



VYTAUTAS MAGNUS
UNIVERSITY
— MCMXXII —

SYLVESTER SEDEM DJOKOTO

**AKTYVIŲJŲ
SKYSČIŲ TAIKymo
MECHATRONIKOS
SISTEMOSE
TYRIMAI**

DAKTARO DISERTACIJOS
SANTRAUKA

TECHNOLOGIJOS
MOKSLAI, MECHANIKOS
INŽINERIJA (T 009)

Kaunas
2021

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
VYTAUTO DIDŽIOJO UNIVERSITETAS

SYLVESTER SEDEM DJOKOTO

**AKTYVIŲJŲ SKYSČIŲ TAIKYMO MECHATRONIKOS
SISTEMOSE TYRIMAI**

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, mechanikos inžinerija (T 009)

2021, Kaunas

Disertacija rengta 2016–2021 metais Kauno technologijos universiteto Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakulteto Gamybos inžinerijos katedroje.

Mokslinis vadovas:

Dr. Egidijus DRAGAŠIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija, T 009).

Redagavo: Violeta Meiliūnaitė (Leidykla „Technologija“)

Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Dr. Giedrius JANUŠAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija, T 009) – pirmininkas.

Dr. Saulius BASKUTIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija, T 009).

Dr. Krzysztof JAMROZIAK (Vroclavo mokslo ir technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija, T 009).

Dr. Artūras KILIKEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija, T 009).

Dr. Renaldas RAIŠUTIS, (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, matavimų inžinerija, T 010).

Disertacija bus ginama viešame mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2021 m. rugsėjo 29 d. 14 val. Kauno technologijos universiteto disertacijų gynimo salėje.

Adresas: K. Donelaičio g. 73-403, 44249 Kaunas, Lietuva.

Tel. (370) 37 300 042; faks. (370) 37 324 144; el. paštas doktorantura@ktu.lt.

Disertacijos santrauka išsiųsta 2021 m. rugpjūčio 27 d.

Su disertacija galima susipažinti internetinėje svetainėje <http://ktu.edu>, Kauno technologijos universiteto bibliotekoje (K. Donelaičio g. 20, 44239 Kaunas, Lietuva) ir Vytauto Didžiojo universiteto Žemės ūkio akademijos bibliotekoje (Studentų g. 11, LT-53361 Akademija, Kauno r., Lietuva).

IVADAS

Pastaruoju metu yra didelis susidomėjimas įvairių tipų precizinių vykdiklių ir jutiklių, naudojamų mechaninėse ir mechatroninėse sistemose, konstrukcijų tyrimu. Aktyviųjų skysčių įvedimas šiek tiek pagerino šių didelio tikslumo vykdiklių ir jutiklių funkcionalumą. Šis tyrimas sutelktas į trijų skirtingų prietaisų funkcionalumo tobulinimą, taikant aktyviuosius skysčius (ERF ir MRF):

1. Konsolinės gembės (CB) slopinimas, naudojant elektreologinio skysčio (ERF) reologinių savybių pokyčius kaip slopinančią terpę;

2. Pjezoelektrinio energijos generatoriaus dažnio palaikymas, naudojant magnetoreologinio skysčio (MRF) reologinių savybių pokyčius kaip minkštą smūginę terpę;

3. Sferinio 3D rotacinio pjezoelektrinio deflektoriaus (RPD) stabdymas, naudojant aktyviuosius skysčius (ERF ir MRF) kaip stabdymo terpę.

Pirmasis pritaikymas suteikė būdą naudoti ERF kaip slopinančią (amortizuojančią) terpę mažoms konstrukcijoms. Augantis vidutinio dydžio mechaninių ir mechatroninių konstrukcijų taikymo poreikis sukėlė didelį mokslininkų susidomėjimą. Šios konstrukcijos dažnai būna veikiamos vibracijų, todėl, norint kad jos veiktų įvairiomis sąlygomis, pavyzdžiui, veikiant dinaminėmis apkrovomis, reikia tvirtesnės konstrukcijos. Gerai žinoma, kad vibracijos geriau valdomos slopinant sistemą. Taikant mažos galios valdymo signalą, aktyvieji skysčiai gali būti naudojami kintamai slopinimo jėgai sukurti [2].

Antrasis pritaikymas buvo pjezoelektrinio energijos generatoriaus išėjimo galios padidinimas, naudojant vibracinio smūgio metodą. Pjezoelektrinės energijos rinkimas yra procesas, kai aplinkoje esanti mechaninė energija renkama ir paverčiama elektros energija. Pjezoelektrinės medžiagos gali paversti mechaninį vibracinį poslinkį į elektros įtampą ir atvirkščiai. Tai taikoma daugelyje šiuolaikinių belaidžių telekomunikacijų prietaisų, tuo pačiu ir mobiliuosiuose telefonuose.

Trečiasis pritaikymas, kai aktyvūs skysčiai naudojami 3D rotacinio pjezoelektrinio deflektoriaus (RPD) stabdymui. Sukamojo tipo deflektoriai, pavyzdžiui, optinio spindulio deflektoriai, turi daug taikymo sričių. Didėjant palydovų sistemų miniatiūrizavimo poreikiui, reikia suprojektuoti nedidelius, kompaktiškus, mažai energijos sunaudojančius, judrius ir tvirtus mikro-optinius komponentus [10]. Vienas iš šių miniatiūrinių 3D sukamųjų pjezoelektrinių deflektorių buvo sukurtas Kauno technologijos universitete. 3D RPD yra įtaisai, paverčiantys pjezoelektrinių keitiklių daugiakrypčius rezonansinius virpesius į

labai tikslų (iki $0,1 \mu\text{m}$) nuolatinį arba žingsninį veidrodžio judėjimą ir naudojami tiksliai lazerio spindulio valdymui.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Tikslas: Atlikti teorinius ir eksperimentinius aktyviųjų skysčių (MRF ir ERF) taikymo tyrimus, siekiant pagerinti mechatronikos sistemų funkcionalumą.

Uždaviniai šiam tikslui pasiekti:

1. Atlikti aktyviųjų skysčių tyrimų, modelių ir pritaikomų sričių literatūros ir patentų apžvalgą.
2. Atlikti vibruojančios konsolinės gembės, naudojamos rezonansiniuose jutikliuose ir kituose prietaisuose, teorinius ir eksperimentinius tyrimus, slopinimui naudojant aktyvuotą ERF kaip slopinimo terpę.
3. Suprojektuoti ir eksperimentiškai ištirti MRF, kaip minkštosios smūginės terpės, panaudojimą bimorfino pjezoelektrinės energijos generatoriaus išėjimo galios didinimui.
4. Atlikti teorinius ir eksperimentinius tyrimus, pritaikant ERF ir MRF reologinių charakteristikų pokyčius 3D sukamojo pjezoelektrinio deflektoriaus stabdymo, kuris turi įtakos jo kampinio pozicionavimo tikslumui, pagerinimui.

Metodai ir įranga

Disertacija buvo paremta teoriniais, analitiniais ir eksperimentiniais tyrimais. Teoriniai skaičiavimai atlikti naudojant MATLAB matematinės analizės programinę įrangą. BEM analizė buvo atlikta programa „COMSOL Multiphysics“.

Eksperimentiniam ir simuliacinių ERF konsolinės gembės ir MRF pjezoelektrinio energijos generatoriaus rezultatams gauti pasirinkti bimorfinės pjezoelektrinės gembės parametrai.

3D sukamojo (rotacinio) pjezoelektrinio deflektoriaus eksperimentai buvo paremti prototipu, suprojektuotu Kauno technologijos universiteto Mechatronikos institute. Visi šioje disertacijoje pateikti eksperimentai buvo atlikti Kauno technologijos universiteto Mechatronikos institute.

Mokslinis naujumas

- Patobulintas vibruojančios gembės virpesių valdymas, gembės gale pritaikant aktyvuotą ERF kaip slopinimo terpę.

- Ištirta nauja koncepcija, naudojant aktyvuotą MRF kaip minkštą smūgio terpę vibruojančio PEG dažnių derinimui ir galios didinimui; o rezultatai rodo, kad buvo pasiekta padidėjusi ir stabili išėjimo galia.
- Sukurta nauja ERF ir MRF kaip stabdymo terpės panaudojimo 3D RPD koncepcija, o rezultatai parodė reikšmingą stabdymo pagerėjimą, kuris turi įtakos kampinio pozicionavimo tikslumui.

Praktinė vertė

Ištirtas vibruojančios konsolinės gembės slopinimas, gembės gale pritaikant aktyvuotą ERF kaip slopinimo terpę.

Sukurta naujas metodas, panaudojant aktyvintą MRF kaip minkštą smūginę terpę, vibruojančio pjezoelektrinio energijos generatoriaus dažnių derinimui ir galios didinimui.

Buvo sukurtas ir išanalizuotas ERF ir MRF, kaip stabdymo terpės, poveikis 3D RPD. Taip pat atliktas analitinis ir eksperimentinis stabdymo reiškinio tyrimas.

Gynimui pateikiami darbo rezultatai

1. Sukurtas naujas CB slopinimo su ERF metodas ir CB virpesių slopinimas, lokalizuojant elektorreologinį skystį konsolinės gembės gale.
2. Sukurtas naujas metodas, panaudojant aktyvuotą MRF kaip minkštą terpę ir vibruojančio PEG dažnių derinimui bei galios didinimui.
3. Sukurtas naujas 3D RPD kampinio pozicionavimo valdymo metodas taikant ERF ir MRF kaip stabdymo terpę.

Darbo aprobavimas

Moksliniai rezultatai buvo pristatyti 4 publikacijose *Web of Science* žurnaluose su citavimo indeksu, taip pat 8 tarptautinėse mokslinėse konferencijose.

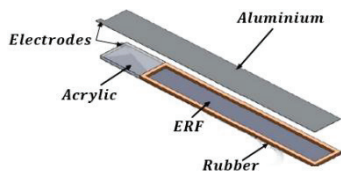
Trumpinys	Angliška reikšmė	Lietuviška reikšmė
CB	Cantilever Beam	konsolinė gembė
ERF	Electrorheological Fluid	elektorreologinis skystis
MRF	Magnetorheological Fluid	magnetorreologinis skystis
PEG	Piezoelectric Energy Generator	pjezoelektrinis energijos generatorius
RPD	Rotational Piezoelectric Deflector	sukamasis pjezoelektrinis deflektorius
SF	Smart Fluids	aktyvieji skysčiai

1. LITERATŪROS APŽVALGA

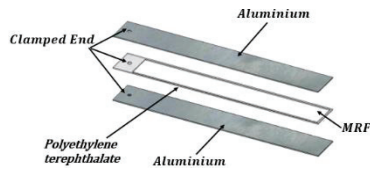
1.1. Slopinimo prietaisai

Mechaninės konstrukcijos ar prietaisai, pvz., dinaminiai virpesių slopintuvai, naudojami transporto priemonių variklių vožtuvuose, važiuoklėse ir daugelyje kitų sričių [11, 12]. Šių konstrukcijų virpesių slopinimas yra vadinamas aktyviu daugiasluoksniu slopinimu. ERF ir MRF daugiasluoksnėse aktyviose struktūrose savasis dažnis ir slopinimo savybės yra valdomi taikant išorinį lauką – elektrinį arba magnetinį [13–17]. Jų veikimo principas parodė dinamines ERF ir MRF daugiasluoksnių struktūrų charakteristikas: jas galima sureguliuoti taip, kad padidėjus elektriniam ar magnetiniam laukui, būtų gautas norimas slopinimo ir savajo dažnio santykis.

