



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

Lukas Daujotas

**IŠMANIŲJŲ SKYSČIŲ TAIKYMAS MAŽOS GALIOS
GENERATORIAMS**

**IMPLEMENTATION OF SMART LIQUIDS IN SMALL POWER
HARVESTERS**

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos studijų programa, valstybinis kodas 621H33001

Mechatronikos specializacija

Mechanikos inžinerijos studijų mokslo kryptis

Vilnius, 2012

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Lukas Daujotas

IŠMANIŲJŲ SKYSČIŲ TAIKYMAS MAŽOS GALIOS

GENERATORIAMS

IMPLEMENTATION OF SMART LIQUIDS IN SMALL POWER

HARVESTERS

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos studijų programa, valstybinis kodas 621H33001

Mechatronikos specializacija

Mechanikos inžinerijos studijų mokslo kryptis

Vadovas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2012

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Mechanikos fakultetas

Mašinų gamybos katedra

ISBN

ISSN

Egz. sk. 2

Data 2010-05-14

Mechanikos inžinerijos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Išmaniųjų skysčių taikymas mažos galios generatoriams**

Autorius **Lukas Daujotas**

Vadovas **prof. Vytautas Bučinskas**

Kalba

☒ X

lietuvių

☐

užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamas išmaniųjų skysčių taikymas mažos galios nešiojamam elektrinės energijos generatoriui, kuris veikia nuo žemų dažnių. Darbe yra apžvelgti jau veikiantys mažos galios generatoriai, išnagrinėtos išmaniosios medžiagos. Teoriškai nustatytas magnetinio lauko pasiskirstymas feromagnetiniame skystyje, kuris yra sumodeliuotas „COMSOL multiphysics“ modeliavimo programa. Darbe yra aprašytas sukurto ir eksperimentiškai ištirto mažos galios elektrinės energijos generatoriaus prototipas. Yra nustatyta galios ir magnetinio lauko kitimo bei dažnio priklausomybės, feromagnetinio skysčio galimybė panaudoti mikropavarai, feromagnetinio skysčio santykinis pakilimas, veikiant magnetiniu lauku.

Darbą sudaro keturios dalys: įvadas, mažos galios elektros generatorių literatūros apžvalga, teorinis pagrindimas ir skaičiavimai, feromagnetinio skysčio modeliavimas, eksperimentas ir jo rezultatų įvertinimas, išvados, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 60 p. teksto be priedų, 45 iliustracijos, 6 lentelės, 30 bibliografinių šaltinių.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: feromagnetinis skystis, mažos galios generatorius, išmaniosios medžiagos, mikropavara, elektromagnetinė indukcija.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of **Mechanic**
Machine Engineering department

ISBN ISSN
Copies No. 2
Date 2012-05-14

Mechanical Engineering study programme master thesis.

Title: **Implementation Of Smart Liquids In Small Power Harvesters**

Author **Lukas Daujotas**

Academic supervisor **prof. Vytautas Bučinskas**

Thesis language

☒ X

Lithuanian

☐

Foreign (English)

Annotation

In this master degree thesis presented analyses of smart fluids applying to small power portable harvesters which is operating from low frequencies. In this paper is reviewed existing small power harvesters also smart materials were analyzed. Magnetic field distribution in ferromagnetic liquid were theoretically calculated with simulation program "COMSOL multiphysics". In this work small power harvester prototype was created, described and experimentally investigated. Power, magnetic field and frequency dependence, also possibility to use ferromagnetic fluid in micro drive, ferromagnetic fluid comparative lift, when magnetic field is applied is define.

Structure: introduction, small power harvesters analyzes, theoretically substantiation and calculations, ferromagnetic fluid simulation, experiment and results evaluation, conclusions and references.

Thesis consist of: 60 p. text without appendixes, 45 pictures, 6 tables, 30 bibliographical entries.

Appendixes included.

Keywords: ferromagnetic fluid, small power harvester, smart materials, micro drive, electromagnetic induction.

TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS	8
ĮVADAS	9
1. MAŽOS GALIOS ELEKTROS GENERATORIŲ LITERATŪROS APŽVALGA	11
1.1 Spyruokliuojanti kuprinė – generatorius.....	11
1.2 Kelio raištis – generatorius	14
1.3 Rūbai – nanogeneratoriai	16
1.4 Įsikraunančios baterijos	21
1.5 Mikroelektromechaninis vibracijos konverteris.....	22
1.6 Išmaniosios medžiagos	23
1.7 Problemos formulavimas	27
2. TEORINIS PAGRINDIMAS IR SKAIČIAVIMAI	28
2.1 Feromagnetinio skysčio magnetostatiniai skaičiavimai.....	28
2.2 Feromagnetinio skysčio hidrodinaminiai skaičiavimai.....	30
3 FEROMAGNETINIO SKYSČIO MODELIAVIMAS	33
3.1 Magnetinio lauko analizė	33
3.2 Feromagnetinio skysčio statinės priklausomybės analizė.....	35
3.3 Judinamo feromagnetinio skysčio analizė	36
3.4 Žmogaus eisenos sukiamų svyravimų nustatymas.....	38
4. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI IR JŲ REZULTATŲ ĮVERTINIMAI	40
4.1 Feromagnetinio skysčio santykinio pakilimo, veikiant magnetiniu lauku, tyrimas.....	41
4.2 Feromagnetinio skysčio galimybės panaudoti mikro pavarai tyrimas.....	45
4.3 Mažos galios generatoriaus prototipas	46
4.4 Mažos galios generatoriaus prototipo vartymas 90 laipsnių kampu.....	48
4.5 Švytuojamą generatoriaus tyrimas.....	52
LITERATŪRA	57

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Pirminis spyruoklėmis pritvirtintos kuprinės modelis	12
2 pav. Pagamintos kuprinės modelis	12
3 pav. Žmogaus masės centro kitimas einant	13
4 pav. Žmogaus masės centro kitimas, kai žmogus yra su: a – svoriu, kuris yra judantis kartu su žmogumi; b – svoriu, kuris yra svyruojantis atskirai nuo žmogaus ėjimo.....	13
5 pav. Kelio raištis-generatorius: A – kelio raištis – generatorius ant žmogaus kūno; B – kelio raiščio – generatoriaus struktūra.....	14
6 pav. Kelio judėjimo kampinio greičio, kelio kampo, sukuriamos energijos ir generatoriaus įjungimo - išjungimo priklausomybės nuo laiko grafikai.....	15
7 pav. Generatoriaus nanopluoštas	16
8 pav. Nanogeneratoriaus sandara: du vienas kitą apsimiję kevlaro pluoštai	17
9 pav. Sukurto nanogeneratoriaus principinė schema	17
10 pav. Padidinta nanogeneratorius nuotrauka.....	19
11 pav. Nanogeneratoriaus struktūra	20
12 pav. Nanogeneratoriaus elementai.....	21
13 pav. Nuo mechaninių virpesių įsikraunančios baterijos	22
14 pav. Mikroelektromechaninis vibracijos konverteris	22
15 pav. Plėtimosi pjezoelektrinė pavara	24
16 pav. Apšvietimo lempa, pagaminta iš atmeniujų formos lydinių: a – neįjungta lempa, b – įjungta lempa	25
17 pav. Lėlės, pagamintos iš fotochrominės medžiagos	26
18 pav. Feromagnetinis skystis.....	26
19 pav. Feromagnetinis skystis, kuris yra naudojamas šiame tyrime – EFH1	27
20 pav. Feromagnetinio skysčio įsimagnetinimas kintant magnetiniam laukui.....	29
21 pav. Modelis skirtas feromagnetiniam skysčiui analizuoti.....	33
22 pav. 3-D magnetinio srauto intensyvumo pasiskirstymas	34
23 pav. Magnetinio lauko intensyvumo pasiskirstymas.....	34
24 pav. Feromagnetinio skysčio paviršiaus aukštis.....	35

25 pav. 3-D feromagnetinio skysčio paviršiaus aukštis	36
26 pav. Feromagnetinio skysčio paviršiaus aukščio, piko taškuose, kitimas	37
27 pav. Žmogaus modelis: a – atvirkštinės švytuoklės modelis, b – žmogaus kūno modelis, sudarytas iš vertikalčiai išdėstytų grandžių	38
28 pav. Atvirkštinės švytuoklės modelis	39
29 pav. Feromagnetinio skysčio santykinio pakilimo, veikiant magnetiniam laukui, tyrimo stendas	41
30 pav. Tyrime naudoti informacijos apdorojimo įrenginiai: a – kilnojama matavimo rezultatų apdorojimo įranga „Machine Diagnostics Toolbox Type 9727“ su kompiuteriu DEEL, b – oscilografas „GDS – 806C“	42
31 pav. Skysčio atsakas į 4 Hz žadinimą skirtingais magnetiniais laukais	44
32 pav. Skysčio atsakas į 8 Hz žadinimą skirtingais magnetiniais laukais	44
33 pav. Skysčio atsakas į 24 Hz žadinimą skirtingais magnetiniais laukais	45
34 pav. Feromagnetinio skysčio panaudojimo mikropavaroms tyrimo stendas: 1– nuolatinis magnetas, kurio sukuriamas magnetinis laukas $B = 0,3 \text{ T}$; 2 – korpusas su ertme poslinkiui matuoti; 3 – silikoninė guma VMQ; 4 – indas feromagnetiniam skysčiui	46
35 pav. Elektromagnetinės indukcijos reiškinių pavaizdavimas	46
36 pav. Sukurto generatoriaus prototipas: 1 – korpusas, 2 – induktyvioji ritė, 240Ω , 3 – dangtelis, 4 – elektros jungtis, 5 – magnetas	47
37 pav. Tyrimo stendas.....	48
38 pav. Įtampų pasiskirstymas žadinant skirtingais dažniais su 1 ml feromagnetinio skysčio ..	49
39 pav. Įtampų pasiskirstymas žadinant skirtingais dažniais su 2 ml feromagnetinio skysčio ..	50
40 pav. Įtampų pasiskirstymas žadinant skirtingais dažniais su 3 ml feromagnetinio skysčio ..	50
41 pav. Įtampų pasiskirstymas žadinant skirtingais dažniais su 4 ml feromagnetinio skysčio ..	51
42 pav. Švytavimo stendas	52
43 pav. Generuojami parametrai švytuojant pastovia 100 mm amplitude	53
44 pav. Generuojami parametrai švytuojant pastovia 150 mm amplitude	54
45 pav. Generuojamos įtampos priklausomybė nuo svyravimo amplitudės ir magnetinių laukų	55

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Išmaniųjų medžiagų klasifikavimas pagal dirgiklio ir atsako formas	23
2 lentelė. Magnetinio lauko priklausomybė nuo dažnio generatoriui tiekiamos įtampos bei jo sukuriama dažnio, feromagnetinio skysčio viršuje ir apačioje.....	43
3 lentelė. Generuojamos įtampos priklausomybė nuo svyravimų dažnių, feromagnetinio skysčio tūrio ir magnetinių laukų	49
4 lentelė. Generuojami parametrai švytuojant pastovia 100 mm amplitude	53
5 lentelė. Generuojami parametrai švytuojant pastovia 150 mm amplitude	54
6 lentelė. Generuojamos įtampos priklausomybė nuo svyravimo amplitudės ir magnetinių laukų	55

IVADAS

Tyrimo objektas

XXI amžiaus tendencijos – miniatiūrinių elektronikos prietaisų kūrimas. Dažniausiai tokie elektronikos prietaisai būna nešiojami, o tai reiškia, jog jie turi savo maitinimo šaltinius, kurie dažniausiai būna baterijos ar akumuliatoriukai ir kurie laikui bėgant tampa nebefektyvus ir tenka juos pakeisti naujais. Tiek baterijose, tiek ir akumuliatoriuose yra pavojingų aplinkai medžiagų tokių kaip švinas, gyvsidabris, kadmis, taip pat ir metalų, tokių kaip cinkas, varis, manganas, litis ir nikelis (Whittingham 2003). Todėl ir akumuliatorius ir baterijas yra būtina rūšiuoti, kad būtų galima juos perdirbti. Norint išvengti šių minusų reikia atsisakyti baterijų, o kad prietaisai veiktų maitinimo šaltinį pakeisti į kitokį elektrinės energijos generavimo prietaisą. Norint atsisakyti baterijų, reikia maitinimo šaltinį pakeisti į kitokį elektros generavimo prietaisą. Būtent todėl šio magistro darbo objektas – mažos galios generatoriai panaudojant išmaniąsias medžiagas.

Darbo tikslai ir uždaviniai

1. Sukurti elektromechaninės sistemos prototipą, gebantį generuoti elektros energiją iš chaotinių mechaninių virpesių,
2. Ištirti šios sistemos charakteristikas,
3. Nustatyti efektyvumą,
4. Numatyti išmaniųjų medžiagų parametrus, reikalingus tokiai sistemai.

Temos naujumas

Ši tema yra nauja tuo, kad čia yra ištirta galimybė panaudoti išmaniąsias medžiagas sistemose, kurios yra jautrios chaotiniams mechaniniams virpesiams žemų dažnių diapazone. Taip pat, kaip temos naujumą, galima išskirti skysčių panaudojimą elektros energijai gauti.

Temos aktualumas

Kaip jau minėjau, XXI amžiaus technologijos leidžia tobulėti miniatiūriniais elektronikos prietaisams (mobilieji telefonai, sekimo, pasišvietimo prietaisai ir t. t.). Taigi, šie prietaisai dažniausiai būna nešiojami ir naudoja baterijose patalpintą energiją. Bet nepaisant to, baterijos senka, jas gaminant yra sunaudojami dideli brangių medžiagų resursai. Taip pat naudotose baterijose yra medžiagų, kurios teršia gamtą, todėl jas būtina surinkti, perdirbti. Teigiama, jog greitai dėl išsikrovusių elementų nebereikės nutraukti pokalbio telefonu. Pasak autoriaus reikės tik žengti kelis žingsnius ar tiesiog natūraliai judėti, ir mobilusis telefonas „atsigaus“ (Brooks GA, Fahey TD, Baldwin KM, 2005). Mokslininkų pastebėtas produktyvus ir visame pasaulyje neišnaudotas energijos šaltinis – žmogaus kūnas, tad vis rimčiau imta juo domėtis. Mūsų kūne slypi didžiuliai energijos ištekliai. Suaugusiojo sukaupuose riebaluose esama tiek energijos, kiek 1 toną sveriančiame elemente. Kasdien mes išskiriame daug energijos, o ji nueina perniek. Pavyzdžiui, sporto klubuose energingai besimankštinantys žmonės augindami raumenis lieja prakaitą, o

degindami nereikalingas kalorijas kiloja svarmenis, užuot sukę generatorių ir gaminę elektros energiją (Starner T, Paradiso JA, 2005).

Šis principas yra puikiai žinomas, pavyzdžiui, dviračio dinamą – kad šviestų dviračio žibintai, žmogaus energija panaudojama elektros energijai gaminti, arba įvairius mechaniškai sukamus radijo imtuvus, kompiuterius, kišeninius žibintuvėlius ir mobiliuosius telefonus, kuriems įkrauti užtenka nedidelio raumenų darbo. Tačiau mokslininkų naujas užmojas – kurti prietaisus, naudojančius žmogaus energiją. Įvairius kūno judesius – šokį diskotekos aikštelėje, kompiuterio klaviatūros klavišų spaudymą ir net menkus judesius mūsų organizme, pavyzdžiui, kraują varinėjančios širdies darbą – mokslininkai pasiryžę paversti elektra. Tai būtų nuolatinis, neįjuntamas ir nieko nekainuojantis energijos šaltinis mobiliesiems telefonams, MP3 grotuvams, navigacinei įrangai krauti.

Tokie šaltiniai taip pat galėtų maitinti miniatiūrinius medicinos prietaisus, kurie ateityje galbūt nuolat vertins ir stebės mūsų sveikatos būklę, pavyzdžiui, matuos sergančiųjų diabetu cukraus kiekį kraujyje ir automatiškai pagal poreikį tieks vaistų iš vaistų pompos (DeVita P, Helseth J, Hortobagyi T, 2007).

Tyrimo metodai

Šis magistrinis darbas yra atliktas daugiausia eksperimentiškai. Iki sukurto generatoriaus prototipo buvo eita eksperimentiniu keliu, t. y. buvo remiamasi esamais elektromagnetinės indukcijos, hidraulikos bei kitais dėsniais, kuriami galimi prototipai, tikrinami šių prototipų parametrai, žiūrima, kas juos labiausiai veikia ir tuomet generatoriaus prototipo sistema buvo tobulinama, kad būtų gauti geresni rezultatai.

Darbo aprobacija

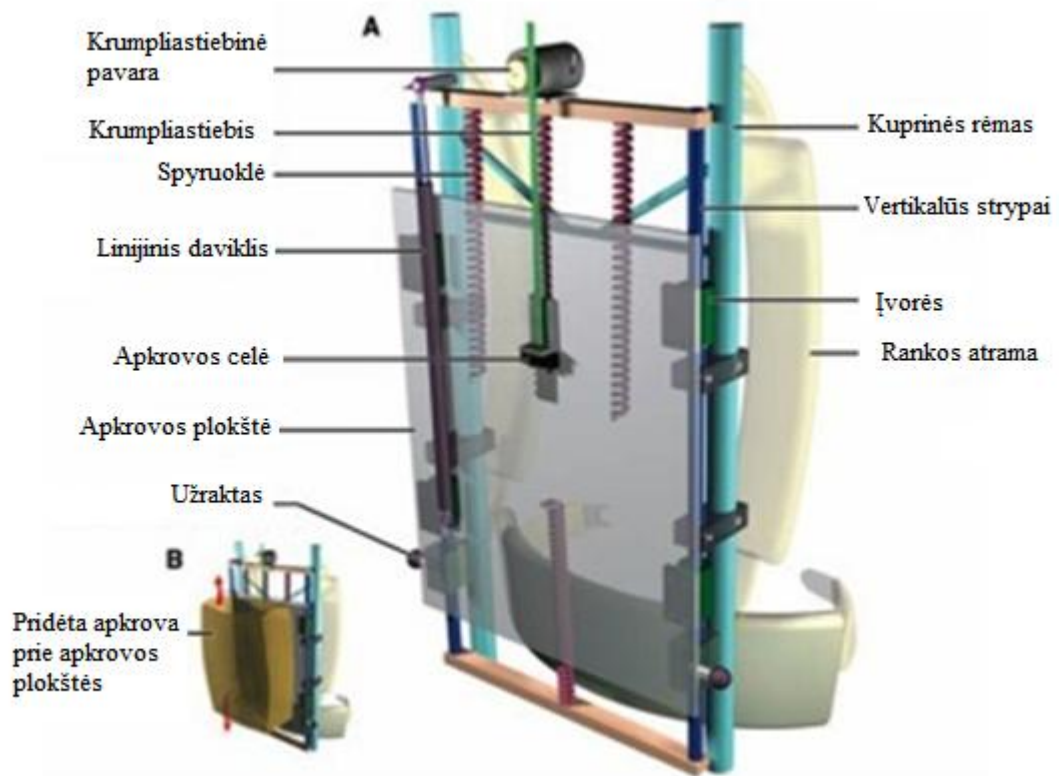
Darbo rezultatai apibendrinti 15-ojoje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS“, 2012 pavadinimu „Chaotinių mechaninių virpesių energijos panaudojimas naudojant išmaniąsias medžiagas“.

1. MAŽOS GALIOS ELEKTROS GENERATORIŲ LITERATŪROS APŽVALGA

1.1 Spyruokliuojanti kuprinė – generatorius

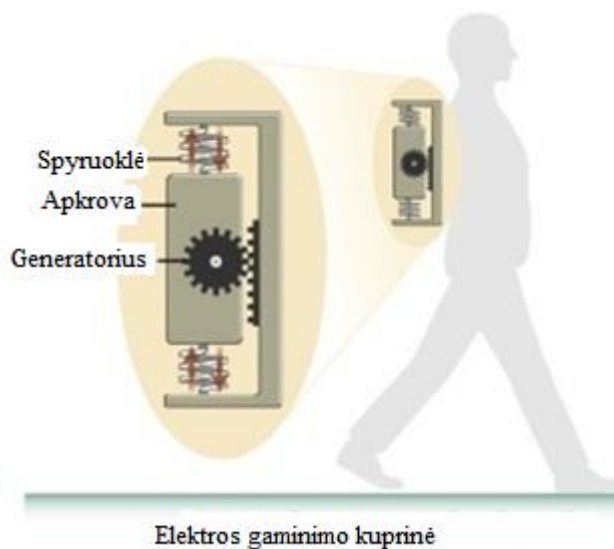
Kadangi vaikščiojant galima gaminti elektros energiją, atsiveria naujų galimybių nuošaliose vietovėse, kuriose elektros energija netiekama. Tai būtų paspirtis, pavyzdžiui, mokslininkams, Afrikos atogrąžų miškuose studijuojantiems vabzdžius, arba alpinistams, nuolat ieškantiems, kaip patobulinti sunkius elementus arba saulės šviesos kolektorių, kurio veikimas priklauso nuo oro sąlygų. Mokslininkai išvelgia daug potencialių tokios energijos rūšies pritaikymo sričių. Pavyzdžiui, patenkinti ketvirtadalio Žemės gyventojų, šiandien gyvenančių be elektros, komunikacijos poreikį. „Mūsų pasaulyje šis atradimas pirmiausia nudžiugintų tuos žmones, kuriems įsodinti įvairūs protezai“, – sako Donelanas (Human energy... 2010). Naujausiuose dirbtiniuose kelio ir čiurnos sąnariuose įmontuojami varikliai, padedantys vaikščioti, tačiau dideli, sunkūs elementai, kuriuos reikia dažnai įkrauti, yra nepatogūs. Kūno judesių energija galėtų būti tiesiogiai naudojama tokioms ir panašioms elektrinėms protezų dalims (pavyzdžiui, valdomiems dirbtinės plaštakos pirštams) maitinti. Kada nors į raumenis bus įmanoma įterpti energijos kaupiklius ir jie veiks kaip nuolatinis energijos šaltinis. Tokie šaltiniai galės maitinti vaistų pumpas ir nervų stimuliatorius, nes jų didžiausias trūkumas šiandien yra tas, kad norint pakeisti šių įtaisų elementus ligonį reikia operuoti (Human energy... 2010).

