088/0957-0233/21/2/022001
61. TWIEFEL J., WESTERMANN H. Survey on broadband techniques for vibration energy harvesting. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2013 24 (11), 1291–1302. doi: 10.1177/1045389X13476149
62. CHALLA V.R., PRASAD M.G., SHI Y., FISHER F.T. A vibration energy harvesting device with bidirectional resonance frequency tenability. *Smart Materials and Structures*. 2008, 17 (1), 015035. doi: 10.1088/0964-1726/17/01/015035
63. Liu J.Q., Fang H.B., Xu Z.Y., Mao X.H., Shen X.C., Chen D., Liao H., Cai B.C. A MEMS-based piezoelectric power generator array for vibration energy harvesting. *Microelectronics Journal*. 2008, 39 (5), 802–806. doi: 10.1016/j.mejo.2007.12.017
64. GU L. LIVERMORE C. Impact-driven, frequency up-converting coupled vibration energy harvesting device for low frequency operation. *Smart Materials and Structures*. 2011, 20 (4), 045004. doi: 10.1088/0964-1726/20/4/045004
65. JUNHUI H., SENIOR M., IEEE, JANUAR J., CHUNSHENG Z. Vibration Energy Harvesting Based on Integrated Piezoelectric Components Operating in Different Modes, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2010, 57:2. doi: 10.1109/TUFFC.2010.1418
66. GAMMAITONI L., NERI I., VOCCA H. Nonlinear oscillators for vibration energy harvesting. *Applied Physics Letters*. 2009, 94 (16), 164102. doi: 10.1063/1.3120279
67. DAQAQ M. F., MASANA R., ERTURK A., QUINN D. Closure to "Discussion of 'On the role of nonlinearities in energy harvesting: a critical review and discussion'". *Applied Mechanics Reviews*. 2014 66 (4), 040801. doi: 10.1115/1.4027259
68. BASSET P., GALAYKO D., COTTONE F., GUILLEMET R., BLOKHINA E., MARTY F., BOUROUINA T. Electrostatic vibration energy harvester with combined effect of electrical nonlinearities and mechanical impact. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2014, 24 (3), 035001. doi: 10.1088/0960-1317/24/3/035001
69. KIM P., SEOK J. A multi-stable energy harvester: dynamic modeling and bifurcation analysis. *Journal of Sound and Vibration*. 2014, 333 (21). 5525–5547. doi: 10.1016/j.jsv.2014.05.054

70. ZHOU S., CAO J., INMAN D.J., LIN J., LIU S., WANG Z. Broadband tristable energy harvester: modeling and experiment verification. *Applied Energy*. 2014, 133: 33–39. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.07.077
71. STEPHEN NG. On energy harvesting from ambient vibration. *Sound Vib*. 293. 2006, 409-425. doi: 10.1016/j.jsv.2005.10.003
72. SHU YC., LIEN IC. Efficiency of energy conversion for a piezoelectric power harvesting system. *Microeng*. 16. 2006, 2429-2438. doi: 0.1088/0960-1317/16/11/026
73. LU K., WILEY J., *Materials in Energy Conversion, Harvesting, and Storage*, First Edition., Inc. Published 2014 by John Wiley & Sons, Inc. doi: 10.1002/9781118892374
74. PRIYA S., SONG H.C., ZHOU Y. A Review on Piezoelectric Energy Harvesting: Materials, Methods, and Circuits. Article in *Energy Harvesting and Systems*. 2017. doi: 10.1515/ehs-2016-0028
75. HALIM M.A., PARK J.Y. Theoretical modeling and analysis of mechanical impact driven and frequency up-converted piezoelectric energy harvester for low-frequency and wide-bandwidth operation *Sens. Actuator A-Phys*. 2014, 208, 56-65. doi: 10.1016/j.sna.2013.12.033
76. KATHPALIA B., TAN D., STERN I., ERTURK A. An experimentally validated model for geometrically nonlinear plucking-based frequency up-conversion in energy harvesting. *Smart Mater. Struct*. 2018, 27: 015024. doi: 10.1088/1361-665X/aa9b01
77. GALCHEV T., AKTAKKA E.E., NAJAFI K. A Piezoelectric Parametric Frequency Increased Generator for Harvesting Low-Frequency Vibrations. *Microelectromech. Syst*. 2012, 21: 1311-1320. doi: 10.1109/JMEMS.2012.2205901
78. TANG Q.C., YANG Y.L., LI X. Bi-stable frequency up-conversion piezoelectric energy harvester driven by non-contact magnetic repulsion. *Smart Materials and Structures*. 2011, 20 (12), 125011. doi: 10.1088/0964-1726/20/12/125011
79. PILLATSCH P., YEATMAN E.M., HSSOLMES A.S. Magnetic plucking of piezoelectric beams for frequency up-converting energy harvesters. *Smart Mater. Struct*. 2014, 23: 025009. doi: 10.1088/0964-1726/23/2/025009
80. RAMEZANPOUR R., NAHVI H., ZIAEI-RAD S. Electromechanical behavior of a pendulum-based piezoelectric frequency up-converting energy harvester. *Sound Vib*. 2016, 370: 280-305. doi: 10.1016/j.jsv.2016.01.052
81. POZZI M., ZHU M. Plucked piezoelectric bimorphs for knee-joint energy harvesting: modelling and experimental validation. *Smart Mater. Struct*. 2011, 20: 055007. doi: 10.1088/0964-1726/20/5/055007
82. JANPHUANG P., LOCKHART R.A., ISARAKORN D., HENEIN S., BRIAND D., DE ROOIJ NF. Harvesting Energy From a Rotating Gear Using an AFM-Like MEMS Piezoelectric Frequency Up-Converting Energy Harvester. *Microelectromech. Syst*. 24. 2015, 742-754. doi: 10.1109/JMEMS.2014.2349794
83. RENAUD M., FIORINI P., VAN SCHAIJK R., VAN HOOFF C. Harvesting energy from the motion of human limbs: the design and analysis of an impact-