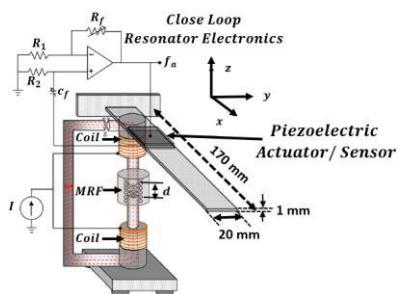
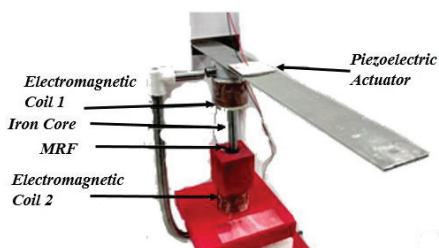
(a)



(b)



1.1 pav. Daugiasluoksnės gembės schemas su (a) ERF ir (b) MRF sluoksniais [13–17]

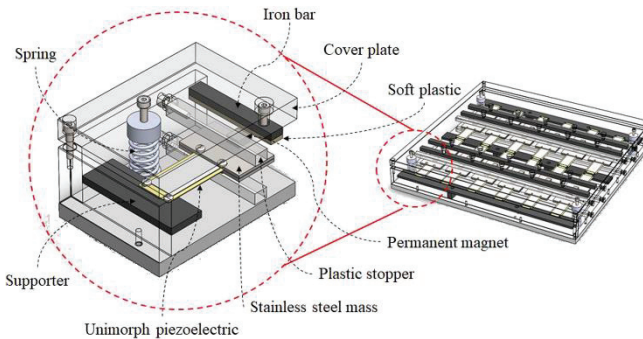


1.2 pav. Šlyties įtempių matavimo sistema: a) nuotrauka; (b) schema [23]

Tyrėjų atlikto tyrimo metu rezonansinio tipo jutiklyje naudojamas rezonansu vibruojantis elementas. Rezultatai rodo, kad rezonansinio tipo jutiklis yra labai stabilus, turi didelę skiriamąją gebą ir kvaziskaitmeninį išėjimą [20]. Šie prietaisai yra labai veiksmingi, kuomet yra naudojami kaip matavimo prietaisai ir prietaisai fizikiniams, cheminiams ir biologiniams dydžiams matuoti [21–23].

1.2. Vibracinis elektros energijos šaltinis

Mažos galios, belaidžių prietaisų ir jutiklių poreikio didėjimas skatina tvarios žaliosios atsinaujinančios energijos gamybos sistemų, kurios pakeistų tradicinį akumuliatorių energijos šaltinį, kūrimą. Būtent dėl šios priežasties prietaisams, kuriems reikia mažo galingumo, naudojami vibraciniai elektros energijos šaltiniai [28, 29].



1.3 pav. Vibracinio elektros energijos šaltinio, sumontuoto grindų plytelėse, schema [37]

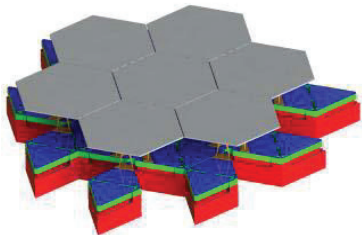
Pjezoelektrinių vibracinių elektros energijos šaltinių generuojamos galios galimybės priklauso nuo daugelio veiksnių, pavyzdžiui, medžiagos savybių, konsolinių gembų formų, struktūrinių parametų ir daugelio kitų [31–33].

1.3. Sukimosi tipo pjezoelektrinis deflektorius

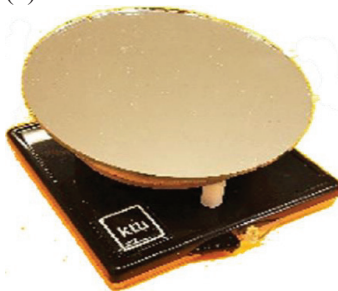
Varikliai ir vykdikliai dažniausiai sukuria vieno laisvės laipsnio sukamąjį arba tiesiaieįjį judesį. Šiuolaikinės rotacinės mašinos pasižymi sudėtingesnėmis struktūromis ir sudėtingais judesiais, kad būtų galima sėkmingai atlikti užduotis, kurios dar niekada nebuvo automatizuotos, pavyzdžiui, humanoidiniai robotai, chirurginiai robotai, elektrinės transporto priemonės ir daugelis kitų. Sferinio judesio sistema turi kompaktišką daugiafunkcinį standaus kūno judėjimą sferiniu paviršiumi su pastoviu sukimosi centru. Pramoninio tipo pavyzdžius galima rasti

stebėjimo prietaisuose, automatikos įrankiuose, automobiliuose ir buitinėje technikoje. Sferinio judesio generavimo įtaisai dažnai projektuojami derinant du ar tris sukamuosius vykdyklius su nuosekliai arba lygiagrečiai sujungtais mechanizmais.

(a)



(b)



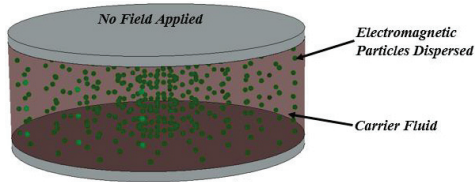
1.4 pav. Sukimosi tipo deflektoriai: (a) mikrovedrodžiai [55]; (b) eksperimentinio deflektoriaus su vienu veidrodžiu vaizdas [56]

1.4. Aktyviosios medžiagos

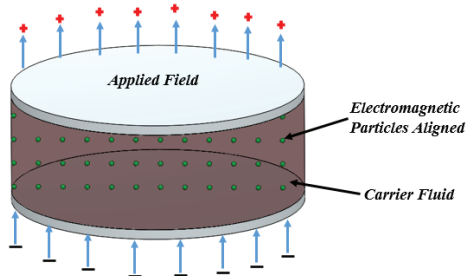
Kuriant šiuolaikines mechatronikos inžinerijos, telekomunikacijų inžinerijos, automatikos inžinerijos ir kt. sudėtingus įrenginius ir struktūras, reikia sukurti tobulesnes ir specializuotas medžiagas šiems taikymams. Viena iš pastaraisiais dešimtmečiais atrastų ir sukurtų medžiagų yra aktyviosios medžiagos, galinčios konvertuoti, pavyzdžiui, fotoelektrinę, termoelektrinę, pjezoelektrinę, fotoluminescencinę ar elektrostrikinę energiją [58].

1.4.1. Aktyviųjų skysčių savybės

Bendrai SF reakcijos yra panašios. Vienintelis skirtumas yra tas, kad, pavyzdžiui, MRF turi magnetinį prisotinimą, o ERF riboja dielektrinės savybės [81]. Taikant elektrinį lauką, ERF viduje esančios dalelės poliarizuojamos ir turi didesnę dielektrinę konstantą nei jį supantys skysčiai. Šis reiškinys sukelia dipolių momentus, kurie traukia vienas kitą ir sudaro dalelių išlyginimą, kad sumažintų dipolio-dipolio sąveikos energiją lauko kryptimi [67]. Kita vertus, MRF yra kur kas stabilesni, vartoja mažiau energijos ir turi didesnius šlyties įtempius [82]. ERF ypatingas tuo, kad jis pasižymi didesnėmis atsako charakteristikomis, palyginti su MRF [84].



1.5 pav. Aktyvusis skystis (SF), nepridėjus išorinio lauko



1.6 pav. Aktyvus skystis (SF), pridėjus išorinį lauką (elektrinį arba magnetinį)

1.5 pav. parodytas Binghamo klampaus skysčio elgesys, kai dalelės SF plinta be elektrinio / magnetinio lauko. Pritaikius atitinkamą lauką, dalelės sulyginamos į grandines, kaip parodyta 1.6 pav.

1.4.2. Aktyviųjų skysčių modeliavimas

Norint pritaikyti SF mechatronikos prietaisuose, reikalinga atitinkama valdymo sistema. Todėl modeliavimas siekiant numatyti netiesinį skysčio elgesį bus neatsiejama SF prietaisų projektavimo dalis. Buvo pristatyta daugybė fenomenologinių modelių, apibūdinančių SF įrenginių elgseną.

MRF taikomi sukimo momento perkėlimo įtaisuose, pavyzdžiui, stabdžiuose ir sankabose. „Lord Corporation“ prekiauo MRF mankštos ir sporto prietaisais [92–96]. Kita valdomų skysčių taikymo sritis yra amortizatoriai (slopintuvai) ir pakabos elementai, skirti naudoti pusiau aktyviai arba adaptyviai virpesiams valdyti.

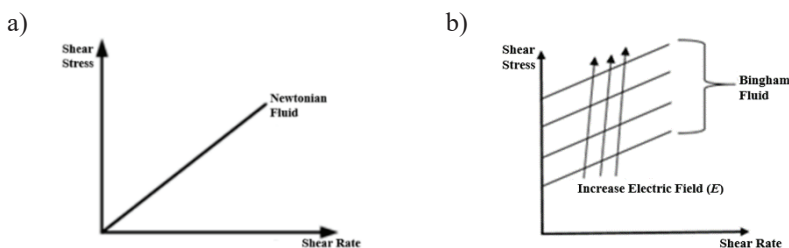
1.4.3. „Bingham“ modelis

„Bingham“ modelis – dažniausiai naudojamas modelis apibūdinant SF elgesį / elgseną. SF elgiasi kaip niutoninis skystis, kur skysčio kirpimo įtempio ir kirpimo tempimo santykis yra tiesinis.

Ideali Binghamo teorija SF elgseną apibrėžia kaip kietą medžiagą, kol viršijama takumo riba τ_y , ir tada yra tiesinis ryšys tarp įtempio ir šlyties ar deformacijos greičio. Didėjant taikomam laukui, didėja ir įtempiai. 1.7 paveiksle (a) parodytas būdingas SF elgesys be pritaikyto lauko ir (b) parodytas šlyties įtempio ir tariamosios klampos pokytis keičiant pritaikytą lauką. Todėl šlyties įtempis SF yra pateiktas 1.7 paveiksle, parodant takumo įtempio ir tariamosios klampos pokytį keičiant taikomą lauką. Todėl šlyties įtempis SF pateikiamas formule:

$$\tau = \tau_y \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta \dot{\gamma}, \quad (1.1)$$

kai: $\dot{\gamma}$ yra gaunamasis šlyties įtempis, valdomas taikomojo lauko, η yra skysčio plastinė klampa, taigi Niutono būseną be pritaikyto lauko [85].