Ateityje galbūt atsiskleis dar daugiau galimybių. Jeigu reikia daugiau energijos, galima pasinaudoti jau sukurta kuprine, kurią 2005 metais pristatė keturi išradingi Pensilvanijos universiteto (JAV) (angl. University of Pennsylvania) mokslininkai. Prie metalinio rėmo spyruoklėmis pritvirtinta kuprinė (1 pav.) žingsniuojant slankioja aukštyn ir žemyn (žiūrėti 3 pav.), o šie judesiai paverčiami elektros energija.



1 pav. Pirminis spyruoklėmis pritvirtintos kuprinės modelis

Tokia pagaminta kuprinė buvo nepatogi ir atrodė neestetiškai, nes jos visos dalys buvo neuždengtos, galėjo pakliūti drabužiai į pavaras, su ja buvo labai nepatogu eiti, net bandymų tikslais, todėl reikėjo perdaryti konstrukciją. Jos kompaktiškesnis modelis atrodytų taip:

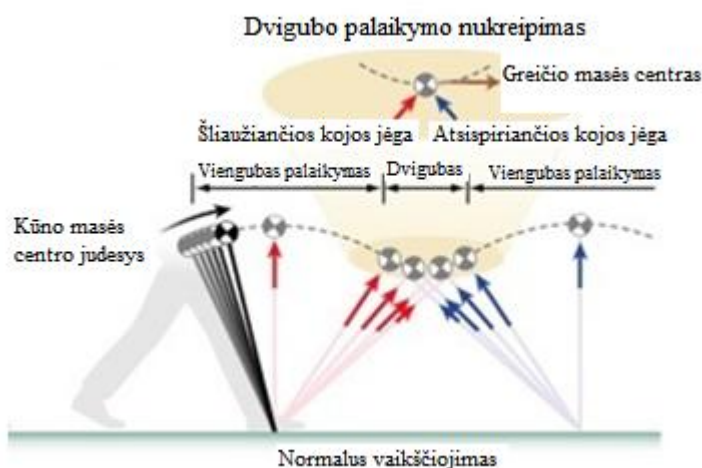


2 pav. Pagamintos kuprinės modelis

Norint išsiaiškinti, ar energija bus sukuriama, ir kiek kuprinėje esanti masė svyruos buvo

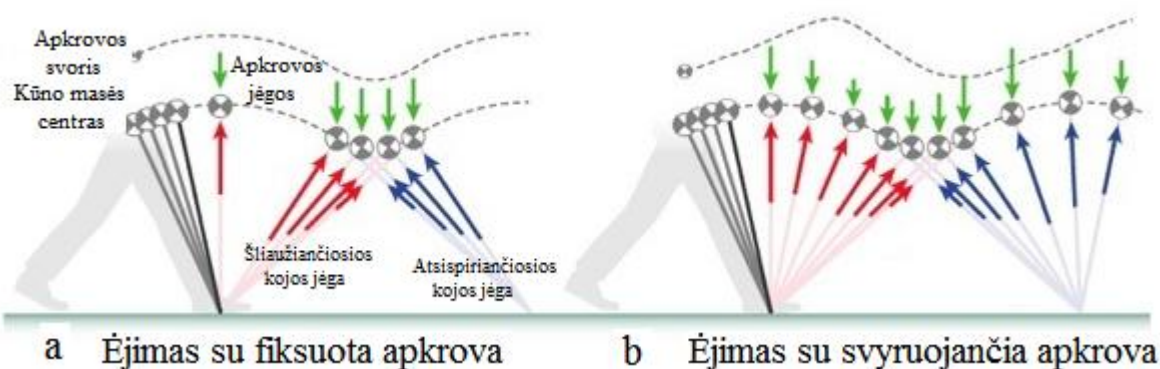
nustatytos žmogaus ėjimo bangų sukeltos virpesių amplitudės, ir buvo gauta, jog žmogui ramiai einant virpesių bangos dažnis yra apie 1–3 Hz (Energy harvesting... 2010).

3 pav. pavaizduotas žmogaus ėjimo masės centro judėjimas žmogui einant. Iš čia matyti, jog yra zona, kurioje veikia dviejų krypčių jėgos dėl kojų perkėlimo einant:



3 pav. Žmogaus masės centro kitimas einant

3 pav. yra pavaizduota vieno žmogaus, be jokios kuprinės, ėjimo masės centras ir veikiamos jėgos. Bet, užsidėjus kuprinę ir jei ji yra pakankamai sunki, tai kuprinė turi dar savo svyravimą. Tai reiškia, kad žmogui einant veiks papildomos jėgos, kurios smarkiai sunkins ėjimą. Jei būtų kuprinė ir jos turinys įtvirtintas, tai žmogų tik apkrautų papildoma jėga. Visa tai pavaizduota 4 pav.:



4 pav. Žmogaus masės centro kitimas, kai žmogus yra su: a – svoriu, kuris yra judantis kartu su žmogumi; b – svoriu, kuris yra svyruojantis atskirai nuo žmogaus ėjimo

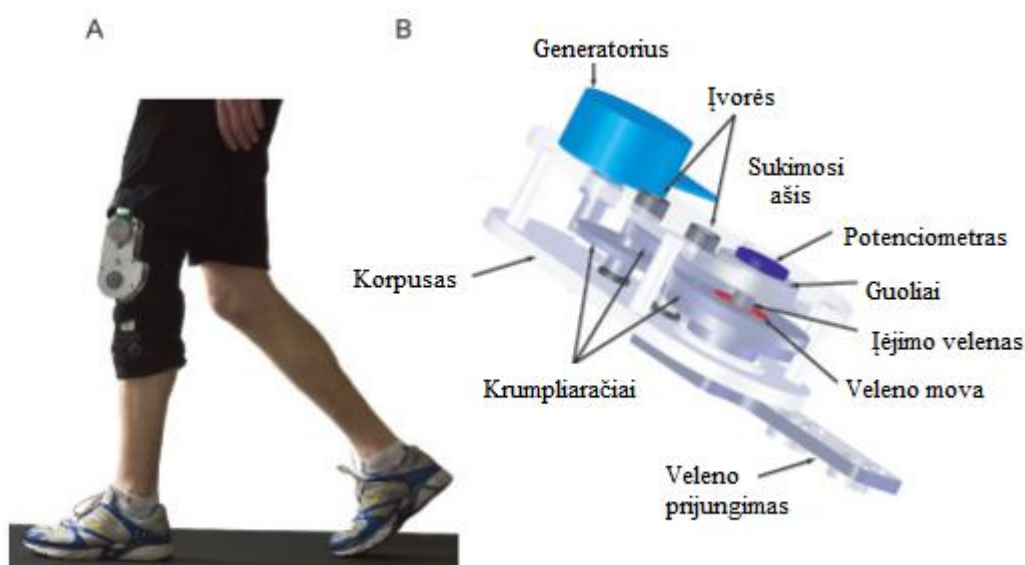
Kaip matyti iš 4 pav., eiti su atskirai nuo žmogaus pritvirtintu svoriu yra kur kas sunkiau, nes kuprinėje esantis generatorius nusileidžia tuomet, kai žmogus tik pradeda perkėlinėti svorį ant kitos kojos.

Tokio tipo generatorius – kuprinė ramiai vaikstant sukuria 7 vatus per žingsnį, ir tai yra tikrai nemažai, bet yra vienas niuansas, kad su šia kuprine norint pagaminti 7 vatus, pastaroji turi sverti nuo 20 iki 38 kg. Vadinasi, ši kuprinė yra maždaug visa kareivio amunicija, reiškia – ją vadinti lengva jau negalime, o tuo labiau, tai mažu mažiausiai sunkus rankinis bagažas. Čia kuo kuprinė sunkesnė, tuo daugiau elektros energijos bus pagaminta ir tuo pačiu tuo sunkiau bus vaikščioti žmogui.

1.2 Kelio raištis – generatorius

Kalbant apie „kelio generatorių“, labiausiai žavi jo kūrimo principas – pirmiausia buvo nuodugniai išstudijuota žmogaus eisena (žiūrėti 6 pav.).

Nors lenkiant ir tiesiant koją generatorius galėtų nuolat gaminti elektros energijos, jis suaktyvinamas ir kaupia energiją tik tada, kai apatinė kojos dalis spiriasi į priekį, t. y. per paskutinius 20 žingsnio ciklo procentų. Donelano kelio raištį – generatorių (5 pav.) yra valdomas kompiuteriu, todėl generatorius padeda pristabdyti kojos judėjimą prieš žengiant kitą žingsnį, o aktyvus raumenų darbas, reikalingas elektros energijai gaminti, yra minimalus, palyginti su darbu, kurio reikėtų, kad generatorius veiktų nuolat.



5 pav. Kelio raištis-generatorius: A – kelio raištis – generatorius ant žmogaus kūno; B – kelio raiščio – generatoriaus struktūra

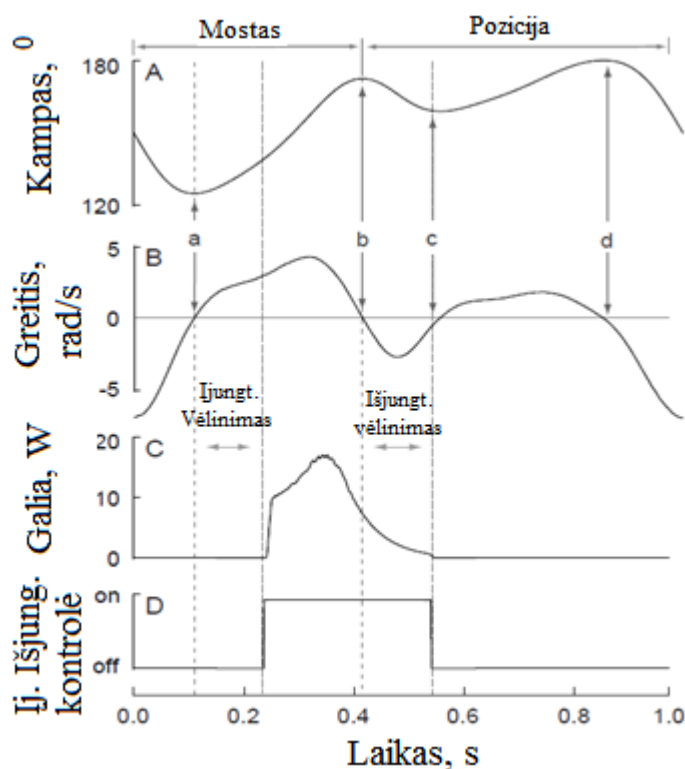
Donelano sukurtame kelio raištyje – generatoriuje jutikliai tūkstantį kartų per sekundę matuoja kelio judėjimo greitį bei kampą ir kompiuteryje esanti programa apskaičiuoja, kada jis turi įsijungti ir išsijungti. Kai žengiamas vienas paprastas žingsnis, žmogaus raumenys aktyviai dirba – ir tiesiant koją pirmyn, kai ši greitėja, ir stabdant, kad nebūtų spyrio į orą. Kadangi generatorius suveikia tik

tada, kai raumenys sustabdo koją, raumenims tenkantis krūvis nėra didelis.

Užtenka mažiau nei vieno vato raumenų galios, kad kelio raištis pasiektų 1 vato elektrinę galią.

Didžiausia apkrovos dalis atsiranda dėl papildomo svorio, t. y. dėl 1,6 kilogramo sveriančio kelio raiščio. Todėl jis yra toliau tobulinamas svorio mažinimo klausymu. Šio darbo jau ėmėsi Donelanas ir bendrovė „Bionic Power“, kurią jis įsteigė siekdamas kelio raištį paversti komerciniu produktu. Generatoriuje planuojama sumontuoti lengvesnę pavarą, o korpusas turėtų būti gaminamas iš lengvesnių medžiagų, pavyzdžiui, iš anglies pluošto. Vienas žmogus, ant abiejų kojų ryšintis po kelio raištį, lėtai vaikščiodamas vidutiniškai generuojami 5 „vatžingsnius“ elektros energijos – to užtenka, kad veiktų dešimt paprastų mobiliųjų telefonų.

Šeštame paveikslėlyje yra pateikti grafikai, kaip ir kada veikia generatorius.



6 pav. Kelio judėjimo kampinio greičio, kelio kampo, sukuriamos energijos ir generatoriaus įjungimo - išjungimo priklausomybės nuo laiko grafikai

Čia pavaizduota generatoriaus kontrolinė sistema, kuri kad kontroliuoti generatorių naudoja kelio polinkio kampą, kelio kampinį judėjimo greitį ir generatoriaus jėgos įjungimo/išjungimo laiką. Šeštame paveikslėlyje atitinkamai pavaizduota:

- A – kojos kelio kampas, kuris yra matuojamas potenciometru;
- B – kojos kelio kampinis pagreitis nustatomas iš diferencijuoto laiko nuo kelio kampo;
- C – Matuojama elektrinė galia;

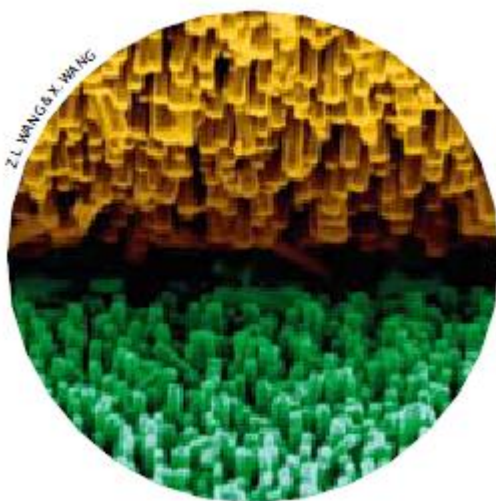
D – Kontrolinis signalas įjungti ar išjungti kelio raiščio generatorių.

Vertikalios a, b, c, d linijos žymi kelio svyravimo kitimą per vieną žingsnį (Qingguo Li *et al.* 2008).

Dėvint tokių kelio generatorių 0,7 vato raumenų galios užtenka pagaminti 1 „vatžingsniui“ elektros energijos, o su kuprine 1 vato elektrinei galiai pasiekti reikia 5 vatų raumenų galios. Turint omenyje sukurtus kitokius panašaus veikimo prietaisus – tai neblogas išradimas, nes palyginimui su rankiniu būdu sukamais radijo imtuvais ar kišeniniais žibintuvėliais, kuriems reikia maždaug 8 vatų raumenų galios norint pasiekti 1 vato elektrinę galią.

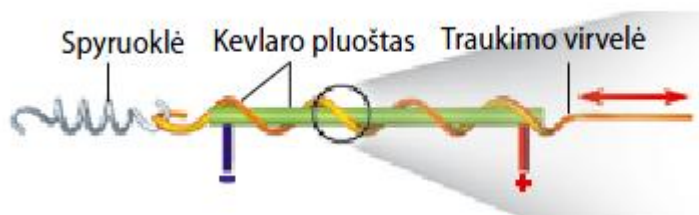
1.3 Rūbai – nanogeneratoriai

Kelio generatoriaus pranašumas tas, kad vaikstant jis kaupia energijos perteklių, o mes to beveik nejaučiame. Vis dėlto, kaupti elektros energiją įmanoma dar neįjuntamiau. Praėjus vienai savaitei po Donelano kelio raiščio pristatymo, Džordžijos technologijų instituto (JAV) profesorius Zhongas Lin Wangas (2005) drauge su dviem kolegomis paskelbė apie kitokio tipo generatoriaus išradimą. Naudodami pliką akimi nematomą nanoplauštą, primenantį mažičius lanksčius šepetėlio buteliams plauti šerelius (7 pav.), mokslininkai sukūrė kelių nanometrų dydžio generatorių, šis prietaisas trintį tarp dviejų pluoštų paverčia elektros energija.



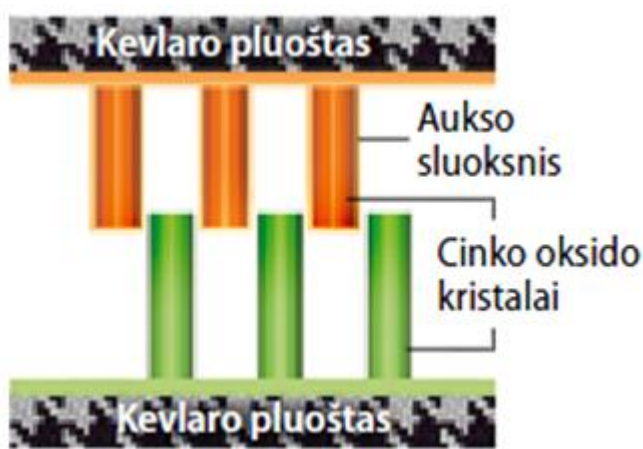
7 pav. Generatoriaus nanoplauštas

Nanotechnologijų srityje iki šiol labai stigo mažo elektros energijos šaltinio, todėl šis išradimas yra didžiulis perversmas. Wango nanoplauštas toks plonas, kad energijos gali kaupti iš visai nepastebimų judesių, o jų kasdien mes padarome nesuskaičiuojamai daug. Iš jo galima suverpti ilgus siūlus, o iš jų austi audinius ir sukurti ateities energetinių drabužių, galinčių energiją paversti menkiausius kūno judesius. Wangas šią dviejų nanoplauštų sistemą (8 pav.) apibūdina kaip lankstų ir paslankų energijos šaltinį, dėvimą kaip bet kurį kitą drabužį (Nano generatorius 2010).



8 pav. Nanogeneratoriaus sandara: du vienas kitą apsiviję kevlaro pluoštai

Kūrėjas įsitikinęs, kad ateityje galėsime elektros energijos gauti iš ramaus užuolaidų, palapinių ir marškinėlių plevėnimo vėjyje, taip pat iš transporto, mašinų keliamos vibracijos ar garsinio slėgio svyravimų. Be to, nanopluoštus bus galima įperuoti į žmogaus kūną ir elektros energijos gamybai pritaikyti kraujagyslių pulsavimą. Šitaip būtų galima elektros energija aprūpinti tokius medicinos prietaisus kaip širdies stimulatoriai ar insulino pompos. Novatoriškas Wango nanogeneratorius paremtas vadinamuoju pjezoelektriniu efektu, kai spaudžiant arba gniuždant tam tikras medžiagas atsiranda elektros įtampa. 2007 metais Wangas sukūrė savo pirmąjį nanogeneratorių, jį sudaro dvi plokštelės su pjezoelektriniais nanolaideliais (9 pav.).



9 pav. Sukurto nanogeneratoriaus principinė schema

Šie laideliai – tai cinko oksido (ZnO) kristalai, jie vieninteliai turi ir pjezoelektrinių, ir puslaidininkio savybių, todėl juos deformavus atsiranda elektros srovė. Wangui jau pavyko patobulinti lankstaus nanogeneratoriaus veikimą. Tam jis panaudojo kevlaro pluoštą su cinko oksido kristalais, išsidėsčiusiais tarsi daugybė mažyčių plaukelių. Mokslininkai pagamino 200 naujojo nanoplaušto gijų ir sujungė jas po dvi, vieną pritvirtindami nejudamai, o kitą sujungdami su maža spyruokle, kad ją judinant atsirastų trintis. Išmatavęs gautus rezultatus, Wangas apskaičiavo, kad kiekvienas plaušto centimetras pasiekia 16 pW (pikovatų). Tai labai mažai, tačiau nanoskalėje

tokia galia reikšminga, juolab kad galima naudoti daug generatorių, kurie beveik neužima vietos. Wangas įrodė, kad į vieną giją suvijus daugiau pluošto porų tarpusavyje liečiasi daugiau cinko oksido šepetėlių ir rezultatai pagerinami 30–50 kartų.

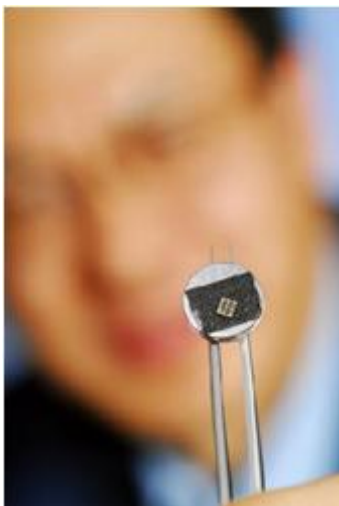
Mokslininkai apskaičiavo, kad vienas kvadratinis metras medžiagos, išaustos iš nanogeneratorių pluošto, gali tiekti iki 80 mW (milivatų) galią. Tokios galios beveik užtenka, kad veiktų mobilusis telefonas arba kitas elektroninis prietaisas, kurį paprastai nešiojamės kartu su savimi. Vis dėlto Wangas pabrėžia, kad turės praeiti mažiausiai penkeri metai, kol išvysime pirmuosius elektros energiją gaminančius drabužius, nes dar ne visos užduotys išspręstos. Šiaip ar taip, kol kas ši technologija tikrai daug žada. Pagaminti tokią medžiagą nebus brangu, o gamybos apimtį bus galima didinti iki pramoninio masto. Kadangi gamyba vyksta esant 80 laipsnių temperatūrai, galima naudoti įvairiausią pluoštą, pavyzdžiui, medvilnę arba vilną. Be to, mokslininkai įrodė, kad siūlai labai tvirti, atsparūs lankstymui ir tarpusavio trinčiai, o mažyčiai kristalai nelūžta ir lieka veiksmingi. Daugiausia keblumų kelia vanduo, nes jis gali pakenkti nanogeneratoriui, tačiau, Wango manymu, šią problemą galima išspręsti įsiuvant energiją gaminančią medžiagą daugiasluoksnių drabužių viduje ir skalbiant atskirai tik vidinį ir išorinį sluoksnius. Norint pasiekti dar geresnių rezultatų, būtina gerinti nanogeneratorių konstrukciją. Prisiminę pirmuosius didelius griozdiškus mobiliuosius telefonus, galėsime lengviau įsivaizduoti tolesnę nanogeneratorių raidą. Apibendrinant galima pasakyti, kad elektronikos plėtra krypta į mažiau energijos eikvojančių prietaisų ir geresnių elementų kūrimą, todėl ilgainiui skirtumas tarp pagaminamos energijos ir sunaudojamo jai pagaminti mažės (Nano generatorius 2010).

Turbūt reiktų paklausti, kodėl toks paprastas ir elementarus energijos išgavimo būdas išrastas tik dabar. Tačiau tikriausia, tai nuosekli nanotechnologijų vystymosi seka - visgi norint įdarbinti išorines vibracijas, kad jos gamintų elektros srovę, reikia tam naudoti nanovamzdelius. Štai taip vienos nanotechnologijos išsprendė kitas nanotechnologijų problemas - miniatiūrinių jutiklių, medicininių implantų ir kitų mini įtaisų maitinimas buvo didelė ir opi problema. Tiesiog visi dabar paplitę maitinimo šaltiniai yra per dideli, o dabar sukurtas generatorius kaip tik yra nanometrinio dydžio.

Vienas šio mini generatoriaus kūrėjų Džordžijos technologijos instituto profesorius Zhong Lin Wang mano, jog kurdami nanoprietaisus mokslininkai dar nemąsto, kaip sukurti jiems maitinimo šaltinius, o toks nanogeneratorius tam puikiai tiktų (Live harvesting 2010).

Generatoriaus pagrindinis elementas – vertikaliai išdėstytų cinko oksido nanostrypelių masyvas, o veikimo principas pagrįstas unikaliomis cinko oksido pjezoelektrinėmis ir puslaidininkinėmis savybėmis. Esminė savybė ta, jog nuo mechaninio poveikio pjezoelektrikai įsielektrina. Cinko oksido nanovamzdeliai gali svyruoti ir retkarčiais prisiliesti prie specialaus

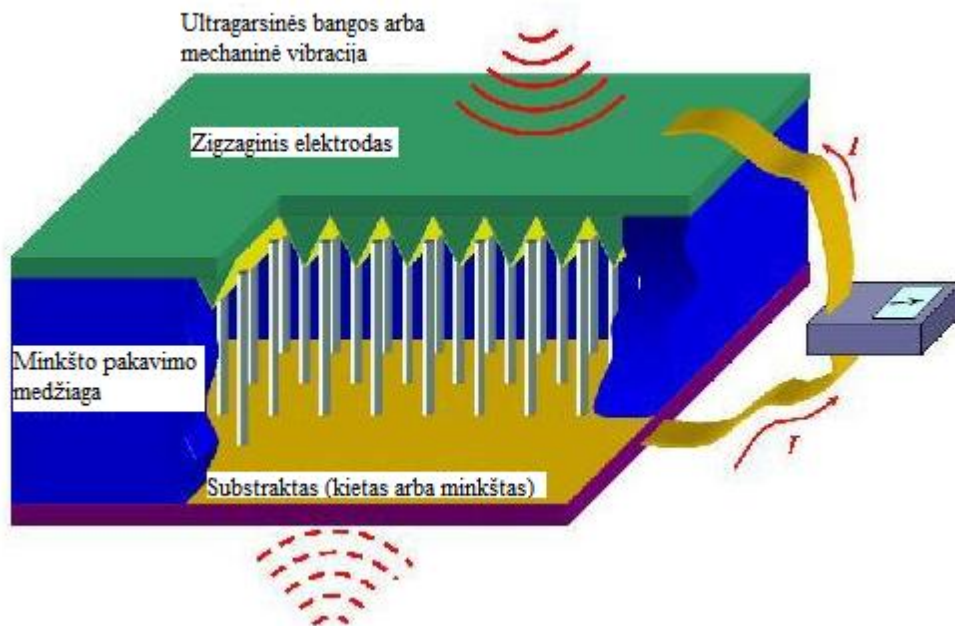
elektrodo, esančio viršuje, nelygaus paviršiaus. Jame yra duobutės, kuriose nanovamzdelių galai gali svyruoti. Dėl savo pjezoelektrinių savybių cinko oksido strypeliai, kai yra veikiami net ir labai menkų išorinių jėgų, palinksta ir įgyja elektros krūvį, kurį gali atiduoti, susilietę su viršutiniu elektrodu (Energetika, 2010).



10 pav. Padidinta nanogeneratorius nuotrauka

Aišku, kiekvienas nanostrypelis sukaupia nepaprastai mažą krūvį, tačiau kuomet jų yra ištisi milijardai, suminis galingumas yra jau apčiuopiamas. Kol kas jis gali sukurti tik nanoamperų stiprumo suminę srovę, tačiau skaičiavimai rodo, kad optimizavus jo parametrus, jis gali generuoti apie 4 vatų galią vienam kubiniam centimetrui, o to pakaktų įvairiems sensoriams, medicininiams implantams, ryšių ir gynybos pramonėms, mikroprietaisams ar nanorobotams.

Taigi, nedaug trūksta iki amžino variklio – energiją, reikalingą elektrai generuoti, „pasiimantis“ iš aplinkos – ultragarso bangų, mechaninių virpesių, net iš virpesių, kuriuos sukelia kraujo tekėjimas žmogaus kūne.



11 pav. Nanogeneratoriaus struktūra

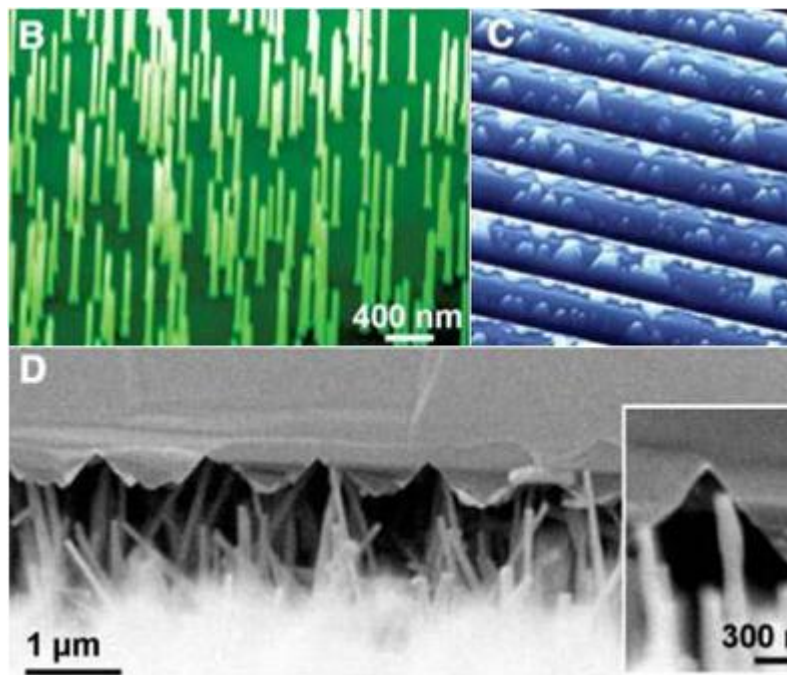
Idėją paversti mechaninius virpesius elektros energija greitai pasigavo kiti mokslininkai ir net kariškiai.

„Live Science“ portale pranešama, jog JAV fizikai sugalvojo būdą šilumai paversti garsu, o tada – elektros energija. Technologija leidžia panaudoti kitiems prietaisams dirbant švaistomą šilumą.

Jutos universiteto mokslininkų išradimas – cilindro formos prietaisai, telpantys delne. Jie sukonstruoti taip, kad šiltas oras kauptųsi ties nematomu „slenksčiu“, kurį peržengęs išskiria garsą – panašiai kaip grojant fleita. Tuomet garso bangos paveikia vadinamąjį pjezoelektrinį prietaisą, kuris spaudžiamas sukuria elektros srovę (Live harvesting 2010).

Taigi, metodas labai panašus į nanogeneratorių, tik šįsyk pagamintas prietaisas didesnių gabaritų ir tuo pačiu didesnio galingumo.

Tyrimus finansavo JAV kariuomenė, kuri tikisi panaudoti technologiją nešiojamiems energijos šaltiniams kurti. Tuo tarpu mokslininkai tikisi, kad per kelerius ateinančius metus prietaisai taps alternatyva fotoelementams, kurie Saulės šviesą paverčia elektra. Tai, taip pat būtų naujas būdas vėsinti kompiuteriams arba „įdarbinti“ energijai iš atominis reaktorių vėsinančių bokštų (Live harvesting 2010)



12 pav. Nanogeneratoriaus elementai

Paveikslėlyje matyti pagrindiniai nanogeneratoriaus elementai:

B - ant pagrindo išauginti nanovamzdeliai

C - paviršinis elektrodas

D - generatoriaus skersinis pjūvis

1.4 Įsikraunančios baterijos

Free Brother Industries kompanija sukūrė neįprastus AA ir AAA tipo akumuliatorius – nors jų išvaizda mažai kuo skiriasi nuo analogų, tačiau jų išskirtinė savybė – gebėjimas autonomiškai pasikrauti nuo aplinkos vibracijų (Vibration-powered 2010).

Vibracijų generatoriai jau senokai yra inžinierių galvose – juk mes gyvename labai dinamiškame pasaulyje, kur vibracijas sukuria mašinos, gamyklos, pagaliau žmogaus kasdieninė veikla. Tai kodėl to neišnaudoti maitinant nedidelės galios schemas?

Dabar gi, kompanija Free Brother Industries nusitaikė į kitus mažos galios prietaisus – distancinius pultelius bei žaidimų konsolių valdymo pultelius. Naudojimo metu jie visada judinami – vadinasi, juos veikia nedidelės vibracijos, kurias galimą išnaudoti elementų pakrovimui.

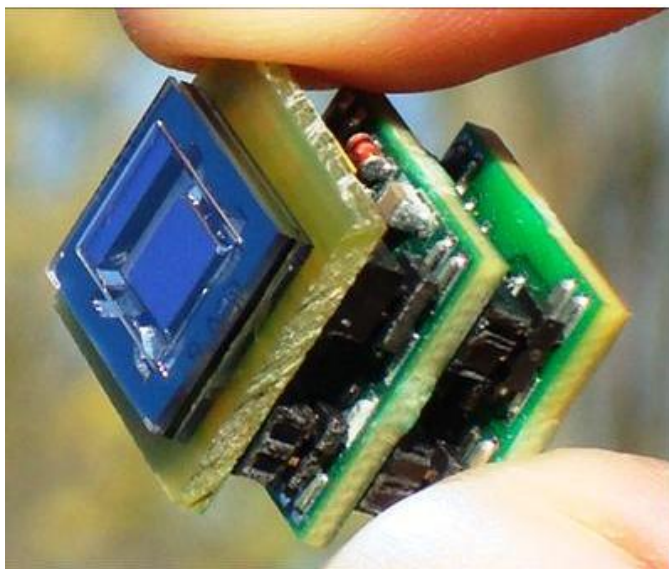


13 pav. Nuo mechaninių virpesių įsikraunančios baterijos

Naujieji elementai, pavadinti Vibration-powered Generating Battery, elektros energijos sau pasigamina iš mechaninės vibracijos. Kinetinės energijos generatoriai nėra originalus išradimas, tačiau šiuo atveju toks sprendimas gali būti labai praktiškas ir plačiai pritaikomas. Gamintojų teigimu, tokio tipo akumuliatoriai pajėgūs maitinti iki 100 mW galingumo schemas. Tarkim, vidutinis distancinių pultelių suvartojamas galingumas siekia nuo 40 mW iki 100 mW. Tokio tipo baterijos pakrovimas vyksta nuo 4 iki 8 Hz dažnio ir jų talpa yra iki 500 mF (Pasikraunančios baterijos, 2010).

1.5 Mikroelektromechaninis vibracijos konverteris

Europos mokslinių tyrimų organizacijos IMEC, Holst Centre ir TNO paskelbė sukūrusios kol kas patį efektyviausią mikroelektromechaninį vibracijos konverterį (angl. harvester), aplinkos vibracijų energiją paverčiantį elektros energija (Energy harvesting, 2010).



14 pav. Mikroelektromechaninis vibracijos konverteris

Tokie prietaisai, veikiantys 150 – 1000 Hz diapazone, labai tinka „maitintis“ įvairių pramoninių prietaisų triukšmais ir gali būti panaudojami kaip autonominių daviklių maitinimo šaltiniai.

Nors sukurto prietaiso galia siekia vos $85\mu\text{W}$, tačiau jis buvo prijungtas prie standartinio bevielio temperatūros daviklio, tik kiek modifikuoto taip, kad naudotų mažiau energijos, ir pasirodė, kad šio energijos šaltinio, veikiamo realių maždaug 325 Hz dažnio vibracijų, galios pilnai pakanka, kad daviklis kas penkiolika sekundžių bevieliu ryšiu į bazinę stotį siųstų temperatūros duomenis.

Dar vienas naujojo konverterio privalumas – jo pjezoelektriniam sluoksniui formuoti buvo panaudotas aliuminio nitridas (AlN), kurio sluoksnių gamybos procesas yra paprastesnis ir pigesnis, nei kitų įprastai naudojamų pjezoelektrinių medžiagų (Mikrokonverteris, 2010)

Šis pasiekimas įrodo, kad tokie vibracijos konverteriai jau netrukus gali būti pritaikyti ir įvairiose pramonės srityse.

1.6 Išmaniosios medžiagos

Pasaulyje neseniai baigėsi dviejų medžiagų kūrimosi amžius – tai plastikų amžius ir kompozitų amžius. Viduryje šių dviejų medžiagų kūrimosi amžių išsivystė nauja era, tai išmaniųjų medžiagų era (John Wiley & Sons, 2002).

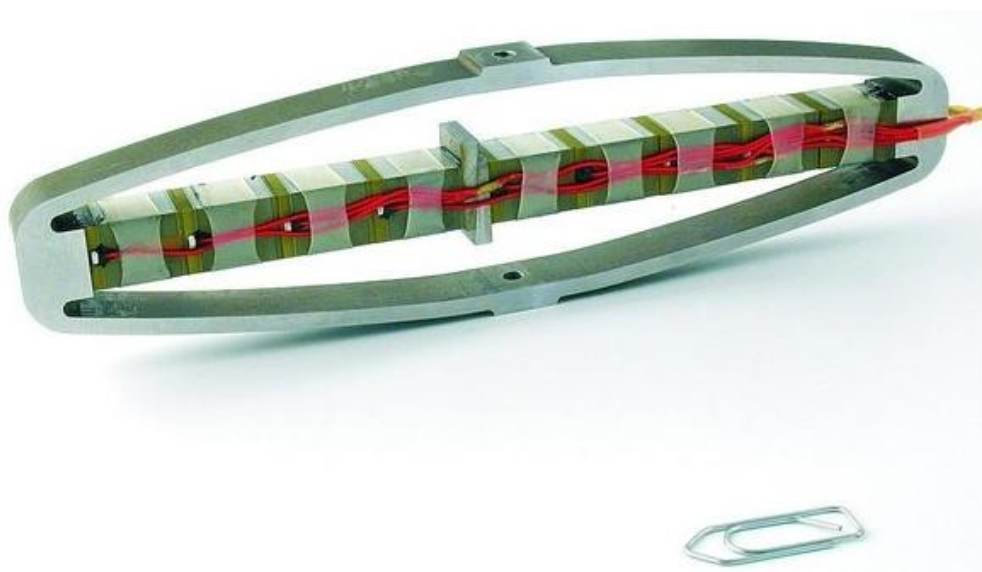
1 lentelė. Išmaniųjų medžiagų klasifikavimas pagal dirgiklio ir atsako formas

Atsakas	Elektrinis	Magnetinis	Optinis	Terminis	Mechaninis
Žadinimas					
Elektrinis			Elektrochrominės Elektroluminisencinės Elektro-optinės	Termo- elektrinės	Pjezoelektrinės Elektrostrikcinės Elektro- reologiniai skysčiai
Magnetinis			Magneto-optinės		Magneto- reologiniai, feromagnetiniai skysčiai
Optinis	Fotokonduktorius		Fotochrominės		
Terminis			Termochrominės Termoluminisencinės		Atmynus lydiniai
Mechaninis	Pjezoelektrinės Elektrostrikcinės Elastrostrikcinės	Magnetostrikcinės	Mechanochrominės		

Išmaniosios medžiagos – yra medžiagos, kurios turi vieną ar daugiau savybių, kurias galima reikšmingai keisti kontroliuojant išorinius dirgiklius, pavyzdžiui, stresą, temperatūrą, drėgmę, pH, elektrinius arba magnetinius laukus.

Išmaniąsias medžiagas yra labai sudėtinga suskirstyti į tipus, todėl čia yra pateikta šių medžiagų apibūdinimai:

Pjezoelektrinės medžiagos ir elektrostrikcinės medžiagos yra medžiagos, kurios gamina įtampą, kai sukuriama įtempiai. Kadangi, šis poveikis, taip pat taikomas atvirkštine tvarka – paleidus įtampa medžiagoje bus gaunamas įtempis. Tinkamai suprojektuoti ir pagaminti iš šių medžiagų struktūros, gaminiai gali susilenkti, plėstis arba trauktis, kai yra joms paduodama įtampa.

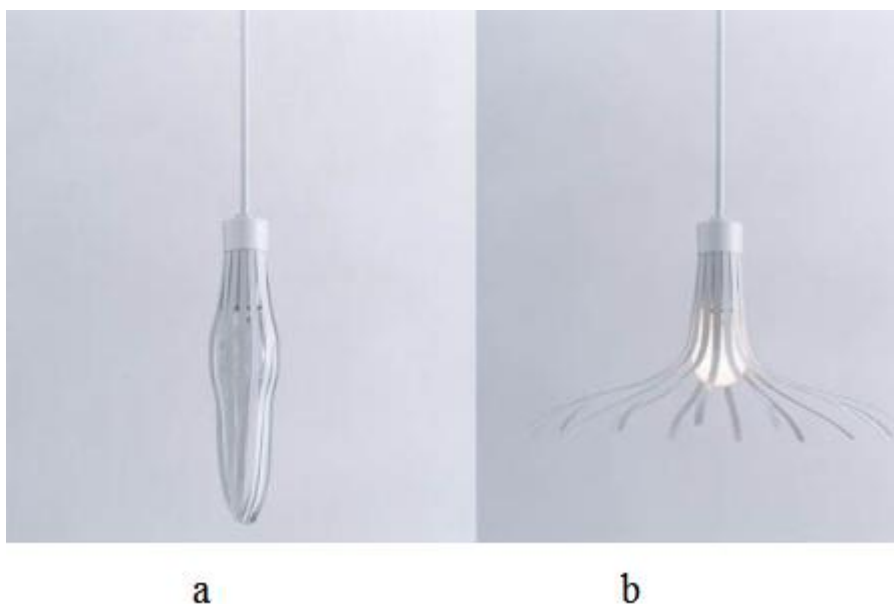


15 pav. Plėtimosi pjezoelektrinė pavara

Magnetostrikcinės medžiagos gali keisti magnetinę energiją į kinetinę, arba atvirkščiai t.y. šios medžiagos reaguodamos į magnetinį lauką keičia savo būvį. Jos yra plačiai naudojamos gaminant aktuatorius (mechaninis elektrinis prietaisas sudarytas iš elektros variklio su reduktoriumi ir keičiantis elektros energiją į judesio) arba jutiklius.

Elastorestrikinės medžiagos – tai medžiagos, kurios yra mechaniškai ekvivalenčios elektrostrikcinėms ir magnetostrikcinėms medžiagoms, tik šios medžiagos išduoda didelį histerizės kilpą tarp įtempimų ir ištiesimų.

