



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

Justas Vagonis

**ŽMOGAUS KINETINĖS ENERGIJOS TAIKymo DĖVIMŲ ĮTAISŲ
MAITINIMUI TYRIMAS**
**RESEARCH OF THE APPLICATION OF HUMAN KINETIC ENERGY TO THE
POWER SUPPLY FOR WEARABLE DEVICES**

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX048

Automatinių sistemų specializacija

Elektros inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2023

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėja

(Parašas)

prof. dr. S. Tolvaišienė

(Vardas, pavardė)

(Data)

Justas Vagonis

ŽMOGAUS KINETINĖS ENERGIJOS TAIKymo DĖVIMŲ ĮTAISŲ
MAITINIMUI TYRIMAS

RESEARCH OF THE APPLICATION OF HUMAN KINETIC ENERGY TO THE
POWER SUPPLY FOR WEARABLE DEVICES

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX048

Automatinių sistemų specializacija

Elektros inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

doc. dr. Dainius Udris

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

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

dr. Aušra Žemienė

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

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2023

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

Studijų kryptis: Elektros inžinerija

TVIRTINU

Studijų programa: Automatika, valstybinis kodas 6211EX048

Katedros vedėjas

Specializacija: Automatinės sistemos

Sonata Tolvaišienė

2023-05-22

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Nr. AUSfm-21–3625

Vilnius

Studentas: Justas Vagonis

Baigiamojo darbo tema: Žmogaus kinetinės energijos taikymo dėvimų įtaisų maitinimui tyrimas

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas pagal numatytą studijų kalendorinį grafiką.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Darbo apibūdinimas. Darbo tikslas: Tyrimo tikslas - parinkti tinkamiausią žmogaus kinetinės energijos keitimo elektrine dėvimojo ant riešo įtaiso konstrukciją, sukurti maketą ir iširti jo parametrus, įvertinti gaunamą energijos kiekį.

Įvadas.: Įvardinti temos naujumą ir aktualumą, apsibrėžti uždavinius, reikiamus tikslui pasiekti.

Analitinė dalis.: Literatūros analizė. Išnagrinėti tyrimo objektą, įvertinti sprendžiamą problemą, aprašyti priemones ir metodus jai spręsti, išanalizuoti žinomus sprendimo būdus ir palyginti jų rezultatus.

Projektinė - tiriamoji dalis.:

Kinetinės energijos keitiklių elektrine techninių sprendimų ir parametrų analizė. Keitiklių valdymo metodų analizė ir parinkimas.

Keitiklio maketo projektavimas, lygintuvo ir įtampos keitiklio techninių sprendimų parinkimas. Keitiklio parametrų eksperimentinis tyrimas esant skirtingiems judėjimo greičiams bei apkrovoms.

Aiškinamasis raštas. Brėžiniai.: Pateikti ir aprašyti kinetinės energijos keitiklio elektrine maketo konstrukciją ir parametrus, tyrimų metodiką bei pateikti tyrimų rezultatus.

Rezultatų apibendrinimas.: Įvertinti gautus rezultatus, pateikti išvadas ir pasiūlymus.

Vadovas docentas Dainius Udris

Vilniaus Gedimino technikos universitetas	ISBN	ISSN
Elektronikos fakultetas	Egz. sk.	
Elektros inžinerijos katedra	Data-.....-.....	

Antrosios pakopos studijų Automatikos programos magistro baigiamasis darbas	
Pavadinimas	Žmogaus kinetinės energijos taikymo dėvimų įtaisų maitinimui tyrimas
Autorius	Justas Vagonis
Vadovas	Dainius Udris

	Kalba: lietuvių
--	------------------------

Anotacija
Pagrindinė šio tiriamojo darbo užduotis yra ištirti naudojamo elektrinio prietaiso - integruoto elektromechaninio keitiklio, keičiančio rankos judesių kinetinę energiją elektrine - taikymo galimybes, kartu išanalizuoti gaunamus energijos kiekius bei galimus konstrukcinius sprendimus. Buvo siekiama pagaminti kuo mažesnių matmenų generatorių, kuris galėtų kaupti pakankamai energijos, kuri galėtų būti panaudojama dėvimųjų įtaisų krovimo tikslu. Darbe taip pat apžvelgiami veikimo principai, efektyvumas, patirti nesklandumai, išnagrinėti ir aprašyti rezultatai.

Prasminiai žodžiai: Dėvimi prietaisai, efektyvumas, elektromechaninis keitiklis, generatorius, kinetinė energija

<table border="1"> <tr><td>Vilnius Gediminas Technical University</td></tr> <tr><td>Faculty of Electronics</td></tr> <tr><td>Department of Electrical Engineering</td></tr> </table>		Vilnius Gediminas Technical University	Faculty of Electronics	Department of Electrical Engineering	<table border="1"> <tr> <td>ISBN</td> <td>ISSN</td> </tr> <tr> <td>Copies No.</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Date-.....-.....</td> <td></td> </tr> </table>		ISBN	ISSN	Copies No.		Date-.....-.....	
Vilnius Gediminas Technical University												
Faculty of Electronics												
Department of Electrical Engineering												
ISBN	ISSN											
Copies No.												
Date-.....-.....												
Master Degree Studies Automation study programme Master Graduation Thesis												
Title	Research of the Application of Human Kinetic Energy to the Power Supply for Wearable Devices											
Author	Justas Vagonis											
Academic supervisor	Dainius Udris											
			Thesis language: Lithuanian									
Annotation This research project aims to investigate the feasibility of using an integrated electromechanical transducer to convert the kinetic energy of arm movements into electrical energy for charging wearable devices. The ultimate goal is to design a compact generator that can store sufficient energy for wearable device charging. The results include an overview of the transducer's principles of operation, efficiency, and potential design solutions, as well as a discussion of encountered challenges. This work contributes to the growing field of energy harvesting and offers insights for developing practical solutions for powering wearable electronics.												
Keywords: Kinetic energy, electromechanical transducer, wearable devices, efficiency, generator.												

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

	Justas Vagonis, 20210036	
	(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)	
	Elektronikos fakultetas	
	(Fakultetas)	
	Automatika, AUSfm-21	
	(Studijų programa, akademinė grupė)	

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2023 m. gegužės 22 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Žmogaus kinetinės energijos taikymo dėvimų įtaisų maitinimui tyrimas“ yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: daktaras Aušra Žemienė. Mano darbo vadovas docentas daktaras Dainius Udris.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

			Justas Vagonis
	(Parašas)		(Vardas ir pavardė)

TURINYS

TURINYS	7
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS	10
SANTRUPOS	11
IVADAS.....	12
1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ PAIEŠKA.....	14
1.1. Atrinktų mokslinės literatūros šaltinių analizė	14
1.2. Tyrimo tikslo ir uždavinių suformulavimas	20
2. TEORINĖ DALIS	21
2.1. Kinetinės energijos keitiklių elektrine techninių sprendimų ir parametrų analizė	21
2.2. Keitiklių valdymo metodų analizė ir parinkimas	27
3. TIRAMOJI DALIS	36
3.1. Keitiklio maketo projektavimas.....	36
3.2. Keitiklio eksperimentinis tyrimas.....	39
3.3. Eksperimentinio tyrimo rezultatų analizė.....	56
IŠVADOS	57
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	58

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Pjezoelektrinis energijos rinkiklis.....	15
1.2 pav. Energijos surinkimo kuprinė su pusės bangos mechaniniu lyginimu.....	16
1.3 pav. Triboelektrės energijos rinkiklis bate	17
1.4 pav. Didelio našumo elektromagnetinis generatorius.....	18
1.5 pav. Triboelektrinis energijos rinkiklis.....	19
1.6 pav. Elektromagnetinės energijos rinkiklis	20
2.1 pav. Magnetostrikcinio rinkiklio koncepcija	22
2.2 pav. Magnetostrikcinio kombaino koncepcija.....	22
2.3 pav. Monostabilus elektromagnetinės energijos rinkiklis	24
2.4 pav. Elektromagnetinis mikrogeneratorius.....	24
2.5 pav. Elektromagnetinis spyruoklinis rinkiklis.....	25
2.6 pav. MOSFET tiltelinis lygintuvas.....	29
2.7 pav. MOSFET tipai 1) P kanalo 2) N kanalo	30
2.8 pav. ADP5090 galios stiprinimo reguliatorius	31
2.9 pav. ADP5090-2-EVALZ vertinimo plokštė.....	31
2.10 pav. ADP5090-2-EVALZ vertinimo plokštės schema	32
2.11 pav. DC2509A vertinimo plokštė.....	33
3.1 pav. Nubraižytas keitiklio maketas.....	36
3.2 pav. Korpusas ritės sukimui.....	37
3.3 pav. Susukta ritė	37
3.4 pav. Sukonstruotas keitiklio maketas: kairėje pusėje išdėstytos ritės, dešinėje pusėje uždengimas su besisukančiu magnetu	38
3.5 pav. Signalų amplitudė	38
3.6 pav. Sukonstruotas antrojo maketo korpusas su tyrimui paruoštomis varinėmis vielomis	39
3.7 pav. Maketo korpusas su atskirais ričių jungimais	40
3.8 pav. Maketo korpusas su prijungtu keturių kanalų oscilografu.....	40
3.9 pav. Gauti ričių duomenys.....	40
3.10 pav. Maketo korpusas su taisyklingu ričių jungimu	41
3.11 pav. Paruoštas keitiklio maketas tyrimams.....	42
3.12 pav. Reguliuojamo fiksuoto ir stabilaus greičio magneto sukimo aparatas	42
3.13 pav. Reguliuojamo fiksuoto ir stabilaus greičio magneto sukimo aparatas su keitiklio maketu	

3.14 pav. Amplitudės rezultatai skirtingų apsisukimo greičių bei skirtingų parametrų sąlygomis	44
3.15 pav. Galios rezultatai esant skirtingiems apsisukimo greičiams bei skirtingiems parametrų	45
3.16 pav. Galios rezultatai esant skirtingiems apsisukimo greičiams bei skirtingiesms parametrams	46
3.17 pav. BAT43 šotkių diodų tiltelis	47
3.18 pav. BAT43 diodų lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai	47
3.19 pav. BAT43 diodų lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai	48
3.20 pav. MOSFET SI2302 ir SI2377 tranzistorių lygintuvas	48
3.21 pav. MOSFET SI2302 ir SI2377 tranzistorių lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai.....	49
3.22 pav. MOSFET SI2302 ir SI2377 tranzistorių lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai.....	49
3.23 pav. MOSFET SI2302 ir SI2377 tranzistorių lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai.....	49
3.24 pav. MOSFET lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai su 1 μ F kondensatoriumi	50
3.25 pav. MOSFET lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai su 10 μ F kondensatoriumi	50
3.26 pav. MOSFET lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai su 100 μ F kondensatoriumi	50
51	
3.27 pav. MOSFET lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai su 100 μ F kondensatoriumi	51
3.28 pav. RZM002P02T2L ir RUM002N05T2L tranzistorių lygintuvas	51
3.29 pav. RZM002P02T2L ir RUM002N05T2L tranzistorių lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai	52
3.30 pav. RZM002P02T2L ir RUM002N05T2L tranzistorių lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai	52
3.31 pav. Lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai esant 750 mV amplitudės įtampai	53
3.32 pav. Lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai esant 1 V amplitudės įtampai	53
3.33 pav. Nustatoma minimali įvesties įtampa į vertinimo plokštę.....	54
3.34 pav. Signalų netolygumai pilnai įkrovus superkondensatorių.....	54
3.35 pav. Vertinimo plokštėje esantis superkondensatorius pasiekia 3,3 V įtampą.....	55
Atliekant superkondensatoriaus įkrovimą buvo pastebėta (žr. 3.34 pav.) kaip iš lygintuvo išeinantis signalas yra iškraipomas bei viršūnė yra ribojama didėjant superkondensatoriaus įtampai. ...	55
3.36 pav. Įtampos kitimas superkondensatoriuje bėgimo metu.....	55

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Nustatyti sistemos parametrai	27
2 lentelė. Planuojami sistemos parametrai	27
3 lentelė. Naudojamų ričių duomenys	41
4 lentelė. Amplitudės matavimas be apkrovos ir su vienu magnetu	43
5 lentelė. Amplitudės matavimas be apkrovos ir su dvigubu magnetu	43
6 lentelė. Amplitudės matavimas su 1 Ω apkrova ir su dvigubu magnetu	43
7 lentelė. Amplitudės matavimas su 10 Ω apkrova ir su dvigubu magnetu	43
8 lentelė. Amplitudės matavimas su 500 Ω apkrova ir su dvigubu magnetu	43
9 lentelė. Amplitudės matavimas su 1 k Ω apkrova ir su dvigubu magnetu	43
10 lentelė. Gaunama galia esant skirtingo dydžio varžai	45
11 lentelė. Gaunama amplitudė mV, esant skirtingo dydžio varžai	45
12 lentelė. Gaunama galia mW, esant skirtingo dydžio varžai	45

SANTRUPOS

TER – triboelektrinis energijos rinkiklis (angl. *triboelectric energy harvester* – TEH)

EJ – elektrovaros jėga (angl. *Electric & Magnetic Field* – EMF)

MOP – metalo, oksido ir puslaidininkio lauko tranzistorius (angl. *Metal-oxide-semiconductor field-effect transistors* – MOSFET)

DI – daiktų internetas (angl. *Internet of Things* – IOT)

TER – termoelektrinės energijos rinkiklis (angl. *Thermoelectric Energy Harvesting* – TEG)

IPM – impulsų pločio moduliacija (angl. *Pulse width modulation* – PWM)

RPM – apsisukimai per minutę (angl. *Revolutions per minute* – RPM)

IVADAS

Per pastarąjį dešimtmetį nešiojamųjų technologijų sritis pajuto didėjančią pramonės ir akademinės bendruomenės dėmesį. Tai matoma stebint augantį rašomų mokslinių tyrimų kieki bei besiplečiančias paslaugas šioje srityje. Dauguma nešiojamųjų prietaisų tapo sveikatingumo srityje įrankiais, turinčiais daug taikymų sporto sferoje, kurios tiesiogiai susiejamos su mobiliuoju telefonu. Pagrindinis nešiojamųjų prietaisų minusas yra ribotas baterijos veikimo laikas, įrenginius nuolat reikia įkrauti, dažniausiai kiekvieną dieną arba kas kelias dienas. Šis krovimo dažnumas vis didėja prietaisams, kurie yra išmanesni, turintys didesnę jutimo lauką ar prieigą prie neapdorotų duomenų. Idealiu atveju prietaisai galėtų būti visiškai nepriklausomi nuo energijos vartojimo, taip žmonės galėtų jais naudotis patogiai, pamiršdami jų nuolatinio krovimo būtinybę. Norint patobulinti prietaisus, reikėtų ištirti naujos kartos akumuliatorius arba padidinti tokių metodų, kaip energijos kaupimas, naudojimo galimybes.

Yra daug būdų, kaip gauti energiją iš žmogaus kūno judesio, elektromagnetinės radiacijos, šviesos ar šilumos. Energijos rinkimas iš aplinkos šaltinių (pvz., šviesa ar žmogaus judesiai) yra vienas perspektyviausių būdų. Net ir nedideli judesiai kasdienėje žmogaus veikloje pagamina daug energijos, kuri gali būti sukaupta.

Pastaruoju metu buvo daug bandymų įterpti generatorius į batų padus, norint generuoti energiją vaikščiojant ar generuoti kuprinės judėjimo metu gaunamą energiją ir ją panaudoti išmaniesiems prietaisams įkrauti. Tačiau prieita prie išvados, kad reikia mažesnio dydžio generatoriaus kinetinei energijai kaupti.

Energijos rinkimas patraukia dėmesį kaip technologija, kuri gali pakeisti ar patobulinti baterijas, kuriant įvairią nešiojamąją elektroniką. Šiam tikslui pasiekti turi būti naudojamas energijos kaupimas ir elektromechaninis generatorius, kurie turi atitikti svorį ir dydį, kad būtų galima juos patalpinti į žmogaus naudojamą prietaisą. Tokiems prietaisams reikėtų sukurti savarankiškai kraunamą sistemą, naudojančią sukaupią energiją. Ir jie turėtų rinkti energiją iš aplinkos, kaupti ją baterijose ar superkondensatoriuose. Tai būtų ypač naudinga ir efektyvu. Darbe bus apžvelgtos energijos surinkimo technologijos, kurios surenka kinetinę energiją iš žmogaus judesių. Jos klasifikuojamos pagal kinetinės energijos surinkimo principus: pjezoelektrinis, triboelektrinis ir elektromagnetinės energijos.

Darbo tikslas: Sukonstruoti ant riešo tvirtinamą elektromechaninį keitiklį, parinkti kaupiklio schemą ir įvertinti gaunamą energijos kiekį.

Darbo uždaviniai:

1. Apžvelgti panašių energijos keitiklių tyrimų rezultatus.
2. Parinkti tinkamiausią keitiklio konstrukciją, ją sukonstruoti ir ištirti.
3. Parinkti ir išbandyti tinkamiausią kaupiklio schemą.
4. Įvertinti tyrimo gautus rezultatus.

1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ PAIEŠKA

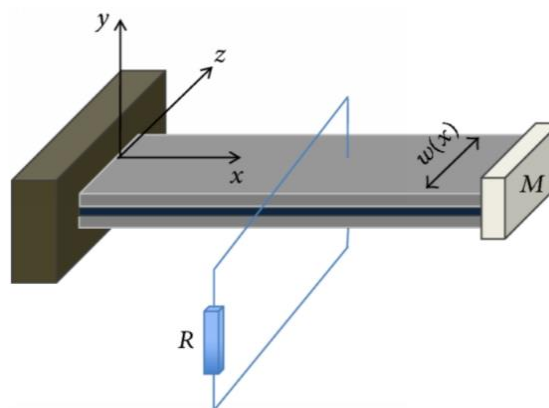
Ieškant literatūros šaltinių, daugiausia dėmesio skirta žmogaus kinetinei energijai, jos surinkimui bei jos panaudojimui dėvimųjų prietaisų krovimui. Galiausiai buvo išsirinkti keli informacijos šaltiniai. Vienaame straipsnyje (Jaziri et al., 2020a) analizuojami ant odos nešiojamieji termoelektriniai generatoriai, skirti kūno šilumos energijai surinkti, kad būtų galima maitinti dėvimuosius prietaisus. Kitame straipsnyje (Wang et al., 2022) apžvelgiamos elektromagnetinės, pjezoelektrinės ir triboelektrinės energijos surinkimo iš žmogaus judesių, įskaitant sąnarių sukimąsi, galūnių svyravimą, jėgos veikimą ir lankstymą, technologijos. Yra daug naudojamų būdų energijos surinkimui iš žmogaus judesių ir jos panaudojimui dėvimųjų prietaisų krovimui. Renkant energiją iš žmogaus judesių, dėvimieji prietaisai gali tapti tvaresni, efektyvesni ir ilgaamžiškesni, sumažindami priklausomybę nuo įprastinių energijos šaltinių, pavyzdžiui, baterijų. Tyrimai rodo, kad tobulėjant technologijoms ir kuriant efektyvesnius keitiklius, žmogaus kinetinė energija potencialiai galėtų tapti perspektyviu energijos šaltiniu įvairiems dėvimiesiems prietaisams.