1.7 pav. a) būdingas SF elgesys be pridėto elektrinio lauko; b) MRF šlyties įtempio ir šlyties deformacijos kitimas esant skirtingiems magnetinio lauko stipriams [85]

Aktyvių skysčių sistemų Binghamo slopinimo modelio mechanizmas susideda iš Coulombo trinties elemento, įdėto lygiagrečiai su klampiu slopintuvu, kaip parodyta 1.7 paveiksle. Diagramoje parodytas modelis turi jėgą F , kuri sukuriama SF įtaiso, gali būti išreikšta:

$$F = f_c \operatorname{sgn}(\dot{x}) + C_0 \dot{x}, \quad (1.2)$$

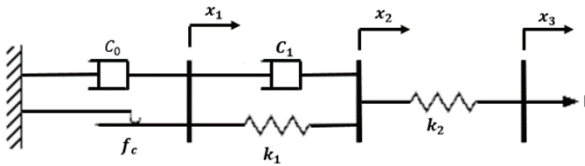
kur \dot{x} yra greitis dėl išorinio sužadavimo, C_0 yra slopinimo koeficientas ir f_c yra trinties jėga.

1.4.4. Išplėstinis „Bingham“ modelis

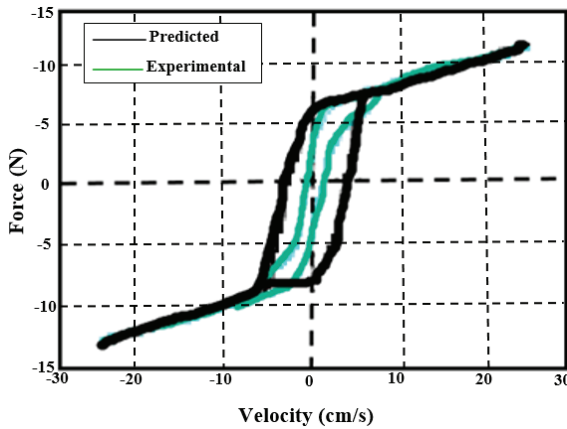
Tyrimus, pateikiančius išplėstinį Binghamo modelį, parodantį SF elgseną prieš derlių, po derliaus ir po derliaus taško, atliko [130]. Todėl šios sistemos jėgą suteikia:

$$F = \begin{cases} C_0 \dot{x}_1 + f_c \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) \\ k_1(x_2 - x_1) + C_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \\ k_2(x_3 - x_2) \\ k_1(x_2 - x_1) + C_1\dot{x}_2 \\ k_2(x_3 - x_2) \end{cases} \quad |F| > f_c \\ |F| \leq f_c \quad , \quad (1.3)$$

kur C_0 yra slopinimo koeficientas ir trinties jėga, f_c yra atitinkamai plastinės klamos ir takumo įtempis. Nuo lauko priklausantys parametrai C_1 , k_1 and k_2 yra skysčio elastingės savybės prieš derliaus sritį, parodytos 1.8 paveiksle [131].



1.8 pav. Išplėstas Binghamo modelis [132]

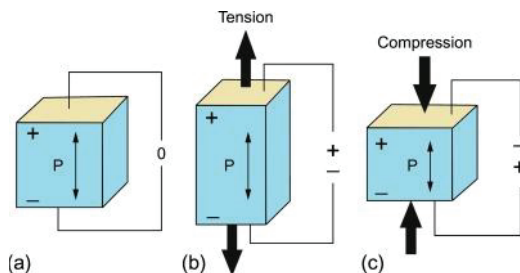


1.9 pav. Prognozuojamos ir eksperimentiškai jėgos greičio, būdingo Binghamo modeliui, palyginimas [129]

1.4.5. Vibracinis elektros energijos šaltinis

Pjezoelektrinės medžiagos paverčia mechaninę deformaciją į elektros krūvį arba atvirkščiai. Įtaisai su pjezoelektrinėmis medžiagomis skirstomi į tris

pagrindines kategorijas: jutikliai, pavaros ir vibraciniai elektros energijos šaltiniai [154].



1.10 pav. Tiesioginio pjezoelektrinio reiškinio (efekto) schema: a) nedeformuojama pjezoelektrinė medžiaga; elektros krūvio susidarymas esant (b) įtempimui ir (c) suspaudimui [155]

Tiesioginis pjezoelektrinis efektas naudojamas vibraciniuose elektros energijos šaltiniuose. Mechaniniai virpesiai, kurie paprastai yra nepanaudojama energija, paverčiami elektros energija per tokį įtaisą. Viena iš mechaninės energijos sričių, iš kurios galima generuoti elektrinę energiją, yra pasikartojantys žmogaus kūno judesiai. Pjezoelektrinės plytelės dedamos ant šokių aikštelių [172] ir geležinkelio stočių grindų [173], kur išėjimo energija kaupiama akumuliatoriuje ir naudojama kai kuriems objektams apšviesti. Pjezoelektrinės energijos rinkimas dabar vaidina svarbų vaidmenį daiktų internete, nes kiekvienam jutikliui reikės maitinimo šaltinio.

Padidėjo pjezoelektrinio elemento, naudojamo vibraciniuose elektros energijos šaltiniuose, projektavimo poreikis. Dėl to reikia modelių, kurie galėtų numatyti bet kurios grandinės, sujungtos per pjezoelektrinio įtaiso elektrodus, sugeneruotą įtampą. Pjezoelektrinių prietaisų projektavimas ir modeliavimas reikalauja kelių projektavimo proceso etapų. Pjezoelektriniai ekvivalentiniai grandinių modeliai paprastai naudojami atliekant bendrus sistemos tyrimus ankstyvuose projektavimo etapuose.

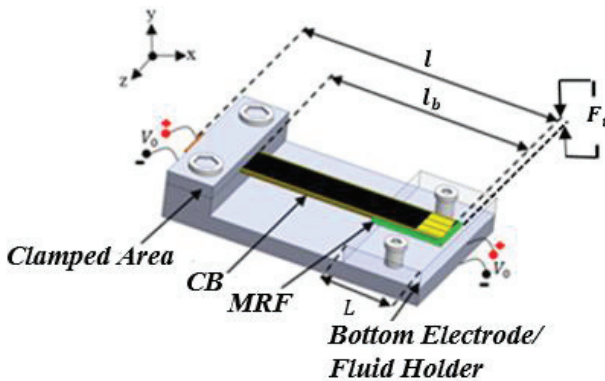
2. MAŽŲ KONSOLINIŲ GEMBIŲ VIRPESIŲ VALDYMAS, NAUDOJANT ERF KAIP SLOPINIMO TERPĘ

2.1. Įvadas

Šiame tyrime buvo pasiūlyta nauja pavara, naudojanti ERF kaip slopinančią terpę. Pagrindinė siūlomos pavaros koncepcija yra sustiprinti jėgą, atsirandančią dėl elektrinio lauko, kurį sukuria naudojama įtampa naudojant ERF.

2.2. ERF CB projektavimas ir modeliavimas

Siūloma konsolinės gembės (CB) su ERF aktyviaja slopinančia terpe struktūra yra parodyta 2.1 pav. Sistema pagaminta iš vibruojančios konsolinės gembės, kurio galas veikiamas ERF. ERF sluoksnis, storis $F_t = 0,7$ mm, dedamas ant stačiakampio skysčio laikiklio su elektrodu dugne. Skysčio sluoksnio storis F_t buvo pasirinktas atsižvelgiant į prietaiso pobūdį. Veikiamas elektrinio lauko ERF sukietėja, taip tarnaudamas kaip aktyvus vibruojančios konsolinės gembės slopintuvas.



2.1 pav. Konsolinės gembės su elektreoreologinio skysčio slopintuvu (CB-ERF) aktyviosios palaikymo sistemos konfigūracija

2.2.1. Spaudžiamo elektreoreologinio sluoksnio analizė

2.1 pav. rodo, kad apatinis elektrodas yra pritvirtintas prie skysčio pagrindo plokštės, o viršutinis elektrodas šiuo atveju yra aukšтын–žemyn vibruojanti konsolinė gembė. Slopinimo jėga jau yra ir tada, kai ERF dar nėra

veikiamas elektrinio lauko [197]. Slopinimo jėga, susidaranti dėl ERF klamos, gali būti užrašyta taip:

$$F_d(t) = F_p(t) + F_{ERF}(t), \quad (2.1)$$

kur $F_d(t)$ yra bendra slopinimo jėga. $F_p(t)$ yra klampi slopinimo jėga, o $F_{ERF}(t)$ – valdoma slopinimo jėga, susijusi su veikiančiu elektriniu lauku. Šias slopinimo jėgas apibūdina šios lygtys:

$$F_p(t) = \frac{L\mu w^4}{[h_0+h(t)]^3} \dot{h}(t) \quad , \quad (2.2)$$

$$F_{ERF}(t) = \frac{Lw^3}{[h_0+h(t)]^3} \tau(E) \operatorname{sgn}(\dot{h}(t)) \quad , \quad (2.3)$$

kur $h(t)$ ir $\dot{h}(t)$ yra atitinkamai poslinkis ir greitis tarp elektrodo ir gembės; h_0 yra pradinis tarpas tarp elektrodų; L ir w , atitinkamai yra elektrodo ilgis ir plotis, o μ yra pagrindinė ERF klampa, kai elektrinis laukas yra lygus nuliui; $\tau(E)$ – įtampa, suteikianti ERF šlyties įtempius.

2.2.2. Dinamiškas konsolinės gembės ir elektreologinio skysčio sistemos atsakas

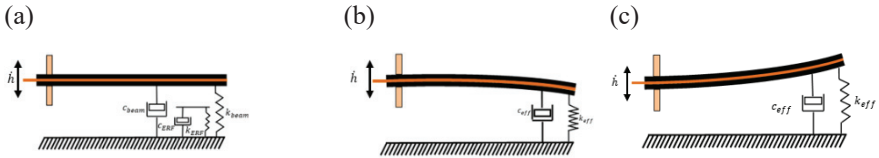
Konsolinės gembės judėjimas vaizduojamas kaip vieno laisvės laipsnio priverstinis harmoninis svyravimas, išreikštas kaip [200]:

$$\ddot{h}(t) + (c_{eff}/m)\dot{h}(t) + (k_{eff}/m)h(t) = F_p(t)/m + F_d(t)/m, \quad (2.5)$$

kur $c_{eff} = c_{beam} + c_{ERF}$ – suminis efektyvus sistemos slopinimas; $k_{eff} = k_{beam} + k_{ERF}$ – suminis efektyvus sistemos standumas, $F_p(t)$ – pjezoelektrinė jėga, kur k_{beam} yra laisvai vibruojančios konsolinės gembės kontakto standumas.

2.2 pav. parodyta virpančios konsolinės gembės schema. 2.2 (a) pav. konsolinė gembė laisvai vibruoja be aktyvuoto ERF. Konsolinės gembės standumas k_{beam} yra pastovus poslinkio metu, o virpesių elgesys yra tiesinis. 2.2 (b) pav. parodytas pusiau kietas aktyvus stabdis, sudarytas iš aktyvinto ERF, esančio po vibruojančios konsolinės gembės galu. Kai vibruodama ji paveikia aktyvuotą sukietėjusį ERF sluoksnį (stabdį), konsolinės gembės standumas buvo

konvertuotas iš k_{beam} į k_{ERF} , kur $k_{ERF} \gg k_{beam}$. Suteikus tą $k_{ERF} \gg k_{beam}$, padidėja sistemos efektyvusis rezonansinis dažnis. Toje vietoje, kai aktyvusis ERF stabdis dėl elektrinio lauko intensyvumo, ERF veikiant suspaudimo režimu, elgiasi kaip pusiau kietas, tada standumas tampa k_{ERF} ($k_{ERF} > k_{beam}$) kaip parodyta 2.2 pav. (c), todėl efektyvus konsolinės gembės (po smūgio) standumas pasikeičia iš k_{beam} į $(k_{ERF} + k_{beam})$.



2.2 pav. Konsolinių gembių (CB) schemas su ERF atrama ir dinaminiais modeliais. (a) nėra ERF, (b) ERF suspaudimas ir (c) ERF tempimas

ERF dalelių grandinės standumas (k_{ERF}) nustatomas [204]:

$$k_{ERF} = \left| \frac{\partial F_{ERF}}{\partial y} \right| = \left(LW\tau(E) + \frac{2\mu Lw}{h(t)} \right). \quad (2.12)$$

Aktyvios konsolinių gembių su ERF atrama (CB-ERF) stabdžių sistemos rezonansinis dažnis nurodomas taip:

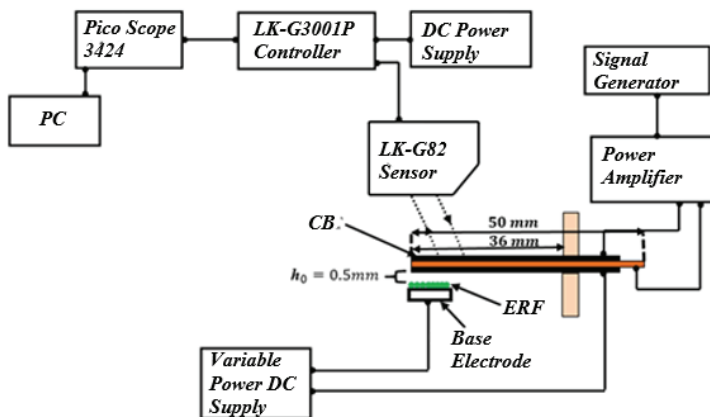
$$\omega_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{eff}}{m_{eff}}} \quad (2.13)$$

2.3. Eksperimentinis konsolinių gembių su ERF atrama tyrimas

Konsolinės gembės virpesių valdymo schema ir eksperimentinė sąranka, naudojant aktyvią ERF atramą gale, parodyta 2.3 ir 2.4 pav. Eksperimentinę įrangą sudaro signalo generatorius („Tabor WW5064“) ir galios stiprintuvas (EPA-104), prijungtas prie prispaustos pjezoelektrinės konsolinės gembės. Žadinimo dažnis buvo nuo 160 Hz iki 300 Hz. Lazerinis poslinkio jutiklis („Keyence LK G82“) buvo nustatytas virš vibruojančios konsolinės gembės laisvo galo. Analoginis įtampos signalas, užfiksuotas poslinkio jutikliu, siunčiamas valdikliui („Keyence LK-G3001P“), tada apdorojamas ir filtruojamas „PicoScope-3424“ analoginiu / skaitmeniniu osciloskopu. Galiausiai virpesiai analizuojami kompiuteriu, prijungtu prie osciloskopo.

2.3.1 Eksperimentinis tyrimas

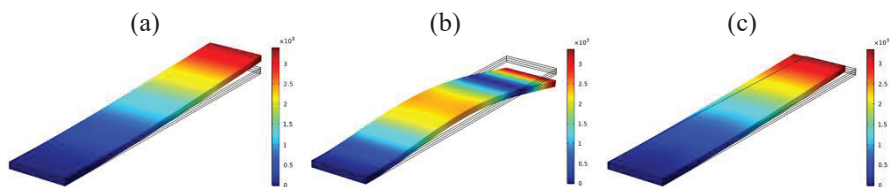
Pagal lygtį $E=V_0/h$ apskaičiuotas atitinkamas elektrinio lauko stiprumas E : 0 kV/mm (be įtampos ERF), 1,6 kV/mm, 1,8 kV/mm ir 2kV/mm. Atitinkamas šlyties įtempis τ (E) yra atitinkamai 0 kPa, 0,7 kPa, 0,8 kPa ir 1 kPa.



2.3 pav. Charakteristikų matavimo schema

2.4. Konsolinės gembės su ERF atrama (CB-ERF) dinaminio modeliavimo tyrimas su COMSOL Multiphysics

„COMSOL Multiphysics 5.4 Simulation“ programinėje įrangoje buvo imituojamas lygiavertis modelis, siekiant tiksliai numatyti laisvai vibruojančio CB rezonanso dažnį, klampų ERF slopinimą ir spaudimo režimo smūgio reiškinius. Pirmųjų dinaminų modeliavimų tikslas buvo nustatyti gembės modų formas ir natūralius dažnius. Modeliuojamos natūralaus dažnio ($\omega_n s$) vertės: $\omega_n s1 = 247$ Hz, $\omega_n s2 = 1551$ Hz ir $\omega_n s3 = 2.4089$ kHz. 2.4 pav. Iliustruojami imituoti konsolinių gembių mikrostruktūros lenkimo rezonanso režimai.

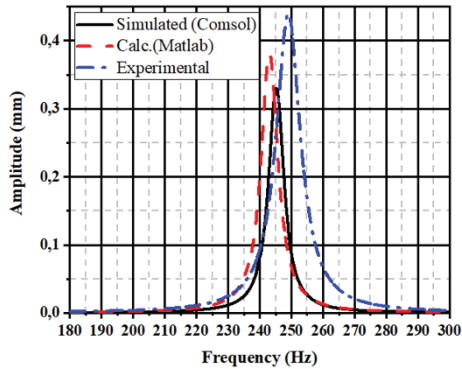


2.4 pav. Modeliuojamos pirmosios trys lenkimo režimo modos, kurių dažniai (a) 247 Hz, (b) 1551 Hz ir (c) 2,4089 kHz

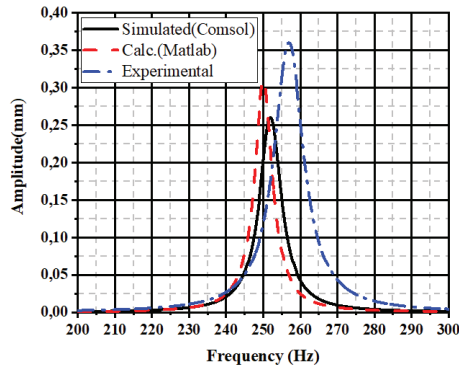
2.5. Rezultatai ir diskusijos

2.5.1. Konsolinės gembės su ERF atrama (CB-ERF) sistemos modeliavimo rezultatai

Konsolinių gembių (CB) dažnio atsakas priklauso nuo konstrukcijos elementų standumo ir masės pasiskirstymo. Pirmiausia buvo tiriama rezonansiniai natūralūs dažniai, esant skirtingoms elektrinio lauko konfigūracijoms.



2.5 pav. Konsolinės gembės (CB-ERF) amplitudės priklausomybė nuo dažnio, kai nėra ERF atramos

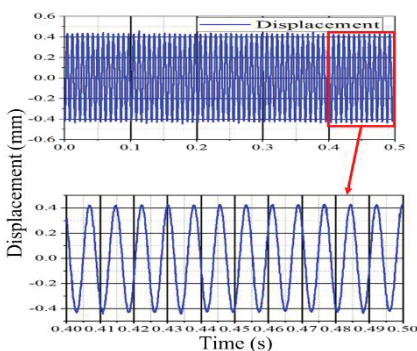


2.6 pav. Konsolinės gembės su ERF atrama (CB-ERF) amplitudės priklausomybė nuo dažnio, kai elektrinio lauko stiprumas yra 0 kV/mm

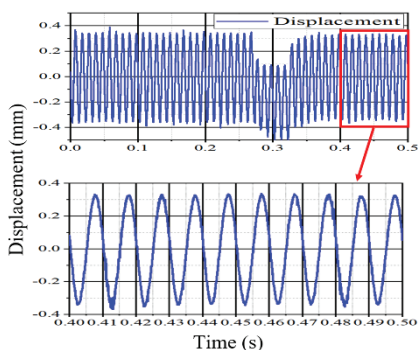
2.6. Eksperimentiniai konsolinės gembės su ERF atrama (CB-ERF) sistemos tyrimai laiko atžvilgiu

Kaip nurodyta modeliuotuose ir analitiniuose bandymuose, duomenys, gauti iš CB su ERF atrama, buvo tiriama be elektrinio lauko ir buvo lyginami su taikomu elektros lauku. CB žadinimo dažnis svyravo nuo 160 Hz iki 300 Hz.

CB-ERF sistemos laisvo galo virpesių kreivės parodytos 2.7 ir 2.8, paveiksluose. Šie rezultatai rodo CB-ERF atramos *peak to peak* (dvigubos amplitudės) svyravimus, kai nėra elektrinio lauko arba jis yra (atitinkamai 1,6 kV/mm, 1,8 kV/mm ir 2 kV/mm). Laiko atsako grafikuose parodytą atsako skilimo greitį galima apibūdinti pagal slopinimo santykį, kaip parodyta 2.15 lygtyje. Slopinimo santykis, jei nėra magnetinio lauko, yra 0,20 %; 2kV/mm lauke jis padidėja iki 0,45 %.



2.7 pav. Virpesiai Eksperimentiniai MCB rezultatai be EMF paramos



2.8 pav. Virpesiai Eksperimentiniai MCB rezultatai be ERF palaikymo su aktyvuota ERF esant 0 kV/mm.

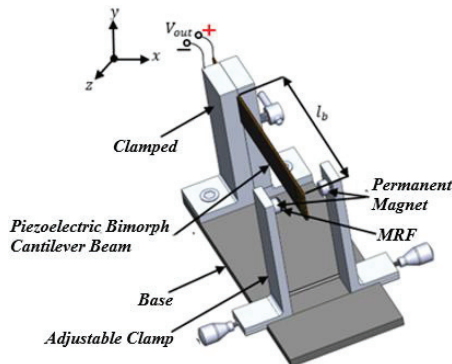
3. PIEZOELEKTRINĖS ENERGIJOS GENERATORIUS DAŽNIO DERINIMAS PAGAL VEIKIAMĄ MRF

3.1 Įvadas

Šiame skyriuje trumpai apžvelgiami pjezoelektrinio energijos generatoriaus dažnio derinimo būdai ir bus nustatyta, kad taikant MRF poveikį gali būti keičiamas dažnis.

3.2 Matematinė pjezoelektrinio energijos generatoriaus studija

Siūlomas pjezoelektrinis bimorfinis energijos generatorius ir jo veikimo būdas parodytas 3.1 pav. Sistema susideda iš vibruojančios pjezoelektrinės bimorfinės gembės ir dviejų nuolatinių magnetų, sumontuotų priešingose gembės pusėse. MRF kaip smūginis elementas pritvirtintas prie vieno iš nuolatinių magnetų. Nuolatiniai magnetai yra išdėstyti taip, kad būtų nukreipti vienas į kitą priešingais poliais tarpu d_m horizontalioje plokštumoje x ašimi. Sistema buvo sumodeliuota magnetais, išdėstytais $0.8l_b$ laisvo pjezoelektrinio bimorfo gembės ilgio.



3.1 pav. Siūlomas MRF energijos generatorius

Pjezoelektrinė medžiaga išsaugo didžiąją dalį pagamintos energijos. Elektros energijai generuoti reikalinga varžinė apkrova. Elektrinė apkrova modeliuojama kaip vienas rezistorius. Vidutinė galia, kurią sukuria bimorfinė pjezoelektrinė gembė pagal [219], nurodomas kaip:

$$Power = \frac{\omega_{sys}^2 t_{sh}^2 w^2 \epsilon_{31}^2 x^2}{4 \left(1 + w l_b \epsilon_{33} \times \frac{\omega_{sys} R}{t_p} \right)^2} \times R, \quad (3.14)$$

kur ω_{sys} yra MRF pagrįstos sistemos rezonansinis kampinis dažnis, t_{sh} yra tarpinio sluoksnio storis, w yra gembės plotis, x yra maksimali deformacija ir t_p yra pjezoelektrinio sluoksnio storis; e_{31} yra pjezoelektrinė konstanta. Atsparumas apkrovai R pjezoelektrinės medžiagos pateikiama kaip [220]:

$$R = \frac{1}{C_p \omega_{sys}}, \quad (3.15)$$

kur C_p yra pjezoelektrinio bimorfo talpa.

Sistemos efektyvumas priklauso nuo mechaninės energijos pavertimo elektros energija. Šiame darbe buvo naudojamas efektyvumo modelis, kurį pasiūlė [221]. Šioje formulėje energijos konversijos efektyvumas eff buvo apibrėžtas kaip sukurto elektros energijos (P_L) apkrovos rezistoriuje R_L ir sunaudotos galios (P_c) santykis visame energijos generatoriaus įtaise, įskaitant apkrovos rezistorių, esant $\omega = \omega_{sys}$, kuris gaunamas kaip:

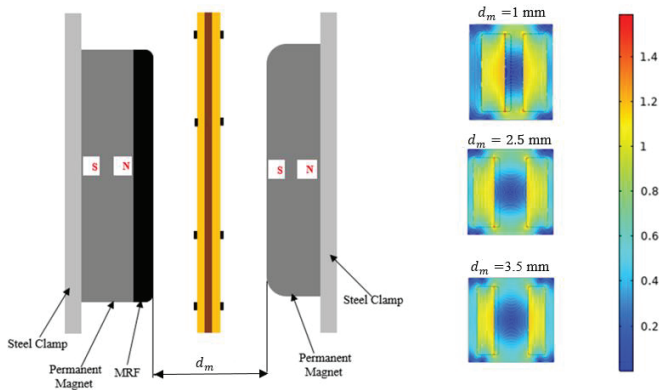
$$eff \approx \frac{P_L}{P_c} = \frac{k_{33}^2/2(1-k_{33}^2)}{(1/Q_m + k_{33}^2/2(1-k_{33}^2))}, \quad (3.16)$$

kur Q_m yra pjezoelektrinio bimorfo mechaninis kokybės faktorius. Atsparumas apkrovai R_L kaip duota lygtyje (3.15). k_{33} yra pjezoelektrinio sukabinimo koeficientas.

3.3 Pjezoelektrinio energijos generatoriaus tyrimas baigtinių elementų metodu

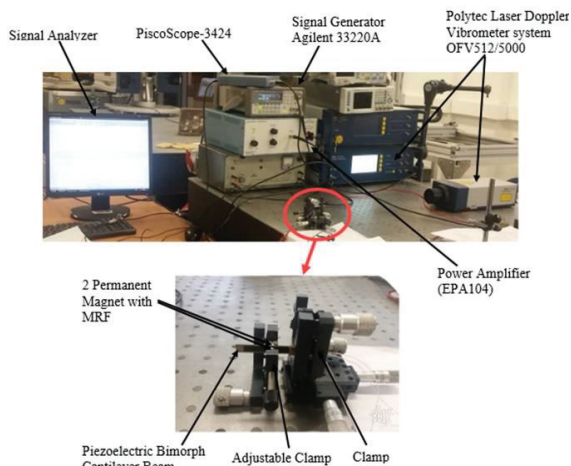
Sukurta pjezoelektrinio bimorfo galia priklauso nuo magnetinio lauko intensyvumo MRF, kuris atitinka tarpą (d_m) tarp dviejų nuolatinių magnetų ir MRF stabdžio. 3.3 pav. rodo magnetinės grandinės modeliavimą, kad sukurtų reikiamą magnetinį lauką, kuris turi įtakos MRF charakteristikoms COMSOL Multiphysics.

MRF ir pjezoelektrinio bimorfo gembės modeliavimas buvo klasifikuojamas taip: laisvi gembės virpesiai (i) be skysčio, su skysčiu, kai 0T; kai tarpas tarp nuolatinių magnetų (ii) $d_m = 1 \text{ mm}$, atitinkantis 0,3 T, (iii) $d_m = 2,5 \text{ mm}$, atitinkantis 0,2 T, ir (iv) $d_m = 3,5 \text{ mm}$, atitinkantis 0,1 T.



3.3 pav. FEM magnetinio srauto tankio modeliavimas esant skirtingiems tarpams ($d_m = 1\text{ mm}$, $d_m = 2,5\text{ mm}$ ir $d_m = 3,5\text{ mm}$)

3.4 Eksperimentinis tyrimas



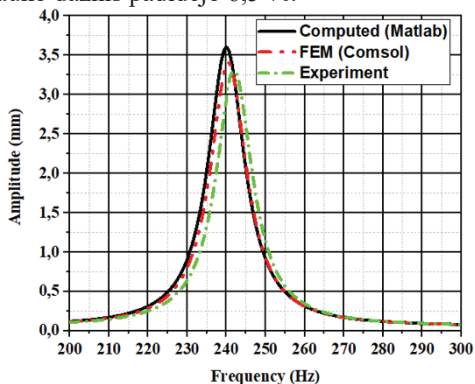
3.4 pav. Eksperimentiniai smūgio pagrindu atliekamo dažnio didinimo, naudojant vibruojančio bimorfo pjezoelektrinės energijos generatorių, nustatymai

Pagrindinė eksperimente naudojama įranga yra bimorfinė konsolinė gembė, du nuolatiniai magnetai Nd-Fe-B (N42), stiprintuvas, signalo generatorius, lazerinis vibrometras ir osciloskopas. Magnetinio lauko srautui matuoti buvo naudojamas magnetinis laukas „Gauss Meter“ (HHG191).

Signalinis generatorius („Signal Generator Agilent 33220A“) buvo naudojamas sužadinti pjezoelektrinę bimorfinę gembę su nustatytu sinusinio įjungimo dažniu, svyruojančiu nuo 0 Hz iki 300 Hz. Pjezoelektrinės bimorfinės gembės virpesių atsakas buvo matuojamas bekontakčiu lazerinio doplerio vibrometru („Polytec Laser Doppler Vibrometer“ sistema OFV512 / 5000).

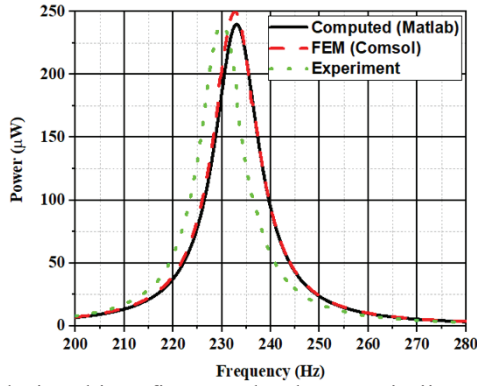
3.5 Rezultatai ir jų aptarimas

Dažnio padidėjimas buvo pastebėtas, kai padidėjo magnetinis laukas, pritaikytas MRF. Remiantis analizės rezultatais, matyti, kad laisvos vibruojančios gembės dažnis padidėjo 4 % be smūgio į MRF stabdį iki didžiausio magnetinio lauko, esant 0,3T, taikant MRF stabdį. FEM imitavimo modelio rezultatai parodė, kad dažnis padidėjo 3,8 %, kai MRF taikomas 0,3T magnetinis laukas. Eksperimentiniai rezultatai, kita vertus, parodė, kad taikant 0,3T magnetinio lauko dažnis padidėjo 6,5 %.



3.5 pav. Pjezoelektrinės bimorfinės konsolinės gembės su MRF stabdžiu dažnio atsakas, esant 0,2 T

Šiame darbe gauti išėjimo galios rezultatai sutampa su kitais rezultatais, pateiktais pjezoelektrinių dažnių derinimo įtaisams. Rezultatai, kuriuos pateikė [217], pateikė pjezoelektrinę gembę, kurios natūralus dažnis buvo 26 Hz, naudojamos energijos surinkimui, kuri sėkmingai sureguliuotas 22–32 Hz dažnių diapazone, kad būtų užtikrinta nuolatinė galia 240–280 μW per visą išbandytą dažnių diapazoną.



3.6 pav. Pjezoelektrinės bimorfinės gembės be MRF išėjimo galia, palyginti su dažnio atsaku

4. SU AKTYVAUS SKYSČIO STABDIS 3D PASUKAMAM SFERINIS PJEZOELEKTRINIAM DEFLEKTORIUI

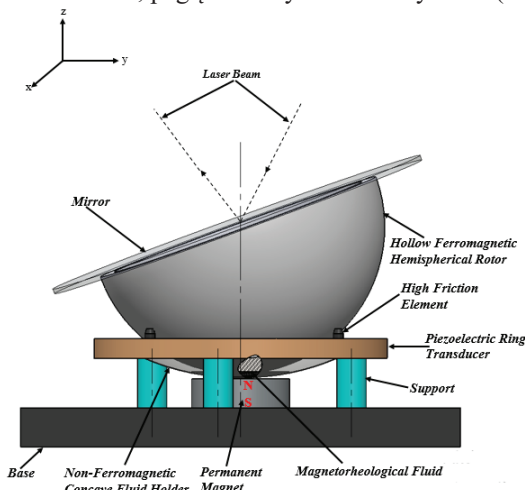
4.1. Įvadas

Aktyviųjų skysčių savybės ir charakteristikos, aprašytos 2 ir 3 skyriuose, paskatino 3D (rotacinio pjezoelektrinio deflektoriaus) MRF ir ERF sferinių stabdžių konstrukcijos tyrinėjimą. Šiame skyriuje pateikiamas 3D RPD dizainas, sprendžiant pagrindinę šio įrenginio konstrukcijos problemą - kampinės padėties nuokrypius dėl sferinio kūno inercijos momento. Aktyviųjų skysčių įvedimas į 3D RPD sudarė sąlygas tiksliam kampiniam padėties nustatymui.