Atmenieji formos lydiniai ir formos atmenieji polimerai yra medžiagos, kurias paveikus temperatūros ar įtempimų pokyčiais, gali būti sukeltos didelės deformacijos t.y. šios medžiagos gali grįžti į pradinę savo formą paveikus tam tikra temperatūra. Tokių deformacijų rezultatai atsiranda dėl martensitinės medžiagos fazės kaitos.



16 pav. Apšvietimo lempa, pagaminta iš atmeniujų formos lydinių: a – neįjungta lempa, b – įjungta lempa

Magnetiniai atmenieji formos lydiniai yra medžiagos, kurios keičia savo formą, reaguojant į didelius magnetinio lauko pokyčius.

pH-jautrieji polimerai yra medžiagos, kurios reaguoja į pakitusi pH. Tokiu atveju dažniausiai yra keičiama skysčio klampumas.

Halochromic medžiagos – kurios keičia savo spalvą reaguojant į rūgštingumą. Pavyzdžiui, tokias medžiagas galima naudoti dažams, kad būtų galima identifikuoti metalo koroziją (Harvey 2003).

Chromogeninės sistemos geba pakeisti spalvą dėl elektros, optinės ar šilumos pokyčių. Tai apima elektrochrominių medžiagų, kurios keičia savo spalvą arba skaidrumą naudojant įtampą (pvz., skystųjų kristalų ekranai).

Termochrominės medžiagos keičia savo spalvą priklausomai nuo jų temperatūros.

Fotochrominės medžiagos keičia savo spalvą kaip atsaką į šviesos ryškumą, pavyzdžiui, šviesai jautrūs saulės akiniai, patamsėja priklausomai nuo šviesos ryškumo.

Fotomechaninės medžiagos, kurios keičia savo formą nuo šviesos ryškumo.

Save gydančios (angl. Self-healing) medžiagos turi galimybę pasitaisyti save pačios, dėl jose esančių vidinių įtempių, bei molekulių judėjimų, net ir vykstant tos medžiagos darbui, todėl šios medžiagos prailgina gyvavimo ciklą.

Magnetokalinės medžiagos junginiai, kuriuose vyksta grįžtamieji temperatūros pokyčiai juos veikiant besikeičiančiame magnetiniame lauke.



17 pav. Lėlės, pagamintos iš fotochrominės medžiagos

Dielektriniai elastomerai yra protingų medžiagų sistemos, kurios sukuria didelius įtempimus (iki 300%), priklausomai nuo išorinio elektrinio lauko dydžio. Taip pat paveikiant juos mechaniškai galimas ir atgalinis reiškinys, kai iš mechaninės energijos yra gaminama elektros energija

Termoelektrinės medžiagos yra naudojamos kurti prietaisus, kad konvertuoti temperatūros skirtumus į elektrą arba atvirkščiai – iš elektros skirtingą temperatūrą.

Magnetoreologinės medžiagos yra tokios, kurios savo reologines savybes gali labai staigiai keisti veikiant magnetiniu lauku. Šie pokyčiai yra proporcingi magnetinio lauko dydžiui ir jie staigiai keičiami. Dažniausiai šios medžiagos yra skysčiai, sudarytas iš alyvos ir smulkių geležies dalelių, kurias paveikus magnetiniu lauku, jos įgyja dipolio momentą ir sukimba viena su kita. Taigi, keičiant skystį veikiančio magnetinio lauko stiprumą, galima reguliuoti skysčio klampą (Li and Du 2003). Šios medžiagos labai dažnai yra naudojamos amortizatoriams, stabdžiams, sankaboms, movoms (K.D. Weiss, *et al.* 2000).

Feromagnetinis skystis – kuris tampa stipriai magnetinis, veikiant išoriniam magnetiniam laukui. Feromagnetinis skystis susideda iš feromagnetinių dalelių ir nešančiojo skysčio, dažniausiai tai būna alyva. Feromagnetinių dalelių dydis ~10 nm, todėl šios dalelės yra nenufiltruojamos. Toks feromagnetinių dalelių dydis leidžia feromagnetiniam reiškiniui pasireikšti dar stipresnėje formoje, nei feromagnetinėje medžiagoje, reiskia ir taip labai didelis įsimagnetinimas tampa dar didesniu.



18 pav. Feromagnetinis skystis

1.7 Problemos formulavimas

Iš pateiktos literatūros apibendrinant galima teigti, jog yra kuriama daug naujų prietaisų, kurie galėtų gaminti elektros energiją. Taip pat, galime pastebėti, jog norint mažų gabaritų, reikia, jog vibracijos būtų didelio dažnio. Jeigu žadinimo dažnis yra mažas, tai mechaninė sistema, kuri gebėtų generuoti elektros energiją, turi būti didesnių gabaritų. Taip yra dėl inercijos jėgų.

Taigi, šio darbo užduotis – sukurti generatoriaus prototipą, kuris būtų santykinai mažų gabaritų, ir gebėtų generuoti elektros energiją iš žemų virpesių dažnių. Kad tai būtų galima įvykdyti, reikalinga sistema, kurios inercijos jėgos būtų mažos. Tokią sąlygą tenkina skysčiai, o tai yra dar nei vieno nepaliesta sritis, arba ji niekada iki galo neišspręsta.

Šiam tyrimui bus naudojami išmanieji skysčiai. Pagal šių skysčių savybes, atrodo, jog labiausiai tinka feromagnetinis skystis, nes jis turi nano dydžio feromagnetinių dalelių, kurios yra nenufiltruojamos, taip pat, šis skystis yra stipriai įsimagnetinantis.

Atlikti tyrimą yra pasirinktas feromagnetinis skystis EFH1, kurio savybės:

Pilnas įsimagnetinimas – 0,044 T;

Klampumas, prie 27⁰ C – 6 mPa · s;

Tankis, prie 25⁰ C – 1,21 x 10³;

Užšalimo temperatūra – -94⁰ C;

Virimo temperatūra – 92⁰ C;



b

19 pav. Feromagnetinis skystis, kuris yra naudojamas šiame tyrime – EFH1

2. TEORINIS PAGRINDIMAS IR SKAIČIAVIMAI

2.1 Feromagnetinio skysčio magnetostatiniai skaičiavimai

Anot Hyung-Sub Bae (2009), pirmiausiai verta aptarti magnetostatinę analizę, nes šis tyrimas apima feromagnetinio skysčio judinimą magnetiniame lauke, kuris yra sukurtas nuolatinio magneto (Badescu *et al.* 1999). Magnetostatinė priklausomybė gali būti išreikšta Maksvelo-Ampero dėsnio:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}, \quad (1)$$

čia $\vec{H}$ – magnetinio lauko vektorius, A/m;

∇ – gradiento operatorius;

$\vec{J}$ – srovės tankio vektorius, A/m².

Kadangi nuolatinis magnetas sukuria pastovų magnetinio lauko srautą, tai šio magnetinio lauko nuokrypiai visuomet bus lygūs 0. Todėl magnetinio lauko srauto tankio vektorių $\vec{B}$ galima išreikšti Gauso dėsnio:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (2)$$

čia $\vec{B}$ – magnetinio lauko tankio vektorius, Wb/m².

Norint apibūdinti ryšį tarp magnetinio lauko srauto tankio vektorių $\vec{B}$ ir magnetinio lauko vektorių $\vec{H}$, naudojama konstitutyviniai ryšiai:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}(H)), \quad (3)$$

čia μ_0 – magnetinis pralaidumas vakuume;

$\vec{M}(H)$ – įsimagnetinimo vektorius, kuris įsimagnetina nuo magnetinio lauko intensyvumo.

Magnetinio vektoriaus potencialumą galima išreikšti naudojant (1) ir (2) formules:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}; \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0, \quad (5)$$

čia $\vec{A}$ – magnetinis vektoriaus potencialas.

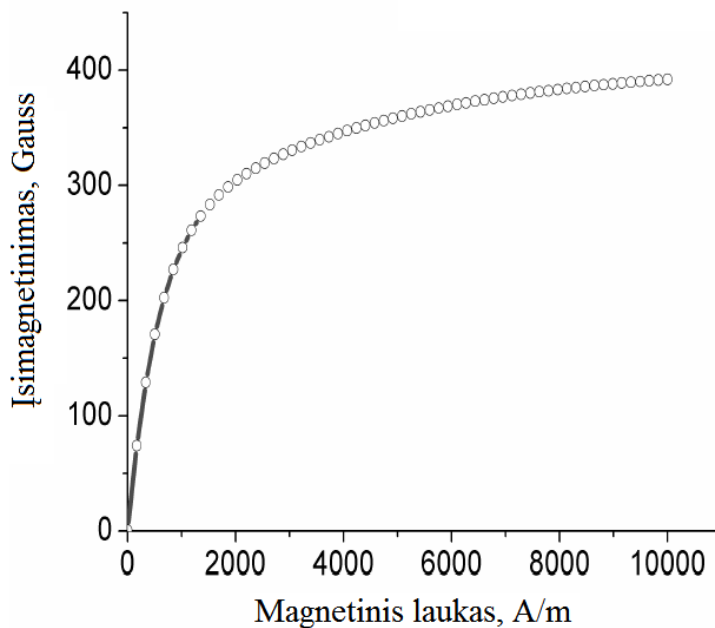
Remiantis pateiktomis formulėmis galima jas supaprastinti, t.y. į (5) formulę įstačius (3) gauname (6) bei į pastarąją įsistačius (1) gauname (7) formulės vektorių išraiškas:

$$\nabla \times \vec{A} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}); \quad (6)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{A} - \vec{M} \right) = \vec{J}. \quad (7)$$

Kadangi mus domina judinimas feromagnetinio skysčio dvejose ašyse (t.y. amplitudė ir magnetinis laukas), tai srovės tankio vektorius $\vec{J} = 0$. Vadinasi (7) lygtį galima perrašyti taip:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{A} - \vec{M} \right) = \vec{J}. \quad (8)$$



20 pav. Feromagnetinio skysčio įsimagnetinimas kintant magnetiniam laukui

20 paveikslėlis parodo feromagnetinio skysčio įsimagnetinimo dydį keičiantis magnetiniam laukui.

2.2 Feromagnetinio skysčio hidrodinaminiai skaičiavimai

Veikiant magnetiniam laukui turi būti remiamasi tiek elektromagnetinėmis tiek hidrodinaminėmis feromagnetinio skysčio savybėmis (Kamiyama *et al.* 1999).

Taigi, tėkmė sukelta judinimo privalo tenkinti pastovumo ir impulsinius skaičiavimus, kurie yra tokie, kaip ir įprastinių skysčių (Bashtovoy *et al.* 2002):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (9)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} - \nabla \cdot \eta \left(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right) + \rho (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} + \nabla p_c = \vec{F}_m + \vec{F}_v, \quad (10)$$

$$p_c = p_f + p_m, \quad (11)$$

$$\vec{F}_m = \mu_0 (\vec{M} \cdot \nabla) \vec{H}. \quad (12)$$

čia ρ – magnetinio skysčio tankis, kg/m³;

$\vec{u}$ – greičio vektorius ($\vec{u} = u, v$), m/s;

η – dinaminė klampa, kg/ms;

p_c – slėgis, kuris susideda iš skysčio slėgio p_f ir skysčio-magnetio lauko slėgio p_m , N/m²;

$\vec{F}_m$ – jėgos vektorius sukurtas nuo magnetinio lauko, N/m³;

$\vec{F}_v$ – jėgos vektorius dėl indo, kuriame įpiltas feromagnetinis skystis, judėjimo, N/m³.

Kai yra taikomas nedidelis magnetinis laukas, tai magnetinio lauko slėgis gali būti užrašomas taip :

$$p_m \equiv \mu_0 \int_0^H M dH = \mu_0 M H = \mu_0 H \frac{1}{H} \int_0^H M dH = \frac{\mu_0}{2} M H. \quad (13)$$

13 formulė išreiškia vidinius ir išorinius feromagnetinio skysčio slėgių skirtumus, kurie atsiranda veikiant magnetiniam laukui ir tai yra tiesiogiai susiję su magnetinio skysčio paviršiaus pasikėlimu, kai šį skystį veikia magnetinis laukas.

Taip pat, mes galime išreikšti magnetines kūno jėgas $\vec{F}_m$, kurios yra pateiktos 12 formulėje, Dekarto koordinatų sistemoje naudojant magnetinį vektoriaus potencialą $\vec{A}$:

$$(F_m)_x = \mu_0 \left(M_x \frac{\partial H_x}{\partial x} + M_y \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) = \mu_0 \left(M_x \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial y} - M_y \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right), \quad (14)$$

$$(F_m)_y = \mu_0 \left(M_x \frac{\partial H_y}{\partial x} + M_y \frac{\partial H_y}{\partial y} \right) = \mu_0 \left(-M_x \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial x} + M_y \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right). \quad (15)$$

Jėgos vektorius $\vec{F}_v$ gali būti išreikštas Dekarto koordinatų sistemoje taip:

$$(F_v)_x = \rho g \sin(\phi_{max} \sin(2\pi f t)), \quad (16)$$

$$(F_v)_y = -\rho g \cos(\phi_{max} \sin(2\pi f t)), \quad (17)$$

čia ϕ – feromagnetinių dalelių frakcijos dydis, nm.

Norint išreikšti įsimagnetinimo vektorių $\vec{M}$ Dekarto koordinatų sistemoje galima naudoti Langevino funkcijas:

$$\lim_{\alpha \gg 1} M_x = M_s \left(1 - \frac{1}{\alpha} \right) = M_s \left(1 - \frac{6KT}{\pi \mu_0 \phi M_d H_x d^3} \right); \quad (18)$$

$$\lim_{\alpha \gg 1} M_y = M_s \left(1 - \frac{1}{\alpha} \right) = M_s \left(1 - \frac{6KT}{\pi \mu_0 \phi M_d H_y d^3} \right); \quad (19)$$

$$\text{kur } \alpha = \frac{\mu_0 M_d V H}{KT}; \quad (20)$$

čia $M_s = \phi M_d$ – feromagnetinių dalelių prisotinimo koeficientas feromagnetiniame skystyje;

M_d – feromagnetinių dalelių įsimagnetinimas, A/m;

ϕ – feromagnetinių dalelių frakcijos dydis, nm;

α – energijos santykis;

V – sferinis feromagnetinio skysčio magnetinis dydis;

d – feromagnetinių dalelių dydis, nm;

T – temperatūra Kelvinais, K.

Aprašomoje sistemoje buvo taikytas nestiprus magnetinis laukas, todėl Langevino funkcija čia yra apytiksliai linijinė, todėl galime teikti, jog įsimagnetinimas yra proporcingas efektyviam magnetinio lauko stipriui.

$$\vec{M} = X_{mf} \vec{H}; \quad (21)$$

čia X_{mf} – feromagnetinio skysčio magnetinis imlumas.

Įtraukiant visas prieš tai pateiktas formules galime išreikšti (10) formulę Dekarto koordinatų sistemoje:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} = & -\frac{\partial p_c}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \\ & + \mu_0 \left(M_x \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial y} - M_y \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) + \rho g \sin(\phi_{\max} \sin(2\pi ft)) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial v}{\partial t} = & -\frac{\partial p_c}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \\ & + \mu_0 \left(-M_x \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial x} + M_y \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) - \rho g \cos(\phi_{\max} \sin(2\pi ft)) \end{aligned} \quad (23)$$

19 ir 20 formulės išreiškia feromagnetinio skysčio judinimą veikiant magnetiniam laukui, taip pat į šias formules įeina magnetinis kūno jėgos poveikis. 19 ir 20 formulių dešinėje pusėje atsispindi feromagnetinio skysčio greičio kitimas. Kairėje pusėje minėtų formulių yra išreikšta skaičiavimai slėgio, klampumo, magnetinės kūno jėgos, taip pat kūno jėgos, kuriuose įeina žemės traukos jėga g .

3 FEROMAGNETINIO SKYSČIO MODELIAVIMAS

Šiame tyrime, magnetinis laukas yra sukurtas nuolatinių magnetų, todėl ir yra svarbu padaryti magneto statinę analizę dvejose ašyse. Šiame tyrime modeliavimas buvo atliktas naudojantis „COMSOL“ Multiphysics programinę įrangą.

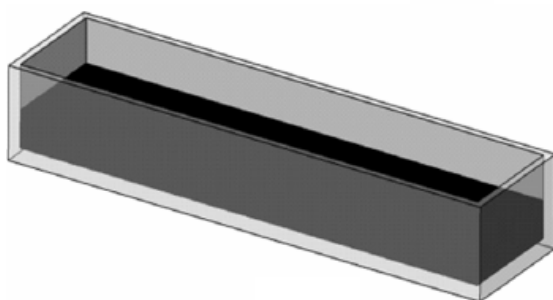
„COMSOL Multiphysics“ – tai interaktyvi programinė įranga skirt modeliuoti ir spręsti mokslines ir inžinerines problemas, kurių pagrindas yra diferencialinės lygtys.

Nuolatinės srovės magnetas, kuris naudojamas šiame modeliavime yra Neodimio magnetas. Šis magnetas susideda iš neodimio, geležies ir boro: $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Šio cheminio elemento kristalo struktūra yra tetragoninė. Tokio tipo magnetai yra išrasti bendradarbiaujant „General Motors“ ir „Sumitomo Special Metals“ kompanijoms 1982 metais, kurie yra patys stipriausi iki šiol sukurti magnetai [Jiles 2003]. Šio magneto dydis yra 18 mm x 5 mm x 5 mm. Paviršiaus magnetinės srovės tankis ir realyvi magnetinė skvarba yra apie 0,3 teslų [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{A}^{-1}$] metrinėje matavimų sistemoje arba 3000 [gauss] centimetrinėje.

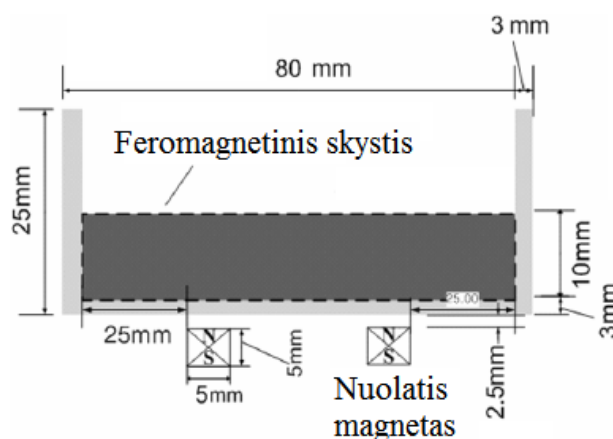
3.1 Magnetinio lauko analizė

Judinant feromagnetinį skystį, nepaisant ar tai vyksta esant sukurtame magnetiniame lauke, būtina atsižvelgti į šio skysčio elektromagnetines savybes (Rosensweig 1985).

21 paveikslėlyje yra pavaizduotas modelis, kuris yra naudojamas tyrimui. Paveikslėlyje yra parodytas tarpelis tarp magneto, kurio magnetinis srauto tankis yra 0.3 teslų, ir indo skysčiui laikyti 2.5 mm. Šis dydis bus keičiamas, kad pamatyti priklausomybę, kaip keičiasi skysčio savybės keičiantis magnetinio lauko atstumui.