1.1. Atrinktų mokslinės literatūros šaltinių analizė

Šios literatūros paieškos tikslas – ištirti dabartinį žmogaus kinetinės energijos panaudojimą, kaip energijos šaltinį, dėvimiesiems prietaisams, taikant mokslinius tyrimus, bei apžvelgiant mokslinius straipsnius. Todėl šiame skyriuje bus apžvelgta jau sukurtų ir ištirtų kinetinės energijos generatorių konstrukcijos, bei jų pasiekti rezultatai. Atliekant paiešką, apžvelgiami įvairūs energijos surinkimo būdai, kurie gali būti naudojami elektros energijai iš žmogaus judesių generuoti, pavyzdžiui, pjezoelektriniai, triboelektriniai ir elektromagnetinės energijos. Taip pat paieška apima literatūros, susijusios su dėvimųjų prietaisų, kurie maitinami žmogaus kinetine energija, efektyvumo ir našumo vertinimu. Galiausiai atkreipiamas dėmesys į problemas, susijusias su energijos gavyba iš žmogaus judesių, (pvz., maža išėjimo galia ir nenusipėjamas žmogaus judėjimas).

Pjezoelektriniai energijos rinkikliai (1.1 pav.) – tai prietaisai, kurie mechaninius virpesius ar įtempius paverčia elektros energija, naudodami pjezoelektrinį efektą. Pats pjezoelektrinis efektas yra tam tikrų medžiagų, pavyzdžiui, kristalų, tokių kaip turmalinas ar kvarcas, keramikos ir kai kurių polimerų, gebėjimas generuoti elektros krūvį, reaguojant į mechaninę įtampą ar vibraciją. Juos paprastai sudaro pjezoelektrinė medžiaga, kuri yra įsiterpusi tarp dviejų elektrodų. Dėl mechaninių virpesių ar įtempimo, kuris veikia medžiagą,

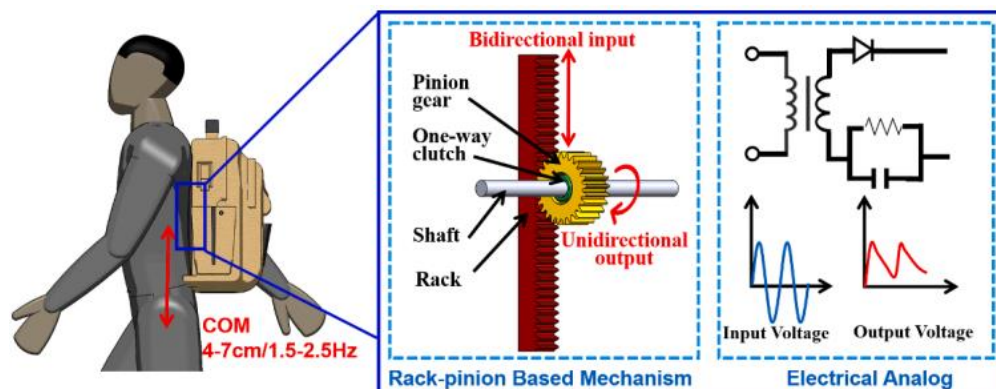
elektros krūvis pasislenka per elektrodus ir sukuria elektros srovę. Gebėdami keisti elektrinius signalus į mechaninius ir atvirkščiai, šie energijos rinkikliai gali būti naudojami įvairiose srityse: technikoje – jutikliuose, belaidžio ryšio įrenginiuose ar mažos galios elektronikos energijos šaltiniuose, taip pat akustikoje ar radiofizikoje. Svarbu paminėti, kad jie ypatingai naudingi tais atvejais, kuomet yra sunku pakeisti baterijas ar prijungti prie energijos šaltinio, tuo atveju, jei jis yra sunkiai prieinamoje vietoje. Šie energijos rinkikliai gali būti pritaikyti taip, kad gebėtų surinkti energiją iš įvairių šaltinių: aplinkos vibracijos, akustinės bangos ir žmogaus judesių. Straipsnyje (Rosa & De Marqui Junior, 2014) rašoma apie alternatyvios energijos surinkimo konstrukciją, pagrįstą judančios masės poveikiu pjezoelektrinėms lenkiamosioms struktūroms. Klasikinės surinkimo konstrukcijos nėra pritaikytos žemam dažniui ir didelės amplitudės judėjimo charakteristikai, kai kraunamieji prietaisai yra ant žmogaus kūno. Eksperimentiškai ištirtu pjezoelektrinio energijos surinkimo prototipu buvo pasiekta $47 \mu\text{W}$ išėjimo galia per apkrovą, kai prietaisas buvo pasukamas 180° kas sekundę. Gauta $600 \mu\text{W}$, kai buvo atliekamas 10 Hz dažnio ir 10 cm amplitudės linijinis judesys. Taip pat straipsnyje aprašoma, kad keitiklis gali būti toliau tobulinamas, todėl šios vertės gali būti gerokai padidintos.



1.1 pav. Pjezoelektrinis energijos rinkiklis (Rosa & De Marqui Junior, 2014)

Straipsnyje (Mi et al., 2020) aprašomas vibracinės energijos rinkiklis, kuris naudoja mechaninį pusės bangos išlyginimą, siekiant pagerinti energijos kiekio iš kuprinės surikimą (1.2 pav.). Kuprinės su elektroniniais prietaisais dažnai būna sunkios ir nešiojamos ilgą laiką, dėl to naudojant jas lengvai galima surinkti kinetinę energiją iš žmogaus judesių, norint tvariai įkrauti nešiojamuosius elektroninius prietaisus atokiose vietose ar kelionėse. Energijos kaupimas galimas kuprinei, kuri naudoja spyruokles ir amortizatorius, laisvai svyruojant vertikalia kryptimi. Norint paversti mechaninius kuprinės judesius į elektros energiją, naudojamas generatorius. Didelę įtaką energijos surinkimui daro ėjimo greitis ir išorinės

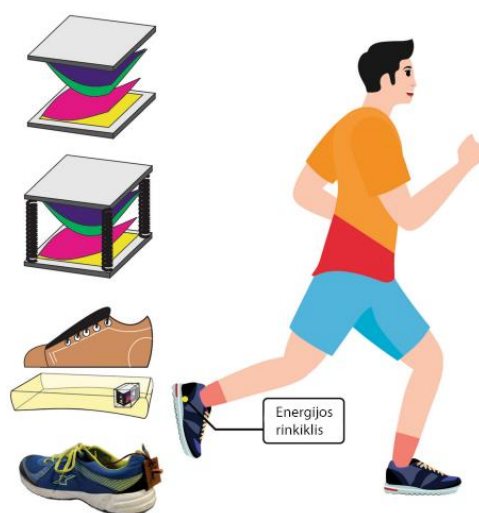
apkrovos masė. Didesnis ėjimo greitis lemia didesnę energijos surinkimą. Darbe aprašomas pusbangio mechaninio lyginimo mechanizmas, naudojantis vieną krumpliaračią ir vienpusį sankabos komplektą. Jis dvikrypčius vertikaliuosius virpesius paverčia vienkrypčiu generatoriaus su netiesine inercija sukimu. Atliekant modeliavimo ir standinius bandymus, siūloma pusbangiu mechaniniu lyginimu pagrįsta energijos surinkimo sistema. Ji gali gauti maždaug dvigubai didesnę vidutinę išėjimo galią nei pilnutinio mechaninio lyginimo sistema. Siekiant visapusiškai apibūdinti siūlomos konstrukcijos veikimą ir patikimumą, tiriama išorinio pasipriešinimo, žmogaus ėjimo greičio ir naudingojo krovinio masės įtaka. Bėgimo takelio bandymai su skirtingais žmonėmis parodė, kad vidutinė galia yra 3,3 – 5,1 W, kai ėjimo greitis yra 4,8 km/val, o naudojama apkrova – 13,6 kg. Galia gali siekti 0,4 W/kg, esant 4,8 km/val ėjimo greičiui. Eksperimentų rezultatai rodo, kad siūloma pakabinama energijos surinkimo kuprinė gali nuolat generuoti elektros energijos kiekį, tinkamą nešiojamiesiems ir dėvimiesiems elektroniniams prietaisams maitinti, o tai gali būti taikoma kariuomenėje, lauke dirbantiems asmenims ar turistams (Choi et al., 2017).



1.2 pav. Energijos surinkimo kuprinė su pusės bangos mechaniniu lyginimu (Mi et al., 2020)

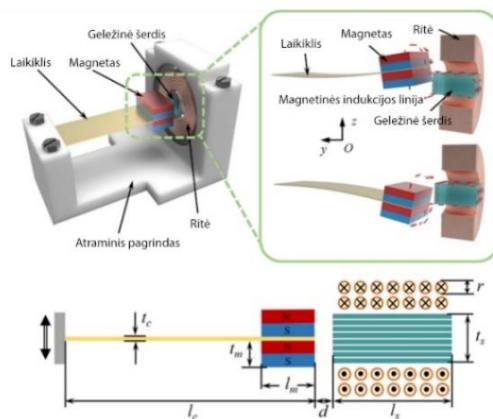
Šiame (Khushboo & Azad, 2020) straipsnyje aprašomas triboelektrinės energijos surinkimas iš žmogaus judesių, pritaikant kiekvieno žmogaus kasdienybėje naudojamus ir dėvimus batus (1.3 pav.). Kadangi žmonės vaikščiodami generuoja daug energijos, o energijos rinkimas naudojant batus yra gana paprastas ir efektyvus būdas. Energija, gaminama einant, gali būti paversta elektros energija elektroniniams gaminiams įkrauti. Batą sudaro dvi pagrindinės dalys: viena iš jų guminė skiltis, naudojama kulnui ir atliekanti amortizavimo vaidmenį, kita – grandinės sistema skirta energijos surinkimui, energijos kaupimui ir elektroninių gaminių įkrovimui einant. Daugiafunkciniai batai pasižymi geru stabilumu ir universalumu einant skirtingais būdais. Toks energijos rinkimas pasižymi didelio galios kiekio surinkimu, be to jis mažiau jautrus vaikščiojimo pokyčiams. Visi šie veiksniai padidina

surenkamos energijos kiekį. Triboelektrinių nanogeneratorių (TENG) sudaro politetrafluoretileno, nailono, vario ir aliuminio plėvelių rinkinys. Jis vertikalios judėjimo metu gamina ir surenka krūvį. Atliktų eksperimentų rezultatai atskleidė, kad nuosekliai sujungta grandinė gali gerokai padidinti iš triboelektrinių medžiagų išgaunamos energijos kiekį vaikščiojant. Naudojant nuosekliają grandinę buvo pasiekta 32,78 V išėjimo įtampa, esant 1 μF talpai ir 25 $\text{M}\Omega$ varžai, bei didžiausia 55,88 μW galia, esant 10 $\text{M}\Omega$ varžai. Darome išvadą, kad nuolatinė srovė, gaunama, esant mažam dažniui 6,5 Hz žmogaus biomechaninės energijos, gali būti patikimas šaltinis, skirtas tvariam mažos galios elektronikos veikimui.



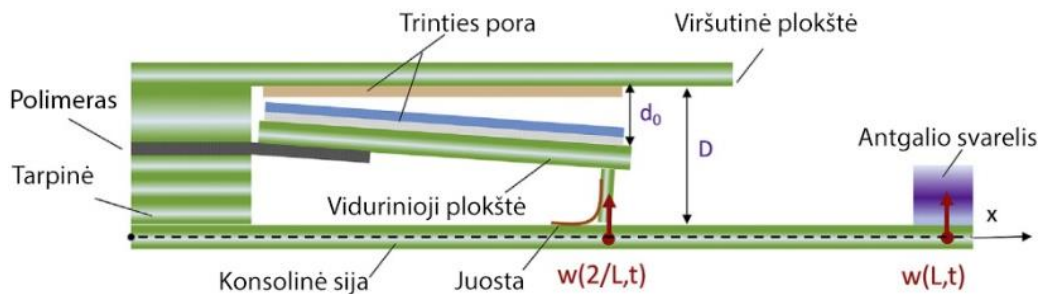
1.3 pav. Triboelektrės energijos rinkiklis bate (Khushboo & Azad, 2020)

Straipsnyje (Huang et al., 2021) aprašomas didelio našumo elektromagnetinis generatorius (1.4 pav.) (MNL-EMG), pasižymintis didesniu darbinio dažnių juostos pločiu ir didesne išėjimo galia. Į ritę patalpinus didelio pralaidumo geležinę šerdį, ji ir vibruojantys magnetai stipriai susisieja, todėl žymiai padidėja išėjimo galia. MNL-EMG gali generuoti didelę išėjimo galią ir platų dažnių juostos plotį, esant santykinai dideliui pagreičiui, o tai rodo, kad jis yra pranašesnis už kitus vibracinius generatorius, esant plačiai vibracijos amplitudei. Didžiausia MNL-EMG išėjimo galia siekia 174 mW, esant optimaliai 35 Ω apkrovai, o tai yra daugiau nei daugumos mažesnio nei 30 Hz dažnio vibracijos generatorių. Prototipas gali įkrauti Ni-MH akumuliatorių (1,2 V, 900 mAh) nuo 0,95 V iki 0,98 V per 240 s. Ir modeliavimas, ir eksperimentai patvirtina, kad siūlomas nestabilus EMG įtaisas, naudojantis magnetinį ryšį, pasižymi plataus veikimo dažnių juostos pločio ir didelės išėjimo galios privalumais, kurių gali pakakti mikroelektroniniams prietaisams maitinti. Prototipas sėkmingai įžiebė 360 lygiagrečiai sujungtus šviesos diodus.



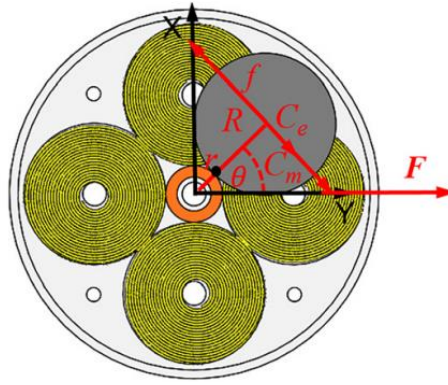
1.4 pav. Didelio našumo elektromagnetinis generatorius (Huang et al., 2021)

Kalbant apie triboelektrinius energijos rinkiklius (1.5 pav.) – tai prietaisai, kurie gamina elektros energiją dėl dviejų skirtingų medžiagų sąlyčio ir atsiskyrimo. Kitaip tariant, tai technologija, pagrįsta būtent triboelektriniu efektu. Tai reiškiny, kuomet tam tikros medžiagos įgyja elektros krūvį, kai liečiasi su kita medžiaga ir po to atsiskiria. Šie energijos rinkikliai gali būti naudojami surinkti energiją iš įvairių šaltinių: mechaninių virpesių, žmogaus judesio ir netgi vėjo ar vandens srauto. Paprastai šiuos prietaisus sudaro du medžiagų sluoksniai, kurie sukurti taip, kad trindamiesi vienas į kitą sukuria krūvio disbalansą, kurį galima panaudoti kaip elektros energiją. Triboelektriniai energijos rinkikliai taip pat gali tapti ir atsinaujinančiu energijos šaltiniu įvairiose srityse, nuo dėvimos elektronikos iki jutiklių ir mažos galios prietaisų. Visgi, jie taip pat susiduria su iššūkiais, kurie susiję su įrenginyje naudojamų medžiagų ilgaamžiškumu ir patikimumu. Be to, jų maža išėjimo galia, palyginus su kitomis energijos surinkimo technologijomis. Nepaisant to, jie yra lengvi ir lankstūs, tad juos galima lengvai integruoti į įvairias sistemas, ir būtent dėl to, tai yra perspektyvi ateities energijos surinkimo technologija. Analizuotame straipsnyje (Zhao et al., 2021) yra aprašomas naujo tipo triboelektrinis energijos rinkiklis (TEH), veikiantis kontakto atsiskyrimo metu ir pritaikytas energijos surinkimui, esant žemo dažnio vibracijoms. Įvertinus bendrą elektros energiją tarp dviejų paviršių, išvedamas elektromechaninis TEH modelis su nelygiagrečiais kontaktiniais paviršiais, ir taip teoriškai bei eksperimentiškai yra tiriamas TEH veikimas. Rezultatai rodo, jog energijos rinkiklis gali generuoti energiją iš plačiajuosčių vibracijos šaltinių, o jo didžiausia išėjimo įtampa yra 25 V, esant 0,5 g baziniam pagreičiui ir 8 Hz sužadinimo dažniui, o tai yra geras eksperimentinių rezultatų ir analitinių prognozių atitikimas. Derintuvas veikia kontakto atsiskyrimo režimu, kuris yra labai lankstus, kadangi triboelektrinės poros kontakto atsiskyrimo ciklus galima lengvai valdyti aplinkos, bei pagrindo vibracijomis. TEH veikimą galima pagerinti reguliuojant atstumą tarp viršutinės plokštelės ir sijos. Yra žinoma, jog triboelektrinis rinkiklis yra ekonomiškai efektyvus išgauti žemo dažnio vibracijos energijai iš aplinkos.



1.5 pav. Triboelektrinis energijos rinkiklis (Zhao et al., 2021)

Galiausiai aptariamas elektromagnetinės energijos surinkimas (1.6 pav.). Tai procesas, kai elektromagnetinių bangų energija paverčiama elektros energija. Tai pasiekama elektromagnetinės indukcijos principu, kai kintantis magnetinis laukas sužadina elektros srovę laidininke, pavyzdžiui, varinėje vielos ritėje. Kai magnetas juda šalia ritės, kintantis magnetinis laukas ritėje sukuria elektros srovę. Ši srovė gali būti naudojama elektroniniams prietaisams įkrauti ar panaudojama vėliau, kaupiant ją akumuliatoriuose ar superkondensatoriuose. Surinktas energijos kiekis priklauso nuo kelių veiksnių (pvz., magnetinio lauko stiprumo, ritės dydžio, magneto judėjimo greičio, bei atstumo tarp magneto ir ritės). Įprastai kuo didesnis magnetinis laukas ir kuo greičiau juda magnetas, tuo daugiau energijos galima surinkti. Naudotame straipsnyje (Liu et al., 2018) pateiktas nerezonansinis sukamasis elektromagnetinės energijos rinkiklis, skirtas žemo dažnio (10 Hz) ir energijos surinkimui iš kintančių žmogaus judesių. Keitiklio konstrukcijai naudojamas cilindro formos statorius ir disko formos rotorius. Be sudėtingo perdavimo mechanizmo rotorius dėl magnetinės traukos jėgos gali lengvai sukis aplink statorių. Magnetinis rotorius, veikiamas plataus diapazono svyravimų, kintančia magnetinio lauko jėga veikia apačioje esančias rites, kuriose vyksta elektromagnetinės energijos surinkimas. Straipsnyje atlikti teoriniai ir eksperimentiniai keitiklio tyrimai, o imitacinio modelio sudarymas rodo atitinkamą eksperimentinį rezultatą. Siekiant įrodyti elektromagnetinės energijos pranašumą renkant energiją iš netaisyklingo žmogaus judėjimo, atliekami bėgimo takelio bandymai, esant skirtingiems judėjimo greičiams. Esant 8 Hz varomajam dažniui, elektromagnetinės ritės gali suteikti didžiausią 10,4 mW galią, kai apkrovos varža yra 100 Ω . Šis rinkiklis pasižymi išskirtinėmis išėjimo charakteristikomis ir gali būti taikomas pažangiųjų nešiojamųjų ar dėvimųjų elektroninių prietaisų maitinimui.



1.6 pav. Elektromagnetinės energijos rinkiklis (Liu et al., 2018)

1.2. Tyrimo tikslo ir uždavinių suformulavimas

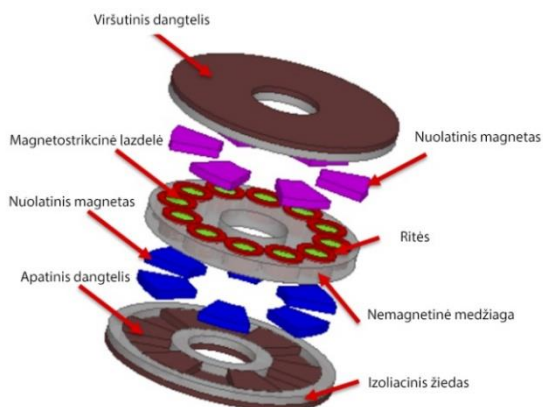
Apžvelgus skirtingus energijos surinkimo būdus generuojant energiją iš žmogaus judesių, buvo pastebėta, kad elektromagnetinės energijos surinkimas gali būti geresnis už pjezoelektrinį ar triboelektrinį. Taikant elektromagnetinės energijos generatorių, galima generuoti didesnę galią iš mažesnio dažnio įėjimų, kurie labiau būdingi žmogaus judesiams. Pjezoelektriniam energijos surinkimui reikia aukšto dažnio įvesties, kad būtų generuojama didelė išėjimo galia. Nors ir žmogaus judesiai gali sukelti aukštus dažnio virpesius, jie nebūna pastovūs ir dažniausiai yra per maži. Todėl toks generavimo būdas nėra itin veiksmingas. Apžvelgus triboelektrinės energijos surinkimą, galima tvirtinti, kad elektros galią galima generuoti iš įvairių mechaninių įėjimų, netgi prie žemo dažnio virpesių. Tačiau triboelektriniam generatoriams reikalingas kruopštus projektavimas ir optimizavimas, kad būtų efektyvu ir būtų pasiekta aukšta išėjimo galia. Be to, triboelektriniai generatoriai nėra tokie patikimi ir ilgaamžiai. Kiekviena technologija turi savų privalumų ir trūkumų. Elektromagnetinės energijos surinkimas yra geras pasirinkimas dėl savo gebėjimo generuoti didelę galią iš žemo dažnio įėjimų, lengvo projektavimo ir optimizavimo bei patikimumo.

2. TEORINĖ DALIS

Kinetinės energijos keitiklių naudojimas sulaukia vis daugiau dėmesio kaip potencialus atsinaujinančios energijos šaltinis. Iš įvairių naudojamų šios energijos surinkimo būdų ypač perspektyvus pasirodė elektromagnetinės energijos. Kai magnetinis laukas juda per ritę, jis indukuoja ritėje elektros įtampą. Susidariusi įtampa yra proporcinga magnetinio srauto kitimo greičiui, kuris yra magnetinio lauko ir ritės vijų skaičiaus sandauga. Magnetinio srauto kitimo greitis taip pat proporcingas magnetinio lauko judėjimo per ritę greičiui. Įtampa, indukuojama ritėje, yra tiesiogiai proporcinga dviejų veiksnių sandagai: greičiui, kuriuo magnetinis laukas jungiasi su rite, ir greičiui, kuriuo šis jungimasis vyksta. Šis reiškinyss vadinamas Faradėjaus elektromagnetinės indukcijos dėsniu, kuris teigia, kad bet koks ritės magnetinės aplinkos pokytis sukelia ritėje „indukuotą“ įtampą (emf). (*Magnetic Properties of Dislocations*, n.d.) Labai svarbu atlikti tinkamą elektromagnetinės energijos keitiklio projektavimą bei optimizavimą, taip pat, tinkamai pasirinkti magnetines medžiagas, ričių išdėstymą, bei jų vijų skaičių, siekiant maksimaliai padidinti išėjimo galią. Ir, būtent, dėl to yra labai svarbu atlikti nuoseklią elektromagnetinės energijos keitiklių analizę. Šioje dalyje bus apžvelgti jau sukurti, bei naudojami elektromagnetinės energijos keitikliai.

2.1. Kinetinės energijos keitiklių elektrine techninių sprendimų ir parametrų analizė

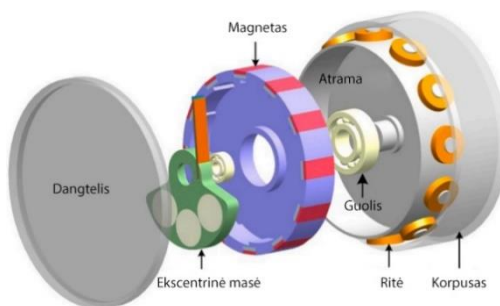
Atlikus platesnę elektromagnetinių keitiklių apžvalgą, buvo rasta keletas išsamesnių darbų, kurie bus apžvelgti plačiau. Straipsnyje (Yan et al., 2018) pateikiamas metodas, kaip surinkti energiją, kuri generuojama iš žmogaus kelio sąnario judėjimo, naudojant hibridinį magnetostrikcinio ir elektromagnetinio energijos generavimo būdą. Magnetostrikcija yra magnetinių medžiagų savybė, dėl kurios jos keičia savo formą arba matmenis įmagnetinimo proceso metu. Keitiklyje naudojama medžiaga keičia savo formą, reaguodama į mechaninę jėgą, atsirandančią dėl kelio sąnario judėjimo, ir sukuria magnetinį lauką, kuris savo ruožtu indukuoja elektros srovę ritėje, kuri gali būti naudojama elektros energijai generuoti. Įrenginį sudaro sukamasis magnetostrikcinis ir elektromagnetinis hibridinis keitiklis, kaip parodyta (2.1 pav.).



2.1 pav. Magnetostrikinio rinkiklio koncepcija (Yan et al., 2018)

Rotoriuje tolygiai išdėstyti dvylika plokščių magnetostriksinių strypų, apsuptų varinės vielos ritėmis. Rotorius pritvirtintas prie veleno, kurį veikia žmogaus kelio sąnario judėjimas. Kiekvienoje vidinėje statoriaus dalyje, kurią supa lengvai įmagnetinamos ir išmagnetinamos medžiagos, sumontuoti šeši vienodos įmagnetinimo krypties nuolatiniai magnetai. Tarp statoriaus ir rotoriaus yra paliktas tam tikras oro tarpas. Sukantis rotorui, magnetostriksiniai strypai tolygiai juda iš dešinės į kairę, todėl juose magnetinis laukas keičiasi. Dėl šio magnetinio lauko pokyčio ašine kryptimi magnetostriksiniams strypams sukelia elektromagnetinė jėga, nuo kurios jie šokinėja iš apačios į viršų. Keitiklis suprojektuotas taip, kad galėtų rinkti sukamąją elektromagnetinę energijos generavimo efektą, ir smūginį magnetostriksinį energijos generavimo efektą, taip pasiekiant didesnę energijos galią bei efektyvumą. Sukonstruotas generatorius nėra mažas, jo struktūros skersmuo 13 cm, o dydis 265 cm³, masė 0,87 kg. Keitiklis gali generuoti įtampą iki 80 V, esant 0,97 Hz žemam sukimosi dažniui.

Šiame straipsnyje (Fan et al., 2021) aprašomas naujoviškas ekscentrine mase varomas keitiklis, galintis transformuoti labai žemo dažnio kinetinę energiją į elektros energiją. Ekscentrinės masės varomas rotorius užtikrina didelį varomąjį sukimo momentą. Ši konstrukcija leidžia keitikliui generuoti gerokai didesnę elektros energiją nei įprastiniai ekscentriniai rotorai.

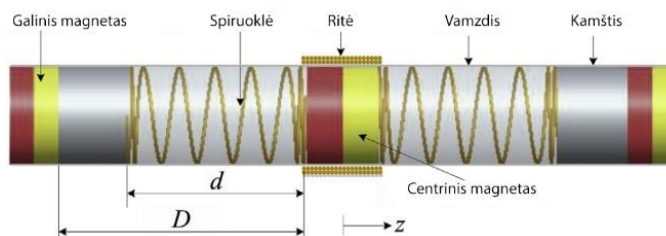


2.2 pav. Magnetostrikinio kombaino koncepcija (Fan et al., 2021)

Keitiklio maketą (2.2 pav.) sudaro vėduoklės formos ekscentrinė masė, rotorius su įmontuotais nuolatiniais magnetais, su ištraukiama iš korpuso cilindrine atrama su pritvirtintomis ritėmis. Keitiklio karkasas, įskaitant ekscentrinę masę, rotorių, atramą ir korpusą, yra atspausdinti 3D spausdintuvu. Siekiant padidinti sukimosi inerciją ekscentrike, yra naudojami trys variniai svareliai. Rotoriaus sukimosi trinčiai sumažinti naudojama tefloninė plėvelė. Prie išorinio rotoriaus, kurio skersmuo yra 49 mm, yra pritvirtinta 12 magnetų, sudarančių apskritą matricą. Visų magnetų matmenys yra vienodi, tai yra 10x5x2 mm. Elektros energijai generuoti, naudojant elektromagnetinės indukcijos efektą, ant išorinės atramos perimetro, panašiai kaip ir magnetai, sumontuota 12 nuosekliai sujungtų ričių. Ekscentrinė masė ir rotorius su atrama sujungti dviem keraminiais guoliais. Galiausiai viskas patalpinama į cilindrinį korpusą, kurio skersmuo yra 61 mm, aukštis – 22,5 mm, o svoris – 67,6 g. Norint sukaupti surinktą kintamosios srovės (AC) energiją, naudojama lygintuvo grandinė, kurią sudaro tiltelis nuolatinės srovės (DC) išėjimui gauti ir kondensatorius (2,2 mF) surinktai elektros energijai kaupti. Atliktas eksperimentas rodo, kad didėjant judėjimo greičiui, didėja ir įtampa, o judant 6 km/val. greičiu, kondensatorių galima įkrauti iki 1,5 V per 7 sekundes. Taip pat atliekant eksperimentus su generatoriumi, gamintojai papildomai sukonstravo reguliuojamo sukimo greičio stendą, kurio dėka galėjo plačiau tirti maketą, esant skirtingoms veikiamoms sukimosi bei vibravimo jėgoms. Gauti rezultatai parodė, kad keitiklis turi didelį potencialą pasiekti autonominę elektroniką (Fan et al., 2021).

Straipsnyje (Fan et al., 2019) pateiktas žemo dažnio vibracijų bei iš žmogaus judesių energijai surinkti skirtas rinkiklis. Jį sudaro judantis centrinis magnetas, įdėtas į cilindrinį vamzdį, ir du galiniai magnetai, pritvirtinti abiejuose vamzdžio galuose, kaip parodyta 2.3 pav. Trys magnetai išdėstyti, kad trauka veiktų iš abiejų centrinio magneto pusių. Vamzdžio išorinį paviršių juosia ritė, skirta elektros išėjimui užtikrinti, o centriniam magnetui prilaikyti naudojamos dvi spyruoklės. Kad centrinis magnetas nesusiliestų su kraštiniais magnetais, naudojama pora kamščių, kurie riboja centrinio magneto judesius tam tikrame diapazone, kur tamprioji jėga visada yra didesnė už magnetinę trauką, taip užtikrinant sistemos monostabilumą. Veikiamas jėgos, centrinis magnetas juda pirmyn ir atgal išilgai vamzdžio ašies, skatindamas ritę gaminti elektros energiją. Pagamintą prototipą sudaro trys cilindriniai neodimio magnetai, dvi varinės 13 mm skersmens spyruoklės, 69 mm ilgio akrilinis vamzdelis ir 200 vijų ritė, apvyniota aplink išorinį vamzdžio paviršių. Judančio centrinio magneto ir dviejų kraštinių magnetų skersmuo vienodas – 12 mm. Viso prototipo skersmuo yra maždaug 15 mm, ilgis - 69 mm, o svoris – 30,4 g. Rinkiklis sužadintas rankoje per 2 s gali įžiebtį 48 šviesos diodus (LED) ar įkrauti 47 μ F kondensatoriuje nuo 0 V iki 4 V. Ant bėgimo takelio atlikti

eksperimentai parodė, kad pagamintas prototipas gali generuoti 0,5 mW galios, jam esant vertikalčiai pritvirtintam prie kojos, ir 0,7 mW galios, kai jis lygiagrečiai pritvirtintas prie kojos bėgant. Taip pat, atliekant eksperimentą, esant 0,8 g sinusoidinės amplitudės virpesiams, rezultatai parodė, kad rinkiklis gali generuoti 1,15 mW maksimalią galią, esant 9 Hz dažniui.



2.3 pav. Monostabilus elektromagnetinės energijos rinkiklis (Fan et al., 2019)

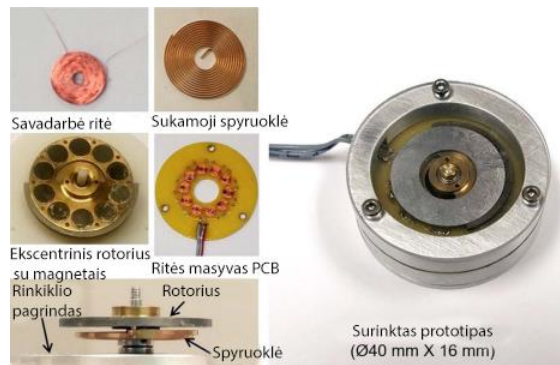
Straipsnyje (Niroomand & Foroughi, 2016) aprašomas sukamasis elektromagnetinis mikrogeneratorius (2.4 pav.), galintis surinkti energiją iš žmogaus judesių. Mikrogeneratorius, suprojektuotas su švytuokliniu mechanizmu be krumpliaračio, yra mažas ir jautrus prietaisas, galintis aptikti nedidelius virpesius ir paversti juos elektros energija. Generatorių sudaro rotorius su necentriniais svoriais. Nuolatiniai 32 rotorius magnetai yra cilindro formos, pagaminti iš neodimio. Jų aukštis 1,8 mm, o skersmuo 5 mm. Statoriaus apvijos suprojektuotos plokščiai. Išorinėms jėgoms sukant necentrinį rotorių, ritės gnybtuose atsiranda įtampa. Generatoriaus skersmuo 5 cm, svoris 18 g. Mikrogeneratoriaus veikimas įvertintas pritvirtinus generatorių skirtingose kūno vietose testuojant su skirtingomis apkrovomis. Didžiausia įprasto vaikščiojimo metu surenkama elektros energija buvo 416,6 μ W, kai generatorius buvo netoli kulkšnies. Mikrogeneratoriaus konstrukcija yra sudėtinga, reikalaujanti kruopštaus surinkimo.



2.4 pav. Elektromagnetinis mikrogeneratorius (Niroomand & Foroughi, 2016)

Straipsnyje (Halim et al., 2018) aprašomas suprojektuotas elektromagnetinės energijos surinkimo įtaisas (2.5 pav.). Jis naudoja spyruoklinį ekscentrinį rotorių, skirtą energijai surinkti iš vieno dažnio sinusoidinio signalo, gaunamo iš varomosios švytuoklės

judėjimo, kuri apytiksliai atitinka rankos svyravimą žmogui einant. Atlikta analizė rodo, kad rotorius su ekscentrine mase, pakabintas ant sukamosios spyruoklės, padidina mechaninę energiją, gaunamą iš žemo dažnio sužadinimo signalų (pvz., atsirandančių žmogui einant, bėgant). Spyruoklinėje ekscentrinio rotoriaus konstrukcijoje esantis elektromagnetinis keitiklis konvertuoja mechaninę energiją į elektros energiją. Energijos rinktuvo prototipas buvo pagamintas ir išbandytas pseudo riešo nešiojimo sąlygomis (pritvirtinus jį prie mechaninės svyruoklės), siekiant imituoti žemo dažnio sužadinimą, atsirandantį žmogui einant. Keičiant svyravimo profilį (kampą ir dažnį), buvo sukurta daug įvairių judesių. Rinkiklis su optimaliu spyruoklės standumu generuoja didžiausią $61,3 \mu\text{W}$ galią, esant $\pm 25^\circ$ sukimosi amplitudei ir 1 Hz dažniui, o tai yra maždaug 6 kartus daugiau nei be spyruoklės, esant tokioms pačioms sužadinimo sąlygoms.



2.5 pav. Elektromagnetinis spyruoklinis rinkiklis (Halim et al., 2018)

Straipsnyje (Liu et al., 2018) pateiktas besisukantis elektromagnetinės energijos rinkiklio (1.3 pav.) modelis, kuriame rotoriaus magnetas sukasi veikiamas F išorinės jėgos y kryptimi. Žymėjimai turi atitinkamas reikšmes: masė – M , rotoriaus masė – m , sukimosi slopinimo jėga – C_m (kuri atsiranda dėl trinties tarp statoriaus ir rotoriaus magneto), elektromagnetinio pasipriešinimo jėga – C_e (atsirandanti dėl sukimosi tarp rotoriaus magneto ir ričių), rotoriaus magneto spindulys – R , statoriaus magneto spindulys – r , kampas – θ (kuriuo sukasi rotorius) ir inercijos jėga, kuri žymima f . Simuliacijoje elektromagnetinės energijos rinkiklis ribojamas išilgai y krypties. Jokios gravitacinės jėgos nedaro įtakos jo judėjimui. Remiantis modelio dinaminėmis charakteristikomis, statoriaus magneto judėjimas apibūrinamas kaip (Liu et al., 2018):

$$x_m = (R + r)\sin\theta, \quad (1)$$

$$y_m = y + (R + r)\cos. \quad (2)$$

Kurioje x_m ir y_m reiškia absoliučius rotoriaus magneto poslinkius atitinkamai x ir y kryptimis. y reiškia pagrindinės masės grįžtamąjį judesį. Diferencijuojant x_m ir y_m laiko atžvilgiu, rotoriaus magneto greitį galima apskaičiuoti taip (Liu et al., 2018):

$$\dot{x}_m = (R + r)\dot{\theta}\cos\theta, \quad (3)$$

$$\dot{y}_m = \dot{y} - (R + r)\dot{\theta}\sin\theta. \quad (4)$$

Tada kinetinę energiją T galima išreikšti taip:

$$T = \frac{1}{2}M\dot{y}^2 + \frac{1}{2}m(\dot{y}^2 + 2(R + r)\dot{y}\dot{\theta}\sin\theta + (R + r)^2\dot{\theta}^2) + \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2. \quad (5)$$

Kurioje I yra rotoriaus magneto masės inercijos momentas. Turint kinetinę energiją, potencinę energiją ir apibendrintas jėgas, sistemos judėjimą apibūdinančias lygtis galima išvesti naudojant Lagranžo funkciją. Taigi rotoriaus magneto judėjimą valdančios lygtys užrašomos taip (Liu et al., 2018):

$$\begin{cases} (M + m)\ddot{y} + m(R + r)(\ddot{\theta}\cos\theta - \dot{\theta}^2\sin\theta) + c\dot{y} \\ F\cos(\omega t)[m(R + r)^2 + I]\ddot{\theta} + C_m\dot{\theta} + C_e\dot{\theta} = -m(R + r)\dot{y}\cos\theta. \end{cases} \quad (6)$$

Kai rotoriaus magnetinis laukas yra vienodas, išėjimo įtampa kiekvienoje ritėje yra susijusi tik su vijų skaičiumi N , rotoriaus kampiniu greičiu ir ričių spinduliu. Įtampa gali būti išreikšta taip (Liu et al., 2018):

$$E(t) = NBLv = NB \int_{point1}^{point2} \dot{\theta} l dl. \quad (7)$$

Šioje formulėje *point 1* ir *point 2* dviejų taškų, kuriuose išorinis magneto skersmuo kerta rites. Sukantis rotoriaus magnetui, atsiranda elektromagnetinio pasipriešinimo jėga C_e ir sukimosi slopinimo jėga C_m . Jas galima išreikšti taip (Liu et al., 2018):

$$\begin{cases} C_e = NBIL = B \frac{E(t)}{Rc} L = N^2 B^2 \frac{\int_{point1}^{point2} \dot{\theta} l dl}{Rc} \int_{point1}^{point2} dl \\ C_m = 2mc_m \sqrt{\frac{g}{R+r}} (R + r) \dot{\theta} \end{cases} \quad (8)$$

Kadangi statoriaus magnetas ir rotoriaus magnetas traukia vienas kitą, magnetinio lauko intensyvumas yra santykinai mažesnis, o jo vertė modeliavimo metu yra maža. B – magnetinio lauko tankis, L – efektyvusis ričių ilgis, kai magnetinės indukcijos linija kerta ritę, Rc – ričių varža, o C_m – mechaninio slopinimo koeficientas. Remiantis (1)–(8) lygtimis, ryšį tarp įėjimo sužadavimo jėgos F ir išėjimo įtampos $E(t)$ galima ištirti naudojant Matlab/Simulink programas. Teoriniam modeliavimui atlikti sistemos parametrai pateikti 1 lentelėje (Liu et al., 2018).

1 lentelė. Nustatyti sistemos parametrai

Aprašymas	Korpuso masė	Rotoriaus masė	Rotoriaus spindulys	Statoriaus spindulys	Magnetų srauto tankis	Rotoriaus slopinimo koeficientas	Ritės vijų skaičius	Vidinė varža	Korpuso slopinimo koeficientas
Parametrai	M (kg)	m (kg)	R (m)	r (m)	B (T)	C_m	N	R_c (X)	c
Vertė	1,5	0,1	0,0125	0,005	0,03	0,02	500	72	0,3

Atlikus (Liu et al., 2018) straipsnio apžvalgą, buvo nuspręsta konstruoti panašaus tipo rinkiklį, tačiau jo matmenys turėtų būti panašūs į dėvimųjų laikrodžių dydį. Tam buvo pasirinkti matmenys pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė. Planuojami sistemos parametrai

Aprašymas	Korpuso masė	Rotoriaus masė	Rotoriaus spindulys	Statoriaus spindulys	Ritės vijų skaičius
Parametrai	M (kg)	m (kg)	R (m)	r (m)	N
Vertė	0,05	0,002	0,01	0,005	720

2.2. Keitiklių valdymo metodų analizė ir parinkimas

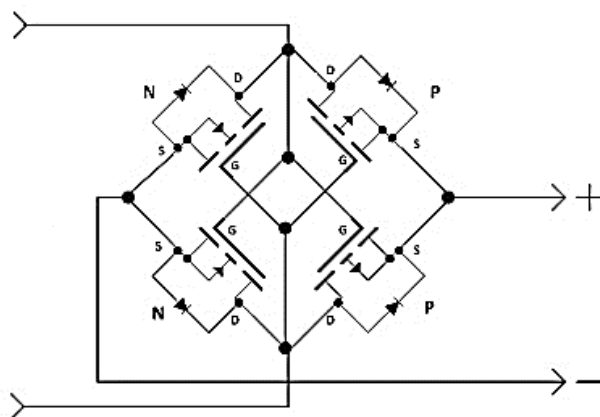
Pirminiu prototipu pasirinktas savaime užsivedančių mechaninių laikrodžių mechanizmas švytuojantis judinant ranką. Atlikta mokslinėje literatūroje aprašytų tokio tipo energijos keitiklių konstrukcinių sprendimų ir pasiektų techninių rodiklių analizė parodė galimybę gauti 4,8 mW (Fan et al., 2021) ar net 10,4 mW (Liu et al., 2018), tačiau aprašyti maketai abiejuose darbuose buvo per dideli, nes buvo 65 mm skersmens ir 18 mm storio. Taigi atsižvelgta į tai, kad tokių gabaritų priedas tikrai per didelis ir jo teikiami energijos generavimo privalumai neatsvers naudojimo nepatogumų. Kad generatorius būtų analogiškas dėvimojo laikrodžio dydžiui, nuspręsta tiriamąjį maketą sukonstruoti laikantis šių matmenų reikalavimų: 40 mm skersmuo, ir 5 mm storis ir apie 20 g svoris. Kartu bus atliekami tyrimai nustatant optimalią apkrovą – didinant apkrovą auga statoriaus ir rotoriaus magnetinės sąveikos jėgos.

Sukonstruotas elektromagnetinės energijos generatorius, veikiamas žmogaus kinetinės energijos, paverčia žmogaus sukurtus judesius į elektros energiją. Šio proceso metu generuojama kintama įtampa, kadangi tiesiogiai kraunami ar energijos saugojimo prietaisai negali naudoti tokios įtampos. Todėl reikia naudoti lygintuvą (angl. *Rectifier*), kuris galėtų keisti kintamą įtampą į nuolatinę (Felipe Gomez et al., n.d.).

Vienas iš pagrindinių ir dažniausiai naudojamų lygintuvų yra diodų tiltelis. Jo privalumas yra tai, kad jis yra efektyvesnis nei paprasti vieno diodo lygintuvai, kurie naudojami tik teigiamosios įtampos pusėje, o neigiamosios pusės signalas yra atmetamas. Diodų tiltelis leidžia panaudoti ir teigiamą, ir neigiamą pusę, todėl jis yra efektyvesnis ir turi didesnę galios perdavimo galimybę. Sudaroma elektroninė grandinė, kuri naudojama sinusoidinės įtampos lyginimui ir nuolatinės įtampos gavimui iš kintamosios įtampos. Tiltelis yra sudarytas iš keturių diodų, kurie yra jungiami taip, kad du iš jų yra sujungti kartu į vieną pusę, o kiti du – į kitą pusę. Kalbant apie kintamąją įtampą – ji yra sinusoidinis signalas, kurios amplitudė ir dažnis nuolat keičiasi. Tai reiškia, kad tiltelio įėjimo grandinės sinusoidinis signalas praleidžia įtampą per du diodus, kai signalo įtampa yra teigiama, o kiti du diodai praleidžia įtampą, kai signalo įtampa yra neigiama. Tai leidžia signalui praeiti per tiltelį tik viena kryptimi, nes kai vieni diodai praleidžia įtampą, kiti diodai yra užblokuoti. Tiltelio išėjimo grandinėje įtampa teka tik viena kryptimi, kadangi įtampa kinta nuolat, o diodai leidžia įtampai praeiti tik viena kryptimi, priklausomai nuo to, kuri pusė turi teigiamą potencialą, o kuri – neigiamą. Šis procesas tęsiasi sinusoidinės įtampos ciklo metu, ir rezultatas yra nuolatinė įtampa, kuri teka tik viena kryptimi per diodų tiltelio išėjimą. Nors diodų tiltelis ir yra labai naudingas ir plačiai naudojamas lygintuvas, tačiau jis turi ir trūkumų. Vienas iš pagrindinių trūkumų yra įtampos kritimas (angl. *Forward voltage drop*). Yra žinoma, kad kiekvienas diodas turi savo specifinį įtampos kritimą, kuris yra atimamas iš įvesties įtampos, norint, kad įtampa galėtų praeiti per diodą. Taip pat kritimas priklauso nuo diodo tipo ir medžiagos, iš kurios jis pagamintas, todėl reikia atsižvelgti į šį parametą, renkant diodus ir projektuojant grandinę. Įtampos kritimas gali būti ypač svarbus tada, kai įvesties įtampa yra maža, nes ji gali būti nepakankama, kad įtampa galėtų praeiti per diodą. Dėl to galima daryti išvadą, kad yra svarbu žinoti diodo įtampos kritimą ir atsižvelgti į jį projektuojant grandines (Muret et al., 2011).

Tam, kad būtų išvengtas jau minėtas įtampos kritimas, o kartu ir galios praradimas, galima naudoti keturis metalo, oksido ir puslaidininkio lauko tranzistorius (angl. *Metal-oxide-semiconductor field-effect transistors*) arba kitaip – MOSFET, kurie kartu veiktų kaip pilnos bangos lygintuvas (žr. 2.6 pav.). MOSFET yra vienas iš pagrindinių lauko tranzistorių tipų FET (*Field Effect Transistor*). Tai puslaidininkinis tranzistorius, kurio veikimo principas pagrįstas elektrinio lauko valdymu. Šių tranzistorių savybės apima aukštą įėjimo varžą, kuri suteikia grandinėms didesnę stabilumą, mažą įtampų suvartojimą ir signalo sustiprinimo charakteristikas. Be to, MOSFET tranzistoriai gali būti naudojami kaip jungikliai ir reguliatoriai, kurie turi mažą galios suvartojimą ir turi greitą reakcijos laiką. Norint, kad MOSFET pradėtų veikti kaip jungiklis, reikia, kad į užtūros elektrodą būtų taikoma slenkstinė įtampa (angl. *Threshold voltage*). Ji nustato minimalią įtampą, kurią reikia taikyti užtūros

elektrodui, kad tarp ištakos ir santakos elektrodų susidarytų kanalas, kuriuo galima valdyti įtampą. Slenksčio įtampa yra specifinė kiekvienam MOSFET tipui ir skiriasi priklausomai nuo struktūros ir medžiagos, iš kurios jis pagamintas (Yilmaz, n.d.).

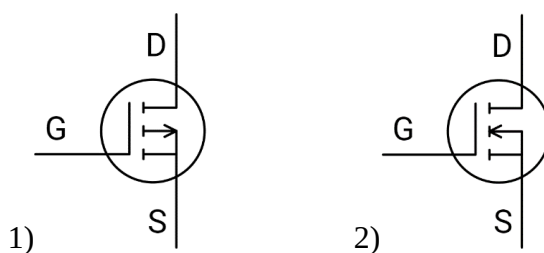


2.6 pav. MOSFET tiltelinis lygintuvas (Yilmaz, n.d.)

Kaip jau buvo minėta anksčiau, bus naudojami keturi MOSFET tranzistoriai, kurie kartu veiktų kaip pilnos bangos lygintuvas: du iš jų yra P kanalo ir du N kanalo. Jie veikia kaip jungikliai su maža įėjimo varža, kuri apsaugo jį nuo per didelio įtampos padavimo į užtūros jungtį.

N-kanalo MOSFET (žr. 2.7 pav.) yra pagaminti iš puslaidininkio medžiagos, paprastai silicio, su plonu oksido sluoksniu viršuje. Oksido sluoksnis veikia kaip izoliatorius, atskiriantis užtūros terminalą nuo puslaidininkio medžiagos. Kai į užtūros išvadą patenka teigiama įtampa, oksido sluoksnyje sukuriama elektrinis laukas, kuris savo ruožtu sukuria elektrinį lauką puslaidininkinėje medžiagoje. Šis elektrinis laukas gali pritraukti arba atstumti laisvuosius puslaidininkinėje medžiagoje esančius elektronus, leisdamas įtampai tekėti tarp ištakos ir santakos išvadų. Tai leidžia kintamosios įtampos teigiamai pusei pereiti per apkrovos rezistorių ir paversti nuolatine įtampa.

P-kanalo MOSFET (žr. 2.7 pav.) veikia panašiai, bet su kitokio tipo puslaidininkine medžiaga, kuri turi teigiamą krūvį. Kai į užtūros išvadą patenka neigiama įtampa, susidaro elektrinis laukas oksido sluoksnyje, kuris traukia teigiamus krūvius puslaidininkinėje medžiagoje. Tai leidžia įtampai tekėti tarp ištakos ir santakos išvadų. Tai leidžia kintamosios įtampos neigiamai pusei pereiti per apkrovos rezistorių priešinga kryptimi ir paversti nuolatine įtampa.



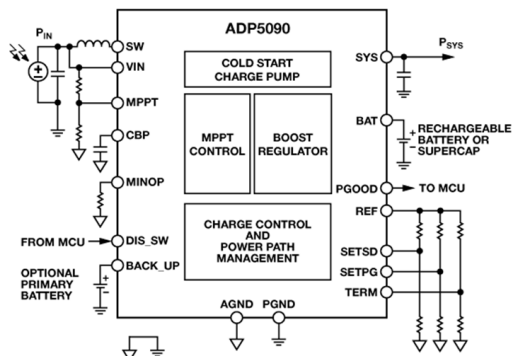
2.7 pav. MOSFET tipai 1) P kanalo 2) N kanalo (Yilmaz, n.d.)

MOSFET pilnos bangos lygintuvas yra elektroninė grandinė, kuri geba derinti kintamosios įtampos teigiamą ir neigiamą pusę, siekiant gauti nuolatinę išvesties įtampą. Tai pasiekama per MOSFET užtūro ir ištakos išvadų valdymą su teigiamos ir neigiamos pusės kintamosios įtampos signalais, kurie kontroliuoja MOSFET laidumo būseną ir leidžia įtampai tekėti tik viena kryptimi per apkrovą. Be to, MOSFET naudojimas grandinėje užtikrina mažesnę įtampos kritimą ir didesnę efektyvumą, palyginti su tradiciniais diodiniais lygintuvais.

Energijos surinkimui ir panaudojimui bus naudojamos jau sukurtos ir rinkoje esamos vertinimo plokštės (angl. *evaluation board*). Jos gali būti pritaikytos skirtingoms reikmėms, pavyzdžiui, našumo vertinimui, patikimumo testavimui, naujų funkcijų bandymams ir taip toliau. Vertinimo plokštės gali būti sukonstruotos pagal konkrečius projektus arba naudojamos kaip bendrosios paskirties įrankiai. Tai svarbi priemonė, kuria naudojasi dauguma elektroninių įrangos projektų kūrėjų, siekdami išbandyti naujas idėjas ar sprendimus, prieš pradėdami kurti produkto prototipą ar įrangos modulius. Šios plokštės yra sukonstruotos taip, kad būtų lengva integruoti daugelį reikiamų komponentų, pvz.: mikrovaldiklius, atminties elementus, duomenų perdavimo sąsajas ir kt., kurie kartu sudaro konkrečią funkciją ar sprendimą. Be to, dauguma vertinimo plokščių turi dokumentaciją, kuri padeda suprasti, kaip tinkamai naudoti plokštę ir integruoti ją į projektą.

ADP5090-2-EVALZ (Ug-, n.d.) (žr. 2.9 pav.) yra energijos rinkimo demonstracinė plokštė, sukurta siekiant parodyti, kaip galima naudoti energiją iš fotovoltinio modulio, kad būtų galima aprūpinti mažos galios elektronines sistemas energija.

Plokštėje yra integruotas ADP5090 (2.8 pav.), tai itin mažos galios sinchroninis nuolatinės srovės stiprinimo reguliatorius, skirtas efektyviai konvertuoti nuolatinės srovės energiją iš fotovoltinių elementų ar TEG rinkiklių (Jaziri et al., 2020b). Jis gali įkrauti energijos kaupiklius, pavyzdžiui, baterijas arba kondensatorius, taip pat maitinti nedidelius elektroninius prietaisus arba beakumuliatorines sistemas. ADP5090 efektyviai konvertuoja surinktą ribotą galią nuo 10 μW iki 1 mW su mažesniais nei μW nuostoliais. Reguliatorius turi vidinę paleidimo grandinę ir gali pradėti veikti, esant vos 380 mV įėjimo įtampai (Devices, n.d.).



2.8 pav. ADP5090 galios stiprinimo reguliatorius (Devices, n.d.)

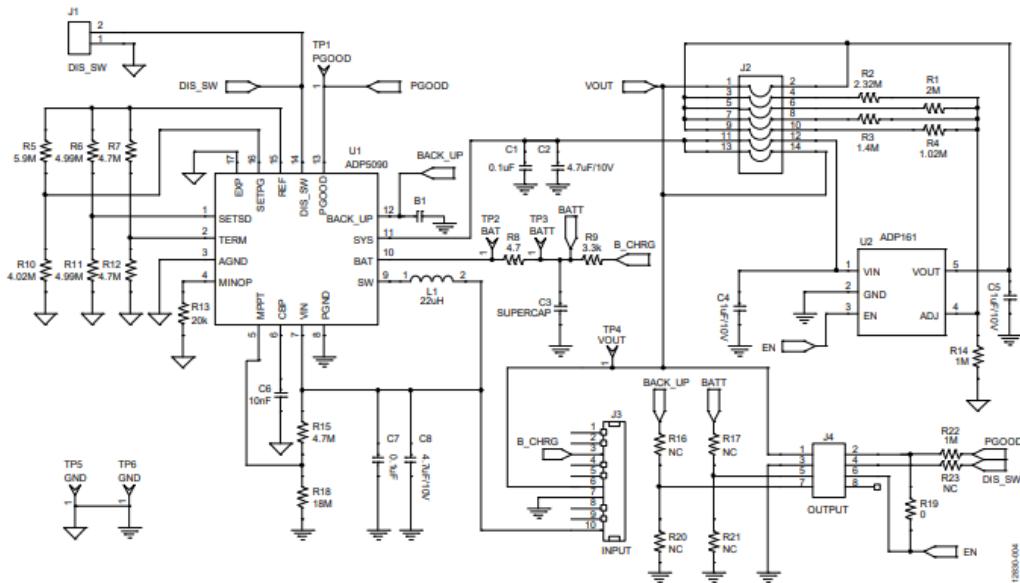
Plokštė taip pat turi LDO reguliatorių, kuris skirtas stabilizuoti tiesinę įtampą reikšmę, mažindamas nuokrypius tarp įvesties ir išvesties įtampų, be to jį galima naudoti kaip įtampų stabilizatorių. Tai yra labai mažos galios įrenginys, kuris gali būti naudojamas kaip energijos šaltinis įvairioms elektroninėms sistemoms, ypač vidinėje aplinkoje, kurios apšvietimas yra 200 – 1000 lux. ADP5090-2-EVALZ plokštė yra sukurta kaip demonstracinis įrenginys, skirtas energijos rinkimui iš fotovoltinio (PV) modulio. Tačiau, turint kitų energijos šaltinių, galima juos panaudoti kaip įvestį į ADP5090 energijos valdymo integracinę schemą. Tad turint tinkamus energijos šaltinius, galima juos prijungti prie plokštės, bet reikia atsižvelgti į jų parametrus ir reikalavimus, kad jie būtų suderinami su ADP5090-2-EVALZ plokšte. ADP5090-2-EVALZ plokštė yra tinkama naudoti su mažos galios DI prietaisais, kadangi gali efektyviai surinkti energiją iš silpnų šaltinių ir užtikrinti nuolatinį prietaiso maitinimą. Taip pat gali įkrauti įvairius energijos saugojimo elementus, (pvz., ličio jonų baterijas ar superkondensatorius). Tai yra puikus sprendimas mažos galios poreikių aplikacijoms, kur energijos surinkimo šaltinis gali būti labai nedidelis arba nepastovus. Ši plokštė yra labai kompaktiška ir gali būti integruota į įvairias įrenginio dalis, taip būtų pasiekiamas didesnis energijos efektyvumas. ADP5090-2-EVALZ yra patikima ir stabiliai veikianti plokštė, kuri gali išspręsti energijos surinkimo iššūkius iš nedidelio galios diapazono daugelyje skirtingų pramonės sričių (Ug-, n.d.).



2.9 pav. ADP5090-2-EVALZ vertinimo plokštė

ADP5090-2-EVALZ plokštės parametrai:

1. Įvesties įtampa: nuo 0,38 V iki 3,3 V
2. Įvesties srovė: iki 350 mA
3. Išvesties įtampa: 3,5 V (saugoma superkondensatoriuje)
4. Energijos kaupimo talpa: 0,1 F
5. Išvesties srovė: iki 10 mA (su integruotu LDO reguliatoriumi)



2.10 pav. ADP5090-2-EVALZ vertinimo plokštės schema (Ug-, n.d.)

Kad plokštė veiktų tinkamai, prie įvesties jungties žymimos J3, 10-to išvado prijungiama iš lygintuvo išeinanti teigiama jungtis. Prie 7-to išvado jungiamas žemėminimas. Plokštės įvestis patenka į ADP5090 stiprinimo reguliatorių, kuris konvertuoja bei didina rinkiklio nuolatinės įtampos energiją. Iš reguliatoriaus BAT išvado išeinanti įtampa keliauja į superkondensatorių, kuris kaupia įtampą ir ją išduoda į BATT ir BAT plokštėje esančius išvadus. Plokštės J2 jungtyje esantys trumpikliai skirti plokštėje naudojamos baterijos išėjimo VOUT įtampos keitimui.

Antra pasirinkta plokštė yra DC2509A (žr. 2.11 pav.) tai Analog Devices gamykloje sukonstruota maitinimo plokštė. Šioje plokštėje yra integruoti keturi skirtingi energijos surinkimo grandynai: LTC3106, LTC3107, LTC3330 ir LTC3331. Kiekviena DC2509A plokštės energijos surinkimo grandinė priima saulės kolektorius, termodinamikos generatorius, piezoelektrinius įrenginius ar bet kokius aukštos kompleksinės grandinės varžą turinčius AC ar DC šaltinius. Tai leidžia plokštės vartotojui prisitaikyti prie skirtingų energijos šaltinių ir efektyviai naudoti surinktą energiją įvairiems poreikiams. Kaip atsarginis maitinimo

šaltinis, plokštėje yra integruotos pagrindinė ir antrinė baterijos, kurias lengvai galima prijungti prie bet kurio norimo integrinio grandyno. Būtent tai leidžia pagerinti sistemos patikimumą ir užtikrinti, kad sistema veiks ir tuo atveju, jei pagrindinis energijos šaltinis neveiktų ar būtų nepasiekama energijos šaltinio maitinimo grandinė. Tai suteikia galimybę vertintojui matyti, kaip atsarginis maitinimo šaltinis yra prijungtas prie integruotos grandinės, kad būtų užtikrintas optimalus energijos naudojimas ir didesnis energijos našumas. DC2509A plokštėje yra jungiklių, perjungiklių ir rezistorių grupės, leidžiančios įvairiais būdais konfigūruoti jos veikimą. Todėl sistema yra labai lengvai pritaikoma ir gali būti modifikuojama pagal naudotojo poreikius. Dėl šio suderinamumo ji yra puiki bet kokios mažos energijos surinkimo sistemos vertinimo priemonė. Plokštė taip pat turi įvairias įvesties ir išvesties jungtis, leidžiančias prijungti įvairius jutiklius, mikrokontrolerius ir kitus komponentus (Technology Corporation, n.d.).



2.11 pav. DC2509A vertinimo plokštė (Technology Corporation, n.d.)

Integruotų keturių modulių veikimo charakteristikos leidžia efektyviai surinkti energiją ir generuoti reikiamą maitinimo įtampą, kad būtų užtikrintas tinkamas įrenginio veikimas.

LTC3106 yra energijos surinkimo modulis, skirtas surinkti energiją iš saulės spindulių ir kitų energijos šaltinių. Jos įvesties įėjimo įtampa nuo 0,33 V iki 6 V ir gali maitinti įvairius įrenginius su 1,8 V iki 5 V išėjimo įtampa. Modulis gali veikti su pirmine arba antrine baterijomis, kurios gali būti įkraunamos iš energijos surinkimo grandinės. Tai reiškia, kad LTC3106 gali būti naudojamas kaip energijos surinkimo ir saugojimo sistema, kuri leidžia patikimai maitinti įrenginius ilgą laiką, net tada, kai energijos šaltinis yra nenuoseklus. LTC3106 taip pat turi *PowerPath* funkciją, kuri leidžia maitinti įrenginius iš energijos surinkimo grandinės arba tiesiogiai iš įvesties maitinimo, priklausomai nuo to, kokia yra prieinama energijos šaltinio galia. Be to, modulis turi 1,5 μ A maitinimo srovę, kuri yra labai maža ir leidžianti naudoti jį ilgą laiką su mažomis energijos sąnaudomis (Technology Corporation, n.d.).

LTC3107 yra energijos surinkimo modulis, skirtas termoelektrinės (TEG) energijos surinkimui. Šis modulis yra sujungiamas su pirmine baterija, kad būtų palaikomas stabilus energijos tiekimas. Ši konfigūracija yra naudojama tam, kad būtų išvengta galios nuostolių ir užtikrintas patikimas energijos tiekimas. Įvesties įtampa gali būti nuo 30 mV iki 500 mV. LTC3107 yra kompaktiškas ir paprastas naudoti modulis, kuris yra idealus energijos surinkimo sprendimas, skirtas mažos galios ir mažo dydžio prietaisams, (pvz., sensoriams, pranešimų siuntimo įrenginiams ir tt) (Technology Corporation, n.d.).

LTC3330 yra daugiafunkcinis energijos surinkimo modulis, skirtas naudoti su įvairiais energijos šaltiniais, pavyzdžiui, AC, pjezoelektriniai elementai ar saulės energijos elementai, siekiant surinkti energiją ir ją konvertuoti į naudingą elektros energiją. Modulis gali būti naudojamas kartu su pirmine baterija, kuri gali būti įkraunama iš surinktos energijos. Taip pat modulis turi aukšto efektyvumo įvesties reguliatorių, kuris leidžia naudoti įvesties įtampos lygius nuo 4 V iki 19 V, o išvesties įtampa gali būti nuo 1,8 V iki 5 V. LTC3330 turi vidinį energijos atstatymo grandyną (angl. *energy harvesting circuit*), įskaitant įvesties diodą ir aukštos efektyvumo step-up keitiklį. Šis keitiklis gali veikti kaip įtampos dvigubinimas (angl. *voltage doubler*) tai grandininė schema, naudojama padidinti įvesties įtampą, kad būtų pasiektas didesnis naudingos energijos lygis (Technology Corporation, n.d.).

LTC3331 yra energijos surinkimo modulis su antrine baterija. Jis skirta aukšto efektyvumo energijos surinkimui iš įvairių šaltinių, tokių kaip Hi-Z AC, pjezoelektriniai elementai ir saulės energija. Šis modulis yra sujungtas su mikrokontrolieriu arba kitomis prietaiso dalimis, kad būtų užtikrintas efektyvus energijos naudojimas ir maksimalus baterijos įkrovimo efektyvumas. LTC3331 yra energijos surinkimo modelis skirtas aukšto efektyvumo energijos surinkimui iš įvairių šaltinių, (pvz., Hi-Z AC, pjezoelektriniai elementų ir saulės energijos). Šis modulis yra sujungiamas su antrine baterija, kuri gali būti įkraunama iš surinktos energijos. Tokiu atveju yra užtikrintas efektyvus energijos naudojimas ir maksimalus baterijos įkrovimo efektyvumas. LTC3331 turi integruotą maitinimo grandinę, kuri gali priimti įvesties įtampą nuo 4 V iki 19 V ir išvesti pastovią įtampos reikšmę, nuo 1,8 V iki 5 V, kad būtų užtikrintas stabilus prietaiso veikimas. Modulis taip pat turi aukšto efektyvumo *step-up* konverterį, kuris gali padidinti įvesties įtampą iki 3,3 V arba 5 V, kad būtų galima maitinti mikrokontrolierius ar kitus prietaisus. Be to, modulis turi integruotą baterijos valdymo grandinę, kuri leidžia įkrauti ir iškrauti antrinę bateriją, užtikrinant maksimalų jos naudojimą. Tai ypač naudinga tais atvejais, kai energijos šaltinis yra nereguliarus arba kintantis. Modulis taip pat turi aukšto efektyvumo baterijos krovimo grandinę, kuri leidžia įkrauti bateriją su dideliu efektyvumu, kad būtų maksimaliai išnaudota surinkta energija (Technology Corporation, n.d.).

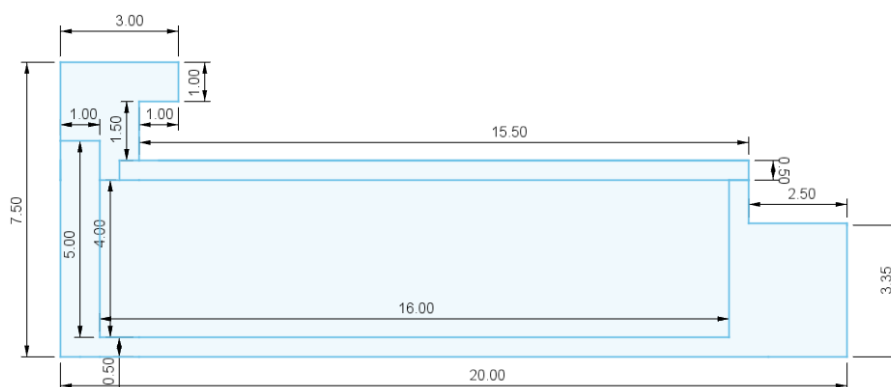
Apžvelgus visus šiuos energijos surinkimo modelius, naudojimui buvo pasirinkta ADP5090-2-EVALZ plokštė ir DC2509A plokštėje esantis LTC3106 modelis. Kaip jau buvo minėta anksčiau, maketo generuojama amplitudė yra nuo 18.6mV iki 585mV. Šį požymį atitinka tik pasirinktos plokštės bei jų modeliai. LTC3107 modulio parametrai yra gan panašūs, įvesties įtampa yra nuo 30 mV iki 500 mV. Tačiau maketui naudoti ji yra netinkama, kadangi viršyta įvesties įtampa gali sudeginti plokštę. LTC3330 ir LTC3331 moduliai yra netinkami dėl savo aukštos įvesties įtampos, kuri siekia 4V. Į juos būtų galima paduoti kintamą įtampą, taip išvengiant papildomų keitiklių konstravimų, bei jų naudojimą (Technology Corporation, n.d.).

3. TIRAMOJI DALIS

Pagrindinė tiriamojo darbo dalis yra ištirti naudojamo elektrinio prietaiso – integruoto elektromechaninio keitiklio, keičiančio rankos judesių kinetinę energiją elektrine, taikymo galimybes, išanalizuoti gaunamus energijos kiekius bei galimus konstrukcinius sprendimus. Energijos surinkimui buvo nuspręsta naudoti rites, kurios būtų pritvirtintos prie korpuso. Virš jų naudojamas aplink ašį nuo judesio besisukantis magnetas, kurio švytavimui daro įtaką mažesnis centrinis magnetas. Taip sukurama elektromagnetinė indukcija. Yra žinoma, jog šiame reiškinyje magnetas yra labai svarbus komponentas, nes nuo jo dalinai priklauso ir sukurta elektrinė įtampa. Ji kitaip dar vadinama indukcinė elektrovara.

3.1. Keitiklio maketo projektavimas

Siekiant sukurti tinkamą maketą, pirmiausiai jis buvo suprojektuotas naudojant programą *AutodeskFusion360*, nes ši programa sudaro galimybes matyti objekto matmenis (3.1 pav.). Tai 3D modeliavimo ir gamybos programinė įranga, kurią naudojant galima nesunkiai sumaketuoti bet kokius 3D modelius. Nors programa leidžia kurti įvairius modelius, tai ilgas procesas, reikalaujantis kruopštumo ir atidumo, siekiant suprojektuoti smulkesnes detales. Be to, būtina atsižvelgti į tai, kad suprojektuotas smulkus modelis neretai gali būti netiksliai atspausdintas 3D spausdintuvu.



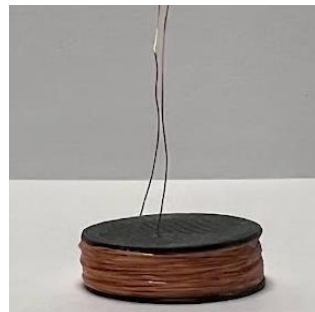
3.1 pav. Nubraižytas keitiklio maketas

Siekiant tyrimui sukonstruoti tinkamą modelį, ne kartą buvo susidurta su nesklandumais. Pavyzdžiui, ne kiekviena atspausdinta detalė susijungė tarpusavyje, arba buvo netinkamai apskaičiuoti matmenys spausdinimui. Atspausdinus tiksliai apskaičiuotas detales, buvo galima pradėti konstruoti keitiklio maketą. Norint, kad projektuojamas kinetinės energijos keitiklis generuotų elektros energiją – reikalingos rites. Projekto eigoje buvo pastebėta, kad

norimo dydžio ričių prekyboje nėra, dėl to jos buvo susuktos rankiniu būdu. Ričių sukimui buvo atspausdinti 3D korpuso modeliai, kurie buvo apvynioti varine lakuota viela (0,12 mm skersmens). Pavyzdyje 3.2 galima matyti 3D korpuso modelį, o 3.3 pav., galima matyti jau susuktą ritę.



3.2 pav. Korpusas ritės sukimui



3.3 pav. Susukta ritė

Šių ričių matmenys yra 15 mm skersmens ir 3,5 mm storio. Kartu apskaičiuota, jog bendras apvijų skaičius ritėje turėtų siekti 780 kartų. Tokios ritės yra keturios. Tuomet buvo pastebėta, jog keitiklyje yra neišnaudotos erdvės, tad pirminiam maketui nuspręsta papildomai įdėti keturias mažesnes rites. Jų matmenys buvo 6,5 mm skersmens ir 3,5 mm storio. Tiek didžiosios, tiek mažosios ritės buvo sujungtos nuosekliai – išėjimas su įėjimu. Tyrimas parodė, jog ričių vijų kiekis yra svarbus, nes kuo jis didesnis, tuo didesnė ir indukcinė elektrovara. Yra žinoma, jog ritė turi ne vieną, o daugybę nuosekliai sujungtų vijų, tai pačioje ritėje indukuota elektrovara yra daugybę kartų didesnė, nei vienoje vijoje. Siekiant pamatuoti ričių išduodamą įtampą, buvo panaudotas oscilografas. Prietaisas parodė, jog mažosios ritės, veikiamos besisukančio magneto, neišduoda pakankamai įtampos – išduodama vos porą mV. Dėl to buvo priimtas sprendimas jas pašalinti, taip sumažinant bendrą keitiklio svorį.

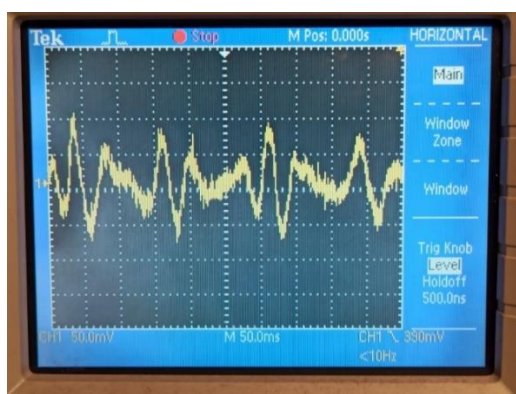
Makete naudojami stiprūs neodimio magnetai. Dėl to yra sukuriamą didesnė elektrovara, nei naudojant silpnesnius magnetus. Iš viso naudojami du magnetai – centrinis cilindro formos (5x5 mm) įstatytas į keitiklio maketą, o antrasis – apvalus (10x1,5 mm) besisukantis aplink jį. Norint indukuoti jau minėtą elektrovarą, reikalingas magneto judėjimas, kuris sukuria kintamą magnetinį lauką. Norint jį išgauti, reikia, jog ričių atžvilgiu magnetas judėtų nuolat, šiuo atveju – sukėtųsi aplink centrinį magnetą.



3.4 pav. Sukonstruotas keitiklio maketas: kairėje pusėje išdėstytos ritės, dešinėje pusėje uždengimas su besisukančiu magnetu

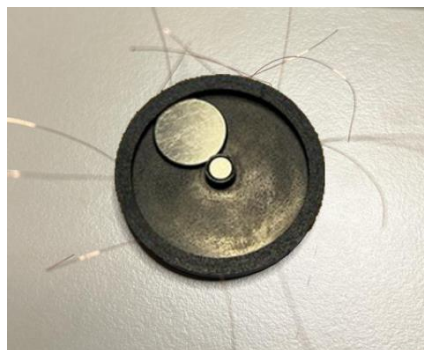
Sukonstravus maketą buvo pastebėta, kad laisvai besisukančio magneto pažymėto 2-uoju numeriu (žr. 3.4 pav.) trintis su korpusu yra kiek didesnė nei tikėtasi, dėl to besisukantis magnetas kartais sustodavo. Trintį mažinti buvo bandoma įvairiais būdais. Buvo klijuojama plona tefloninė juostelė, kadangi teflonas pasižymi labai slidžiu paviršiumi. Buvo klijuojama varinė ir kaptoninė juostelė. Taip pat bandyta pagrindą po magnetu sutepti aliejais, silikonais ar kitais būdais, kurie suteikia didesnę slydimą. Bet šie variantai magneto judėjimo nepagerino, priešingai – jį dar labiau pablogino. Pagaliau nušlifavus paviršių mažėjančio grubumo akmenimis, paviršius tapo lygus ir be išorinių iškilimų. Visgi, to neužteko, todėl korpusas buvo dar nupoliruotas. Tai leido magnetui laisvai ir be trukdžių suktis aplink savo ašį.

Visiškai surinkus maketą, buvo atliktas įtampos matavimo tyrimas oscilografu – iš keitiklio nuosekliai sujungtų ričių išvedus du laidus ir juos prijungus prie aparato. Lengvais rankos judesio mostais priverčiant magnetą suktis aplink centrinę ašį, gaunami rezultatai, kurie parodo, jog signalo amplitudė mažoka – iki 100 mV (žr. 3.5 pav.). Kadangi rezultatai neatitiko lūkesčių, buvo nuspręsta konstruoti antrąjį maketą.



3.5 pav. Signalų amplitudė

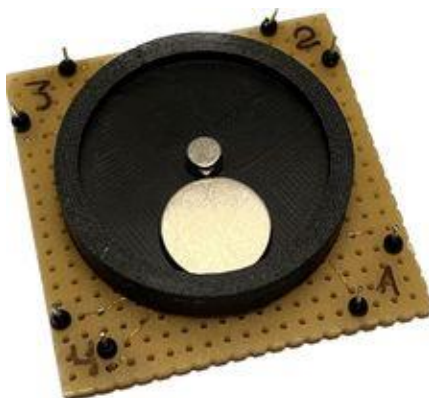
Antrojo korpuso modelis buvo konstruojamas panašiai. Vienas iš pakitimų buvo tai, jog susuktų ričių centruose papildomai buvo įstatyta plieninė viela, kurios matmenys 1 mm skersmens ir 17 mm ilgio. Ji sustiprino magnetinį lauką, ir tai leido sugeneruoti daugiau energijos. Naudojant metalinę šerdį per visą ritę, virš jų besisukantis magnetas protarpiais vis sustodavo prie jų. Patrumpinus šerdžių ilgį iki pusės ritės ilgio, magnetas toliau galėjo sukis nevaržomai. Taip pat 3D spausdintuvu buvo atspausdinta poveržlė, kuri apgaubia centrinį magnetą. Taip buvo sumažinta trintis tarp magnetų. Tai leido magnetui lengviau sukis aplink centrinio magneto ašį. Taip pat prieš atliekant tyrimus, buvo išvesti kiekvienos ritės jungimai į išorę. Taip buvo pamatuota, kaip sujungti rites tarpusavyje, kad jos neatimtų viena iš kitos signalo vykstant priešfazei. Yra žinoma, kad du svyravimai, vykstantys tuo pačiu dažniu, bet turintys skirtingas pradines fazes, turi ir fazių skirtumą, o patys svyravimai yra išfazuoti. Kuomet dvi vienodo dažnio bangos kažkuriame erdvės taške arba kažkurio laiko momentu yra priešfazėje – įvyksta destruktivi interferencija ir tame taške fizikinio dydžio vertė yra lygi amplitudžių skirtumui. Fazių skirtumas nulemia kaip bangos interferuos tarpusavyje – ar jos sustiprins viena kitą, ar nuslopins.



3.6 pav. Sukonstruotas antrojo maketo korpusas su tyrimui paruoštomis varinėmis vielomis

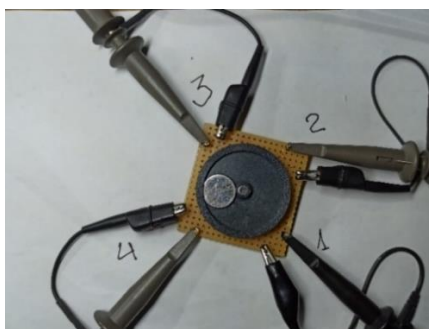
3.2. Keitiklio eksperimentinis tyrimas.

Turimas jau sukonstruotas ir veikiantis keitiklio maketas leido pradėti eksperimentinį tyrimą. Tačiau, tyrimo eigoje iškilo problema. Maketo korpusą reikėjo laikyti rankose, jis buvo nestabilus, o ričių vielos trukdė viena kitai. Galiausiai buvo nuspręsta maketui sukonstruoti stendą, ant kurio jis būtų pritvirtintas ir taip nejudėtų. Tam buvo naudojama testolitinė, nulinė plokštelė su varinėmis aikštelėmis, prie kurių kraštuose prilituoti ričių kontaktai, kad būtų galima lengvai prijungti oscilografą, bei būtų apsaugoti variniai laidai.

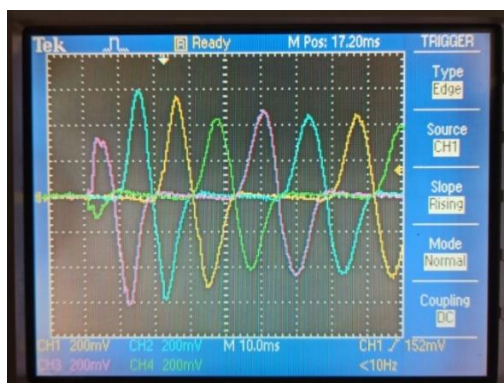


3.7 pav. Maketo korpusas su atskirais ričių jungimais

Sukonstravus maketo korpusą su atskirais ričių jungimais (žr. 3.7 pav.), buvo galima pradėti matuoti atskiras rites. Naudojant keturių kanalų oscilografą, ritės yra prijungiamos prie atskirų kanalų. Galima matyti (žr. 3.9 pav.), kaip išsidėsto jų kreivės, ir ką reikėtų daryti su fazėmis, kaip jas jungti.

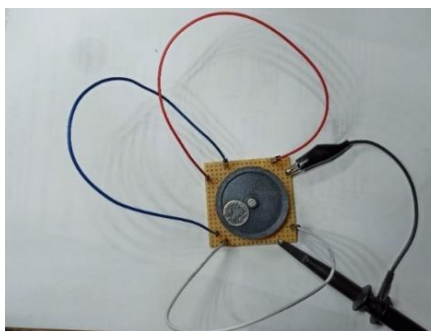


3.8 pav. Maketo korpusas su prijungtu keturių kanalų oscilografu



3.9 pav. Gauti ričių duomenys

Iš 4-ių kanalų oscilografo bandymo matyti, kad gretimas rites reikia jungti priešfaziu, t.y. 1-os pabaigą su 2-osios pabaiga, 2-os pradžia su 3-iosios pradžia, 3-os pabaigą su 4-osios pabaiga. Tolesniems tyrimams keitiklio duomenys bus sekami matuojant tarp 1-osios pradžios ir 4-osios pradžios.



3.10 pav. Maketo korpusas su taisyklingu ričių jungimu

Taip pat buvo išmatuoti naudojamų ričių parametrai: induktyvumas, kompleksinė grandinės varža ir aktyvinė varža naudojant „Hioki 3522-50 LCR hitester“ prietaisą esant nustatytai 1 V įtampai ir 1 kHz dažniui.

3 lentelė. Naudojamų ričių duomenys

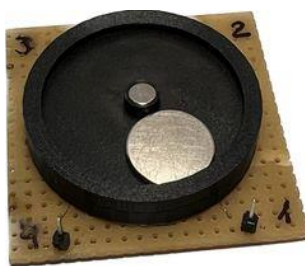
	Induktyvumas	Kompleksinė grandinės varža	Aktyvinė varža
Pirmosios	3,18 mH	37,37 Ω	31,58 Ω
Antrosios	3,42 mH	39,03 Ω	32,56 Ω
Trečiosios	3,57 mH	40,19 Ω	33,30 Ω
Ketvirtosios	2,85 mH	34,59 Ω	29,56 Ω
Bendra	13,750 mH	154,89 Ω	128,56 Ω

Induktyvumas apibūdinantis magnetinio srauto Φ atsiradimą elektros grandinėje, kai joje teka I stiprio elektros srovė:

$$\phi = L * I. \quad (9)$$

Induktyvumo vertė priklauso nuo elektros grandinės matmenų ir formos, magnetinės skvarbos. Kompleksinė grandinės varža nusako pasipriešinimą kintamajai srovei, bei pratęsia varžos sąvoką kintamosios srovės grandinėms, apibūdindama ne tik santykius tarp įtampos ir srovės amplitudžių, bet ir tarpusavyje susijusias fazes. Kalbant apie aktyvinę varžą – ji nevartoja elektros energijos. Ji natūraliai egzistuoja laidininkuose ir puslaidininkuose. Aktyvinė varža apriboja srovės pratekėjimą. Aktyvinė varža yra visada pastovi ir nepriklauso nei nuo įtampos, nei nuo srovės, bet priklauso nuo pačio laidininko fizikinių savybių, bei temperatūros.

Atlikus visus maketo konstrukcinių tyrimus, šis keitiklis buvo paruoštas testavimui. Buvo pašalinti laikini jungiamieji laidai, ritės jungimai buvo sulituoti korpuso viduje, palikti tik du kontaktai, kurie bus naudojami tolesniems maketo tyrimams.



3.11 pav. Paruoštas keitiklio maketas tyrimams

Tolesniems energijos kiekio įvertinimams buvo nuspręsta sukonstruoti aparatą, kuris galėtų suteikti reguliuojamą ir stabilų judesį. Korpuso konstrukcija turėtų reguliuojamu greičiu stumti laisvai besisukantį magnetą. Taip buvo galima išmatuoti gaunamą kintamos energijos amplitudę, esant skirtingiems apsisukimo greičiams.



3.12 pav. Reguliuojamo fiksuoto ir stabilaus greičio magneto sukimo aparatas

Sukonstruotas sukimo stendas buvo suprojektuotas *AutodeskFusion360* programa, visos atskiros maketo dalys atspausdintos 3D spausdintuvu ir sukomplektuotos tarpusavyje nenaudojant jokių klijų. Į įdubusią keturkampę erdvę po sraigtelio puikiai įsistato keitiklio maketas. Apspaustas iš visų pusių jis yra stabilus, visiškai nejuda. Viršuje esantis micro nuolatinės įtampos variklis su reduktoriumi, maitinamas 6 V įtampa, gali sukis iki 300 RPM greičio. Kadangi magneto apsisukimai turi būti panašūs į žmogaus atliekamą rankos judesį, šis greitis puikiai tinka tyrimui. Variklio greitį reguliuoti buvo pasirinktas IPM tipo reguliatorius nuo 3 iki 35 VDC ir 5 A. IPM signalas leidžia ypač lengvai valdyti DC variklio sukimosi momentą ir greitį. Pasukus rankenėlę, didėja IPM signalo darbo ciklas, taip daugiau galios tiekama į variklį. Visas aparatas yra maitinamas naudojant impulsinį maitinimo šaltinį, kuris išduoda 6 V ir 800 mA.



3.13 pav. Reguliuojamo fiksuoto ir stabilaus greičio magneto sukimo aparatas su keitiklio maketu

Buvo atliekamas tyrimas, kaip esant skirtingiems magneto sukimosi greičiams, yra matuojamas svyruojančio dydžio kitimo matas, parodantis dydžio vertės pokytį svyravimų metu, kitaip sakant – amplitudė. Pradžioje buvo atliktas matavimas naudojant jau išrinktą svyravimo magnetą. Tolesniems matavimams papildomai buvo uždėtas ant jau esančio magneto dar vienas neodimio magnetas, kurio skersmuo yra mažesnis, o aukštis didesnis už jau naudojamą magnetą (8x4 mm). Kartu sulipę magnetai padidina magnetinį lauką, kartu pagerina bendrą jų slydį aplink ašį. Taip pat, prie išėjimo taškų lygiagrečiai buvo prijungiamos varžos, kurios tyrimo metu buvo keičiamos.

4 lentelė. Amplitudės matavimas be apkrovos ir su vienu magnetu

RPM	72 rpm	126 rpm	162 rpm	192 rpm	252 rpm
Dažnis	1,79 Hz	3,85 Hz	4,72 Hz	6,86 Hz	8,13 Hz
Amplitudė	149 mV	203 mV	259 mV	338 mV	405 mV

5 lentelė. Amplitudės matavimas be apkrovos ir su dvigubu magnetu

RPM	72 rpm	126 rpm	162 rpm	192 rpm	252 rpm
Dažnis	2 Hz	3,30 Hz	5,12 Hz	7,08 Hz	8,98 Hz
Amplitudė	234 mV	360 mV	509 mV	675 mV	806 mV

6 lentelė. Amplitudės matavimas su 1 Ω apkrova ir su dvigubu magnetu

RPM	72 rpm	126 rpm	162 rpm	192 rpm	252 rpm
Dažnis	1,75 Hz	3,69 Hz	4,92 Hz	6,5 Hz	8,1 Hz
Amplitudė	2,5 mV	4,8 mV	5,3 mV	6,9 mV	7 mV

7 lentelė. Amplitudės matavimas su 10 Ω apkrova ir su dvigubu magnetu

RPM	72 rpm	126 rpm	162 rpm	192 rpm	252 rpm
Dažnis	2,13 Hz	3 Hz	4,83 Hz	6,53 Hz	7,95 Hz
Amplitudė	18,6 mV	19,3 mV	36,2 mV	47,8 mV	56,4 mV

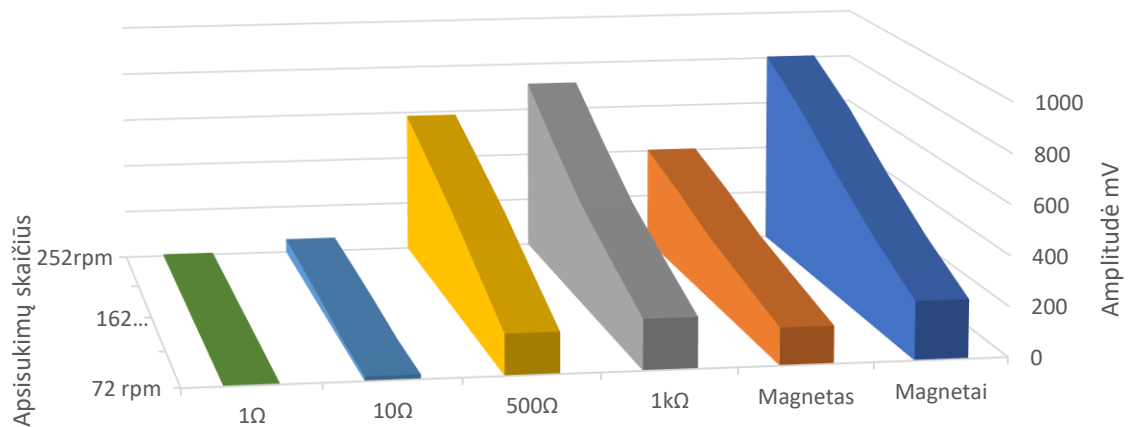
8 lentelė. Amplitudės matavimas su 500 Ω apkrova ir su dvigubu magnetu

RPM	72 rpm	126 rpm	162 rpm	192 rpm	252 rpm
Dažnis	1,82 Hz	3,21 Hz	5 Hz	6,71 Hz	7,56 Hz
Amplitudė	164 mV	278 mV	394 mV	491 mV	585 mV

9 lentelė. Amplitudės matavimas su 1 k Ω apkrova ir su dvigubu magnetu

RPM	72 rpm	126 rpm	162 rpm	192 rpm	252 rpm
Dažnis	1,95 Hz	3,71 Hz	4,82 Hz	6,67 Hz	7,95 Hz
Amplitudė	202 mV	303 mV	409 mV	555 mV	713 mV

Surašius informaciją į lenteles yra sukuriamas grafikas, kuris padeda lengviau analizuoti gautus rezultatus.



3.14 pav. Amplitudės rezultatai skirtingų apsisukimo greičių bei skirtingų parametrų sąlygomis

Išmatavus amplitudę, esant skirtingoms veikimo situacijoms, ir magneto sukimosi greičiui, galima matyti, kaip sukimosi greitis daro įtaką amplitudės dydžiui. Išmatuotos charakteristikos keičiant apkrovą leis įvertinti vidaus varžą. Taip bus žinoma, kaip galima apkrauti keitiklį, pasirinkus tinkamą apkrovą su kuria būtų galima generuoti didžiausia galią. Svarbu paminėti, kad matavimai buvo atliekami nustačius penkis skirtingus greičius (RPM), kurie buvo nekeičiami viso tyrimo metu. Taip pat matavimo metu buvo bandoma skirtingų greičių sąlygomis palaikyti panašų dažnį, siekiant tiksliai nustatyti sukimosi greitį. Kartu buvo pastebėta, kaip naudojant mažas apkrovas amplitudė stipriai sumažėja, nes mažinant varžą padidėja srovė, todėl sumažėja amplitudė. Taigi reikėtų apskaičiuoti amplitudę, esant skirtingo dydžio varžai, ir surasti maksimalią gaunamą kiekvieno sukimosi greičio atveju energiją, kurią galima rasti naudojant efektinės įtampos formulę:

$$U = \frac{U_{amp}}{\sqrt{2}}. \quad (10)$$

Apskaičiavus ją galima rasti galią:

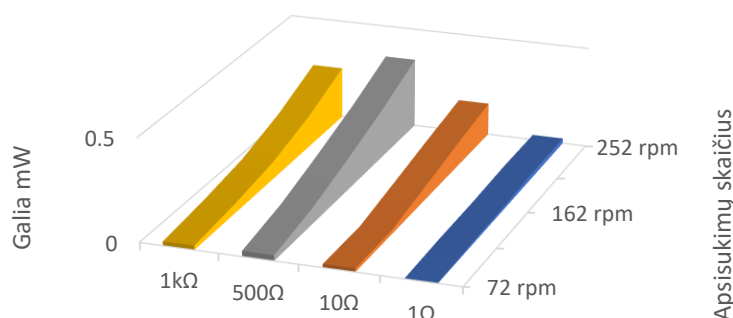
$$P = U * I = \frac{U^2}{R}. \quad (11)$$

Pasirinkus varžą, matuojama įtampa, tada apskaičiuojama efektinė vertė ir pritaikant formulę apskaičiuojama galia. Reikėtų rasti tinkamą apkrovos varžą, kuriai esant būtų galima gauti maksimalią galią.

10 lentelė. Gaunama galia esant skirtingo dydžio varžai

	1 Ω	10 Ω	500 Ω	1 k Ω
72 rpm	0,0031 mW	0,017 mW	0,02 mW	0,02 mW
126 rpm	0,011 mW	0,018 mW	0,07 mW	0,04 mW
162 rpm	0,014 mW	0,065 mW	0,15 mW	0,08 mW
192 rpm	0,023 mW	0,11 mW	0,24 mW	0,15 mW
252 rpm	0,024 mW	0,15 mW	0,34 mW	0,25 mW

Pagal surašytą informaciją lentelėje yra sukuriamas grafikas, kuris padeda lengviau suprasti gautus rezultatus.

**3.15 pav.** Galios rezultatai esant skirtingiems apsisukimo greičiams bei skirtingiems parametrams

Žiūrint į sudarytą grafiką, galima matyti, kad didžiausia galia, esant skirtingiems greičiams, gaunama naudojant 500 Ω varžą. Pagal gautus rezultatus ir galios skaičiavimą buvo nuspręsta plačiau ištirti apkrovos perimetrą, kadangi varža buvo keičiama plačiu diapazonu ir nebuvo žinoma kokią galią galima gauti, esant panašioms varžoms. Taigi, buvo nuspręsta išsamiau išmatuoti galios kitimą tarp 10 ir 500 Ω .

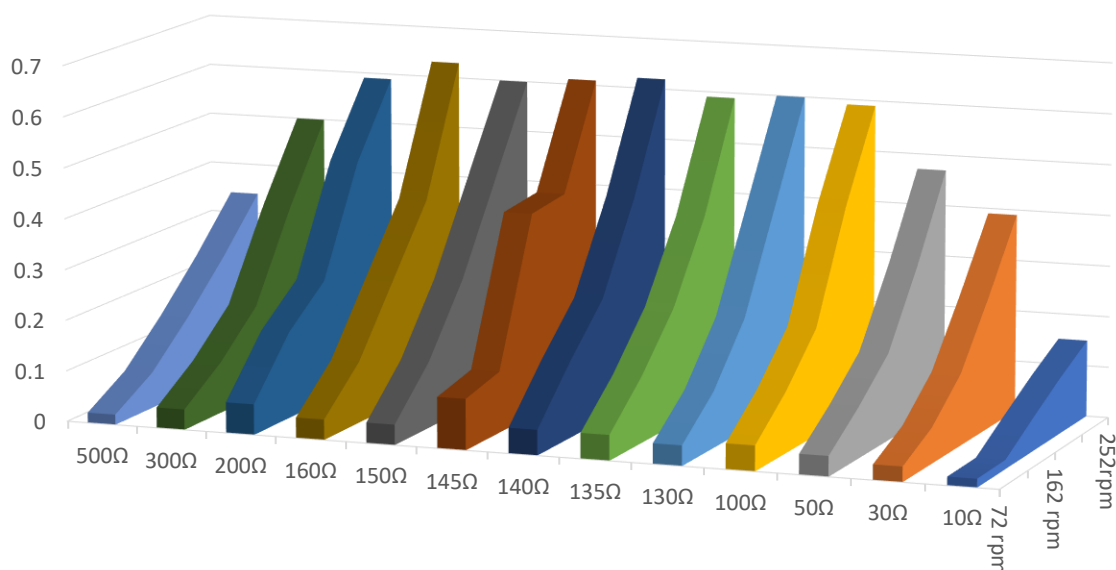
11 lentelė. Gaunama amplitudė mV, esant skirtingo dydžio varžai

	10 Ω	30 Ω	50 Ω	100 Ω	130 Ω	135 Ω	140 Ω	145 Ω	150 Ω	160 Ω	200 Ω	300 Ω	500 Ω
72 rpm	18,6	44,9	65	100	114	124	121	172	119	125	158	160	164
126 rpm	19,3	67,4	103	156	173	194	205	189	204	196	262	254	278
162 rpm	36,2	93,9	131	209	240	252	261	342	280	287	310	334	394
192 rpm	47,8	127	178	293	327	321	342	345	360	353	425	459	491
252 rpm	56,4	153	218	345	398	402	418	422	426	452	489	553	585

Pasirinkus matavimo periodą nuo 10 iki 500 Ω matoma, kaip amplitudės augimas yra tolygus augančiai varžai. Galia čia taip pat apskaičiuojama pagal jau anksčiau minėtas formules.

12 lentelė. Gaunama galia mW, esant skirtingo dydžio varžai

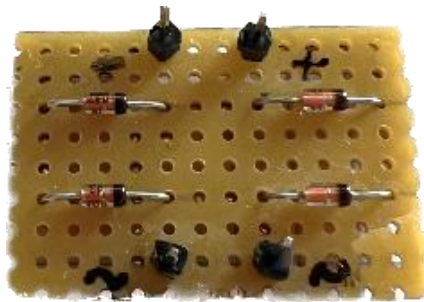
	10 Ω	30 Ω	50 Ω	100 Ω	130 Ω	135 Ω	140 Ω	145 Ω	150 Ω	160 Ω	200 Ω	300 Ω	500 Ω
72 rpm	0,017	0,03	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05	0,10	0,04	0,04	0,06	0,04	0,02
126 rpm	0,018	0,07	0,10	0,12	0,11	0,13	0,15	0,12	0,13	0,12	0,17	0,10	0,07
162 rpm	0,065	0,14	0,17	0,21	0,22	0,23	0,24	0,40	0,26	0,25	0,24	0,18	0,15
192 rpm	0,11	0,26	0,31	0,42	0,41	0,38	0,41	0,41	0,43	0,38	0,45	0,35	0,24
252 rpm	0,15	0,39	0,47	0,59	0,60	0,59	0,62	0,61	0,60	0,63	0,59	0,50	0,34



3.16 pav. Galios rezultatai esant skirtingiems apsisukimo greičiams bei skirtingiems parametrms

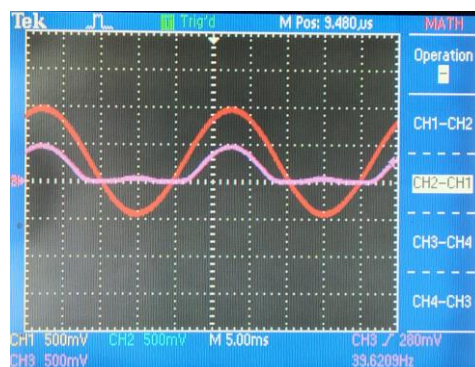
Iš gautų duomenų galima matyti, kaip galia kinta naudojant skirtingas apkrovas ir kaip galios augimas priklauso nuo sukimosi greičio. Labiausiai galima išskirti intervalą nuo 145 iki 200 Ω , nes buvo gaunama didžiausia galia. Vis dėlto naudojant vieną varžą nepavyko gauti didžiausios galios skirtingų greičių sąlygomis. Esant 72 rpm, galia buvo didžiausia naudojant 145 Ω varžą ir siekė 0,1 mW. Esant 126 rpm, galia buvo didžiausia naudojant 200 Ω varžą ir siekė 0,17 mW, esant 162 rpm, didžiausia galia buvo naudojant 145 Ω siekė 0,17 mW. Esant 192 rpm, didžiausia galia buvo naudojant 200 Ω siekė 0,45 mW ir galiausiai esant 252 rpm, didžiausia galia buvo naudojant 160 Ω varžą ir siekė 0,63 mW.

Kadangi sukonstruotas elektromagnetinės energijos generatorius išduoda kintamą įtampą, reikalingas lygintuvas, kuris ją galėtų keisti nuolatine. Būtent tam bus naudojamas diodų tiltelis. Bandant kuo labiau išvengti įtampos kritimų diodų tiltelyje, vietoj įprastų silicio diodų buvo nuspręsta naudoti šotkio. Pasirinkus BAT43 šotkio diodus ir juos sujungus į diodų tiltelį (žr. 3.17 pav.), buvo sukonstruotas lygintuvas, kuris galėjo keisti kintamą srovę į nuolatinę. BAT43 šotkio diodo įtampos kritimas yra 0,25 V.



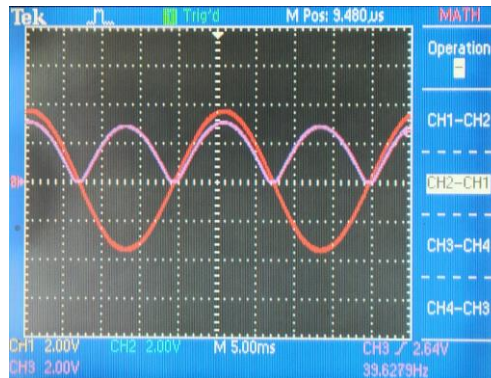
3.17 pav. BAT43 šotkių diodų tiltelis

Prieš pradėdant naudoti lygintuvą, reikia atlikti matavimus, kaip diodų tiltelis lygina įtampą ir kokia ji išvestyje po įtampos kritimų. Matavimai bus atliekami naudojant keturių kanalų oscilografą. Pirmi du kanalai prijungti prie įvesties, o trečias kanalas bus prijungtas prie tiltelio išėjimo. Oscilografo žeminimas prijungtas prie išvesties minuso, kuris yra atskaitos taškas matavimuose. Taip bus galima įvertinti lygintuvo efektyvumą. Svarbu paminėti, kad įvesties įtampai naudojamas žemo dažnio reguliatorius. Išmatuoti įėjimo signalo, tarp dviejų įvesties taškų, tiesiogiai nepavyksta, kadangi šiuos įvesties taškus skiria diodai, o tai yra tiesiniai elementai, kurie elektros įtampai leidžia tekėti tik viena kryptimi. Tačiau, ją galima apskaičiuoti diferencinio matavimo principu. Toks matavimo būdas taikomas, kad matytųsi įėjimo signalas. Be to, diferencinis matavimas leidžia išvengti daugelio trikdžių ir gauti tikslesnį matavimo rezultatą. Lygintuvo išėjime naudojama 1 k Ω apkrova.



3.18 pav. BAT43 diodų lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai

Į lygintuvą tiekiant 750 mV amplitudės įtampą (žr. 3.18 pav.) yra matoma, kaip lygintuvo išvestyje, dėl įtampos kritimo dioduose, signalo aukščiausias taškas pasiekia tik 450 mV. Taip pat, dėl žemos įvesties įtampos nepavyksta visiškai išlyginti neigiamo impulso signalo.



3.19 pav. BAT43 diodų lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai

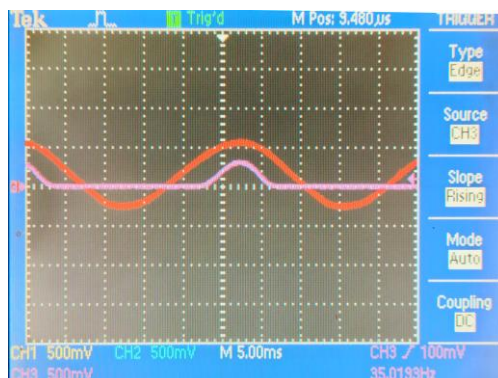
Tiekiant 3,8 V į lygintuvą (žr. 3.19 pav.) yra matoma, kaip įvesties signalai yra išlyginti, bet dėl įtampos kritimo dioduose, išvesties signalo aukščiausias taškas pasiekia 3 V. Tai reiškia, kad dėl įtampos kritimo yra prarandama 0,8 V. Naudojant tokio tipo lygintuvą su žemomis įvesties įtampomis yra patiriamas per didelis nuostolis.

Siekiant išvengti įtampos kritimų lygintuve, buvo pasirinkta naudoti MOSFET lauko tranzistorius (žr. 3.20 pav.). Du naudojami n-kanalo SI2302 MOSFET, skirti žemos įtampos taikymui, kurių slenksčio įtampa paprastai svyruoja nuo 0,65 V iki 1,2 V. Likę du – p-kanalo SI2377 MOSFET yra skirti aukštos srovės taikymams. Jų slenksčio įtampa svyruoja nuo 0,4 V iki 1 V. Norint užtikrinti optimalų veikimą, buvo patikrinta kiekvieno naudojamo MOSFET tranzistoriaus slenkstinė įtampa. Paaiškėjo, kad SI2377 slenkstinės įtampos buvo 0,87 V ir 0,92 V, didesnė įtampa buvo sumažinta iki 0,82 V naudojant atsarginį MOSFET. Analogiškai buvo išmatuotos ir SI2302 slenkstinės įtampos, kurios buvo 0,85 V ir 0,88 V.



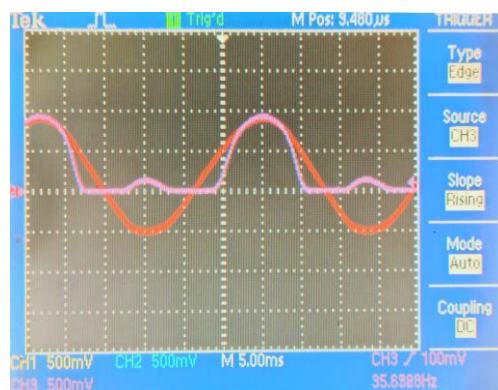
3.20 pav. MOSFET SI2302 ir SI2377 tranzistorių lygintuvas

Prijungus lygintuvą prie keturių kanalų oscilografo ir įvesties įtampą nustačius 0,6 V, matoma, kaip išėjimo signalo aukščiausiais taškas siekia tik 0.3 V.



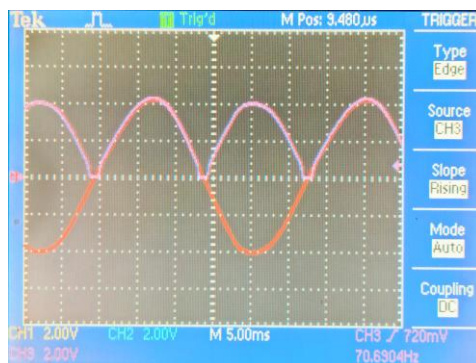
3.21 pav. MOSFET SI2302 ir SI2377 tranzistorių lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai

Padidinus įvesties įtampą iki 0,9 V (žr. 3.22 pav.), kuri yra virš naudojamų MOSFET slenkstinės įtampos, yra matoma, kaip išėjimo signalas visiškai susilygina su teigiama įėjimo sinusoide, o tai reiškia, kad prarandama įtampa yra labai maža arba jos visai nėra. Tačiau pastebėta, kad prie žemos įvesties gaunama asimetrija ir minusinės dalies signalas nėra simetriškas teigiamai daliai.



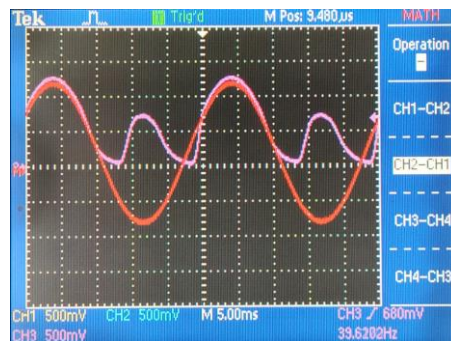
3.22 pav. MOSFET SI2302 ir SI2377 tranzistorių lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai

MOSFET tranzistorių lygintuvas visiškai išlygina įvesties signalą, kai jo vertė yra 4V.

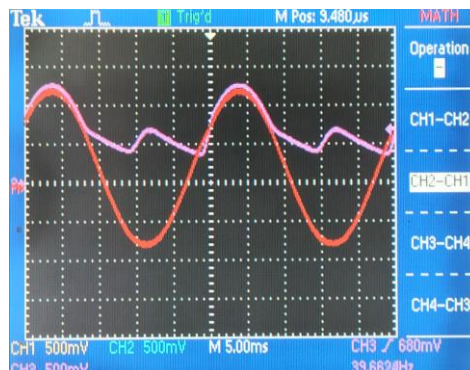


3.23 pav. MOSFET SI2302 ir SI2377 tranzistorių lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai

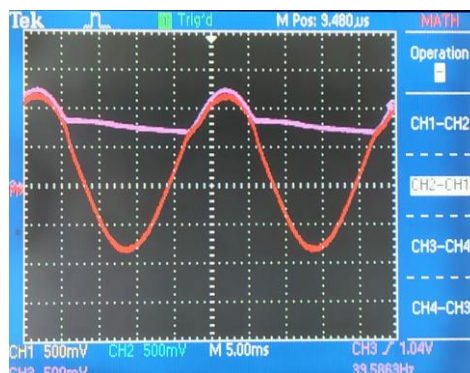
Norint, kad signalas taptų tolygus lygintuvo išėjime, reikia prijungti kondensatorių. Jis gali padėti išlyginti įtampos signalą, kaupdamas dalį krūvio didžiausios įtampos metu ir išleisdamas jį mažesnės įtampos metu. Tokiu būdu gaunama pastovesnė išėjimo įtampa. Naudojant 10 μF ir 100 μF kondensatorius pastebėta, kad tranzistorius lieka atidarytas, bei leidžia įtampą į kitą pusę, kol tranzistorius užsidaro, taip iškraudamas kondensatorių ir šildydamas tranzistorius. Taigi, didesnių kondensatorių talpa nieko nekeičia, nes prarandama įtampa veikiant tranzistoriui. Norint gauti geriausius rezultatus naudojant šį lygintuvą, geriausia yra naudoti 1 μF kondensatorių.



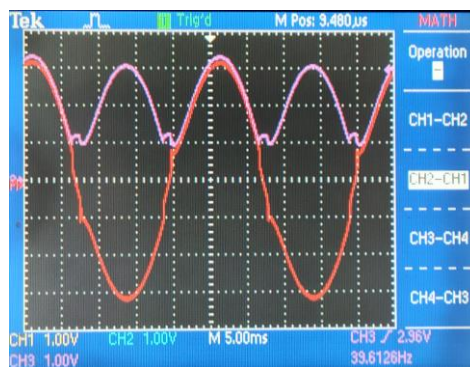
3.24 pav. MOSFET lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai su 1 μF kondensatoriumi



3.25 pav. MOSFET lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai su 10 μF kondensatoriumi



3.26 pav. MOSFET lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai su 100 μF kondensatoriumi



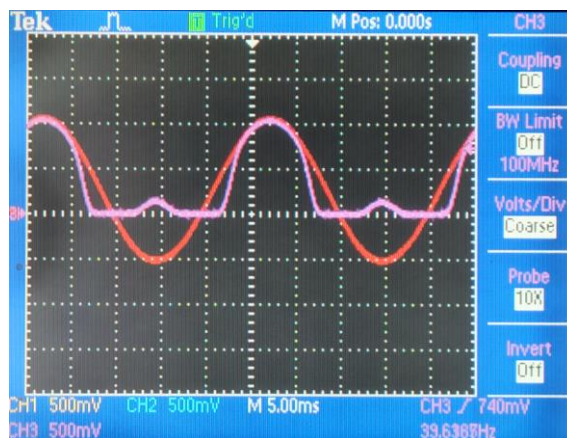
3.27 pav. MOSFET lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai su 100 μ F kondensatoriumi

Lygintuve, esant 3 V įvesties įtampai, naudojant 100 μ F, aiškiai matomas tranzistoriaus vėlus užsidarymas, bei kondensatoriaus įtampos leidimasis į kitą pusę, kol tranzistorius užsidaro.

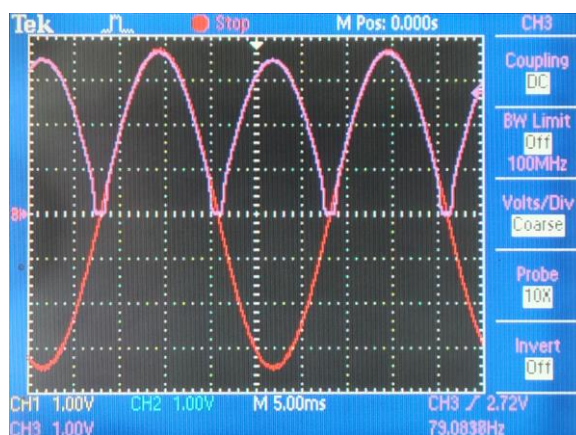
Norint, kad lygintuvas galėtų tinkamai dirbti esant žemesnei įvesties įtampai, bei bandant išvengti asimetrijų, reikalingi mažesnių parametrų MOSFET tranzistoriai, kurie turėtų žemesnę slenkstinę įtampą. Atsižvelgiant į gamintojo nurodymus, buvo nuspręsta naudoti RZM002P02T2L ir RUM002N05T2L MOSFET tranzistorius. RZM002P02T2L yra P-kanalo MOSFET, kurio slenkstinės įtampos diapazonas yra nuo 0,3 V iki 1 V, bei turi žemą perjungimo varžą, kas padeda sumažinti galios nuostolius. RUM002N05T2L yra N-kanalo MOSFET, kurio slenkstinė įtampa taip pat yra nuo 0,3 V iki 1 V. Abu MOSFET gali būti naudojami kaip lygintuvai kintamajai įtampai konvertuoti į nuolatinę ir leidžiant jai tekėti tik viena kryptimi. Patikrinus realią kiekvieno naudojamo MOSFET tranzistoriaus slenkstinę įtampą, rodikliai buvo didesni negu tikėtasi ir vidutinis įtampos slenkstis siekė 0,88 V.



3.28 pav. RZM002P02T2L ir RUM002N05T2L tranzistorių lygintuvas



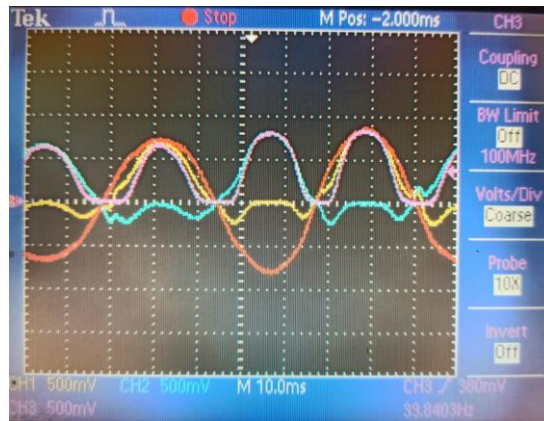
3.29 pav. RZM002P02T2L ir RUM002N05T2L tranzistorių lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai



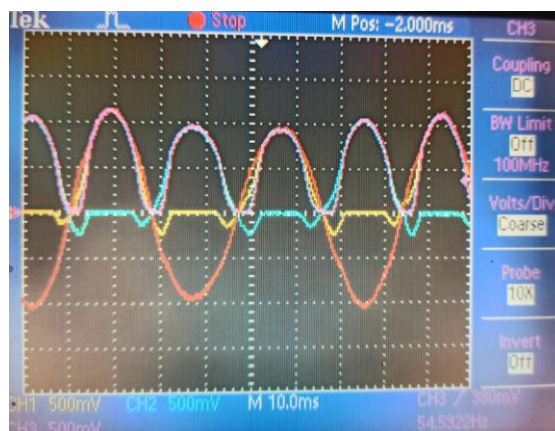
3.30 pav. RZM002P02T2L ir RUM002N05T2L tranzistorių lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai

Pagal oscilografo rodmenis galima teigti, kad antrojo tipo lauko tranzistorių lygintuvas veikia ne itin kitaip nei pirmojo tipo, nors jo slenkstinė įtampa, kaip nurodė gamintojas, turėtų būti mažesnė.

Prijungus rinkiklį prie (3.20 pav.) pavaizduoto MOSFET lygintuvo, naudojant oscilografą, galima (3.31 pav.) matyti kaip generuojant 750 mV įvesties įtampą raudonos spalvos signalas, matuojamas diferenciniu būdu, yra panašus į teigiamos amplitudės pusėje esančio rožinės spalvos išvesties signalą.



3.31 pav. Lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai esant 750 mV amplitudės įtampai



3.32 pav. Lygintuvo įėjimo ir išėjimo signalai esant 1 V amplitudės įtampai

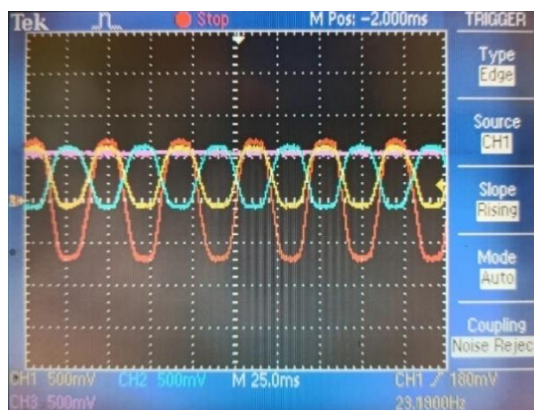
Generuojant 1 V (žr. 3.32 pav.) matoma, kaip abu pusperiodžiai sutampa su įvesties įtampa, be jokio įtampos praradimo.

Norint surinkti ir kaupti įtampą iki tinkamos, bus naudojama ADP5090-2-EVALZ energijos surinkimo plokštė, kuri kaups įtampą iki 3,3 V. Toks įtampos lygis pasirinktas dėl patikimumo ir savo saugumo. Taip pat, tokiu įtampos lygiu galima maitinti daugumą skaitmeninių komponentų nerizikuojant juos sugadinti, o be to, yra žinoma, jog 3,3 V įtampa yra daugelio elektroninių prietaisų standartas.

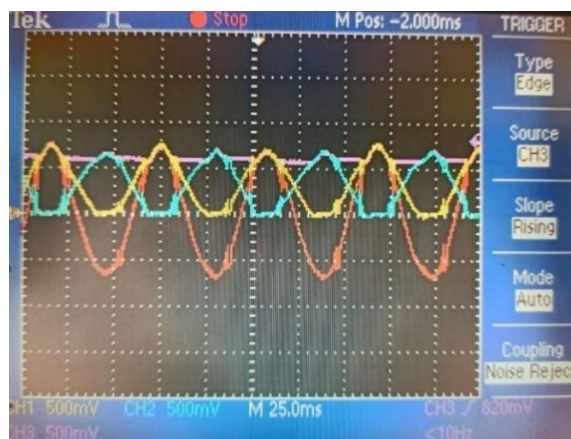
Deja, bet DC2509A plokštės nepavyko panaudoti. Prijungti plokštės modeliai nekaupė ir nekėlė įtampos iki naudojamos. Todėl ši plokštė darbe nebuvo naudojama.

Prijungus keturių kanalų oscilografą, bus galima matyti signalo vertes skirtingose jungimo vietose. Pirmi du kanalai prijungti prie įvesties ir bus matuojami diferenciniu principu, trečias kanalas bus prijungtas prie tiltelio išėjimo, o ketvirtas prijungtas prie energijos surinkimo plokštės išėjimo, kuris matuos įtampos kiekį superkondensatoriuje. Minimali įvesties

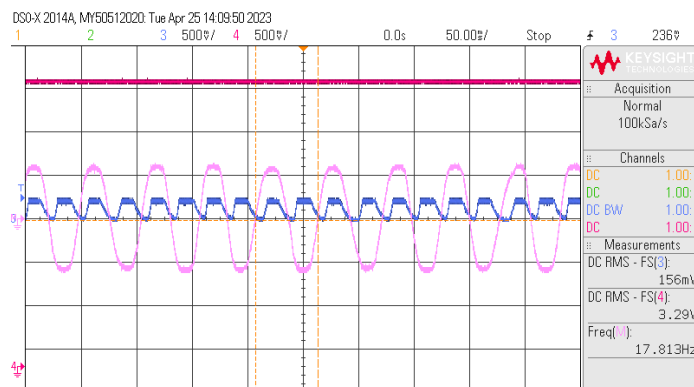
įtampa į plokštę turi būti 236 mV, kurios dažnis 17,64 Hz, ir ji naudoja 1,35 mA srovę (žr. 3.31 pav.). Pasiekus šią ribą, ADP5090-2-EVALZ vertinimo plokštė stiprina įvesties įtampą ir ją kaupia esančiame superkondensatoriuje. Visiškai iškrautas superkondensatorius, iki pageidaujamo 3,3 V, įkraunamas naudojant minimalią nustatytą įtampą per 145 minutes (žr. 3.32 pav.). Plokštelėje esančio superkondensatoriaus talpa yra 0,1 F ir jis gali išlaikyti iki 5 V įtampos. Prijungus 5 k Ω apkrovą išėjime, galima išlaikyti pastovią įtampą kondensatoriuje, jei įvesties įtampa yra bent 650 mV. Iškvėvimui prijungus 1 k Ω apkrovą, kondensatoriuje esant 3,3 V, visiškai jo iškvėvimas truko 8,43 minutes.



3.33 pav. Nustatoma minimali įvesties įtampa į vertinimo plokštę



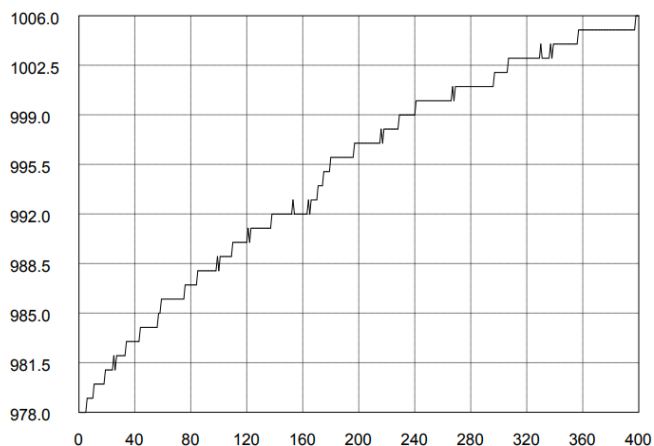
3.34 pav. Signalo netolygumai pilnai įkrovus superkondensatorių



3.35 pav. Vertinimo plokštėje esantis superkondensatorius pasiekia 3,3 V įtampą

Atliekant superkondensatoriaus įkrovimą buvo pastebėta (3.34 pav.) kaip iš lygintuvo išeinantis signalas yra iškraipomas bei viršūnė yra ribojama didėjant superkondensatoriaus įtampai.

Taip pat, buvo atliktas tyrimas, siekiant pamatyti įtampos kaupimo kiekius plokštėje, naudojant žmogaus kinetinę energiją. Generatorius buvo pritvirtintas prie riešo, žmogui bėgant bėgimo takeliu, kurio nustatytas greitis siekė 7 km/val. Rezultatas užfiksuotas naudojant DMM 506 multimetą, kuris fiksavo įtampos kitimus plokštėje kas 3 sekundes 400 kartų.



3.36 pav. Įtampos kitimas superkondensatoriuje bėgimo metu

Matavimas prasidėjo, kuomet plokštės kondensatoriuje jau buvo sukaupta 978 mV. Nuo šios atramos, bėgant 20 minučių, buvo sukaupta 28 mV, o tai yra 1,4 mV per minutę. Taip pat, buvo apskaičiuotas įtampos ir srovės vidurkiai patenkantys į plokštę. Įtampa siekė 143,17 mV, o srovė 0,21 mA. Taip galima apskaičiuoti galią, kuri siekia 0,03 mW. Per šį laiko tarpą galima apskaičiuoti kondensatoriuje sukaupią energiją taikant šią formulę:

$$W_c = 0,5 * C * (\Delta V)^2 \quad W_c = 0,5 * 0,1 * (0,028)^2 = 39,2 \mu J, \quad (12)$$

čia W_c - energija (J), C – Talpa (F), ΔV - įtampų skirtumas (V).

3.3. Eksperimentinio tyrimo rezultatų analizė

Tyrimo eiga parodė, kad keitiklio konstrukcijoje nereikia mažųjų ričių, nes jos neduoda didelės naudos ir yra nepakankamos išduoti norimą energiją. Būtent dėl to jos buvo pašalintos, taip sumažinant bendrą maketo svorį. Nuoseklus ričių jungimas nepasiteisino, nes tarp jų vyko priešfazė, kurios pavyko išvengti naudojant keturių kanalų oscilografą. Pagal jo duomenis buvo galima suprasti, kaip tarpusavyje reikėtų tinkamai sujungti rites. Tolimesniems energijos kiekio įvertinimams buvo sukonstruotas aparatas, kuris galėtų suteikti reguliuojamą ir stabilų judesį. Taip buvo galima išmatuoti gaunamą kintamos energijos amplitudę, esant skirtingiems apsisukimo greičiams. Naudojant magnetus ir skirtingo dydžio varžas yra gaunami rezultatai, kad naudojant vieną magnetą amplitudės dydis kito nuo 149 iki 405 mV. Norint, kad amplitudės dydis būtų didesnis, buvo nuspręsta naudoti antrąjį magnetą, kuris buvo uždėtas ant pirmojo. Tokiu būdu amplitudė šoktelėjo bene dvigubai: nuo 234 iki 806 mV. Naudojant platesnį apkrovos diapazoną, buvo apskaičiuota maksimali gaunama galia, esant didžiausiam sukimosi greičiui su 160 Ω apkrova, siekė 0,63 mW. Toliau buvo atliekamas lygintuvų tyrimas. Jo dėka buvo nuspręsta naudoti MOSFET lauko tranzistorių lygintuvą, kuris gali tinkamai dirbti prie žemesnės įvesties įtampos. Jis sudarytas iš dviejų n-kanalų SI2302 ir dviejų p-kanalų SI2377 MOSFETŲ, o išėjime lygiagrečiai prijungtas 1 μF kondensatorius. Įtampos kaupimui pasirinkta naudoti ADP5090-2-EVALZ energijos surinkimo plokštę. Sujungus visas dalis į vieną visumą, buvo atliekami tyrimai fiksuojami keturių kanalų oscilografu. Generuojama minimali įvesties įtampa į plokštę turi siekti bent 236 mV. Kai ši riba pasiekama, ADP5090-2-EVALZ vertinimo plokštė stiprina įvesties įtampą ir ją kaupia esančiame superkondensatoriuje. Naudojant minimalią nustatytą įtampą, visiškai iškrauto kondensatoriaus įkrovimas iki 3,3 V trunka 145 minutes. Galiausiai atliktas tyrimas, naudojant žmogaus kinetinę energiją. Generatorius pritvirtintas prie žmogaus riešo ir naudojamas bėgant bėgimo takeliu 7 km/val greičiu 20 minučių, sukaupia 28 mV, o tai yra 1,4 mV per minutę. Taip pat buvo apskaičiuotas įtampos ir srovės vidurkiai, patenkantys į plokštę. Įtampa siekė 143,17 mV, o srovė 0,21 mA. Taip galima apskaičiuoti galią, kuri siekia 0,03 mW. Per šį laiko tarpą galima apskaičiuoti kondensatoriuje sukauptą energiją, kuri siekė 39,2 μJ .

IŠVADOS

1. Apžvelgus literatūros šaltinius išsiaiškinta, kokiais būdais geriausia rinkti ir keisti elektrine žmogaus kinetinę energiją. Apžvelgti pjezoelektrinis, triboelektrinis bei elektromagnetinės energijos rinkikliai. Darbe buvo pasirinkta naudoti elektromagnetinės energijos rinkiklį dėl jo gebėjimo generuoti galią iš žemo dažnio svyravimų ir nesudėtingos konstrukcijos.
2. Atlikus lygintuvų apžvalgą bei tyrimą, dėl mažų laidumo nuostolių buvo pasirinkta naudoti MOSFET tranzistorių lygintuvą, nes diodų tiltelis dėl įtampos kritimo vidutiniškai praranda iki 40 %, esant žemai (iki 1 V) įvesties įtampai.
3. Sukonstruotas elektromagnetinio keitiklio maketas, kurio išėjimo įtampos amplitudė siekė 585 mV, esant 252 rpm magneto sukimosi greičiui, naudojant 500 Ω apkrovą. Prijungus MOSFET lygintuvą, bėgant 7 km/val., pasiekta 143,17 mV išėjimo įtampa, o srovė 0,21 mA.
4. Energijos surinkimui ir panaudojimui apžvelgtos vertinimo plokštės, kurias ištyrus buvo nuspręsta naudoti ADP5090-2-EVALZ. Bėgant 20 minučių, plokštės 0,1 F talpos superkondensatoriaus įtampa pakilo 28 mV, superkondensatoriuje sukaupta energija siekė 39,2 μ J.
5. Nors suprojektuotas generatorius nesugebėjo sukurti pakankamos galios, kad būtų galima visiškai ir nepriklausomai įkrauti nešiojamuosius elektroninius prietaisus, eksperimento rezultatai suteikia vertingų įžvalgų apie energijos surinkimo iš žmogaus judesių galimybes. Superkondensatoriaus kaupiama įtampa rodo, kad konstrukciją galima toliau tobulinti ir optimizuoti. Šios išvados gali būti naudingos būsimiems moksliniams tyrimams ir plėtrai dėvimųjų technologijų ir energijos surinkimo srityje.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- Choi, Y. M., Lee, M. G., & Jeon, Y. (2017). Wearable biomechanical energy harvesting technologies. In *Energies* (Vol. 10, Issue 10). MDPI AG.
<https://doi.org/10.3390/en10101483>
- Devices, A. (n.d.). *Ultralow Power Boost Regulator with MPPT and Charge Management*. www.analog.com
- Fan, K., Cai, M., Liu, H., & Zhang, Y. (2019). Capturing energy from ultra-low frequency vibrations and human motion through a monostable electromagnetic energy harvester. *Energy*, 169, 356–368. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.053>
- Fan, K., Hao, J., Wang, C., Zhang, C., Wang, W., & Wang, F. (2021). An eccentric mass-based rotational energy harvester for capturing ultralow-frequency mechanical energy. *Energy Conversion and Management*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114301>
- Felipe Gomez, A., Ricardo Arbulú, M. S., Pablo Franco, J. R., & David Martínez, J. (n.d.). *Comparison of Rectifier Circuits for Energy Harvesting Systems Comparación de Circuitos Rectificadores para Sistemas de Energy Harvesting*.
- Halim, M. A., Rantz, R., Zhang, Q., Gu, L., Yang, K., & Roundy, S. (2018). An electromagnetic rotational energy harvester using sprung eccentric rotor, driven by pseudo-walking motion. *Applied Energy*, 217, 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.093>
- Huang, M., Li, Y., Feng, X., Tang, T., Liu, H., Chen, T., & Sun, L. (2021). A magnetic-coupled nonlinear electromagnetic generator with both wideband and high-power performance. *Micromachines*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/mi12080912>
- Jaziri, N., Boughamoura, A., Müller, J., Mezghani, B., Tounsi, F., & Ismail, M. (2020a). A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications. In *Energy Reports* (Vol. 6, pp. 264–287). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.12.011>
- Jaziri, N., Boughamoura, A., Müller, J., Mezghani, B., Tounsi, F., & Ismail, M. (2020b). A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications. In *Energy Reports* (Vol. 6, pp. 264–287). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.12.011>
- Khushboo, & Azad, P. (2020). Design and Analysis of a Synchronized Interface Circuit for Triboelectric Energy Harvesting. *Journal of Electronic Materials*, 49(4), 2491–2501. <https://doi.org/10.1007/s11664-020-07940-2>
- Liu, H., Hou, C., Lin, J., Li, Y., Shi, Q., Chen, T., Sun, L., & Lee, C. (2018). A non-resonant rotational electromagnetic energy harvester for low-frequency and irregular human motion. *Applied Physics Letters*, 113(20). <https://doi.org/10.1063/1.5053945>
- Magnetic Properties of Dislocations*. (n.d.).
- Mi, J., Li, Q., Liu, M., Li, X., & Zuo, L. (2020). Design, modelling, and testing of a vibration energy harvester using a novel half-wave mechanical rectification. *Applied Energy*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115726>
- Muret, P., Volpe, P. N., Tran-Thi, T. N., Pernot, J., Hoarau, C., Omnès, F., & Teraji, T. (2011). Schottky diode architectures on p-type diamond for fast switching, high forward current density and high breakdown field rectifiers. *Diamond and Related Materials*, 20(3), 285–289. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2011.01.008>
- Niroomand, M., & Foroughi, H. R. (2016). A rotary electromagnetic microgenerator for energy harvesting from human motions. *Journal of Applied Research and Technology*, 14(4), 259–267. <https://doi.org/10.1016/j.jart.2016.06.002>
- Rosa, M., & De Marqui Junior, C. (2014). Modeling and analysis of a piezoelectric energy harvester with varying cross-sectional area. *Shock and Vibration*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/930503>

- Technology Corporation, L. (n.d.). *DC2509A - Gleanergy Multi-Source Energy Harvesting Demo Board with Battery Chargers and Life-Extenders for Use with DC2321A Dust Demo Board – No Transducers*. <http://www.linear.com/demo/DC2509A>
- Ug-. (n.d.). *ADP5090-2-EVALZ User Guide Evaluation Board for the ADP5090 Demonstration Platform for Energy Harvesting*. www.analog.com
- Wang, L., Fei, Z., Qi, Y., Zhang, C., Zhao, L., Jiang, Z., & Maeda, R. (2022). Overview of Human Kinetic Energy Harvesting and Application. In *ACS Applied Energy Materials* (Vol. 5, Issue 6, pp. 7091–7114). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acsaem.2c00703>
- Yan, B., Zhang, C., & Li, L. (2018). Magnetostrictive energy generator for harvesting the rotation of human knee joint. *AIP Advances*, 8(5). <https://doi.org/10.1063/1.5007195>
- Yilmaz, M. (n.d.). *Passive Full-Wave MOSFET Rectifiers for Electromagnetic Harvesting*.
- Zhao, C., Yang, Y., Upadrashta, D., & Zhao, L. (2021). Design, modeling and experimental validation of a low-frequency cantilever triboelectric energy harvester. *Energy*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118885>