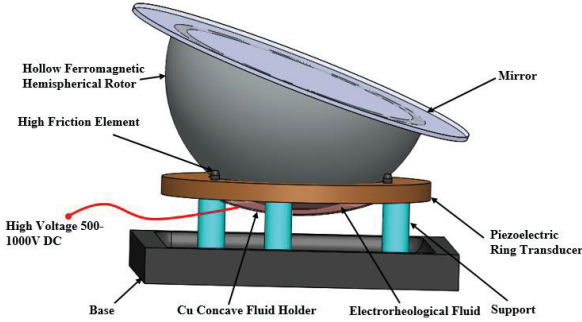
4.2 3D RPD projektavimas naudojant aktyvius skysčius

Pjezoelektrinio 3D optinio spindulio deflektoriaus prototipas yra pagrįstas ankstesniais tyrimais, pateiktais [225], 4.1 ir 4.2 pav. Parodytas 3D RPD prototipas, kurį sudaro dvi dalys: PZT-8 pjezoelektrinio keitiklio žiedas su ašine poliarizacija ir tuščiaviduris feromagnetinis pusrutulio rotorius.

Tokio sudėtingo mechanizmo trūkumai yra tada, kai varomasis vykdyklis yra jau išjungtas, o dėl rotoriaus inercijos jėgų sunku nuolat ir sklandžiai valdyti jėgą bei tiksliai nustatyti padėtį. Būtent dėl šios priežasties kuriama naujas sferinis stabdymo mechanizmas, pagrįstas aktyviaisiais skysčiais (ERF ar MRF).



4.1 pav. Sukamojo pjezoelektrinio deflektoriaus su MRF stabdymo terpe (priemone, stabdžiu) principas



4.2 pav. Sukamojo pjezoelektrinio deflektoriaus su ERF stabdymo terpe (priemone, stabdžiu) principas

4.2.1. RPD stabdymo analizė naudojant MRF

4.3 (a) paveiksle parodytas 3D RPD skerspjūvis. r_s yra pusrutulio rotoriaus spindulys, g yra MRF, užpildyto tarp rotoriaus ir feromagnetinio skysčio laikiklio, aukštis, o r_f – atraminio didelės trinties elemento spindulys. Aukštis tarp trinties elemento ir pjezoelektrinio žiedo keitiklio h_1 , o aukštis tarp lenkto rotoriaus pjezoelektrinio žiedo keitiklio – h_2 . Kampai, atitinkantys apatinio rotoriaus lanko dalis prie skysčio ir pjezoelektrinio žiedo keitiklio, žymimi atitinkamai β_{MRF} ir β_{pr} . Todėl galima gauti šią lygtį:

$$\int_{\beta_a}^{\beta_s + \beta_a} \int_0^{\alpha_{MRF}} (r + h)^2 \sin \beta \, d\alpha \, d\beta = \int_{\beta_s + \beta_a + \beta_{pr}}^{\beta_{MRF}} \int_0^{\alpha_{MRF}} (r + h)^2 \sin \beta \, d\alpha \, d\beta = \cos(\beta_s + \beta_a) + \cos(\beta_s + \beta_a + \beta_{pr}) - \cos(\beta_{MRF}) = \cos \beta_s \quad (4.1)$$

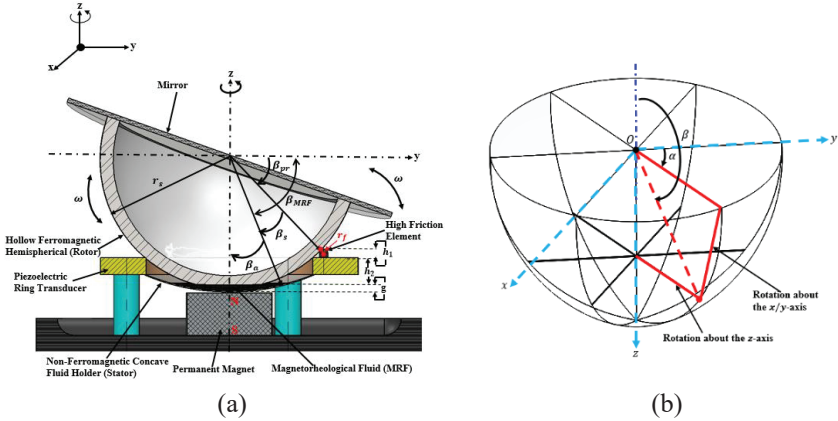
Remiantis, gaunamos šios priklausomybės:

$$\sin \beta_s = \frac{r_f}{r_s + g}, \quad (4.2)$$

$$\beta_s + \beta_a + \beta_{pr} = \beta_{MRF}, \quad (4.3)$$

$$h_1 = (r_s + g)(\cos \beta_s - \cos(\beta_s + \beta_a)), \quad (4.4)$$

$$h_2 = (r_s + g)(\cos(\beta_s + \beta_a) - \cos(\beta_s + \beta_a + \beta_{pr})). \quad (4.5)$$



4.3 pav. Sukamojo pjezoelektrinio deflektorių. a) siūlomo 3D RPD schema; b) sukimo momento modelio sferinė koordinatų sistema

Išėjimo sukimo momentas T_{output} susidaro pusrutulio rotoriaus, todėl:

$$T_{output} = T_{\tau} + T_{\mu} + T_{\eta} \quad (4.9)$$

kur T_{η} yra mechaninė trintis ir T_{τ} yra valdomas sukimo momentas, nurodytas kaip:

$$T_{\tau} = \int_{A_s} r_{\tau} \tau_y(B) dA_s \quad (4.10)$$

T_{μ} yra klampus sukimo momentas, nurodytas kaip:

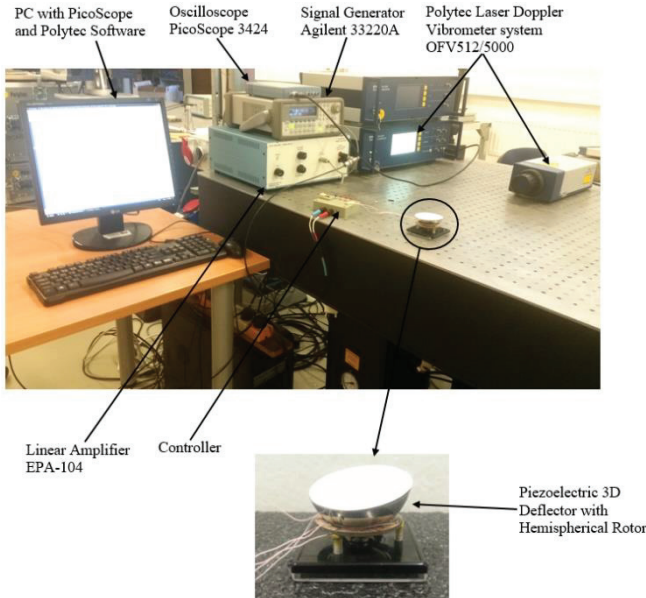
$$T_{\mu} = \int_{A_s} r_{\mu} \mu \dot{\gamma} dA_s \quad (4.11)$$

kur A_s žymi sferos paviršiaus plotą, kurią aktyvuoja magnetinis laukas, r_{τ} yra momento svirtis, kuri yra atstumas nuo sferos paviršiaus taško iki sukimosi ašies. Programoje 3D RPD sukimosi greitis yra lėtesnis, todėl T_{μ} yra proporcingas kampiniam greičiui ir tai yra nereikšminga.

4.3 Eksperimentinė analizė

Eksperimentinė darbo vieta, pateikta 4.4 pav., rodo 3D RPD su MRF ir ERF prototipą. Gauti kampinio poslinkio rezultatai buvo sužadinant pjezoelektrinio keitiklio žiedą. Gautas signalas buvo 22 ciklų gęstančių virpesių

tipo harmoninių virpesių signalas, kuris kartojamas kas 0,5 sekundės. Operacinis dažnis, generuojamas iš „Agilent 33220A“ ir linijinio stiprintuvo EPA-104, buvo nustatytas 32,5 kHz. Rezultatai palygino atvejus, kai nebuvo aktyvaus skysčio ir kai jis buvo aktyvuotas.

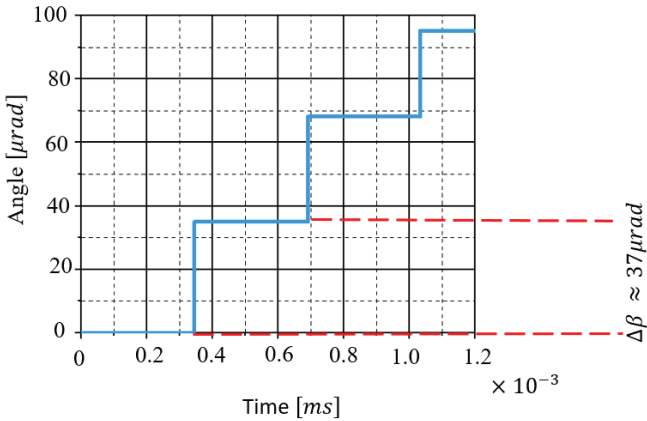


4.4 pav. Eksperimentinis RPD nustatymas, naudojant MRF kaip stabdymo terpę

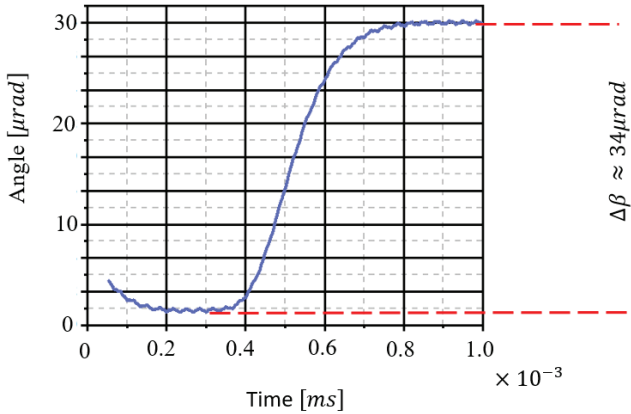
4.4 Rezultatai ir jų aptarimas

4.5 ir 4.6 paveiksluose pavaizduoti grafikai rodo kampinio poslinkio teorinius rezultatus, atliktus Matlabe, kai aktyvuotas MRF. 3D RPD be MRF hemisferinio rotoriaus sukimasis yra apie $40 \mu rad$ pereinamuoju laiku apie 350 ms, kita vertus, grafikai rodo, kad kampinis poslinkis yra apie $37 \mu rad$, esant pereinamam laikui apie 340 ms, kai naudojama aktyvuotas MRF.

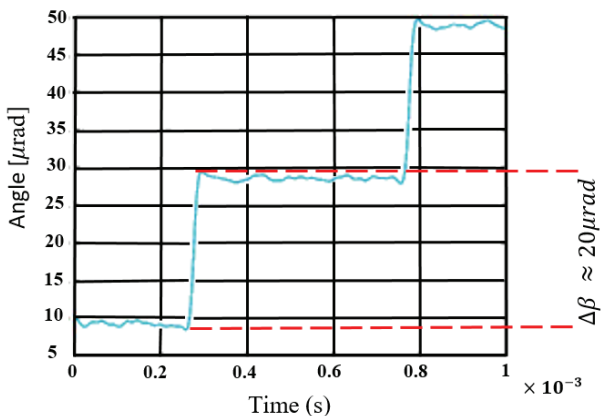
Grafikuose, pavaizduotuose 4.7 ir 4.8 pav., yra FEM COMSOL modeliuoti 3D RPD rezultatai be ir atitinkamai su MRF pritaikymu. 3D RPD kampinis poslinkis netaikant MRF, vieno žingsnio skiriamoji geba yra apie $38 \mu rad$, o pereinamasis laikas yra apie 750 ms. 3D RPD poslinkis, kai naudojama aktyvuotas MRF, vieno žingsnio skiriamoji geba yra apie $34 \mu rad$, o pereinamasis laikas – apie 740 ms.



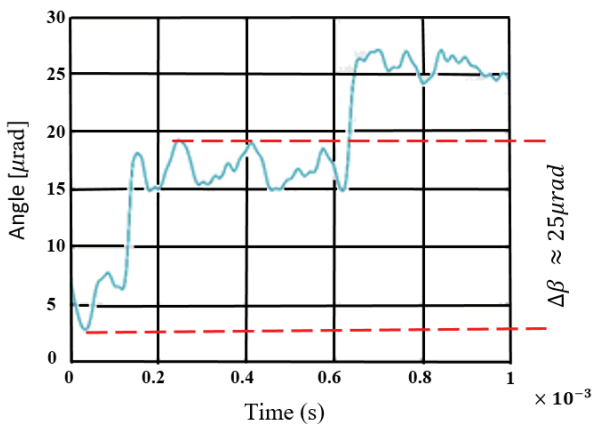
4.5 pav. Apskaičiuoti rotoriaus žingsnio kampinio poslinkio rezultatai kaip laiko funkcija, su aktyvuotu MRF



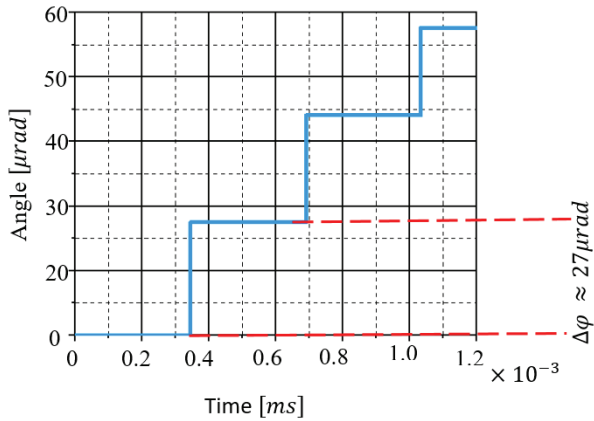
4.6 pav. REM rotoriaus žingsnio kampinio poslinkio, kaip laiko funkcijos su aktyvuotu MRF, rezultatai



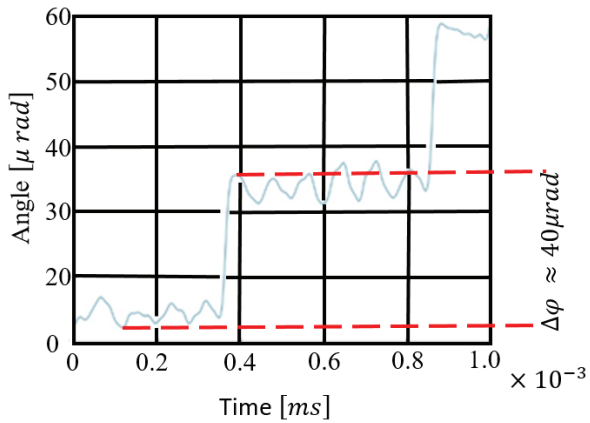
4.7 pav. Eksperimentiniai rotoriaus žingsnio kampinio poslinkio rezultatai, kaip laiko funkcija su aktyvuotu MRF



4.8 pav. Eksperimentiniai rotoriaus žingsnio kampinio poslinkio rezultatai, kaip laiko funkcija be MRF taikymo



4.9 pav. Teorinis kampinis sukimas su įjungta ERF



4.10 pav. Eksperimentiniai rezultatai naudojant „Burst“ tipo virpesius su 22 elektrinių signalų periodais, taikant ERF, esant 1,6 kV/mm

BENDROSIOS IŠVADOS

Tyrimo tikslas – pateikti teorinius ir eksperimentinius tyrimus, kaip pagerinti rezonansiniuose jutikliuose naudojamos gembės funkcionalumą, padidinti pjezoelektrinio generatoriaus išėjimo galią ir sukuriant 3D sukamojo pjezoelektrinio deflektoriaus stabdymo terpę. Rezultatą ir išvadą galima apibendrinti pabrėžiant šiuos dalykus:

1. Įvertinus aktyviųjų skysčių reologines savybes, jie tampa tinkamu medžiagos pasirinkimu, padedančiu pagerinti mechatroninių prietaisų funkcionalumą. Rezonansinis jutiklis, kuris buvo suprojektuotas naudojant daugiasluoksnes aktyviųjų skysčių gembes, nepasiekė reikiamo slopinimo efekto, kai skysčiui buvo pritaikyti aktyvuojantys laukai. Taip pat buvo išsiaiškinta, kad kieto objekto naudojimas pjezoelektrinių energijos generatorių dažnio derinimui nebuvo pakankamai efektyvus, atsižvelgiant į konsolinei gembei padarytą žalą vibruojant.
2. CB su ERF slopinančia terpe modeliavimo, analitinių ir eksperimentinių rezultatų analizė, esant elektrinio lauko stipriui 1,6 kV/mm, 1,8 kV/mm ir 2 kV/mm, rodo, kad CB standumo ir slopinimo charakteristikos buvo valdomos. Gautas dažnio padidėjimas ir amplitudės sumažėjimas, lyginant su neaktyvuotu ERF. Didžiausias CB dažnio padidėjimas buvo esant elektrinio lauko stipriui 2kV/mm: eksperimentiniuose rezultatuose 12,4 %, modeliavimo ir analizės rezultatuose atitinkamai 16,2 % ir 13,46 %.
3. Buvo sukurtas naujas metodas naudoti reologinius MRF pokyčius kaip minkštą smūginę terpę PEG dažnio derinimui. Rezultatai parodė PEG dažnio ir galios padidėjimą, kai MRF yra aktyvuotas, palyginti su laisvai, be MRF terpės, vibruojančia konsoline gembe. Maksimalūs galios rezultatai analizės, modeliavimo ir eksperimentiniams tyrimais, kai MRF aktyvuotas esant 0,3 T, atitinkamai buvo 410 μ W, 405 μ W ir 403 μ W; o be MRF, atitinkamai buvo 240 μ W, 250 μ W ir 239 μ W.
4. Teorinis ir eksperimentinis ERF ir MRF 3D rotacinio pjezoelektrinio deflektoriaus stabdymo terpių tyrimas rodo didesnę kampinio pozicionavimo tikslumą esant stabdymo terpei, negu nesant terpei. Taikant MRF stabdymo terpę, teoriniai, modeliavimo ir eksperimentiniai rezultatai rodo atitinkamai 8 %, 11 % ir 20 % didesnę 3D RPD kampinę skiriamąją gebą, negu nesant terpės. Taikant ERF stabdymo terpę, teoriniai ir eksperimentiniai 3D RPD rezultatai, rodo 68 % ir 56% didesnę kampinę skiriamąją gebą, negu nesant terpės.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Rajeshkumar S. and Manoharan R. (2020) "Recent developments in semi-active control of magnetorheological materials-based sandwich structures: A review" *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 1–33, doi:10.1177/0892705720930749
2. Yuan, L., Sun, S., Pan, Z., Ding, D., Gienke, O., & Li, W. (2019). "Mode coupling chatter suppression for robotic machining using semi-active magnetorheological elastomers absorber". *Mechanical Systems and Signal Processing*, 117, 221–237. doi:10.1016/j.ymssp.2018.07.051
3. Liu, J., Tian, H., Lucas, E., Raja, A. S., Lihachev, G., Wang N.R., He, J., Liu, T., Anderson, M.H., Weng, W., Bhawe, S.A., and Kippenberg T.J., (2020) "Monolithic piezoelectric control of soliton microcombs." *Nature* 583, 385–390. doi:10.1038/s41586-020-2465-8
4. Qiu Z. (2012) "Optical MEMS. Microelectromechanical Systems and Devices", Editor Nazmul Islam, *InTech*, pp. 291-330
5. Kalscheur M. P. and [Nawasra J.](#), "Actuated optical element for light beam scanning device" (2015) *U.S. Patent* No. US10107914B2
6. Bansevicius, R., Mazeika, D., Kulvietis, G., Tumasoniene, I., Drukteinienė, A., Jurenas, V., and Bakanauskas, V. (2017). "Investigation of sphere trajectories of a rotational type piezoelectric deflector". *Mechanical Systems and Signal Processing*. doi:10.1016/j.ymssp.2017.05.038
7. Qiu Z., Pulskamp J. S., Lin X., Rhee C. H., Wang T., Polcawich R. G., and Oldham K. (2010) "Large displacement vertical translational actuator based on piezoelectric thin films". *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 20, Issue 7, pp. 1-10.
8. Wu L., Dooley S., Watson E., McManamon P. F., and Xie H. (2012) "A tip-tilt-piston micromirror array for optical phased array applications." *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 19, Issue 6, pp. 1450-1461.
9. Janutėnaitė-Bogdaniienė, J. (2019). "Control of piezobots' trajectories for nanosatellite stabilization" *doctoral dissertation*. Vilnius: Technika, 126 p.
10. McManamon P. F., and Ataei (2019), "Progress and opportunities in optical beam steering," *Proc. SPIE 10926, Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XVI*, 1092610 ; doi: 10.1117/12.2511987
11. Beltran-Carbajal [F.](#) and Silva-Navarro [G.](#) (2020), "Output feedback dynamic control for trajectory tracking and vibration suppression" *Applied Mathematical Modelling* [vol. 79](#), pp. 793-808, [doi.10.1016/j.apm.2019.11.004](#)
12. Frahm, H. "Device for damping vibrations of bodies". *U.S. Patent* No. 989958, 18 April 1911

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS DISERTACIJOS TEMA

Publikacijos *Web of Science* duomenų bazėje:

1. Azangbebil, Hayford; Djokoto, Sylvester S. & Agelin-Chaab, Martin. (2020) Experimental and numerical studies of a soft impact piezoelectric energy harvesting using an MR fluid // *IEEE Sensors Journal*. [IF: 3,076].
2. Djokoto, S.S.; Azangbebil, H.; Agelin-Chaab, M.; Dragašius, E. & Jūrėnas, V. (2020) Modeling and study of magnetorheological fluid impact base frequency enhancement for a micro-piezoelectric energy generator // *International Journal of Green Energy*. [IF: 1,302].
3. Djokoto, Sylvester S.; Dragašius, Egidijus; Jūrėnas, Vytautas & Agelin-Chaab, Martin. Controlling of vibrations in micro-cantilever beam using a layer of active electrorheological fluid support // *IEEE Sensors Journal*. [IF: 3,076].
4. Augustaitis, Aistis; Djokoto, Sylvester Sedem; Jūrėnas, Vytautas; & Kulvietis, Genadijus. Control features of 3D deflector under different braking conditions // *Mechanika*. [IF: 0,500].

Publikacijos konferencijų medžiagoje

1. S. S Djokoto; E. Dragašius; V. Jūrėnas & A. Mystkowski. Controlling the Positioning 3D Rotational Piezoelectric Deflector using ERF: an Experimental Study //15th International Conference Mechatronic Systems and Materials 1-3 July 2020, Bialystok, Poland.
2. Djokoto, S.S.; Dragašius, E.; Jūrėnas, V. & Agelin-Chaab, M. Micro-piezoelectric actuator vibration control using electrorheological fluid active support: experimental study //13th IFAC workshop on intelligent manufacturing systems IMS 2019, Oshawa, Canada, 12–14 August 2019 Elsevier. ISSN 2405-8963. 2019, vol. 52, iss. 10, p. 388-393.
3. Azangbebil, Hayford; Djokoto, Sylvester Sedem; Agelin-Chaab, Martin & Dragašius, Egidijus. A study of nonlinear piezoelectric energy harvester with variable damping using thin film MR fluid // 13th IFAC workshop on intelligent manufacturing systems IMS 2019, Oshawa, Canada, 12–14 August 2019 Elsevier. ISSN 2405-8963. 2019, vol. 52, iss. 10, p. 394-399.
4. Djokoto, Sylvester Sedem; Azangbebil, Hayford; Agelin-Chaab, Martin; Dragašius, Egidijus & Jūrėnas, Vytautas. Design and modeling of MRF impact base frequency enhancement for a piezoelectric energy generator // Joint congress of the Canadian Society for Mechanical Engineering

- and CFD Society of Canada: proceedings, June 2-5, 2019, Western University, London, Ontario, Canada. p. [139-146].
5. Djokoto, Sylvester Sedem; Agelin-Chaab, Martin; Jūrėnas, Vytautas & Dragašius, Egidijus. Experimental investigation of squeezed MRF film stopper and Its effect on vibrating bimorph for frequency tuning of an energy generator // 2019 IEEE SoutheastCon, Huntsville, AL, USA, 11-14 April 2019. ISBN 9781728101385. eISBN 9781728101378. p. 1-7.
 6. Augustaitis, Aistis; Kulvietis, Genadijus; Jurėnas, Vytautas; Djokoto, Sylvester Sedem. Kinematic characteristics of hollow ball under different braking conditions // Vibroengineering procedia : [29th International conference on vibroengineering, Vilnius, Lithuania, December 1st 2017]. Kaunas: ISSN 2345-0533. 2017, vol. 15, p. 7-12.
 7. Djokoto, Sylvester Sedem; Jūrėnas, Vytautas; Bansevicius, Ramutis Petras, & Dragašius, Egidijus. Investigation of piezoelectric cantilever dynamics with ERF non-linear contact // Mechanika : proceedings of the 22nd international scientific conference, 19 May 2017, p. 97-101.
 8. Krishnamoorthy, Shanker Ganesh; Skiedraitė, Inga; Djokoto, Sylvester Sedem, & Dragašius, Egidijus; Skvireckas, Ramūnas. Study of change in resonance characteristics for a passive bimorph damper // WSEAS Transactions on Applied and Theoretical mechanics. ISSN 1991-8747. eISSN 2224-3429. 2017, Vol. 12, p. 51-56.

Informacija apie autorių

Sylvester Sedem Djokoto gimė 1977 m. gruodžio 18 d. Akroje, Ganoje. 2003 m. jis įstojo į Agderio universiteto, Grimštado inžinerijos mokyklos Mechanikos inžinerijos katedrą Norvegijoje. 2008 m. įgijo aviacijos inžinerijos mokslų bakalauro laipsnį. 2010 m. įgijo mechatronikos inžinerijos mokslų magistro laipsnį. 2016–2021 m. Studijavo Kauno technologijos universiteto Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakulteto Gamybos inžinerijos katedroje mechanikos inžinerijos mokslų krypties doktorantūroje.

Information about the author

Sylvester Sedem Djokoto was born on December 18, 1977, in Accra Ghana. In 2003 he entered Agder University, Department of Mechanical Engineering, School of Engineering Grimstad Norway. In 2008 he obtained a Bachelor of Sciences degree in Aeronautical Engineering. In 2010 he obtained a Master of Sciences degree in Mechatronics Engineering. From 2016 to 2021 studied at Kaunas University of Technology Mechanical Engineering and Design Faculty,

Department of Production Engineering as a doctoral student in Mechanical Engineering sciences.

Summary:

Structure of the dissertation:

This dissertation is composed of four chapters. This dissertation contains an introductory chapter that gives a brief introduction on smart fluids (MRF, ERF), piezoelectric material and their behaviour under the influence of various field applications. The research as well presented the application of these smart fluids to improve the functionalities of three novel Mechatronic devices. The introductory chapter as well talked about the previous research findings, leading to the objectives of this study. Each chapter in this dissertation ends with a brief conclusions outlining the achievements and findings that were established in the chapter. The remainder of this dissertation is organized as follows:

Chapter 2. Vibration Control in Cantilever Beam Structures Using an ERF as Damping Media. This chapter presents topics related to controlling vibrations in CB, using ERF as a damping medium. It provides a mathematical and experimental evaluation of the system. The results, discussion, conclusions and summary were given at the end of the chapter.

Chapter 3. Frequency Tuning of a Piezoelectric Energy Generator via the Application of MRF Impacting. This chapter introduces a mathematical and an experimental study of the MRF soft impacting form of frequency enhancer for piezoelectric energy generator. The mathematical analysis of the mechanical and electrical characteristics of the bimorph piezoelectric device was presented. This analysis was based on the material properties, geometry and boundary conditions (mechanical and electrical). The results, discussion, conclusions and summary were provided at the end of the chapter.

Chapter 4. Spherical Brake with Smart Fluid for 3D Rotational Piezoelectric Deflector. This chapter introduces a comprehensive experimental study on the effect of smart fluids (MRF and ERF) on the 3-dimensional rotational piezoelectric deflector (3D RPD) as a braking media and an overview of the operational principle of the 3D RPD and discusses how the model describing the operation of the 3D RPD has derived. This theoretical work is a damping medium by the corresponding experimental results. The results, discussion, conclusions and summary were provided at the end of the chapter.

Chapter 5. Conclusions. This chapter summarizes the covered topics and gives conclusions that can be used for the future works related to the application of SF devices.

Aim and objectives of the dissertation

The aim is to conduct theoretical and experimental studies by applying smart fluids (MRF and ERF) to improve the functionality of Mechatronic systems.

The objectives to achieve this aim are as follows:

1. To evaluate the effects of the change of smart fluids and how their application will improve the functionality of devices that are used in mechatronic systems.
2. To perform theoretical and experimental studies using an activated ERF as a damping medium for a vibrating cantilever beam, which are used in resonant sensors and other devices.
3. To design and experimentally investigate the use of MRF as a soft impacting medium for increasing the output power of a bimorph piezoelectric energy generator.
4. To perform theoretical and experimental studies applying the change in the rheological characteristics of ERF and MRF to improve the braking, which affects the precision of angular positioning of 3D Rotational Piezoelectric Deflector.

Methods and equipment

This dissertation was based on the theoretical, analytical and experimental research. The theoretical calculations were carried out in MATLAB mathematical analysis software. The FEM analysis was done in COMSOL Multiphysics software.

For the experimental and simulation results of ERF CB damper and the MRF piezoelectric energy generator, the parameters of bimorph piezoelectric cantilever beam were selected.

The experiments were based on a prototype of a 3D Rotational Piezoelectric Deflector that was designed at the Institute of Mechatronics. All experiments presented in this dissertation were conducted at the Institute of Mechatronics, Kaunas University of Technology.

Scientific novelty

- The control of a vibrating cantilever beam was improved by introducing an activated ERF as a damping medium, localised at the end of the beam.
- A new concept using activated MRF as a soft impacting medium for frequency tuning and power enhancement for a vibrating PEG was researched, and the results show that an increased and stable output power was achieved.

- A new concept of using ERF and MRF as a braking medium in 3D RPD was created, and the results showed a significant improvement in the braking, which affects the precision of the angular positioning.

Practical value

The control of a vibrating cantilever beam was investigated by applying activated ERF as a damping medium, localised at the end of the beam.

A new method of using an activated MRF as a soft impacting medium for vibrational frequency tuning and power enhancement of a vibrating Piezoelectric Energy Generator was developed and analysed.

The application of the effects of ERF and MRF as a braking medium on the 3D RPD was developed and analysed. The analytical and experimental study of the braking phenomenon was performed as well.

Research results provided for the defence

1. A new method of damping CB with ERF and vibration damping of CB by applying ERF and localising it at the end of the CB was created.
2. A new method of using rheological change in MRF as a soft impacting medium for frequency tuner for PEG was created.
3. A new method for controlling the angular positioning of 3D RPD by applying ERF and MRF as a braking medium was created.

General conclusions

The research work that was conducted within the scope of this dissertation was aimed at providing theoretical and experimental studies for using SF to improve the functionality of a cantilever beam used in resonant sensors, enhancing the output power of a piezoelectric generator and serving as a braking medium for 3D Rotational Piezoelectric Deflector. The outcome and conclusions can be summarized by highlighting the following points:

5. The evaluation of the rheological properties of smart fluids makes them a good choice as a material to help improve the functionalities in mechatronic devices. A resonant sensor was designed by using sandwiched SF cantilevers that did not achieve the needed damping effects, when the field is applied to the fluid. It has been found that the use of a solid object as frequency tuner for piezoelectric energy generators was not effective enough in terms of damages caused to the cantilever beam when vibrating. The 3D Rotational Piezoelectric Deflector has some limitations in the precision of angular positioning when it brakes.

6. The analysis of simulation, the analytical and experimental results of CB with ERF as damping medium at 1.6 kV/mm, 1.8 kV/mm and 2kV/mm for a vibrating CB shows that the stiffness and damping characteristics of the CB were

controlled. An increase of frequency and a decrease of amplitude were obtained by comparing to non-activated ERF. The maximum increase of the frequency of CB was at 2kV/mm: in the experimental results, 12.4 %, in the simulation and the analytical results, 16.2 % and 13.46 %, respectively.

7. A new method of using rheological change in MRF as a soft impacting medium for frequency tuner for PEG was created. The results showed an increase in the frequency and power output of the PEG when MRF is activated, compared to the free vibrating beam without the presence of the MRF medium. The maximum power output results for analytical, simulation and experimental investigation, when the MRF was activated at 0.3T, were 410 μW , 405 μW and 403 μW , respectively, compared to the one without the presence of MRF, the results were 240 μW , 250 μW and 239 μW respectively. A theoretical and experimental study of the ERF and MRF as a braking medium for 3D Rotational Piezoelectric Deflector shows a higher precision of angular positioning of the 3D RPD, compared to them without the presence of the braking medium. The theoretical, simulation and experimental results, when MRF is applied, show 8 %, 11 %, and 20 % higher angular resolution of the 3D RPD, compared to the one without the presence of the MRF braking medium. The theoretical and experimental results of 3D RPD when ERF is applied show 68 % and 56 % higher angular resolution, compared to the one without the presence of the ERF braking medium

UDK 681.586(043.3)

SL344. 2021-08-17, 2,5 leidyb. apsk. I. Tiražas 28 egz. Užsakymas 220.

Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas