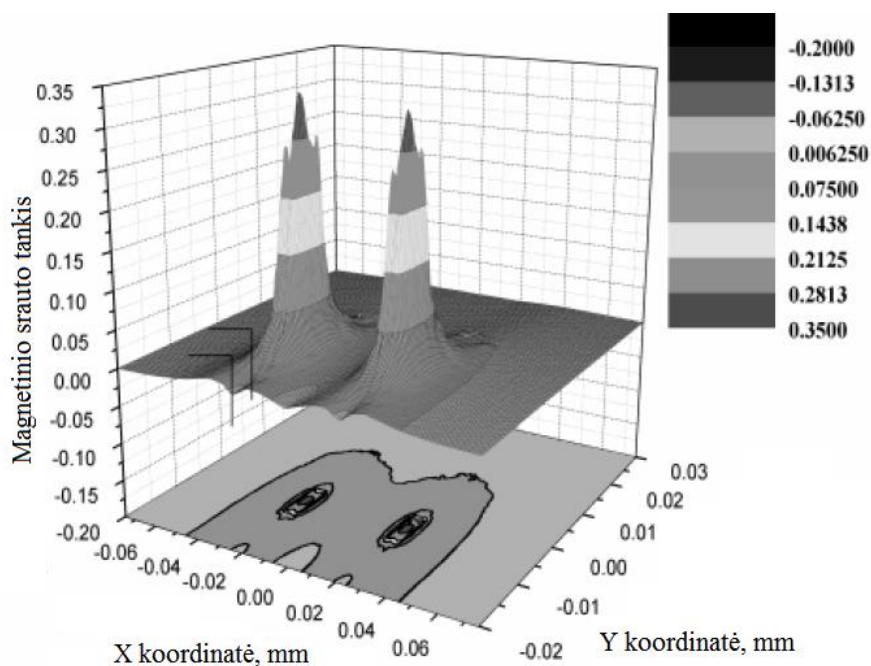


a - 3D vaizdas



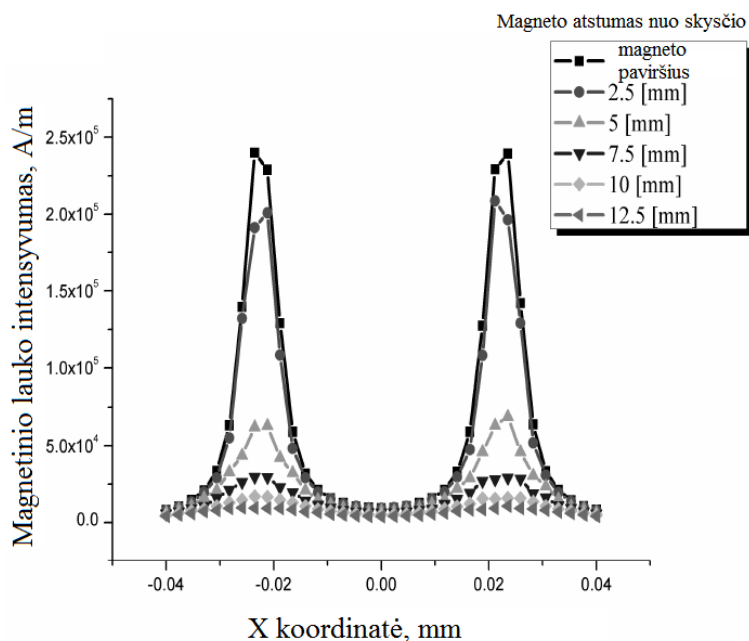
b - 2D vaizdas

21 pav. Modelis skirtas feromagnetiniam skysčiui analizuoti



22 pav. 3-D magnetinio srauto intensyvumo pasiskirstymas

Iš 22 pav. galime matyti, jog magnetinis srauto intensyvumas mažėja didėjant atstumui tarp magneto ir skysčio paviršių. 23 paveikslėlis parodo, kad esant tarp magneto ir feromagnetinio skysčio paviršių atstumui 2,5 mm, magnetinio lauko intensyvumas yra didžiausias magneto šonuose, o centre jis yra labai mažas. Bet, kai atstumas pasiekia 5 mm, magnetinio lauko intensyvumas magnetų šonuose staigiai mažėja. Iš 22 paveikslėlio galima matyti, kad net jei magnetinis laukas sklindantis iš nuolatinio magneto yra 3000 Gauss (0,3 teslų), tik 300 Gauss (0,03 teslų) daro įtaką feromagnetiniam skysčiui.



23 pav. Magnetinio lauko intensyvumo pasiskirstymas

3.2 Feromagnetinio skysčio statinės priklausomybės analizė

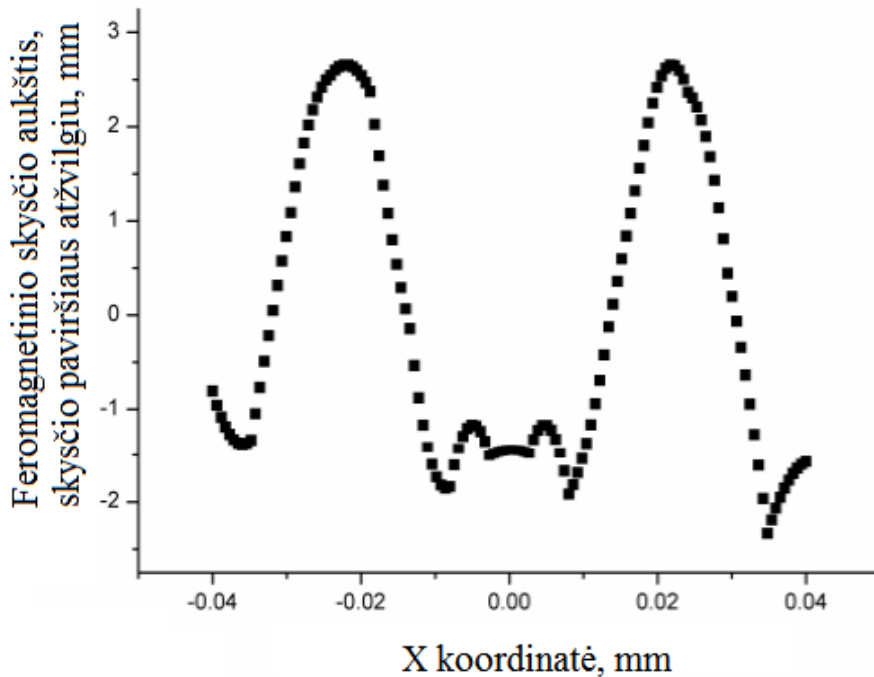
Panaudojant 10 formulę (žiūrėti 30 psl.), kuri yra pagrindinė analizuojant feromagnetinio skysčio statinę priklausomybę, galima įvesti magnetinę kūno jėgą į Navier-Stoko formulę (Kroell *et al.* 2005).

Šiame tyrime nėra įtraukta sąveika tarp feromagnetinių dalelių feromagnetiniame skystyje. Pirmiausia čia yra analizuojama feromagnetinio skysčio priklausomybė nuo magnetinės jėgos. Todėl formulėse (22) ir (23) yra eliminuota jėga $\vec{F}_v$ ir jos dabar yra tokios:

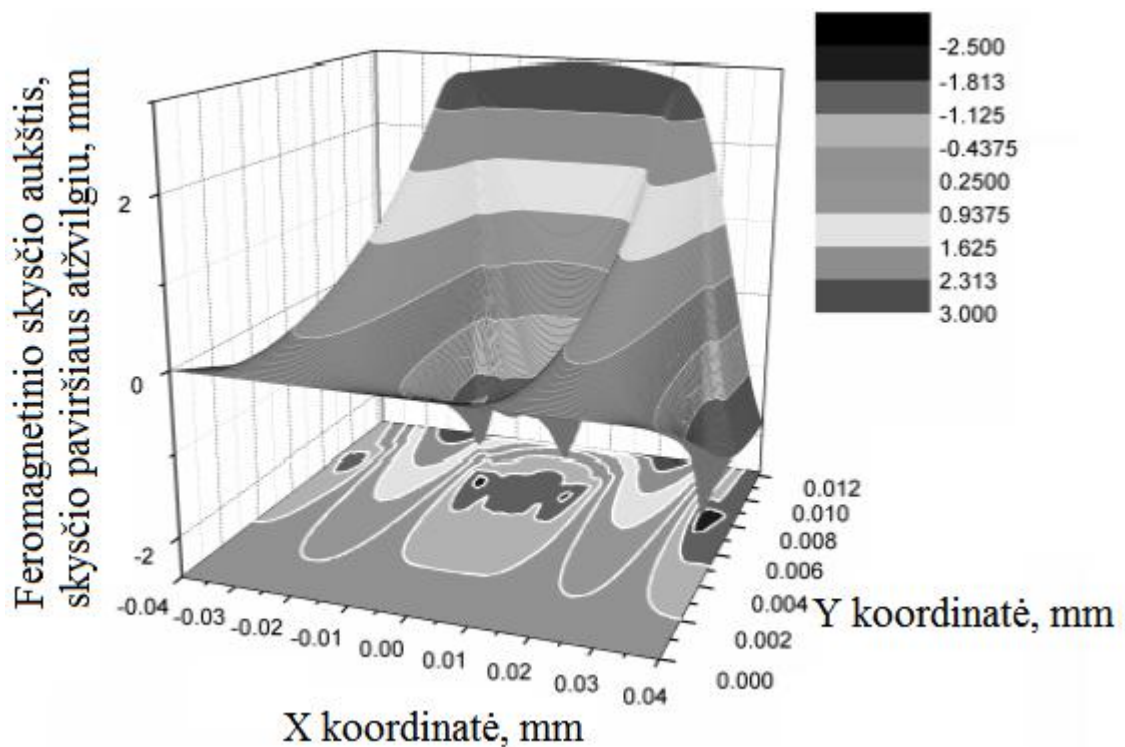
$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial p_c}{\partial y} - \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \mu_0 \left(M_x \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial y} - M_y \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right); \quad (24)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial p_c}{\partial y} - \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \mu_0 \left(-M_x \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial x} + M_y \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right). \quad (25)$$

Feromagnetinio skysčio, kuris yra modeliuotas čia tankis yra $1350 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ir klampumas $-3.99 \times 10^{-2} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$. Žemės trauka $g - 9.8 \text{ m/s}^2$, bei tūris 25 ml.



24 pav. Feromagnetinio skysčio paviršiaus aukštis



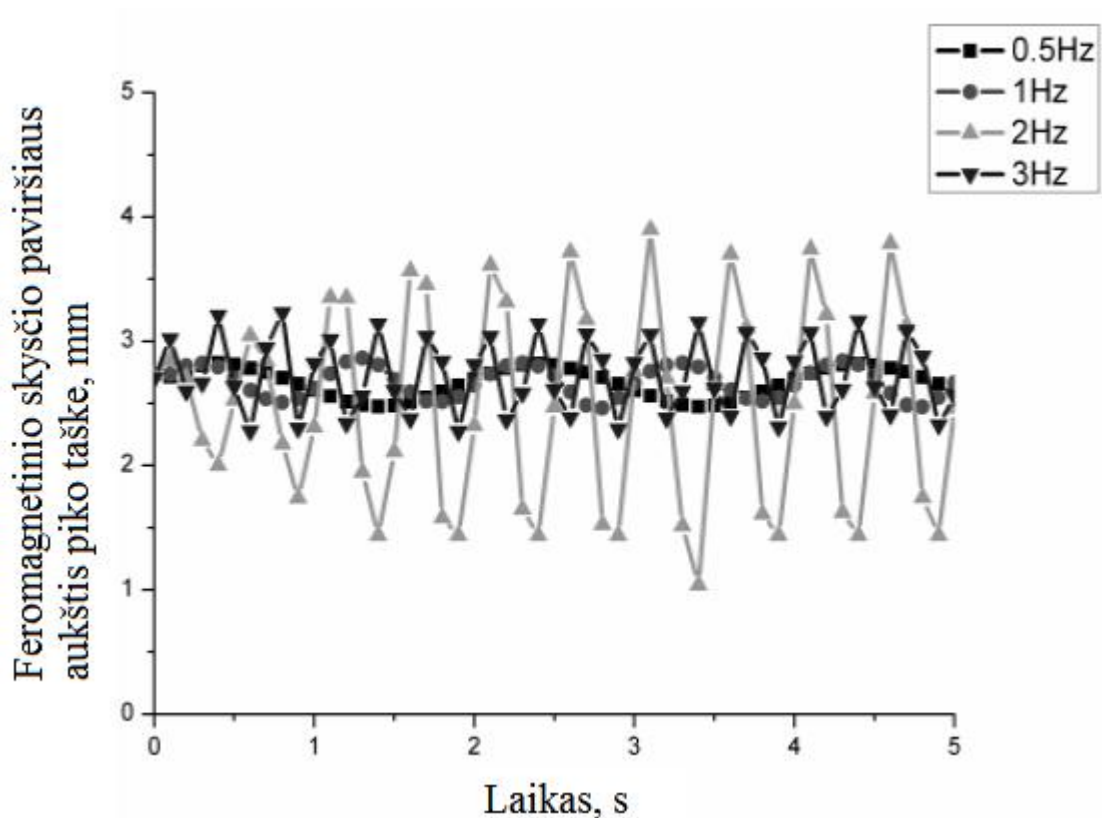
25 pav. 3-D feromagnetinio skysčio paviršiaus aukštis

24 ir 25 paveikslėliuose yra pateikta dvejomis ir trejomis ašimis feromagnetinio skysčio paviršiaus aukščio priklausomybė nuo magnetinės jėgos, kai magnetas yra atitrauktas nuo skysčio 2.5 mm tarpeliu. Didžiausias paviršiaus aukštis yra ten, kur yra didžiausias magnetinio lauko intensyvumas. Taip pat, iš šių grafikų galima matyti, jog ten kur yra silpnas magnetinis laukas skysčio lygis yra žemesnis nei šio skysčio lygis neveikiant magnetinėmis jėgomis. Ši fenomeną galima paaiškinti tuo, kad kai feromagnetinis skystis paveikiamas magnetiniu lauku, pasikeičia skysčio viduje esantis slėgis ir skystis perteka ten, kur yra stipriausia magnetinė jėga.

3.3 Judinamo feromagnetinio skysčio analizė

Judinaamas feromagnetinis skystis gali būti analizuojamas panaudojant 16, 17, 23, 24 formules, kurios išreiškia feromagnetinio skysčio dinaminę priklausomybę inde (Sudo *et al.* 2002).

Analizuojant judinamą feromagnetinį skystį, reikia atsižvelgti į statinės analizės rezultatus. Šiame modeliavime feromagnetinio skysčio indas bus paveikiamas keturiais skirtingais dažniais: 0,5; 1; 2; 3 Hz.



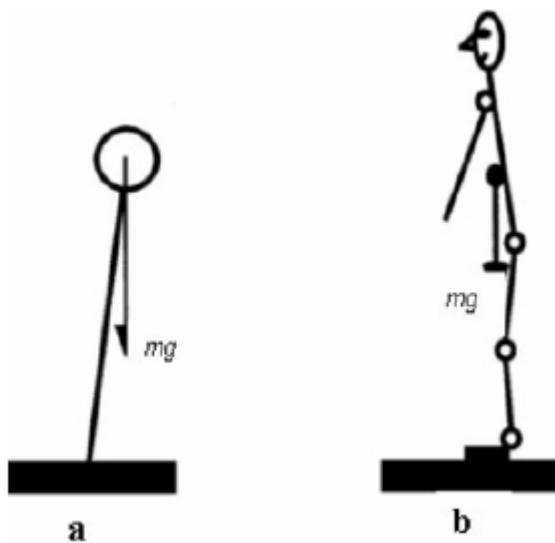
26 pav. Feromagnetinio skysčio paviršiaus aukščio, piko taškuose, kitimas

Apžvelgiant modeliavimo rezultatus, galime teigti, jog skystis labiausiai reaguoja kai yra veikiamas 2 Hz dažniu. Tuomet feromagnetinio skysčio paviršius juda didžiausia amplitude, iki 3 mm. Esant 0,5 Hz, kaip ir 1 Hz, feromagnetinio skysčio judėjimo amplitudė yra apie 0,5 mm. Tuomet vyksta staigus amplitudės augimas (kai judinimo dažnis 2 Hz). Toliau didinant dažnį, skysčio paviršiaus kitimo amplitudė mažėja.

Iš šių rezultatų galime matyti, jog esant žemiems dažniams (iki 1 Hz) feromagnetinis skystis juda maža amplitude, o padidinus judinimo dažnį iki 2 Hz šis skystis rezonuoja ir amplitudė padidėja 6 kartus. Tęsiant judinimo dažnio didinimą, amplitudė mažėja. Iš to galime daryti išvadą, kad šis feromagnetinis skystis turi rezonansinį dažnį esant 2 Hz. Tai žinant, bus galima atitinkamai elgtis: jei reikia, jog sistemoje būtų rezonansas, siekti kad sistema būtų virpinama 2 Hz, jei nereikia – siekti į šį virpesių intervalą nepatekti.

3.4 Žmogaus eisenos sukeliamų svyravimų nustatymas

Analizuojant žmogaus ėjimo svyravimus, galima remtis apverstos fizikinės švytuoklės modeliu (27 a pav.). Šiuo atveju yra susiduriama su kūnų pusiausvyros vertikalioje padėtyje pastovumu. Taigi, norint užtikrinti stabilią pusiausvyrą, kūną turi veikti papildomos jėgos. Pavyzdžiui, žmogaus kūną vertikalioje padėtyje išlaiko raumenys, o tiksliau, raumenų sukuriamos jėgos. Tokią analizę, žmogaus kūnui, padaro sudėtingą išilgai švytuoklės ašies esančios jungtys (27 b pav). Nagrinėjant šią sistemą, reikia ją nagrinėti taip, kad būtų masės centro projekcija atramos ploto ribose. Čia reikalinga tiksli jungčių judesių sąveika (Muckus, 2006).



27 pav. Žmogaus modelis: a – atvirkštinės švytuoklės modelis, b – žmogaus kūno modelis, sudarytas iš vertikalčiai išdėstytų grandžių

Atvirkštinės Švytuoklės modelius yra išsamiai aprašę P. Morasso ir M Schieppati (1999), bei L. Baratto ir kiti (1997). Autoriai teigia, jog kūno masės centras yra viršuje ir svyruoja apie čiurnos sąnarį dėl judančios jėgos vektoriaus. Šios jėgos vektoriaus projekcija atramos plokštumoje yra svorio centre ir tokios sistemos lygtį galima užrašyti tokiu pavidalu:

$$mgy - M_a + z = I\alpha; \quad (26)$$

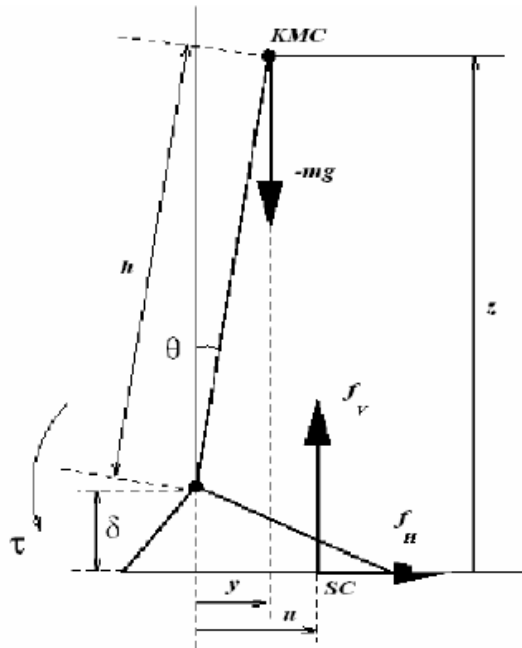
čia I – kūno, svyruojančio apie čiurną, masės inercijos momentas;

α – kampinis pagreitis;

m – kūno masė;

M_a – sukimo momentas ties čiurna;

z – vidinių ar išorinių jėgų (pavyzdžiui, kvėpavimo) sukurtas sukimo momentas.



28 pav. Atvirkštinės švytuoklės modelis

Šiame atvirkštinės švytuoklės modelyje kūno masės centrą nusako y , svorio centro padėtį nusako u . θ simboliu (pav. 28) yra pažymėtas kūno masės svyravimo kampas, o f – atramos plokštumos reakcijos jėga.

Kad sumodeliuoti žmogaus ėjimą reikia remtis ramybės būseną. Ramiai stovint, sukimo momentas ties čiurna M_a turi būti lygus reakcijos jėgos mg momentui apie čiurną. Todėl lygybę (26) galima perrašyti taip:

$$mgu = mgy - I\alpha + z; \quad (27)$$

Atlikus supaprastinimus lygybę (27) galima užrašyti taip:

$$a = \frac{g}{h_e}(y - u) + z'; \quad (28)$$

čia u – valdantysis kintamasis;

y – valdomas kintamasis.

Kitaip tariant, toks modelis paaiškina kūno masės centro padėtį priklausomai nuo svorio centro. Taigi, žinant svorio centro padėtį atramos plokštumoje galima apskaičiuoti kūno masės centro padėtį (Jacobs, 1997). Iš šių skaičiavimų yra nustatyta, jog žmogaus ėjimas sudaro 1-5 Hz dažnį (Starner, Paradiso, 2005).

4. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI IR JŲ REZULTATŲ ĮVERTINIMAI

Atlikus literatūros apžvalgą ir išnagrinėjus išmaniąsias medžiagas bei jų taikymą, tapo aišku, kad eksperimentinis tyrimas yra neišvengiamas šiame tiriamajame darbe. Eksperimentiniu tyrimu bus siekiama išsiaiškinti feromagnetinio skysčio savybes uždarame inde. Čia mums yra svarbiausia ištirti feromagnetinio skysčio savybes, kurios nebuvo surastos literatūros apžvalgos metu ir galėtų būti naudingos mažos elektrinės galios generatoriaus prototipo kūrimui.

Tokių savybių pavyzdžiai:

- Žadinimo dažnis magnetinio lauko impulsais, kuriems esant feromagnetinis skystis reaguoja labiausiai,
- Magnetinio lauko dydžio įtaka feromagnetinio skysčio santykinio pakilimo amplitudei.

Ištyrus šias savybes, kitas tyrimo žingsnis būtų sukurti galimus mažos elektrinės galios generatoriaus prototipus, kurie generuotų elektrinę energiją.

Šiame darbe yra atlikti keturi eksperimentiniai tyrimai:

1. Feromagnetinio skysčio santykinio pakilimo, veikiant magnetiniu lauku,
2. Feromagnetinio skysčio galimybė panaudoti mikropavarai,
3. Generatoriaus prototipo švytavimo 90^0 kampu,
4. Imituojant žmogaus rankų mostus.

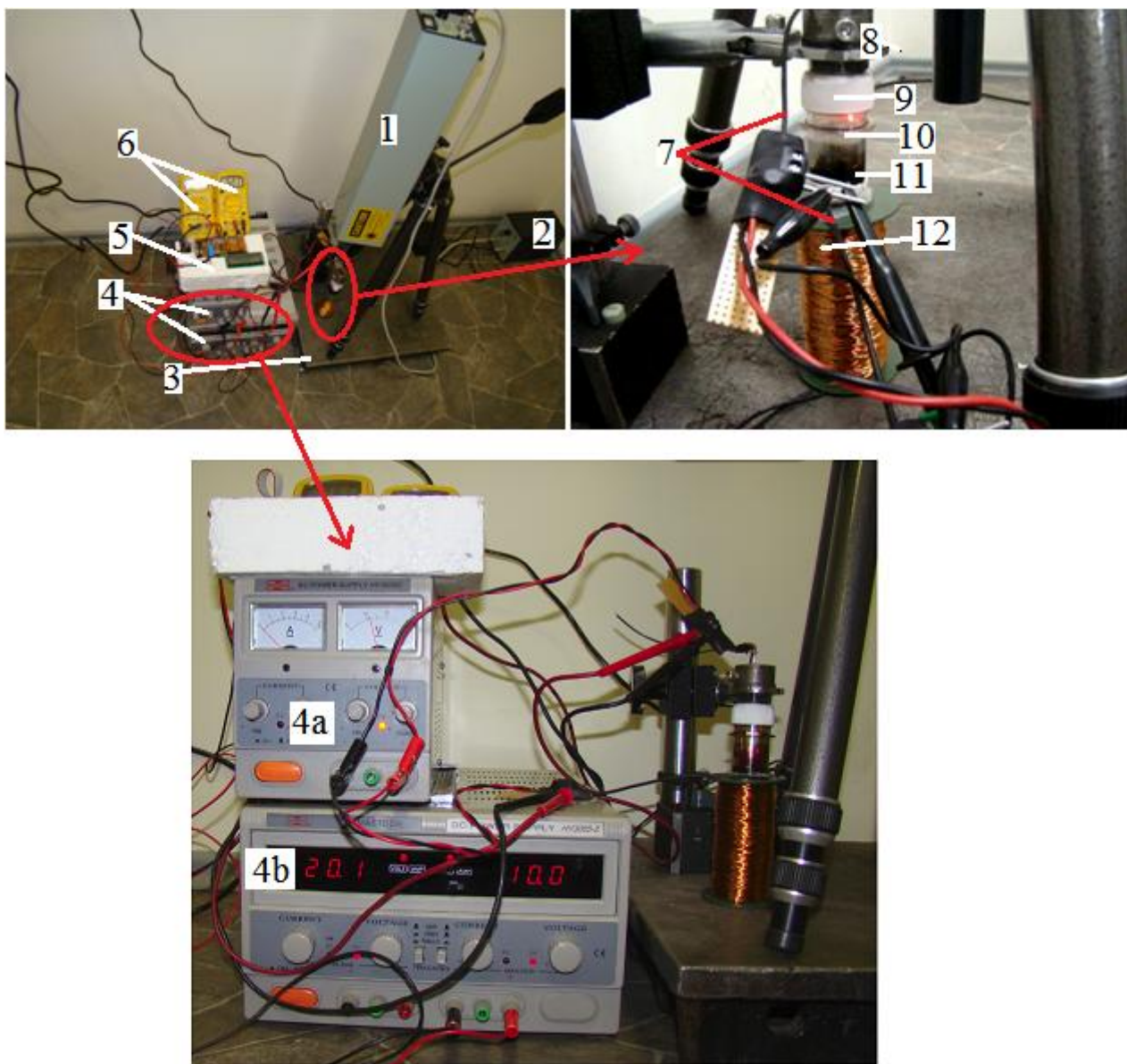
Elektrinės energijos nuskaitymo prietaisai yra labai elementarūs, tokie kaip, voltmetas, ampermetras, laikmatis ar oscilografas. Todėl šiuo atveju galimos paklaidos yra žmogaus (eksperimentatoriaus) ir prietaisų. Žmogaus įneštas paklaidas įvertinti yra labai sunku, bet dažniausiai jas pastebėti yra lengva, nes tai būna dideli neatitikimai imtyje, todėl jas būtinai bus išbraukiamos, o prireikus ir eksperimentai pakartojami.

Atliekant tyrimą ir siekiant, kad rezultatai būtų kuo tikslesni, bus kiekvienas tyrimas kartojamas tris kartus. Po to rezultatai apdorojami, tai yra, vienos eilės rezultatai sudedami ir padalijami iš trijų, ir pateikiami lentelėse. Pavyzdžiui, suteikiant feromagnetiniam skysčiui magnetinį lauko žadinimą esant 5 Hz dažniui, užrašomas rezultatas ir taip kartojama dar du kartus, tada gauti trys rezultatai, esant 5 Hz žadinimui yra sudedami ir padalijami iš trijų, taip gaunant trijų vienetų tyrimų vidurkį. Tokiu būdu sakome, jog tyrimo rezultatai yra pakankamai tikslūs ir juos pateikiame lentelėse.

4.1 Feromagnetinio skysčio santykinio pakilimo, veikiant magnetiniu lauku, tyrimas

Kuriant generatoriaus prototipą, reikia žinoti naudojamo EFH1 feromagnetinio skysčio savybes. Literatūros šaltiniuose galima lengvai surasti su šiuo skysčiu atliktus bandymus, bet, norint sužinoti, kaip jis elgiasi, kai būna uždarytame inde, surasti nepavyko. Taip pat šiame tyrime yra labai svarbu žinoti, į kokių dažnių žadinimą feromagnetinis skystis reaguoja labiausiai.

Tyrimui atlikti, buvo sukurtas tyrimo stendas (29 pav.).



29 pav. Feromagnetinio skysčio santykinio pakilimo, veikiant magnetiniam laukui, tyrimo stendas

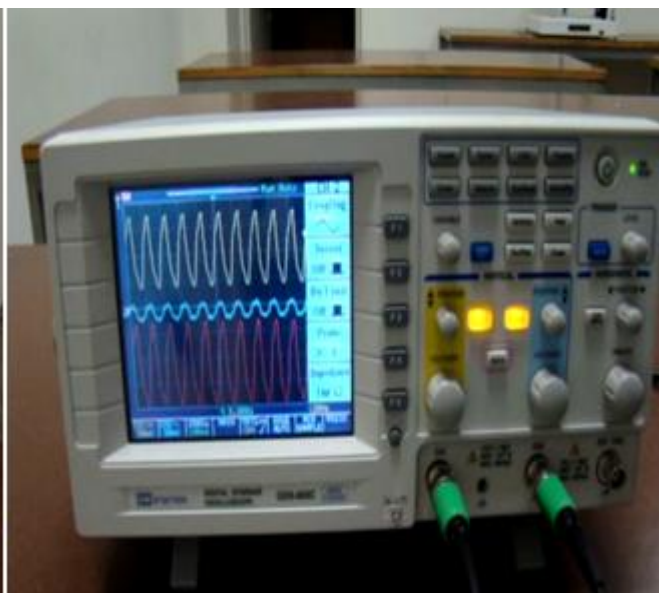
29 paveiksle atitinkamai sužymėti: 1 – lazerinis greičio keitlys 8323; 2 – lazerinio greičio keitlio 8323 stiprintuvas 2815; 3 – matavimo plyta 500x600 mm; 4 – nuolatinės srovės maitinimo šaltiniai, čia 4a – HY3005C; 4b – HY3005–2; 5 – dažnių generatorius; 6 – milivoltmetrai; 7 – Holo jutikliai; 8 – indo laikiklis su specialia anga lazerio spinduliui; 9 Indas feromagnetiniam skysčiui;

10 – plūdė santykiniam pakilimui matuoti; 11 – feromagnetinis skystis EFH1 (2 ml);
12 – elektromagnetas, kurį sudaro ritė (21 Ω) ir geležinė šerdis.

Atliekant tyrimą, buvo nuspręsta skystyje patalpinti plūdę (29 pav. 10 žymuo), kurios svoris – 1 gramas, kad būtų galima išmatuoti feromagnetinio skysčio parametrus. Tokiu būdu bus matuojamas ne pačių piko taškų pakilimas, bet feromagnetinio skysčio santykinis pakilimas veikiant skirtingais magnetiniais laukais bei skirtingais dažniais. Norint sukurti skirtingus magnetinius laukus ir kad būtų galimybė reguliuoti magnetinius impulsus yra reikalingas elektromagnetas (29 pav.) ir dažnių generatorius. Dažnių generatorių maitina maitinimo šaltinis, kuris turi galimybę keisti įtampą nuo 12 V iki 24 V. Tokiu būdu buvo sukuriami skirtingi magnetiniai laukai. Kadangi elektromagnetas buvo gaminamas laboratorijoje ir yra nežinomi jo parametrai, buvo pasitelkti *Holo* jutikliai, kurie matuoja magnetinį lauką. Šie jutikliai buvo pridėti feromagnetinio skysčio indo apačioje ir virš feromagnetinio skysčio bei plūdės, indo viduje. Tokiu būdu buvo išmatuoti magnetiniai laukai. Norint išmatuoti santykinį skysčio pakilimą bei dažnį, kuriam esant skystis reaguoja labiausiai, buvo pasitelktas lazerinis greičio keityklis 8323. Gauti vibracijų rezultatai buvo apdorojami kilnojama matavimo rezultatų apdorojimo įranga „Machine Diagnostics Toolbox Type 9727“ su kompiuteriu DEEL, o magnetinio lauko matavimai – su oscilografu „GDS – 806C“ (30 pav.).



a



b

30 pav. Tyrime naudoti informacijos apdorojimo įrenginiai: a – kilnojama matavimo rezultatų apdorojimo įranga „Machine Diagnostics Toolbox Type 9727“ su kompiuteriu DEEL, b – oscilografas „GDS – 806C“

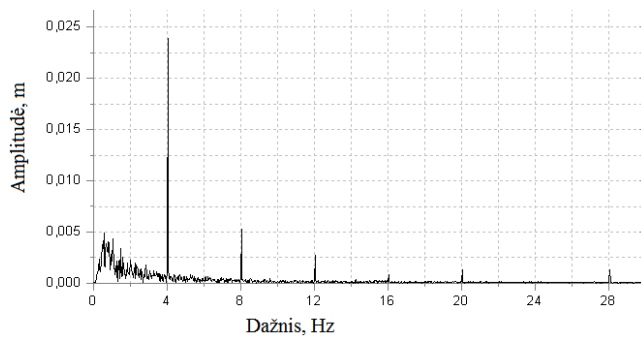
Gauta informacija buvo apdorojama programiškai, su rezultatų apdorojimų programomis *Pulse* ir *Origin 7.5*.

Kaip jau minėta, tyrime buvo keičiamas dažnis, dažnio generatoriui tiekiamą įtampą, kuri savo ruožtu keitė magnetinio lauko dydį. Tyrimo rezultatai yra pateikti 2 lentelėje.

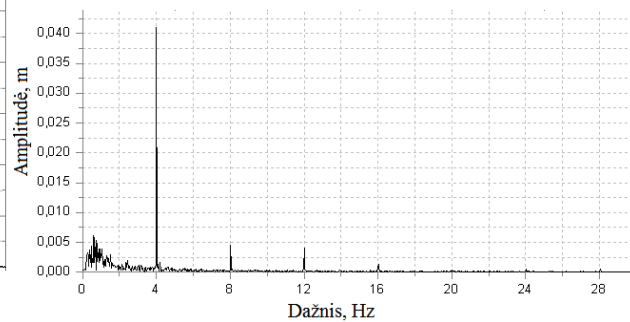
2 lentelė. Magnetinio lauko priklausomybė nuo dažnio generatoriui tiekiamos įtampos bei jo sukuriamo dažnio, feromagnetinio skysčio viršuje ir apačioje

Dažnis, Hz	Dažnio generatoriui tiekiamą įtampą, V					
	12		18		24	
	Sukuriamas magnetinis laukas, T					
	Apačioje feromagneti- nio skysčio	Viršuje feromagneti- nio skysčio	Apačioje feromagneti- nio skysčio	Viršuje feromagneti- nio skysčio	Apačioje feromagneti- nio skysčio	Viršuje feromagneti- nio skysčio
4	0,02456	0,0040	0,02923	0,0043	0,02970	0,0043
6	0,02394	0,0039	0,02840	0,0042	0,02872	0,0043
8	0,02330	0,0038	0,02690	0,0041	0,02767	0,0041
10	0,02230	0,0037	0,02380	0,0038	0,02394	0,0039
12	0,02158	0,0036	0,02270	0,0037	0,02300	0,0038
14	0,02058	0,0035	0,02116	0,0036	0,02148	0,0036
16	0,01948	0,0034	0,01960	0,0034	0,01990	0,0034
18	0,01703	0,0032	0,01745	0,0032	0,01772	0,0032
20	0,01538	0,0030	0,01570	0,0030	0,01601	0,0031
22	0,01367	0,0028	0,01412	0,0029	0,01508	0,0030
24	0,01270	0,0027	0,01347	0,0028	0,01400	0,0029
25	0,01230	0,0026	0,01286	0,0027	0,01310	0,0028
27	0,01190	0,0026	0,01216	0,0026	0,01259	0,0027
30	0,01050	0,0024	0,01117	0,0025	0,01151	0,0025

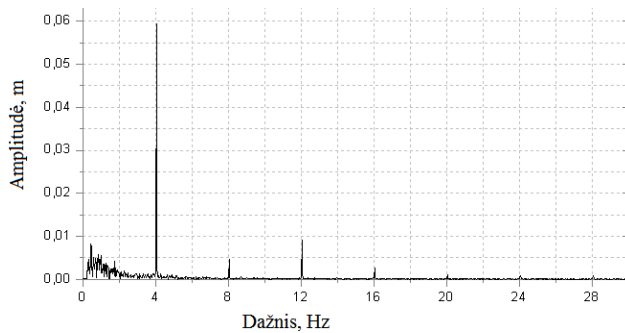
Atlikus šį tyrimą, buvo pastebėta, jog šis feromagnetinis skystis labiausiai reaguoja į žadinimus kas 4 Hz. Tai reiškia, jog žadinant šį skystį eiliškumu kas 4 Hz skysčio santykinis pakilimas būna didžiausias. Pavyzdžiui, žadinant skystį 8 Hz dažniu, santykinis pakilimas yra didesnis nei 7 Hz ar 9 Hz. Atsižvelgiant į gautus rezultatus ir neapkraunant darbo ne tiek svarbiais atsakymais, yra pateikti grafiniai atsakai į žadinimą esant trimis skirtingiems dažniams: 4 Hz, 8 Hz, 24 Hz (31, 32, ir 33 pav.)



a) $B = 0,02456 \text{ T}$

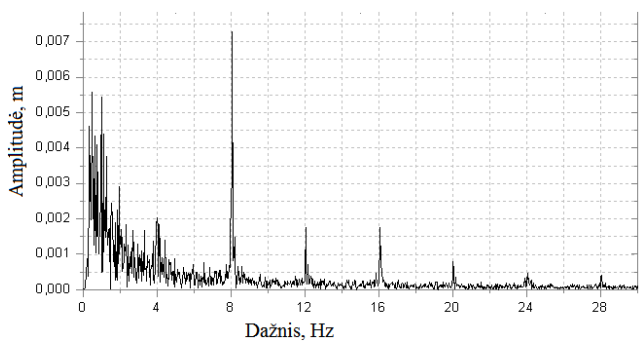


b) $B = 0,02923 \text{ T}$

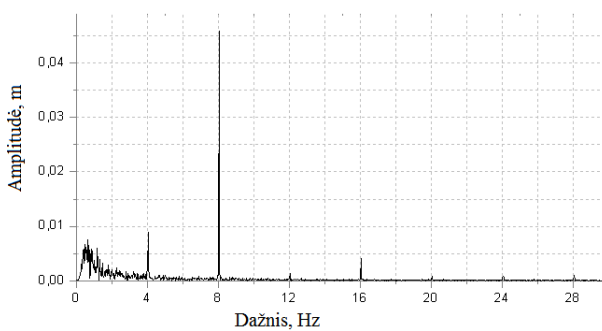


c) $B = 0,02970 \text{ T}$

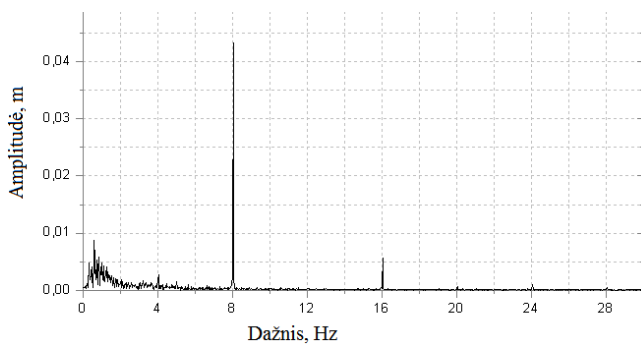
31 pav. Skysčio atsakas į 4 Hz žadinimą skirtingais magnetiniais laukais



a) $B = 0,02330 \text{ T}$

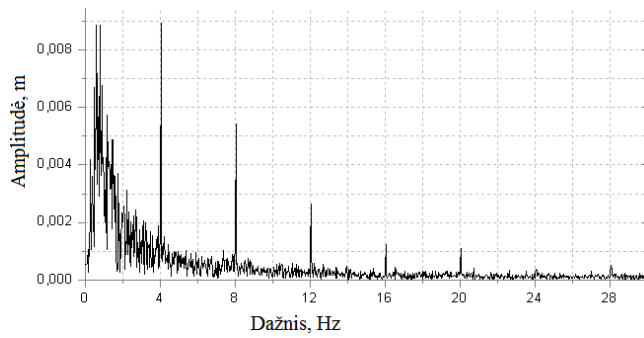


b) $B = 0,02690 \text{ T}$

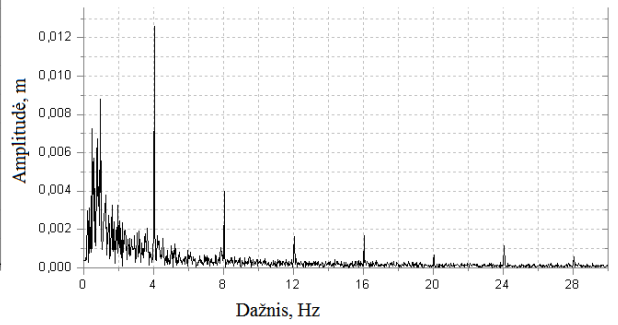


c) $B = 0,02767 \text{ T}$

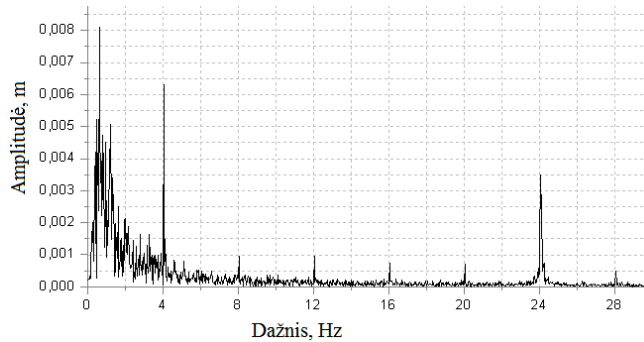
32 pav. Skysčio atsakas į 8 Hz žadinimą skirtingais magnetiniais laukais



a) $B = 0,01270 \text{ T}$



b) $B = 0,01347 \text{ T}$



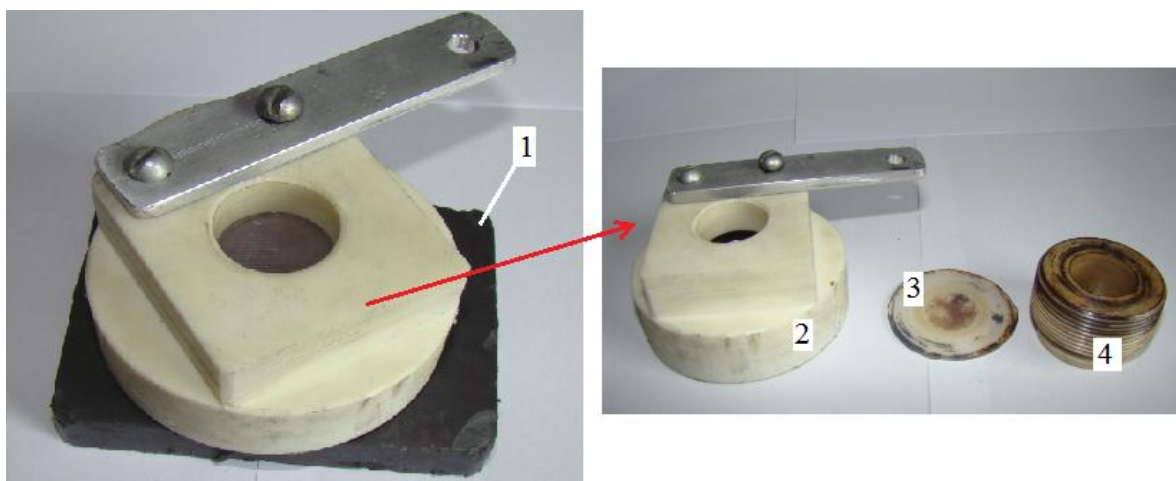
c) $B = 0,01400 \text{ T}$

33 pav. Skysčio atsakas į 24 Hz žadinimą skirtingais magnetiniais laukais

Iš šių rezultatų matyti, jog didžiausias santykinis pakilimas yra esant 4 Hz žadinimo dažniui, ir stipriausiam magnetiniam laukui $B = 0,02970 \text{ T}$. Kai yra šie parametrai, feromagnetinis skystis pakyla 6 mm. Mažinant magnetinio lauko dydį ar didinant magnetinių impulsų dažnį amplitudė mažėja.

4.2 Feromagnetinio skysčio galimybės panaudoti mikro pavarai tyrimas

Kadangi, buvo gauta, jog feromagnetinis skystis pakyla 6 mm, veikiant jį 4 Hz žadinimo dažniui ir esant magnetiniam laukui $B = 0,02970 \text{ T}$ (žiūrėti 31 c pav.), buvo atliktas tyrimas, kuriuo buvo siekiama sukurti mikropavarą, kuri galbūt galėtų pasitarnauti mažos galios generatoriams. Tačiau šis bandymas nepavyko, nes sukuriamas skysčio jėga nuo magnetinio lauko, nesugebėjo pajudinti net silikoninės tarpinės, kuri yra labai elastinga.

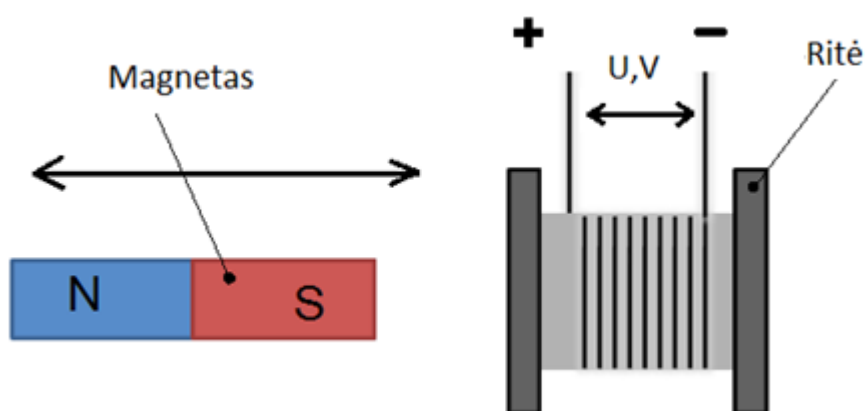


34 pav. Feromagnetinio skysčio panaudojimo mikropavaroms tyrimo stendas: 1– nuolatinis magnetas, kurio sukuriamas magnetinis laukas $B = 0,3 \text{ T}$; 2 – korpusas su ertme poslinkiui matuoti; 3 – silikoninė guma VMQ; 4 – indas feromagnetiniam skysčiui

4.3 Mažos galios generatoriaus prototipas

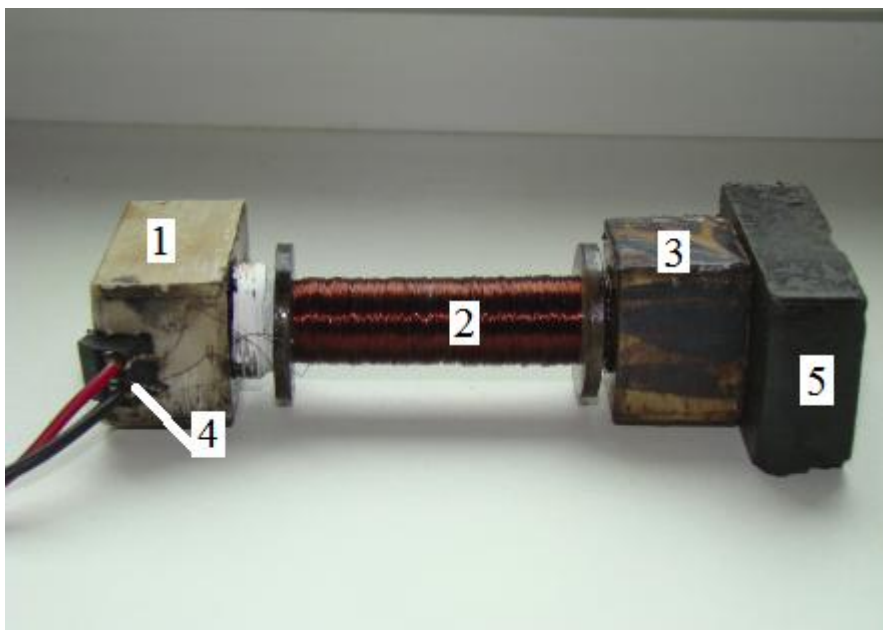
Ištyrus feromagnetinio skysčio savybes, yra aišku, jog skystis labiausiai reaguoja į 4 Hz magnetinių impulsų žadinimo amplitudę ir jog šis skystis negali atlikti mikropavaros vaidmens.

Todėl, apžvelgus esamus dėsnius, buvo nuspręsta panaudoti Maiklo Faradėjaus (Michael Faraday 1791–1867) elektromagnetinės indukcijos reiškinį – kai elektros srovė ima tekėti laidininku, esančiu kintamajame magnetiniame lauke (35 pav.). Magnetinis laukas yra sukuriamas nuolatinių magnetų, kurių magnetiniai laukai yra: pirmojo $B = 0,0188 \text{ T}$ ir antrojo $B = 0,0586 \text{ T}$ (35 pav.), šerdies vaidmenį atlieka feromagnetinis skystis, o laidininkas yra induktyvioji ritė.



35 pav. Elektromagnetinės indukcijos reiškinio pavaizdavimas

Tyrimui atlikti buvo sukurtas mažos galios generatoriaus prototipas (36 pav.) Šis variantas buvo gautas ne iš karto. Norint sukurti kuo efektyvesnį generatoriaus prototipą, buvo gaminamos skirtingo ilgio ir skirtingų vielos storių induktyviosios ritės bei skirtingų ilgių vamzdeliai. Galutiniame kūrimo variante buvo prieita prie induktyviojoje ritėje esančios vielos storio – 0,1 mm bei 240 Ω varžos, taip gaunant didžiausią generatoriaus prototipo našumą. Į šį sukurtą generatoriaus prototipą galima maksimaliai įpilti 4 ml feromagnetinio skysčio.



36 pav. Sukurto generatoriaus prototipas: 1 – korpusas, 2 – induktyvioji ritė, 240 Ω , 3 – dangtelis, 4 – elektros jungtis, 5 – magnetas

Šio generatoriaus prototipo korpuse yra palikta vieta tvirtinimui prie stendo. Į korpusą yra įsukamas vamzdelis, ant kurio suvyniota induktyvioji ritė. Iš kitos vamzdelio pusės yra užsukamas dangtelis. Prie dangtelio yra tvirtinami nuolatiniai magnetai. Šiame tyrime naudojami du skirtingų magnetinių laukų magnetai. Tiriamajame darbe sukurto generatoriaus prototipas sveria 130 g.

Šio mažos galios generatoriaus prototipo kūrimo stadijoje paaiškėjo, jog jis efektyviausiai veikia, kai yra vartomas 90 laipsnių kampas. Todėl tiriamajame darbe yra pateiktas tyrimas, vartant mažos galios generatoriaus prototipą 90 laipsnių kampas bei jį švytuojant.

4.4 Mažos galios generatoriaus prototipo vartymas 90 laipsnių kampu



37 pav. Tyrimo stendas

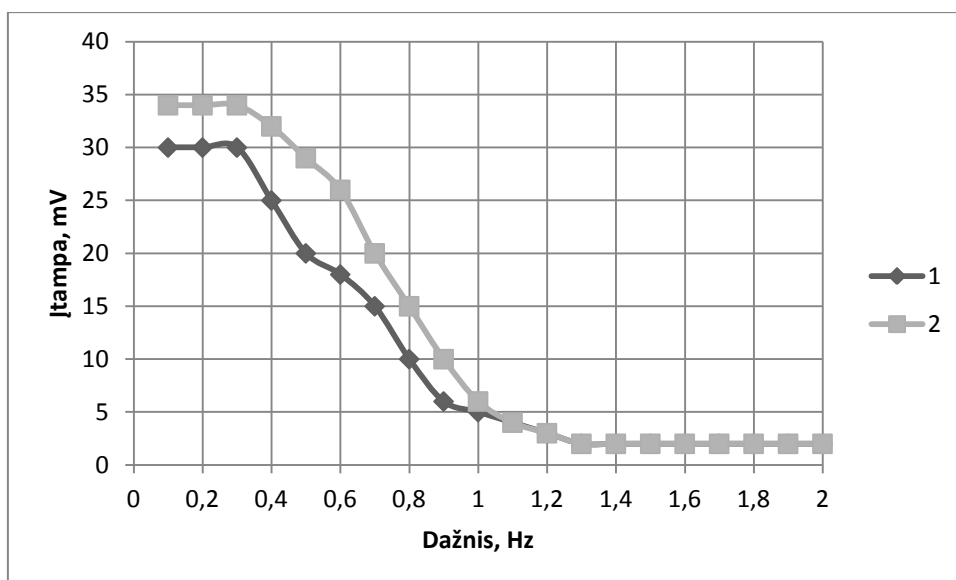
37 paveiksle žymenimis nurodyta: 1 – generatoriaus prototipas; 2 – 900 kampu vartymo mechanizmas; 3 – milivoltmetras $\phi 195$; 4 – maitinimo šaltinis HY3005C, 5A; 5 – oscilografas GDS – 806C; 6 – nuolatinis magnetas, kurio magnetinis laukas $B = 0,01879$ T; 7 – nuolatinis magnetas, kurio magnetinis laukas $B = 0,05856$ T.

90° kampu vartymo mechanizmo variklis yra maitinamas su maitinimo šaltiniu, kuris turi galimybę keisti įtampą ir srovę. Tokiu būdu yra valdomas variklio greitis. Tai leidžia keisti generatoriaus prototipo švytavimo dažnį nuo 0,1 Hz iki 2 Hz. Tyrimo stende (37 pav.) parodyti milivoltmetras ir oscilografas yra reikalingi išmatuoti įtampai, kai generatoriaus prototipas yra švytuojamas. Magnetai, reikalingi keisti magnetiniams laukams, kad būtų galima nustatyti, kokiomis sąlygomis sukurtas prototipas dirba efektyviausiai.

Tyrimo metu buvo tiriama priklausomybė nuo švytavimo dažnio ir magnetinio lauko bei feromagnetinio skysčio kiekio. Matavimo rezultatai yra pateikti 3 lentelėje bei grafiškai pavaizduoti 38–41 paveiksluose. 3 lentelėje yra minimi magnetai (žiūrėti 35 pav.), kurie atitinkamai yra: magneto nr. 1 – magnetinis laukas $B = 0,01879$ T ir magnetas nr. 2 – 0,05856 T. 38 - 41 paveikslėliuose yra pažymėta 1 ir 2, tai yra kreivės, kurios gautos esant pirmam ir antram magnetams.

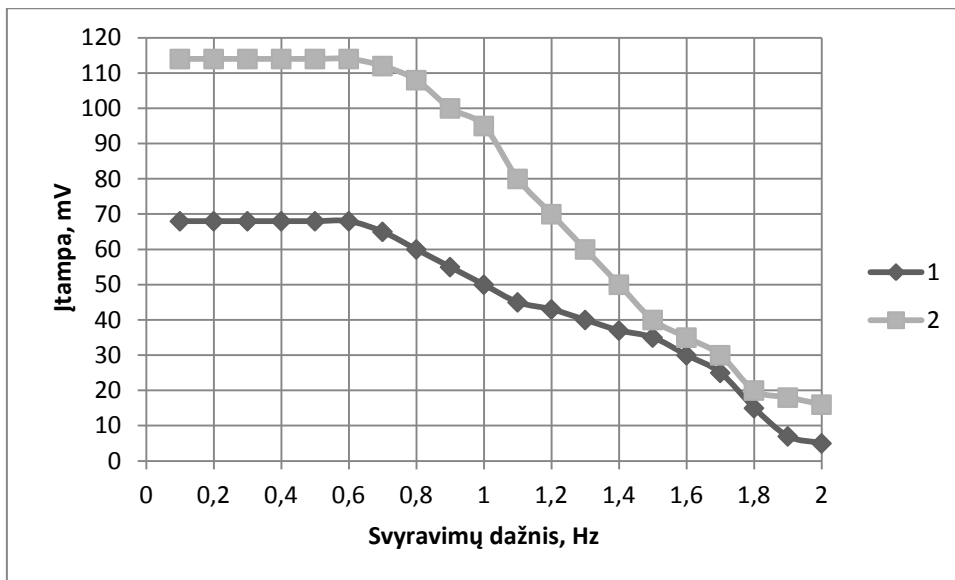
3 lentelė. Generuojamos įtampos priklausomybė nuo svyravimų dažnių, feromagnetinio skysčio tūrio ir magnetinių laukų

Svyravimų dažnis, Hz	Feromagnetinio skysčio kiekis generatoriaus prototipe, ml							
	1		2		3		4	
	Magnetinis laukas B=0,0188T	Magnetinis laukas B=0,0586T	Magnetinis laukas B=0,0188T	Magnetinis laukas B=0,0586T	Magnetinis laukas B=0,0188T	Magnetinis laukas B=0,0586T	Magnetinis laukas B=0,0188T	Magnetinis laukas B=0,0586T
	Generuojama įtampa, mV							
0,1	30	34	68	114	67	108	25	50
0,2	30	34	68	114	67	108	25	50
0,3	30	34	68	114	67	108	25	50
0,4	25	32	68	114	67	108	25	50
0,5	20	29	68	114	65	107	25	50
0,6	18	26	68	114	64	106	25	50
0,7	15	20	65	112	63	104	25	48
0,8	10	15	60	108	60	100	23	43
0,9	6	10	55	100	55	95	20	32
1	5	6	50	95	50	80	18	25
1,1	4	4	45	80	45	70	15	20
1,2	3	3	43	70	37	60	10	15
1,3	2	2	40	60	30	50	6	10
1,4	2	2	37	50	20	40	4	7
1,5	2	2	35	40	15	30	2	5
1,6	2	2	30	35	8	20	2	3
1,7	2	2	25	30	5	10	2	2
1,8	2	2	15	20	2	8	2	2
1,9	2	2	7	18	2	5	2	2
2	2	2	5	16	2	2	2	2



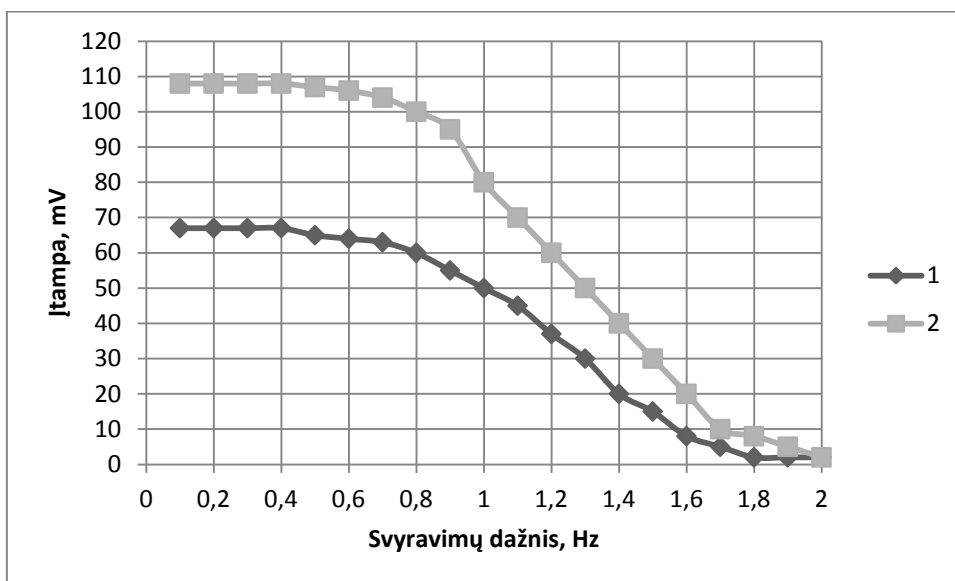
38 pav. Įtampų pasiskirstymas žadinant skirtingais dažniais su 1 ml feromagnetinio skysčio

38 pav. 1 pažymėta kreivė, esant magnetiniam laukui B=0,0188 T, o 2 – B =0,0586 T.



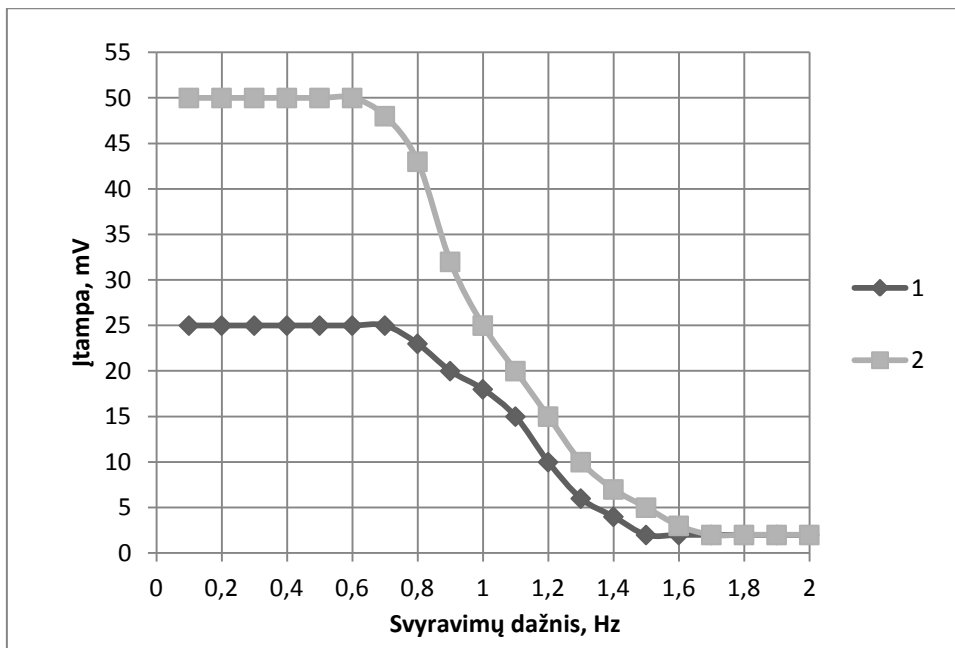
39 pav. Įtampų pasiskirstymas žadinant skirtingais dažniais su 2 ml feromagnetinio skysčio

39 pav. 1 pažymėta kreivė, esant magnetiniam laukui $B=0,0188$ T, o 2 – $B=0,0586$ T.



40 pav. Įtampų pasiskirstymas žadinant skirtingais dažniais su 3 ml feromagnetinio skysčio

40 pav. 1 pažymėta kreivė, esant magnetiniam laukui $B=0,0188$ T, o 2 – $B=0,0586$ T.



41 pav. Įtampų pasiskirstymas žadinant skirtingais dažniais su 4 ml feromagnetinio skysčio

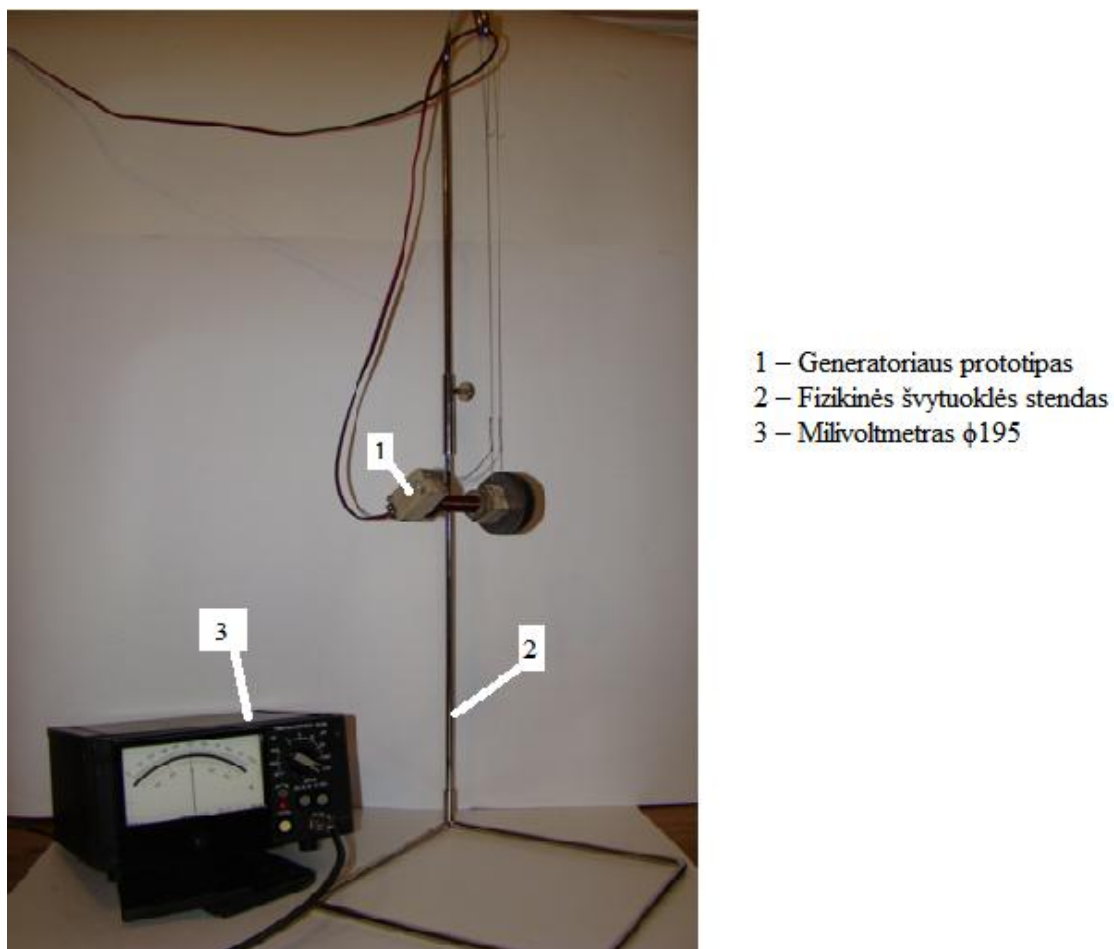
41 pav. 1 pažymėta kreivė, esant magnetiniam laukui $B=0,0188$ T, o 2 – $B=0,0586$ T.

Iš šių rezultatų galima matyti, jog šis generatoriaus prototipas efektyviausiai veikia, kai feromagnetinio skysčio kiekis yra 2 ml – tai yra, kai yra pripildyta pusė generatoriaus prototipo tūrio bei veikiant stipriausiam magnetiniui laukui. Taip pat iš šių rezultatų galime matyti, jog didinat švytavimų dažnį mažėja generuojama elektros įtampa. Tai įvyksta dėl išcentrinių jėgų, kurios veikia feromagnetinį skystį.

4.5 Švytuojamo generatoriaus tyrimas

Šio tiriamojo darbo tikslas yra sukurti nešiojamą generatoriaus prototipą, kurį būtų galima patogiai naudoti ir prirėikus pakrauti elektronikos prietaisus. Bet švytavimas 90 laipsnių kampu yra nepatogus, nes žmogui reikia sukurti papildomus judesius. Todėl buvo ieškoma daugiau variantų, kurie galėtų gaminti elektros energiją, nenaudojant papildomų žmogaus judesių. Vienas iš galimų variantų, gali būti panaudojimas rankų ar kojų mostų, žmogui einant.

Imituoti rankų ar kojų mostus galima su paprasčiausia fizikine švytuokle. Todėl buvo sukurtas stendas, kurį panaudojant atliktas tyrimas (42 pav.).



42 pav. Švytavimo stendas

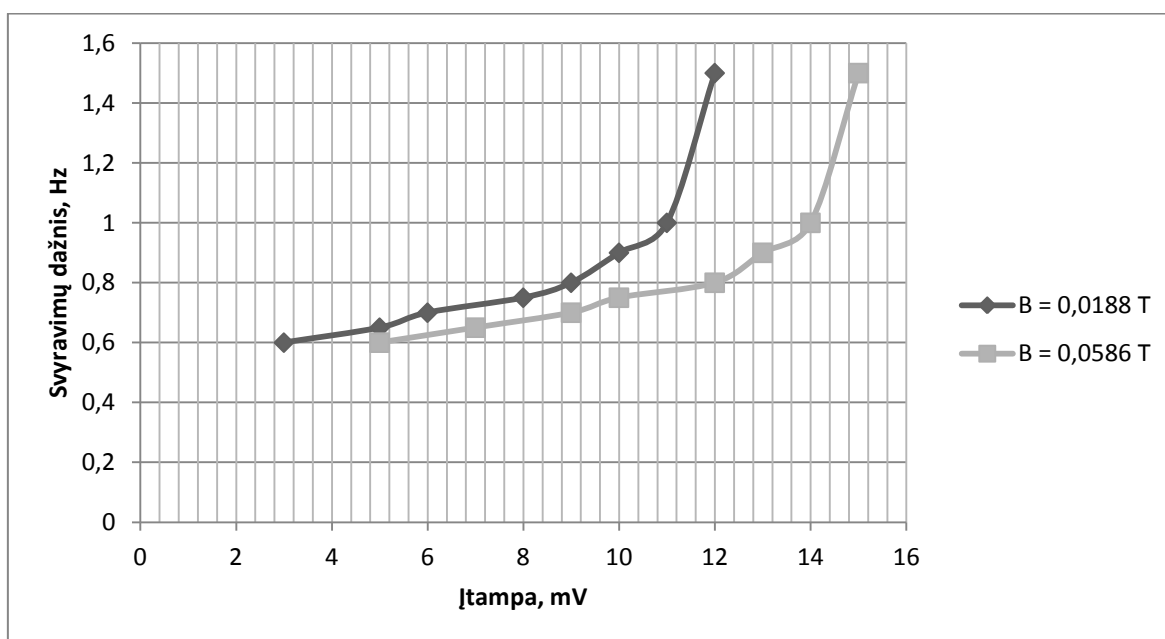
Šiame tyrime, taip pat, kaip ir švytavime 90 laipsnių kampu, yra atlikti matavimai su skirtingus magnetinius laukus sukuriančiais magnetais. Čia, kaip ir švytavime 90 laipsnių kampu, pirmas magnetas yra silpnėsiu magnetiniu lauku ($B = 0,01879 \text{ T}$), o antras magnetas – stipresniu ($B = 0,05856 \text{ T}$).

Pirmiausia, švytavimai atlikti nekeičiant švytavimo amplitudės, o keičiant tik švytavimo dažnį, tai buvo padaroma keičiant pakabinto generatoriaus prototipo atstumą nuo švytavimo ašies.

Sekančiu etapu, buvo palaikomas vienodas švytavimo dažnis, o keičiama svyravimų amplitudė. Rezultatai pateikti 4 - 6 lentelėse, o grafinis rezultatų atvaizdavimas 43 - 45 paveikslėliuose.

4 lentelė. Generuojami parametrai švytuojant pastovia 100 mm amplitude

Svyravimų dažnis, Hz	Generuojama įtampa, mV	
	Magnetinis laukas $B=0,0188$ T	Magnetinis laukas $B=0,0586$ T
0,6	3	5
0,65	5	7
0,7	6	9
0,75	8	10
0,8	9	12
0,9	10	13
1	11	14
1,5	12	15

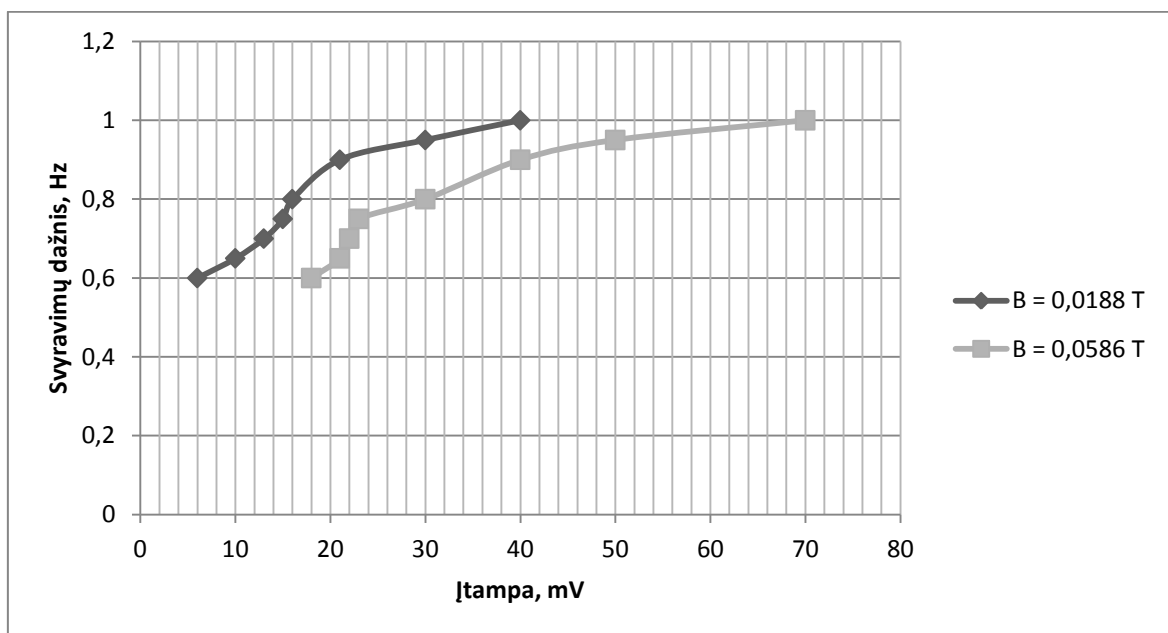


43 pav. Generuojami parametrai švytuojant pastovia 100 mm amplitude

43 pav. 1 pažymėta kreivė, esant magnetiniam laukui $B=0,0188$ T, o 2 – $B=0,0586$ T.

5 lentelė. Generuojami parametrai švytuojant pastovia 150 mm amplitude

Svyravimų dažnis, Hz	Generuojama įtampa, mV	
	Magnetinis laukas $B=0,0188$ T	Magnetinis laukas $B=0,0586$ T
0,6	6	18
0,65	10	21
0,7	13	22
0,75	15	23
0,8	16	30
0,9	21	40
0,95	30	50
1	40	70



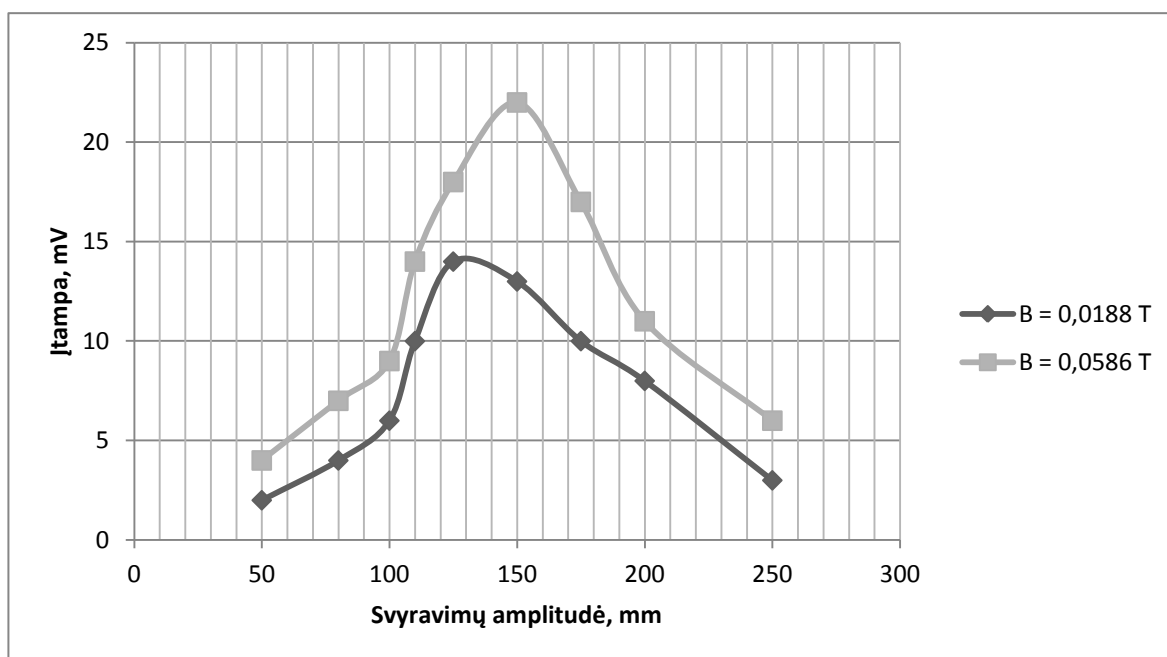
44 pav. Generuojami parametrai švytuojant pastovia 150 mm amplitude

44 pav. 1 pažymėta kreivė, esant magnetiniam laukui $B=0,0188$ T, o 2 – $B = 0,0586$ T.

6 lentelė. Generuojamos įtampos priklausomybė nuo svyravimo amplitudės ir magnetinių laukų

Svyravimų Amplitudė,	Generuojama įtampa, mV	
	Magnetinis laukas $B=0,0188$ T	Magnetinis laukas $B=0,0586$ T
50	2	4
80	4	7
100	6	9
110	10	14
125	14	18
150	13	22
175	10	17
200	8	11
250	3	6

45 pav. Generuojamos įtampos priklausomybė nuo svyravimo amplitudės ir magnetinių laukų



45 pav. 1 pažymėta kreivė, esant magnetiniam laukui $B=0,0188$ T, o 2 – $B =0,0586$ T.

Iš eksperimento rezultatų galima matyti, jog generatoriaus prototipas reaguoja į skirtingus magnetinius laukus, t. y. kuo stipresnis magnetinis laukas, tuo didesnė generuojama įtampa. Taip pat įtampa didėja esant didesnei švytavimo amplitudei arba didinant švytavimo dažnį.

43 ir 44 paveiksluose matyti, jog kreivės pabaigoje pradeda sparčiai augti. Taip atsitinka todėl, kad būna pasiekta riba, kai jau pradeda švytuoti arti 90 laipsnių.

45 paveiksle galima matyti, jog pasiekus 150 mm nuo centro švytavimo amplitudę, generuojama įtampa mažėja. Taip atsitinka todėl, kad feromagnetinį skystį pradeda veikti išcentrinės jėgos ir jis nebeatlieka savo funkcijos – nebejuda vamzdelyje.

IŠVADOS

1. Iš literatūros apžvalgos galima daryti išvadas, jog yra labai daug sukurtų įrenginių, kurie generuoja elektros energiją iš mechaninių virpesių ar suteikiamų judesių, tačiau didžioji dalis jų yra pagrįsta paprastais mechaniniais principais, kurie neleidžia sukurti nedidelių matmenų ir lengvo generatoriaus, kuris galėtų gaminti elektros energiją iš mažo dažnio virpesių. Apžvelgiant literatūrą, nebuvo rasta sukurtų generatorių, kuriuose būtų naudojamos išmaniosios medžiagos.

2. Iš čia pateiktos literatūros apžvalgos matyti, jog visi sukurti įrenginiai sukuria labai mažą elektrinę energiją ir įrenginiai tam yra pakankamai dideli bei sunkūs. Siekiant sukurti palyginti mažą elektros generatorių, kad ir su tokiais pačiomis charakteristikomis gauti, kaip mechaninių įrenginių yra tikslinga panaudoti išmaniąsias medžiagas.

3. Atliekant išmaniųjų medžiagų savybių nagrinėjimą ir ieškant, kuri išmanioji medžiaga geriausiai tinka elektrinės energijos generatoriui, buvo pasirinktas feromagnetinis skystis, kuris turi feromagnetinių savybių ir yra stipriai įsimagnetinantis. Dėl skysčių hidrodinaminių savybių reaguoti į žemų dažnių virpesius, šį feromagnetinį skystį galima panaudoti elektrinei energijai generuoti nuo žmogaus sukeliama virpesių.

4. Tyrimo metu buvo sukurtas elektrinės energijos mažos galios generatoriaus prototipas, kuris veikia esant žemiems dažniams. Atlikti eksperimentai parodė, jog šis generatorius našiausiai dirba, kai yra prie jo pridėtas galingesnis magnetas (turintis stipresnę magnetinę lauką) ir feromagnetinio skysčio įpilta pusė generatoriaus prototipo tūrio. Taip pat elektrinės energijos generatoriaus prototipas našiausiai veikia, kai dažnis yra mažesnis, o jį didinant efektyvumas mažėja.

5. Eksperimentiniai tyrimai parodė, jog sukurtas generatoriaus prototipas efektyviausias, kai yra vartomas 90 laipsnių kampas ir kai yra mažas dažnis. Kai dažnis yra nuo 0,1 iki 0,6 Hz ir magnetinis laukas 0,0586 T ir feromagnetinio skysčio įpilta pusė generatoriaus prototipo sukuriamas įtampa 114 mV. Didinant dažnį arba mažinant vartymo kampą, efektyvumas mažėja.

LITERATŪRA

- Adaptiv Energy* [interaktyvus]. 2009. Žiūrėta 2011 m. birželio 17d. Prieiga per internetą: <http://www.electroniccomponentsworld.com/articleView~idArticle~72630_6832935212172009.html>
- Badescu, R. ; Condurach, D.; Ivanoiu, M. 1999. Ferrofluid with Modified Stabilisant, *Journal of magnetism and magnetic materials* 202 (1): 197-202
- Bashtovoy, V. G.; Lavrova, O. A.; Polevikov, V. K.; Tobiska, L. 2002. Computer modeling of the instability of a horizontal magnetic-fluids layer in a uniform magnetic field, *Journal of magnetism and magnetic materials* 252: 299-301
- Brooks, G.A.; Fahey, T.D.; Baldwin, K.M. 2005. Exercise physiology: human bioenergetics and its applications 4th edition. Boston: McGraw-Hill
- Energetika* [interaktyvus]. 2010m. Žiūrėta 2011m. balandžio 6d. Prieiga per internetą: <http://www.technologijos.lt/n/technologijos/energija_ir_energetika/straipsnis?name=straipsnis-3114>
- Energy harvesting backpack* [interaktyvus]. 2010m. [žiūrėta 2011-06-12]: <http://www-personal.umich.edu/~kzelik/Energy_Harvesting_Backpack.html>
- Energy harvesting* [interaktyvus]. 2010m. Žiūrėta 2011m. gegužės 12d. Prieiga per internetą: <http://memagazine.asme.org/articles/2008/september/harvest_motion.cfm>
- Harvey, A. 2003. Smart materials, Under the Bridge consulting Corvallis, Oregon, 750 p
- Human energy harvesting* [interaktyvus]. 2010. Žiūrėta 2011m. gegužės 12d. Prieiga per internetą: <http://www-personal.umich.edu/~kzelik/Energy_Harvesting.html>
- Hyung-Sub Bae, Young-Won Yun and Myeong-Kwan Park. 2010. Flow response of magnetic fluid surface by pitching motion, *Journal of Mechanical Science and Technology* 24 (2): 583-592
- Jacobs, R. 1997. Control model of human stance using fuzzy logic, *Biological cybernetics science*, 77 (1): 63-70
- Kamiyama, S.; Ueno, K.; Yokota, Y. 1999. Numerical analysis of unsteady gas-liquid two-phase flow of magnetic fluids, *Journal of magnetism and magnetic materials* 201 (1-3): 271-275

Kymissis, J.; Kendall, C.; Paradiso, J.A.; Gershenfeld, N. 1998. Parasitic Power Harvesting in Shoes. In *Second IEEE International Conference on Wearable Computing; Oct IEEE Computer Society Press*: 132-139.

Li, H.; Du, H. 2003. Design and Experimental Evaluation of a Magnetorheological Brake. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Springer-Verlag, London, (21) : 508–515.

Li, Q.; Naing, V.; Donelan, J.M. 2009. Development of a biomechanical energy harvester, *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 1-12

Lightning packs [interaktyvus]. 2006m. Žiūrėta 2012m. balandžio 15d. Prieiga per internetą: < http://lightningpacks.com/images_videos.html >

Live harvesting [interaktyvus]. 2010m. Žiūrėta 2011m. sausio 8d. Prieiga per internetą: < <http://www.livescience.com/environment/090417-top10-alternative-energy.html> >

Margaria, R. 1968. Positive and negative work performances and their efficiencies in human locomotion. *Int Z Angew Physiol* 25: 339-351

Mikrokonverteris [interaktyvus]. 2010m. Žiūrėta 2011m. gegužės 12d. Prieiga per internetą: < <http://www.technologijos.lt/n/technologijos/elektronika/straipsnis-450/straipsnis?name=straipsnis-10450&l=2&p=1> >

Morrasso, P.G. ; Schieppati, M. 1999. Can muscle stiffness alone stabilize upright standing? *Journal of Neurophysiology* 82: 118

Muckus, K. 2006. *Biomechanikos pagrindai*. LKKA. Kaunas, 304 p.

Nano generatorius [interaktyvus]. 2010m. Žiūrėta 2011m. gegužės 14d. Prieiga per internetą: <<http://www.iliustruotasmokslas.lt/nr14/pdf/energija.pdf>>

Odenbach, A.; Hartwig, K. 2005. Magnetic and Rheological Characterization of Novel Ferrofluids, *Journal of magnetism and magnetic materials* 289: 21-24

Isikraunančios baterijos [interaktyvus]. 2010m. Žiūrėta 2011m. kovo 20d. Prieiga per internetą: < http://www.manoenergija.lt/index.php?option=com_content&view=article&id=206:nuo-vibracijos-pasikraunantys-akumuliatoriai&catid=1:naujausi-pranesimai-naujienos&Itemid=203 >

Rosensweig, R. *Ferrohydrodynamics*, Cambridge: Cambridge University Press, 1985

Starner T, Paradiso JA, 2005, Human generated power for mobile electronics. *In Low-power electronics design* Edited by: Piguet C. Boca Raton: CRC Press

Sudo, S.; Kazutaka, I.; Toshiaki, I. 2002. Dynamics of Magnetic Fluid-Permanent Magnet System Subjected to Vertical Vibration, *Journal of magnetism and magnetic materials* 13: 539

Vibration-powered Generators [interaktyvus]. 2010m. Žiūrėta 2011m. gegužės 12d. Prieiga per internetą: <http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20100716/184262/>

Weiss, K.D.; Carlson, J.D.; Nixon, D.A. 2001. Method and Magnetorheological Fluid Formulations for Increasing the Output of a Magnetorheological Fluid, US Pat. 6,027,664, (2000), and US Pat. 5,900,184, (1999),

Wiley J. & Sons. 2002. Handbook of Materials Selection, Inc., New York