- based piezoelectric generator. *Smart Mater. Struct.* 2009, 18: 035001. doi: 10.1088/0964-1726/18/3/035001
84. ALGHISI D., DALOLA S., FERRARI M., FERRARI V. Triaxial ball-impact piezoelectric converter for autonomous sensors exploiting energy harvesting from vibrations and human motion. *Sens. Actuator A-Phys.* 2015, 233: 569-581. doi: 10.1016/j.sna.2015.07.020
 85. UMEDA M., NAKAMURA K., UEHA S. Analysis of the transformation of mechanical impact energy to electric energy using piezoelectric vibrator. *Jpn. J. Appl. Phys.* 35. 1996, 3267-3273. doi: 10.1143/JJAP.35.3267
 86. ZHANG X., GAO S., LI D., JIN L., WU Q., LIU F. Frequency up-converted piezoelectric energy harvester for ultralow-frequency and ultrawide-frequency-range operation. *Appl. Phys. Lett.* 2018, 112: 163902. doi: 10.1063/1.5022496
 87. LIU T., ST PIERRE R., LIVERMORE C. Passively-switched energy harvester for increased operational range. *Smart Mater. Struct.* 2014, 23: 095045. doi: 10.1088/0964-1726/23/9/095045
 88. LIU H., TAY C.J., QUAN C., KOBAYASHI T., LEE C. A scrape-through piezoelectric MEMS energy harvester with frequency broadband and up-conversion behaviors. *Microsyst. Technol.* 17. 2011, 1747-1754. doi: 10.1007/s00542-011-1361-4
 89. HAN D., YUN K.S. Piezoelectric energy harvester using mechanical frequency up conversion for operation at low-level accelerations and low-frequency vibration. *Microsyst. Technol.* 21. 2015, 1669-1676. doi: 10.1007/s00542-014-2261-1
 90. WICKENHEISER A.M., GARCIA E. Broadband vibration-based energy harvesting improvement through frequency up-conversion by magnetic excitation. *Smart Mater. Struct.* 19. 2010. doi: 10.1088/0964-1726/19/6/065020
 91. POZZI M. Magnetic plucking of piezoelectric bimorphs for wearable energy harvester. *Smart Mater. Struct.* 25. 2016. doi: 10.1088/0964-1726/25/4/045008
 92. KUANG Y., YANG Z., ZHU M. Design and characterisation of a piezoelectric knee-joint energy harvester with frequency up-conversion through magnetic plucking. *Smart Mater. Struct.* 25:085029. 2016. doi: 10.1088/0964-1726/25/8/085029
 93. GALCHEV T., KIM H., NAJAFI K. A parametric frequency increased power generator for scavenging low frequency ambient vibrations. *Procedia Chemistry* 1, 2009, 1439–1442. doi: 10.1016/j.proche.2009.07.359
 94. POZZI M., ZHU M. Characterization of a rotary piezoelectric energy harvester based on plucking excitation for knee-joint wearable applications. *Smart Mater. Struct.* 21: 055004. 2012. doi: 10.1088/0964-1726/21/5/055004
 95. SHUKLA R., BELL A.J. PENDEXE. A novel energy harvesting concept for low frequency human waistline. *Sens. Actuator A-Phys.* 2014, 222: 39-47. doi: 10.1016/j.sna.2014.11.016
 96. KUANG Y., RUAN T., CHEW Z.J., ZHU M. Energy harvesting during human walking to power a wireless sensornode. *Sensors and Actuators A* 254. 2017, 69–77. doi: 10.1016/j.sna.2016.11.03597

97. XUE T., ROUNDY S. Analysis of magnetic plucking configurations for frequency-up-converting harvesters. *J. Phys. Conf. Ser.* 2015. doi: 10.1088/1742-6596/660/1/012098
98. ZOU H.X. A broadband compressive-mode vibration energy harvester enhanced by magnetic force intervention approach. *Applied physics letters* 110, 163904. 2017. doi: 10.1063/1.4981256
99. FURLANI E. A formula for the levitation force between magnetic disks. *IEEE Trans. Magn* 29 4165–9. 1993. doi: 10.1109/20.280867
100. SLOBODAN I.B., AKYEL C. Magnetic Force Calculation Between Thin Coaxial Circular Coils in Air. *IEEE Transactions on Magnetics* 44. 2008. doi:
101. RAVAUD R., LEMARQUAND G., LEMARQUAND V. Coils and Magnets: 3D Analytical Models. *PIERS Proceedings* 46. 2010. doi: 10.1109/TMAG.2007.915292
102. VOKOUNA D., BELEGGIAB M., HELLERA L., ŠITTNERA P. Magnetostatic interactions and forces between cylindrical permanent magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 321. 2009, 3758–3763. doi: 10.1016/j.jmmm.2009.07.030.
103. AGASHE J.S., ARNOLD D.P. A study of scaling and geometry effects on the forces between cuboidal and cylindrical magnets using analytical force solutions. *Journal of physics D – Applied Physics* 41(10):105001. 2008. doi: 10.1088/0022-3727/41/10/105001.
104. VOKOUN D., BELEGGIA M. Forces between arrays of permanent magnets of basic geometric shapes. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 350. 2013, 174-178. doi: 10.1016/j.jmmm.2013.09.023
105. KRASIL'NIKOV A. Y.A., KRASIL'NIKOV A. A. Calculating the Torque in an End Magnetic Clutch. *Chemical and Petroleum Engineering* 41. 2005, 383–387. doi: 10.1007/s10556-005-0125-3
106. KRASIL'NIKOV A. Y.A., KRASIL'NIKOV A. A. Attractive Forces of Highly coercive permanent magnets in end magnetic clutches and plane magnetic system. *Russian Engineering Research* 30. 2010. doi: 10.3103/S1068798X1006002X
107. ALLAG H., YONNET J.P., BOUCHEKARA H.R.E.H., LATRECHE M.E.H., RUBECK C. Coulombian Model for 3D Analytical Calculation of the Torque Exerted on Cuboidal Permanent Magnets with Arbitrary Oriented Polarizations. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal* 30. 2015, 351-356
108. AKOUN G., YONNET J.P. 3D analytical calculation of the forces exerted between two cuboidal magnets. *IEEE Transactions on Magnetics* 20. 1984, 1962-1964. doi: 10.1109/TMAG.1984.1063554
109. UPADRASHTA D., YANG Y. Finite element modeling of nonlinear piezoelectric energy harvesters with magnetic interaction. *Smart Materials and Structures* 24. 2015. doi: 10.1088/0964-1726/24/4/045042
110. WU X., LEE D.W. Magnetic coupling between folded cantilevers for high-efficiency broadband energy harvesting. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2015, 234:17–22. doi: 10.1016/j.sna.2015.08.009

111. Comsol [paskutinį kartą žiūrėta 2018 04 06]. Internetinė nuoroda <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>
112. AYRE R.S. Transient Response to Step and Pulse Functions in Harris' Shock and Vibration Handbook. ed. CM Harris and AG Piersol (New York, NY: McGraw Hill). 2002.1-59. ISBN: 9780071508193
113. RAO S.S. Mechanical Vibrations, 5th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. 2011. ISBN: 9780132128193
114. ALLAG H., YONNET J.P. 3-D Analytical Calculation of the Torque and Force Exerted Between Two Cuboidal Magnets. IEEE Trans. 2009, Magn. 45: 3969-3972. doi: 10.1109/TMAG.2009.2025047
115. GADALA M.S. Finite Element Applications in Dynamics in Vibration and Shock Handbook. ed. CW de Silva. Boca Raton, FL: CRC Press 2005, 9-21. ISBN: 9781420039894
116. MICHALCZYK J. Transient resonance of machines and devices in general motion. Journal of theoretical and applied mechanics. 2012, 50:577-587.
117. LI L., SINGH R. Analysis of vibration amplification in a multi-staged clutch damper during engine start-up. Proc IMechE Part D: Automobile Engineering. 2015, 229:1406-1418. doi: 10.1177/0954407014563362
118. MICHALCZYK J. PAKULA S. Phase control of the transient resonance of the automatic ball balancer. Mech. Syst. Sig. Process. 2016, 72-73: 254-265. doi: 10.1016/j.ymsp.2015.11.001
119. MARKERT R., SEIDLER M. Analytically based estimation of the maximum amplitude during passage through resonance. Int. J. Solids Struct. 2001, 38: 1975-1992. doi: 10.1016/S0020-7683(00)00147-5
120. CHEN N., WEI T., JUNG H.J., LEE S. Quick self-start and minimum power-loss management circuit for impact-type micro wind piezoelectric energy harvesters. Sens. Actuator A-Phys. 2017, 263: 23-29, doi: 10.1016/j.sna.2017.05.042
121. ZIZYS D., GAIDYS R., DAUKSEVICIUS R., OSTASEVICIUS V., DANIULAITIS V. Segmentation of a Vibro-Shock Cantilever-Type Piezoelectric Energy Harvester Operating in Higher Transverse Vibration Modes. Sensors 2016, 16, 11. doi:10.3390/s16010011
122. XUE T., YEO H.G., TROLIER-MCKINSTRY S., ROUNDY S. A wrist-worn rotational energy harvester utilizing magnetically plucked {001} oriented bimorph PZT thin-film beams. Actuators and Microsystems 2017. doi: 10.1109/TRANSDUCERS.2017.7994065
123. KATHPALIA B., TAN D., STERN I., ERTURK A. An experimentally validated model for geometrically nonlinear plucking-based frequency up-conversion in energy harvesting. Smart Materials and Structures. 2017, 27-1. doi: 10.1088/1361-665X/aa9b01
124. JACKSON W., CRYNS B.K., HATCHELL., EMILIANO S.R., KURT L.S. Experimental Analysis of a Piezoelectric Energy Harvesting System for Harmonic, Random, and Sine on Random Vibration. Advances in Acoustics and Vibration Volume. 2013, doi: 10.1155/2013/241025

125. WANG X., YANG B., YU H., GAO Y. Transient vibration analytical modeling and suppressing for vibration absorber system under impulse excitation. *Journal of Sound and Vibration* Volume. 2017, 394:28, 90-180. doi: 10.1016/j.jsv.2017.01.042
126. PONTZER H., HOLLOWAY J.H., RAICHLEN D.A., LIEBERMAN D.E. Control and function of arm swing in human walking and running, *J Exp Biol.* 2009. doi: 10.1242/jeb.024927
127. ARTHUR C. *Biomechanical Analysis of Fundamental Human Movements.* Book. 2008. ISBN-10 0-7360-6402-6
128. DONEA J., HUERTA A., PONTHOT J.P., RODRÍGUEZ-FERRAN A. *Arbitrary Lagrangian–Eulerian Methods.* Willey. 2017. doi: 10.1002/9781119176817.ecm2009
129. MIGLINIENĖ I., OSTAŠEVIČIUS V., GAIDYS R., DAUKŠEVIČIUS R., JANUŠAS G., JURĖNAS V., KRASAUSKAS P. Rational Design Approach for Enhancing Higher-Mode Response of a Microcantilever in Vibro-Impacting Mode. *Sensors (Basel).* 2017. 17(12): 2884. DOI: 10.3390/s17122884
130. SuperMagnete.de [paskutinį kartą žiūrėta 2019 02 18]. Internetinė nuoroda https://www.supermagnete.de/eng/block-magnets-neodymium/block-magnet-5mm-x-2.5mm-x-2mm-neodymium-44h-nickel-plated_Q-05-2.5-02-HN
131. SuperMagnete.de [paskutinį kartą žiūrėta 2019 02 18]. Internetinė nuoroda https://www.supermagnete.de/eng/block-magnets-neodymium/block-magnet-10mm-x-10mm-x-2mm-neodymium-n45-nickel-plated_Q-10-10-02-N
132. SuperMagnete.de [paskutinį kartą žiūrėta 2019 02 18]. Internetinė nuoroda https://www.supermagnete.de/eng/ring-magnets-neodymium/ring-magnet-15mm-x-6mm-x-6mm-neodymium-n42-nickel-plated_R-15-06-06-N

PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS

STRAIPSNIAI RECENZUOJAMUOSE PERIODINIUOSE MOKSLO LEIDINIUOSE

Indeksuotuose mokslo leidiniuose su citavimo rodikliu

Tarptautinėse leidyklose

1. Daukševičius, Rolanas; Kleiva, Arūnas; Grigaliūnas, Valdas. Analysis of magnetic plucking dynamics in a frequency up-converting piezoelectric energy harvester // Smart materials and structures. Bristol : IOP Publishing. ISSN 0964-1726. eISSN 1361-665X. 2018, vol. 27, iss. 8, art. no. 085016, p. 1-19. DOI: 10.1088/1361-665X/aac8ad. [Scopus; Science Citation Index Expanded (Web of Science)] [IF: 2,963; AIF: 3,588; IF/AIF: 0,825; quartile: Q1 (2017, InCites JCR SCIE)] [CiteScore: 3,38, SNIP: 1,474, SJR: 1,152 (2017, Scopus Sources)] [M.kr.: T 009] [Indėlis: 0,334].

Nacionalinėse leidyklose

2. Kleiva, Arūnas.; Daukševičius, Rolanas. Experimental study of multi-magnet excitation for enhancing micro-power generation in piezoelectric vibration energy // Mechanika / Kauno technologijos universitetas, Lietuvos mokslų akademija, Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Kaunas : KTU. ISSN xxxx-xxxx. 2019, T. xx, nr. x, p. 1-6. DOI: xxxx. [M.kr.: T 009] [Indėlis: 0,50]. *Priimtas spaudai*.

Konferencijų pranešimų medžiagoje

Tarptautinėse leidyklose

3. Kleiva, Arūnas; Daukševičius, Rolanas. Numerical and experimental study of a novel body-mounted piezoelectric energy harvester based on synchronized multi-magnet excitation // EuroSimE 2019: proceedings of the 20th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, 24, 27 March 2019, Leibniz University of Hannover, Germany / ISSN xxxx-xxxx. 2019, p. 1-6. DOI: xxxx. [M.kr.: T 009] [Indėlis: 0,50]. *Priimtas spaudai*

Nacionalinė leidykla

4. Kleiva, Arūnas; Daukševičius, Rolanas. Experimental study of dynamic and electric characteristics of piezoelectric transducer excited by magnetic forces // *Mechanika 2016 : proceedings of the 21st international scientific conference*, 12, 13 May 2016, Kaunas University of Technology, Lithuania / Kaunas University of Technology, Lithuanian Academy of Science, IFTOMM National Committee of Lithuania, Baltic Association of Mechanical Engineering. Kaunas : Kauno technologijos universitetas. ISSN 1822-2951. 2016, p. 144-148. [Conference Proceedings Citation Index - Science (Web of Science)] [M.kr.: T 009] [Indėlis: 0,500].
5. Kleiva, Arūnas; Daukševičius, Rolanas. Experimental study of footstrike-induced impulse excitation for biomechanical energy harvesting // *Mechanika 2015 : proceedings of the 20th international scientific conference*, 23, 24 April 2015, Kaunas University of Technology, Lithuania / Kaunas University of Technology, Lithuanian Academy of Science, IFTOMM National Committee of Lithuania, Baltic Association of Mechanical Engineering. Kaunas : Kauno technologijos universitetas. ISSN 1822-2951. 2015, p. 155-159. [Conference Proceedings Citation Index - Science (Web of Science)] [M.kr.: T 009] [Indėlis: 0,500].

SL344. 2019-04-23, 13,75 leidyb. apsk. I. Tiražas 12 egz. Užsakymas 95.
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas