



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

Domantas Kaminskas

BEL Aidžių Energijos Perdavimo Sistemų Tyrimas
RESEARCH OF WIRELESS POWER TRANSMISSION SYSTEMS

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX048

Automatinių sistemų specializacija

Elektros inžinerija studijų kryptis

Vilnius, 2022

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas



(Parašas)

Sonata Tolvaišienė

(Vardas, pavardė)

(Data)

Domantas Kaminskas

BEL Aidžių energijos perdavimo sistemų tyrimas
RESEARCH OF WIRELESS POWER TRANSMISSION SYSTEMS

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)

2022-05-26

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

dr. Aušra Žemienė

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

(Parašas)

(Data)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

Elektros inžinerijos studijų kryptis

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 6211EN048

Automatinių sistemų specializacija

TVIRTINU

Katedros vedėjas



(Parašas)

Sonata Tolvaišienė

(Vardas, pavardė)

(Data)

**MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO
UŽDUOTIS**

2020-11-27 Nr. 3

Vilnius

Studentui (ei): Domantui Kaminskui
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Belaidžių energijos perdavimo sistemų tyrimas

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2022 m. gegužės 29 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

IVADAS.

1. LITERATŪROS ANALIZĖ.

1.1. Belaidžių energijos perdavimo sistemų aktualumas.

1.2. Belaidžių energijos perdavimo sistemų lyginamoji analizė.

1.3. Belaidės energijos perdavimo efektyvumo gerinimo būdai.

2. TEORINIAI TYRIMAI.

2.1. Indukcinės belaidės energijos perdavimo sistemos atstojamoji schema.

2.2. Funkcinė schema.

2.3. Imitaciniai indukcinės belaidės energijos perdavimo sistemos tyrimai.

2.4. Modeliavimo rezultatai.

3. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI.

3.1. Tyrimų maketo schema.

3.2. Pasirinktų komponentų analizė.

3.3. Perduodamos energijos priklausomybės nuo atstumo tyrimas.

3.4. Perduodamos energijos priklausomybės tyrimas esant kliūtims.

3.5. Tyrimas naudojant žeminamąjį keitiklį.

3.6. Įtampos pokyčio tyrimas su realiaja induktyviaja apkrova.

3.7. Ritės deformacijos įtakos tyrimas.

3.8. Efektyvumo gerinimo būdai.

3.9. Ričių parametrų priklausomybė nuo dažnio.

IŠVADOS.

LITERATŪROS SĄRAŠAS.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai: dr. Aušra Žemienė

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

Vadovas



(Parašas)

doc. dr. Dainius Udris

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

Užduotį gavau



(Parašas)

Domantas Kaminskas

(Vardas, pavardė)

2020-11-27

(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Elektronikos fakultetas
Elektros inžinerijos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Automatikos** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas **Belaidžių energijos perdavimo sistemų tyrimas**

Autorius **Domantas Kaminskas**

Vadovas **Dainius Udris**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe analizuojamas belaidis energijos perdavimas. Pagrindinės darbo dalys: literatūros apžvalga, teoriniai bei eksperimentiniai tyrimai. Taikyta tyrimo metodika apžvelgiama teorinių bei eksperimentinių tyrimų skyriuose. Eksperimentiniam tyrimui pagamintas demonstracinis modelis. Gaminyje siekiama atskleisti pagrindines energijos perdavimo savybes, tokias kaip veikimo principą, siunčiamą energijos nuotolį, efektyvumą, patirtus nuostolius ir atliekant nestandartinius spendimus išnagrinėti gautus rezultatus. Taip pat nagrinėjama dažnio priklausomybė nuo veikimo atstumo, dažnio įtaka sistemai ir veikimo efektyvumui. Svarbus eksperimentas įvedant trikdį ir elektronikos komponentų temperatūros pokyčio stebėjimas.

Darbą sudaro 5 dalys: įvadas, teorinė dalis, tiriamoji dalis, išvados, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis 68 p. teksto be priedų, 61 iliustracijų, 12 lentelių, 12 bibliografinių šaltinių.

Prasminiai žodžiai: Belaidis energijos perdavimas, dažnis, trikdys, temperatūra.

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 Wireless Power Transmission Systems
-------	---

Author Domantas Kaminskas

Academic supervisor	Dainius Udris
---------------------	----------------------

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The final master's thesis analyses wireless energy transmission. The main parts of the work: literature review, theoretical and experimental research. The applied research methodology is reviewed in the sections of theoretical and experimental research. A demonstration model was developed for the experimental study. The aim of the product is to reveal the main characteristics of energy transmission, such as the principle of operation, the distance of energy sent, the efficiency, the losses incurred and to examine the results obtained by making non-standard decisions. The frequency dependence of the operating distance, the influence of the frequency on the system and the operating efficiency are also examined. An important experiment in introducing a fault and monitoring the temperature change of electronic components.

The work consists of 5 parts: introduction, theoretical part, research part, conclusions, references.

Thesis consists of: 68 p. text without appendixes, 61 pictures, 12 tables, 12 bibliographical entries.

Keywords: Wireless power transmission, frequency, interference, temperature.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto
egzaminų sesijų ir baigiamųjų darbų
rengimo bei gynimo organizavimo tvarkos
aprašo
2 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Domantas Kaminskas, 20200655

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Automatika, AUSfm-20

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2022 m. gegužės 23 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Belaidžių energijos perdavimo sistemų tyrimas“ patvirtintas dekanų potvarkiu Nr. , yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parinkant 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).


(Parašas)

Domantas Kaminskas
(Vardas ir pavardė)

TURINYS

PAVEIKSLŲ ŠARAŠAS	9
LENTELIŲ ŠARAŠAS	11
SANTRUMPOS	12
ĮVADAS.....	13
1. LITERATŪROS ANALIZĖ.....	15
1.1. Belaidžių energijos perdavimo sistemų aktualumas	15
1.1.1.. Belaidės energijos perdavimo sistemos atsiradimo istorija	15
1.1.2. Belaidžio maitinimo perdavimo standartai	16
1.1.3. Elektromagnetinė indukcija	16
1.1.4. Ryšys tarp ričių	18
1.1.5. Belaidės energijos perdavimo sistema.....	18
1.1.6. Belaidės energijos pritaikymo pavyzdžiai	19
1.2. Belaidžių energijos perdavimo sistemų lyginamoji analizė	26
1.2.1. Energijos perdavimas mikrobangomis	26
1.2.2. Indukcinis energijos perdavimas	27
1.2.3. Talpuminis galios perdavimas	27
1.2.4. Lazerinis energijos perdavimas	28
1.2.5. Akustinis energijos perdavimas	29
1.2.6. Magnetinio rezonanso indukcijos pagrindu veikiantis belaidis energijos perdavimas	30
1.2.7. Belaidžių perdavimo sistemų klasifikacijų palyginimas	32
1.3. Belaidės energijos efektyvumo gerinimo būdai	34
2. TEORINIAI TYRIMAI	36
2.1. Indukcinės belaidės energijos perdavimo sistemos atstojamoji schema	36
2.2. Funkcinė schema	39
2.3. Imitaciniai indukcinės belaidės energijos perdavimo sistemos tyrimai.....	39
2.4. Modeliavimo rezultatai	41
3. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI.....	44
3.1. Tyrimų maketo schema.....	44
3.2. Pasirinktų komponentų analizė	45
3.3. Perduotos energijos priklausomybės nuo atstumo tyrimas.....	47
3.4. Perduodamos energijos priklausomybės tyrimas esant kliūtims	52
3.5. Tyrimas naudojant žeminamąjį keitiklį	53
3.6. Įtampos pokyčio tyrimas su realiąja induktyviąja apkrova	55

3.7. Ritės deformacijos įtakos tyrimas.....	56
3.8. Efektyvumo gerinimo būdai	57
3.9. Ričių parametrų priklausomybė nuo dažnio	60
IŠVADOS	65
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	66
PRIEDAI	69

PAVEIKSLŲ ŠARŠAS

1.0 pav. Struktūra elektromagnetinės indukcijos paremtos belaidžiu energijos perdavimu ...	17
1.1 pav. Struktūra laisvai sujungto transformatoriaus	17
1.2 pav. Elektromagnetinių ričių ryšys	18
1.3 pav. Belaidės energijos perdavimo sistema	19
1.4 pav. Belaidžio krovimo schema	20
1.5 pav. Belaidės energijos perdavimo sistemos pavyzdys	20
1.6.Pav. Realus belaidės energijos perdavimo sistemos vaizdas	21
1.7 pav. Talpinio sujungimo taikymas su robotine ranka	22
1.8 pav. Indukcinės perdavimo sistemos bėginis modelis	23
1.9 pav. Indukcinės perdavimo sistemos grindinis modelis	24
1.10 pav. Belaidės energijos įkrovimo modelis	25
1.2.1 pav. Belaidis energijos perdavimas naudojant mikrobangas	26
1.2.2 pav. Indukcinės energijos sukūrimo pavyzdys	27
1.2.3 pav. Vieno poliaus demonstracinė jungtis (a), bipolinė talpinės jungties demonstracija (b)	28
1.2.4 pav. Antžeminė demonstracija naudojant 200 m vertikalų lazerinį BEP (konceptualus piešinys)	29
1.2.5 pav. Akustinio perdavimo pavyzdys	30
1.2.6 pav. Magnetinės indukcijos veikimo pavyzdys	31
1.2.7 pav. $L - C$ grandinė	31
1.2.8 pav. BEP sistemų klasifikacija.	32
1.2.9 pav. BEP sistemų 2019 m. naudingumo skritulinė diagrama.	34
1.3.1 pav. Daugiasluoksnis sukrautas induktorius — (a) vaizdas iš viršaus, — (b) 3D geometrija	35
1.3.2 pav. Spausdintų spiralinių ritinių poros dizainas	35
1.3.3 pav. Alternatyvios apvijos ritės geometrija ir jos srovės pasiskirstymas	35
2.1 pav. Belaidės energijos perdavimo atstojamoji schema	36
2.2 pav. Elektrinių ir magnetinių dydžių ryšio loginė seka	37
2.3 pav. Belaidės sistemos blokinė schema.	39
2.4 pav. BEP principinis modelis.	40
2.5 pav. Pirmoji perdavimo dalis — siųstuvas.	40
2.6 pav. Antroji dalis — imtuvas.	41
2.7 Pav. Maitinimo šaltinio įtampos oscilograma.	42

2.8 pav. Įtampos oscilograma — siųstuvas.	42
2.9 pav. Įtampos oscilograma — imtuvas.	43
2.10 pav. Pereinamasis vyksmas už diodų tiltelio.	43
3.1 pav. BEP — tyrimų maketo schema.	44
3.2 pav. Stabilus „555“ generatorius	45
3.3 pav. Standartinė reguliatoriaus prijungimo schema	45
3.4 pav. IRFZ44N tranzistoriaus standartinė schema	46
3.5 pav. Ritės 95 mm atstumu — siųstuvo pusė.	47
3.6 pav. Ritės mažiausiu atstumu — siųstuvo pusė.	48
3.7 pav. Ritės mažiausiu atstumu — imtuvo pusė.	48
3.8 pav. Tranzistoriaus darbinė temperatūra, kai atstumas 95 mm. Po 3 min.	49
3.9 pav. Tranzistoriaus darbinė temperatūra — atstumas 0 mm. Po 3 min.	49
3.10 pav. Įtampos priklausomybės nuo atstumo grafikas.	50
3.11 pav. Srovės priklausomybės nuo atstumo grafikas.	51
3.11.1 pav. Galios priklausomybė nuo atstumo grafikas.	52
3.12 pav. Kliūtis tarp siųstuvo ir imtuvo.	52
3.13 pav. Imtuvo pusė naudojant 2 mm kliūtį.	53
3.14 pav. Imtuvo pusė naudojant žeminantį keitiklį.	54
3.15 pav. Keitiklio panaudojimas praktiškai įkraunant telefoną.	54
3.16 pav. Įtampos oscilograma imtuve, arčiausiame taške.	55
3.17 pav. Įtampos oscilograma imtuve, toliausias atstumas kuriame sukasi ventiliatorius, 20 mm.	55
3.18 pav. Deformuotos siųstuvo ritės oscilograma.	56
3.19 pav. Atstumas tarp ričių 15 mm.	57
3.20 pav. Minimalus atstumas tarp ričių.	57
3.21 pav. Įtampos ir srovės priklausomybės grafikai nuo atstumo.	58
3.22 pav. Įtampos ir srovės priklausomybės grafikai nuo atstumo su ferito plokštelėmis.	58
3.23 pav. Bandymas naudojant ferito plokštes.	59
3.24 pav. Bandymas su prieš tai naudota 2 mm kliūtimi.	59
3.25 pav. LCR metras Hioki 3522-50.	60
3.26 pav. Atlikto tyrimo su LCR metru charakteristikos.	61
3.27 pav. Tyrimas LCR metru su artimu ryšiu tarp siųstuvo ir imtuvo.	63

LENTELIŲ ŠARAŠAS

1 lentelė. Naudingumo priklausomybė nuo perdavimo atstumo paremta 2019 metų duomenimis	33
2 lentelė. Matavimo priklausomybės keičiant atstumą tarp siūstuvo ir imtuvo ričių.	50
3 lentelė. Srovės priklausomybės keičiant atstumą tarp siūstuvo ir imtuvo ričių, siūstuvo pusė.	50
3.1 lentelė. Galio priklausomybė nuo atstumo.	51
4 lentelė. Atstumo keitimo duomenys naudojant didesnio skersmens rites.	57
5 lentelė. Atstumo keitimo duomenys su ferito plokštėmis.....	58
6 lentelė. Dažnio įtaka siūstuvo ritei.	60
7 lentelė. Dažnio įtaka imtuvo ritei.	61
8 lentelė. Dažnio įtaka siūstuvo ritei kartu su ferito plokšte.	62
9 lentelė. Siūstuvo charakteristikos	62
10 lentelė. Imtuvo pusės charakteristikos.....	63
11 lentelė. Siūstuvo ir imtuvo charakteristikos.....	63

SANTRUMPOS

BEP — belaidis energijos perdavimas (angl. *wireless power transmission* — WPT);

NS — nuolatinė srovė (angl. *direct current* — DC);

BEĮ — belaidis energijos įkrovimas (angl. *wireless power charging* — WPC);

RX — imtuvas (angl. *receiver*)

TX — siųstuvas (angl. *transmitter*)

AGP — akustinės galios perdavimas (angl. *acoustic power transmission* — APT)

TGP — talpinės galios perdavimas (angl. *capacitive power transmission* — CPT)

IGP — indukcinės galios perdavimas (angl. *inductive power transmission* — IPT)

LGP — lazerinės galios perdavimas (angl. *laser power transmission* — LPT)

MREP — magnetinio rezonanso energijos perdavimas (angl. *magnetic resonance power transmission* — MRPT)

MGP — mikrobanginis galios perdavimas (angl. *microwave power transmission* — MWPT)

IVADAS

Belaidės energijos perdavimo sistemos yra sparčiai besivystanti technologija ir yra vienas iš pagrindinių nuolatinių elektrotechnikos, elektronikos ir telekomunikacijos mokslinių tyrimų objektų. Šios sistemos gali būti taikomos daugelyje sričių, įskaitant automobilius, energijos gamybą, energijos kaupimą, biologinę mediciną ir pramonę.

Belaidis energijos perdavimas paremtas orinio transformatoriaus principu be magnetolaidžio. Naudojant elektromagnetinę indukciją elektros srovę galima perduoti iš vienos ritės į kitą. Pirminėje ritėje elektros energija virsta kintamu magnetiniu lauku. Kintamas magnetinis laukas indukuoja antrinę ritę, kurioje pradeda tekėti elektros srovė. Taip belaidžiu būdu energija pasiekia imtuvą.

Pagrindinis belaidžių energijos perdavimo sistemų trūkumas yra mažas siunčiamos energijos nuotolis.

Darbo objektas — belaidis energijos perdavimas.

Baigiamojo darbo tikslas — suprojektuoti belaidę energijos perdavimo sistemą, atliekant detalią apžvalgą bei atlikti efektyvumo tyrimus.

Baigiamojo darbo uždaviniai:

1. Atlikti mokslinės literatūros šaltinių apžvalgą ir analizę, kuriuose nagrinėjamos panašaus pobūdžio sistemos ir jų komponentai.
2. Išanalizuoti indukcinės belaidės energijos perdavimo sistemos matematinį modelį.
3. Suprojektuoti imitacinį indukcinės belaidės energijos perdavimo sistemos modelį „Mathlab Simulink“ programiniame pakete.
4. Suprojektuoti realios sistemos prototipą.
5. Naudojantis sukurta sistema atlikti eksperimentinius tyrimus.
6. Išnagrinėti privalumus bei trūkumus.
7. Suformuoti išvadas.

Problema. Šiomis dienomis, belaidis energijos perdavimas yra sparčiai tobulėjanti energijos perdavimo technologija, kurią dar 1899 metais išradėjas Nikola‘as Tesla. Net daugiau nei po 100 metų, jo belaidės energijos perdavimo idėja buvo įgyvendinta, tačiau tikriausiai ne tokiais metodais, kokius jis įsivaizdavo. Viena iš opiausių iki šių dienų išlikusi šiuolaikinės vartotojiškos visuomenės problema yra energijos perdavimo efektyvumo užtikrinimas. Ši tema yra nagrinėjama įvairių mokslo sričių tyrimuose. Keliamas klausimas, ar galima pagerinti belaidžio energijos perdavimo efektyvumą?

Temos naujumas:

Naujai pažvelgti į šį klausimą verčia pastaruoju metu didėjanti paklausa belaidėms technologijoms. Nemažai pramonės šakų naudoja tokias technologijas, siekdamos pakeisti kitus įprastus sprendimus, pavyzdžiui, kabelių grandines ar laidininkus. Šios technologijos aktualios ir tais atvejais, jei vengiama įtampos lankų arba jei prieiga yra labai ribota.

Temos aktualumas:

Belaidžio energijos perdavimo technologija gali panaikinti laidų ir baterijų naudojimą, taip padidindama elektroninio prietaiso mobilumą, patogumą ir saugumą visiems vartotojams. Belaidis energijos perdavimas yra naudingas maitinant elektrinius prietaisus, kai jungiamieji laidai yra nepatogūs, pavojingi arba neįmanoma perduoti energijos laidais.

Tyrimo metodai:

1. Mokslinės literatūros palyginamoji analizė ir apibendrinimas.
2. Situacinė analizė.
3. Matematinio modelio analizė.
4. Vizualinė apžiūra.
5. Eksperimentas.
6. Energijos naudingumo analizė.

Hipotezės:

1. Indukcinėje energijos perdavimo srityje, didinant atstumą tarp imtuvo ir siųstuvo, prarandama nemaža dalis energijos.
2. Belaidės energijos veikimui daro įtaką kliūtis.
3. Integruojant ferito diskus pagerėja perduotos energijos naudingumas.
4. Deformuotos indukcinės ritės nepagerina perduotos energijos kiekio.
5. Pridedant, bet kokios formos apkrovą sparčiai mažėja energijos perduodamo atstumo santykis tarp imtuvo ir siųstuvo.

Darbo struktūra: įvadas, teorinė dalis, kurioje analizuojama belaidžio energijos perdavimo samprata bei kitų energijos perdavimo sistemų analizė; empirinė dalis, kurioje atliekamas tyrimas taikant įvairius metodus, siekiant įrodyti energijos priklausomybes nuo esamo atstumo tarp siųstuvo ir imtuvo, veikimo dažnio, išvados.

1. LITERATŪROS ANALIZĖ

Šioje dalyje pateikiama belaidės energijos atsiradimo istorija, paaiškinama, kas tai yra, suteikiamas pirminis vaizdas apie belaidės energijos sistemas. Taip pat aptariamos belaidės energijos sistemos, jos palyginamos tarpusavyje ir remiantis perdavimo atstumu išsiaiškinama, kuri sistema yra naudingiausia.

1.1. Belaidžių energijos perdavimo sistemų aktualumas

Šioje skiltyje aptariami nekontaktiniai elektros perdavimo būdai. Literatūroje yra žinoma, kad pagal perdavimo principus, belaidės energijos perdavimo (BEP) sistemos gali būti klasifikuojamos kaip elektromagnetinė indukcija, magnetinis rezonansas, elektrinis sujungimas, elektrinis rezonansas ir mikrobanginis perdavimas. Remiantis siųstuvo / imtuvo skirtumais BEP sistemos galėtų būti klasifikuojami kaip indukcinė jungtis, talpinė jungtis, magneto dinaminė jungtis, mikrobanginės ir lazerinės sistemos. Pagal perdavimo atstumą BEP sistemos galėtų būti klasifikuojami kaip artimojo lauko metodai ir tolimojo lauko metodai. Artimojo lauko energija, dar vadinama nespinduliuojančiu regionu, periodiškai teka pirmyn ir atgal tarp spinduliuotės šaltinio ir erdvės aplink spinduliuotės šaltinį. Tolimojo lauko energija, dar vadinama spinduliavimo sritimi, šioje srityje yra atskirta nuo radiatoriaus ir skleidžiama į išorę elektromagnetinių bangų pavidalu. Indukcinis sujungimas ir talpinis sujungimas yra artimojo lauko nespinduliuojantys metodai, mikrobangos ir lazeriai yra tolimojo lauko spinduliavimo metodai [35].

1.1.1. Belaidės energijos perdavimo sistemos atsiradimo istorija

Belaidis perdavimas elektros tiekimui suteikia galimybę pasiekti didelę pažangą pramonėje ir taikomuosiose programose, kurios priklauso nuo fizinio jungties kontakto. Toks kontaktas savo ruožtu gali būti nepatikimas ir sukelti gedimą. Belaidės elektros energijos perdavimą pirmą kartą pademonstravo Nikola‘as Tesla 1899 m.

Energijos perdavimas mikrobangomis buvo vykdomas dešimtmečius. Tiesą sakant, dar 1891 m. Nikola‘as Tesla nusprendė tiekti energiją belaidžiu būdu. Tai paskatino jį sukurti „Tesla“ ritę — pirmąją sistemą, galinčią belaidžiu būdu perduoti energiją. Jis išbandė belaidį energijos perdavimą naudodamas Tesla rites radijo dažnio rezonansiniam transformatoriui. Jam pavyko pagaminti aukštos įtampos, aukšto dažnio kintamąsias sroves, kurios leido belaidžiu būdu perduoti energiją mažais atstumais. Deja, Tesla‘ai niekada nesisekė toliau plėtoti savo ritės technologijos. Tačiau jo išradimai visiškai pakeitė elektros supratimo ir naudojimo būdą [3].

Tačiau tik per pastarąjį dešimtmetį technologija buvo naudojama tiek, kad ji suteikia realios ir apčiuopiamos naudos dabartinio pasaulio taikymams. Svarbu pabrėžti, plataus vartojimo elektronikos

rinkos rezonansinės belaidės energijos sistemos sukūrimas parodė, kad indukcinis įkrovimas suteikia naujų patogumo lygių milijonams kasdienių prietaisų [3].

1.1.2. Belaidžio maitinimo perdavimo standartai

Šiais laikais, kai kiekviena įmonė kuria savo produkciją ir įkrovimo stoteles, visiems kūrėjams reikia bendrų standartų, kad vartotojas galėtų pasirinkti geriausią iš pateiktų. Būtinų standartų laikosi visos pramonės šakos, dirbančios kuriant BEP sistemas. Pavyzdžiui, kuriant belaidį įkroviklį naudojami šie standartai: [5]

„Qi“ standartai :

- technologijos — indukcinės, rezonansinės;
- maža galia — 5 W;
- vidutinė galia — 15 W;
- dažnių diapazonas (110–205) kHz;

Belaidžio įkroviklio privalumai:

Belaidis įkroviklis yra labai naudingas įkraunant namų įrenginius (pvz., išmanusis telefonas, nešiojamas kompiuteris, „iPod“, ausinės ir kt.). Tai yra patogus, saugus ir efektyvus energijos perdavimo būdas be jokios terpės. Šio įrenginio privalumai tokie, kad tai nekenksmingas aplinkai, nekenkia ir nežaloja žmogaus ar gyvūnų. Tokiu įkrovikliu galima įkrauti net medicininius implantus, kurie pagerina gyvenimo kokybę, o pacientui nereikia jaudintis dėl maitinimo lizdo nusidėvėjimo [5].

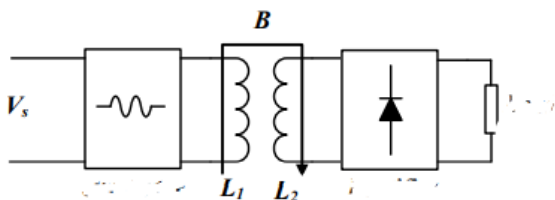
Belaidžio įkroviklio trūkumai:

Mažas efektyvumas ir daug energijos nuostolių. Kainuoja daugiau nei laidinis įkroviklis. Gedimą pašalinti sunku. Netinka didelio galingumo tiekimui. Energijos nuostoliai didėja esant apkrovai [5].

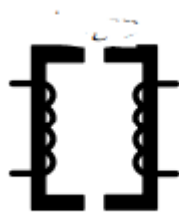
1.1.3. Elektromagnetinė indukcija

Elektromagnetinėje indukcijoje plačiausiai naudojamas įrenginys yra transformatorius, kur galia perduodama tarp tarpusavyje izoliuotų ričių per magnetinį lauką. Elektromagnetine indukcija pagrįstos BEP sistemos. Struktūros ir laisvai sujungtas transformatorius parodytas 1.0 ir 1.1 pav.

Pagal Ampero teoremą, kintamoji srovė, einanti per „L₁“, sukuria svyruojantį magnetinį lauką. Tada kintantis magnetinis laukas praeina per priėmimo ritę ir generuoja kintamosios srovės potencialą pagal Faraday'aus metodą, — indukcijos dėsnį. Srovė gali tiesiogiai valdyti kintamosios srovės apkrovą arba būti konvertuojama į nuolatinę srovę lygintuvu, kad būtų valdoma nuolatinė apkrova.



1.0 pav. Struktūra elektromagnetinės indukcijos paremtos belaidžiu energijos perdavimu [35]



1.1 pav. Struktūra laisvai sujungto transformatoriaus [35]

Elektromagnetinės indukcijos reiškinyje galėtų būti paašškintas remiantis 1 ir 2 MAXWELL lygtimis [35].

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (1)$$

čia $\mathbf{H}$ — magnetinio lauko stiprio išraiška, ∇ — vektorių žymėjimo skirtumas, $\mathbf{J}$ — srovės tankis. Išraiška rodo, kad kintantis elektrinis laukas sukuria magnetinį lauką.

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

čia $\mathbf{E}$ — elektromagnetinio lauko stiprio vektorius, $\mathbf{B}$ — magnetinio srauto tankio vektorius, parodyta, kad kintantis magnetinis laukas sukuria elektrinį lauką.

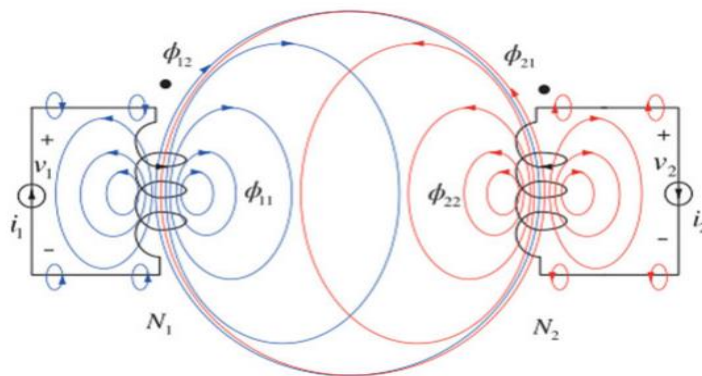
1.1.4. Ryšys tarp ričių

Indukcinės galios perdavimo sistemos analizė yra procesas, kai dviejų susietų ričių modeliavimas yra būtinas. Tokios sistemos pavyzdys pateiktas 1.2 paveiksle, poliškumas tarp ričių parodytas paveiksluose ir srovių apibrėžimas pirminė ir antrinė ritėse yra simetriškas. Yra dvi skirtingos sąlygos, kai yra sujungtos pirminės ritės su antrinės ritės tašku viršutinėje arba apatinėje pusėje. Ritė, kuri yra antrinė, srovės kryptis skiriasi, tačiau magnetinio srauto kryptis t.y. antrinė srovė ir visada yra priešinga pirminei magnetinei srauto kryptiai, pagal Lenco dėsnį. Be to, aiškinant vidinius elektromagnetinius procesus, formuluojama išvada, kad visos ritės yra laisvos nuo bet kokių parazitinių parametrų, taikant vienkartinio parametro metodą. Operacinės IPT dažnis yra pakankamai žemas, kad nereikėtų laikyti elektromagnetinio spinduliuotės ir perdavimo vėlavimo. Ritės gali būti be šerdies arba su šerdimis [35].

Pagal Ampero dėsnį magnetinis srautas susidaro iš srovės I_1 (1.2 pav.) Pirminį magnetinį srautą ϕ_1 galima padalyti į dvi dalis, magnetinis srautas, kertantis antrinę ritę ϕ_{11} ir nuotėkio srautas ϕ_{12} , tuo tarpu antrinėje ritėje susikertantis magnetinis srautas yra ϕ_{21} , o nuotėkio srautas yra ϕ_{22} . Uždelsimo efektas neskaiciuojamas sujungtos ritės modelyje. Tada galima gauti pirminės ir antrinės ritės įtampos lygtį pagal fizinę modelio ritės įtampą ir iš to galima nustatyti laiko išvedimą kuriamo magnetinio srauto pagal Faraday'aus dėsnį taip [35].

$$U_1 = N_1 (\phi_{11} + \phi_{12} - \phi_{21}) \quad (3)$$

$$U_2 = -N_2 (\phi_{21} + \phi_{22} - \phi_{12}) \quad (4)$$

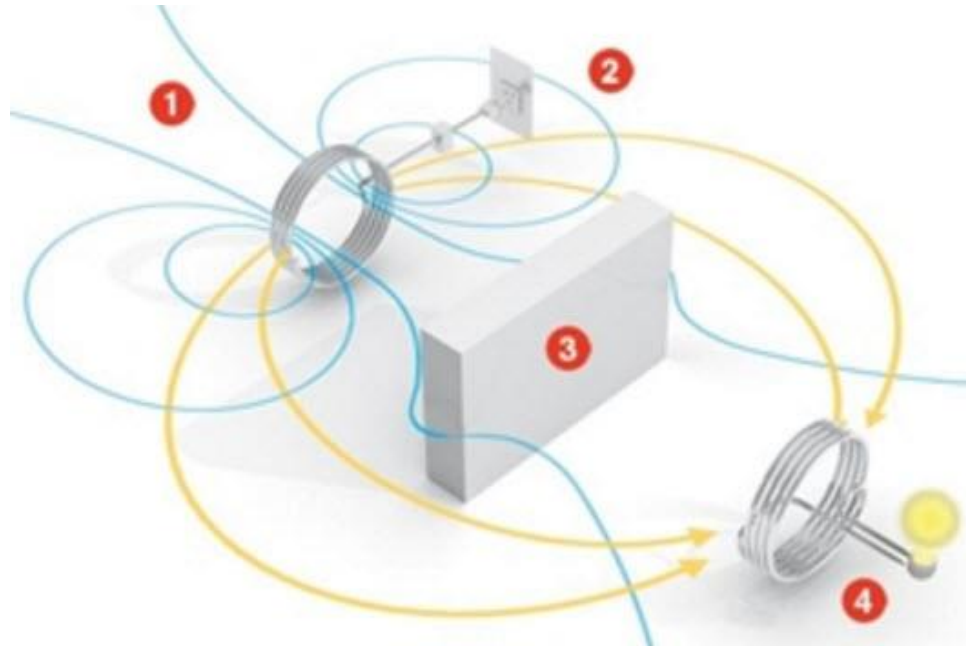


1.2 pav. Elektromagnetinių ričių ryšys [35]

1.1.5. Belaidės energijos perdavimo sistema

Maitinimo įtampa konvertuojama į kintamosios srovės signalą, kuris vėliau siunčiamas į siųstuvo ritės elektroninę grandinę. Srautas per dozatoriaus apviją, sukelia magnetinį lauką ir jis gali plisti į imtuvo ritę, kuri yra pakankamai arti. Tada magnetinis laukas generuoja srovę, tekančią per

priimančiojo prietaiso apviją. Procesas, kuriuo energija paskirstoma tarp perdavimo ir priėmimo ritinių, vadinama magnetine arba rezonansine mova. Imtuvo grandinės srovė, tekanti imtuvo ritėje, konvertuojama į NS. Tada jis gali būti naudojamas prietaiso maitinimui. BEP modelio pavyzdys pateikiamas 1.3 paveiksle [21].

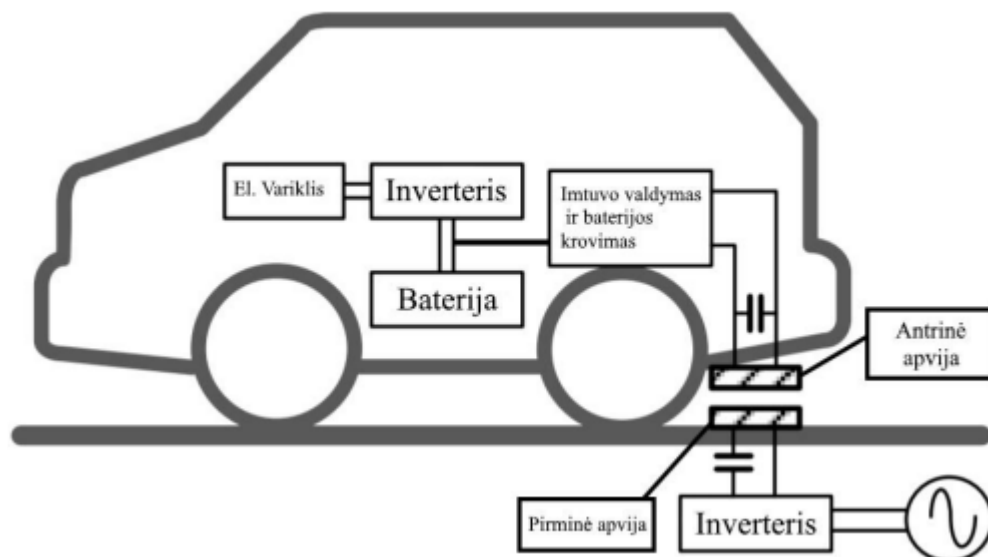


1.3 pav. Belaidės energijos perdavimo sistema [26]

1.1.6. Belaidės energijos pritaikymo pavyzdžiai

- **Belaidis įkrovimas (transporte):**

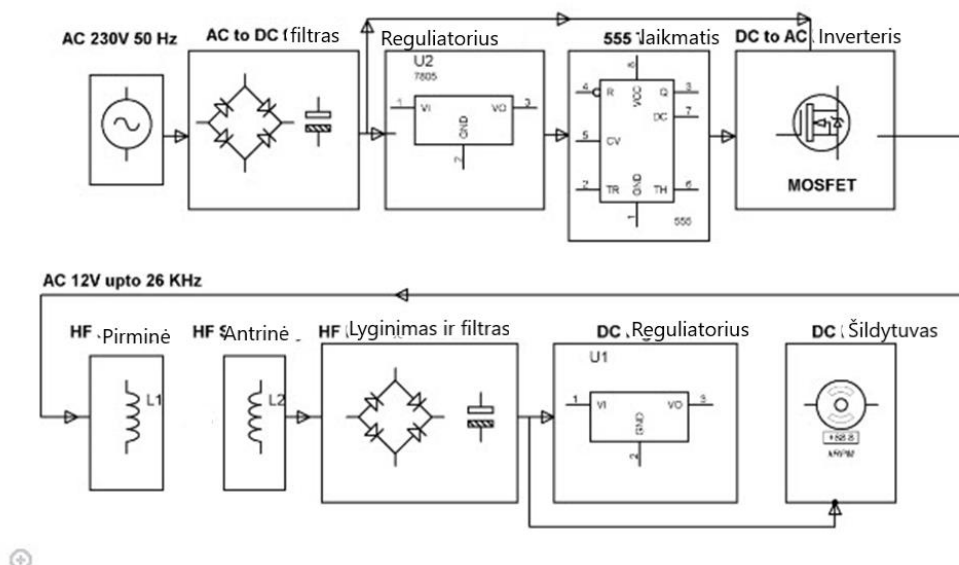
Belaidis įkrovimas sistema susideda iš dviejų komponentų: siųstuvo ir imtuvo. Siųstuvas generuoja kintamą srovę, kurią imtuvas belaidžiu būdu priima ir toliau elektros energiją tiekia į baterijos įkrovimo modulį. 1.4 pav. yra pateikta BEP įkrovimo sistema. Energija yra perduodama oru, magnetinio susijungimo būdu. Tiek imtuvas, tiek siųstuvas turi apvijas, kuriomis teka kintama elektros srovė. Šios apvijos yra pritvirtintos prie feritinės plokštės, kuri priverčia magnetinį srautą judėti belaidėje grandinėje [12].



1.4 pav. Belaidžio krovimo schema [12]

- **Buitinė elektronika:**

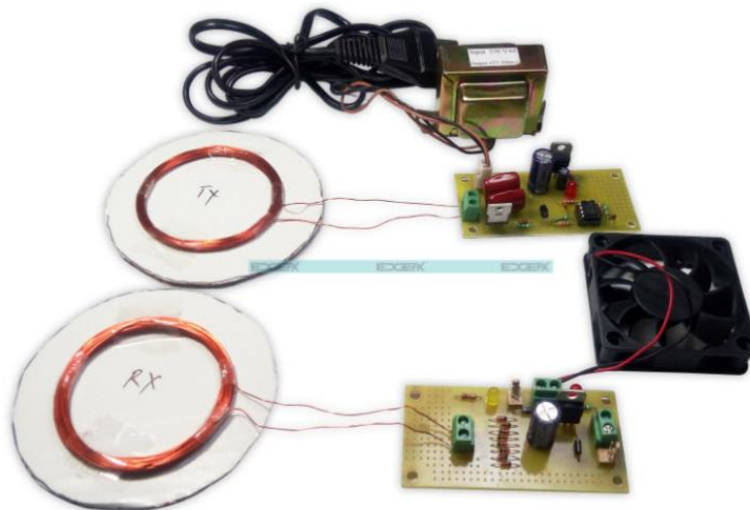
Pagrindinis šios sistemos tikslas yra sukurti belaidžio energijos perdavimo sistemą, kad būtų išvengta įprastų varinių kabelių ir laidų naudojimo.



1.5 pav. Belaidės energijos perdavimo sistemos pavyzdys [27]

Ši sistema sukurta naudojant grandinę, kuri keičia 230 V 50 Hz kintamą įtampą į 12 V kintamą aukšto dažnio įtampą. Sistemos išvestis tiekama į sureguliuotą ritę, kuri yra oro šerdies transformatoriaus pagrindinė dalis. Mažoji ritė sukuria 12 voltų aukšto dažnio įtampą.

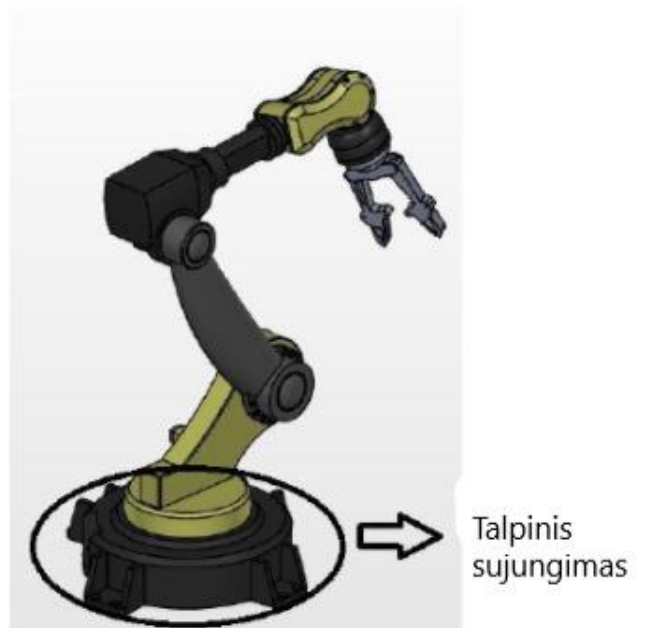
Šį metodą galima naudoti keliose programose, pavyzdžiui, belaidžiu būdu įkrauti įtaisus kaip mobilusis telefonas, nešiojamojo kompiuterio baterija, „iPod“, laikrodžius. Be to, tokio tipo įkrovimas kelia kur kas mažesnę elektros smūgio riziką, nes jis izoliuotas galvaniskai [27].



1.6 pav. Realus belaidės energijos perdavimo sistemos vaizdas [27]

- **Pramonės inžinerija:**

Remiantis praėjusio dešimtmečio plėtra, plačiai naudojamas talpinis susiejimo metodas. Pastaraisiais metais visuotinis talpinis energijos perdavimo metodas yra plačiai išplėtotas dėl biologinio signalo, biomedicinos įgyvendinimo, belaidžio įkroviklio schemas, stiprintuvų, šviesos diodų, elektrinių transporto priemonių, robotų taikymo. Talpinių jungčių technika naudojama įvairiai. Talpinių jungčių metodai gali būti labai naudingas 4.0 pramonei. Pavyzdžiui, visiškai automatizuotų sistemų maitinimas gali būti užtikrinamas talpine jungtimi, siekiant atsikratyti vienos sistemos, kurią galima lengvai deformuoti. Svarbiausias talpinio sujungimo metodo privalumas yra tas, kad elektrinio lauko linijos naudojamos, kai energija perduodama kitai kondensatoriaus plokštei. Todėl, skirtingai nuo magnetinio lauko, elektrinio lauko linijos netrukdo visiškai automatizuotai įterptosios sistemos stabilumui. Be to, duomenis galima perduoti tuo pat metu, kai energija perduodama tuo pačiu dažniu. Kabelio jungtis kenčia nuo ašinio sukimosi ar robotų dalių judėjimo. Talpinis sujungimo metodas gali būti labai naudingas robotų rankos sekcijoms. Remiantis prieš tai pateikta informacija, talpinės plokštės duomenis ir galią gali perduoti tuo pačiu dažniu, todėl, jei duomenų ir energijos poreikiui bus taikoma talpiosios galios perdavimo (TGP) technika, šios sistemos būtų ekonomiškios, kompaktiškos ir patikimos [8].



1.7 pav. Talpinio sujungimo taikymas su robotine ranka [8]

Taikant talpinio sujungimo techniką robotizuotoje rankos architektūroje, užduotis nenutruks dėl pažeistų laidų. Be to, elektros lauko linijos netrukdys sistemų stabilumui, kai duomenys ir galia yra perduodama.

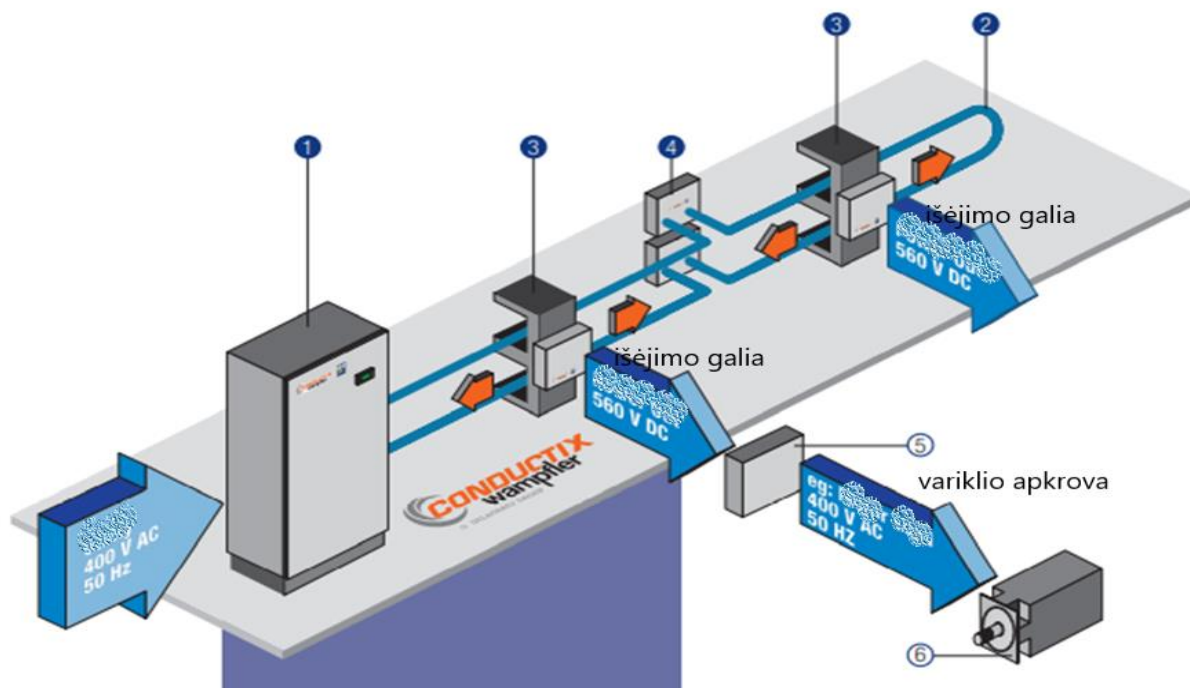
Yra žinoma, kad belaidės energijos perdavimo poreikiai plečiasi ir tampa vis patrauklesni, taikant „Industry 4.0“ programas. Galios valdymas naudojant TGP sistemas leidžia surinkti energiją iš įvairių šaltinių, tokių kaip „Piezo“ elementų arba variklio vibracijos. Todėl visi talpinio sukabinimo metodai plačiai naudojami dirbtinių, intelektualiųjų, sistemų energijos tiekimo technologijoms. Šios belaidės sistemos yra labai kompaktiškos ir patikimos 4.0 pramonės šakoms [8].

- **Modelių inžinerija:**

Bėgių modelis:

Taikant programas su važiuojančiais bėgių segmentais (jungikliais vienabėgėse elektrinėse sistemose), indukcinės galios perdavimo patirtis gali būti naudojama induktyviai tiekiant energiją tokiems bėgių ruožams kaip pademonstruota 1.8 paveiksle. Laidų grandinių ar kitų panašių sprendimų dėvėjimasis tampa antruoju pasirinkimu. Įgyvendinus indukcinės galios perdavimo idėją, tampa įmanoma maitinti vadinamąsias saugos zonas — priešais jungiklius ar keltuvus, kad galimas energijos perdavimas būtų tik tada, kai segmentas yra reikiamoje padėtyje. Norint tai suprasti, nereikia jokių papildomų kanalų ar išorinės kontrolės [4].

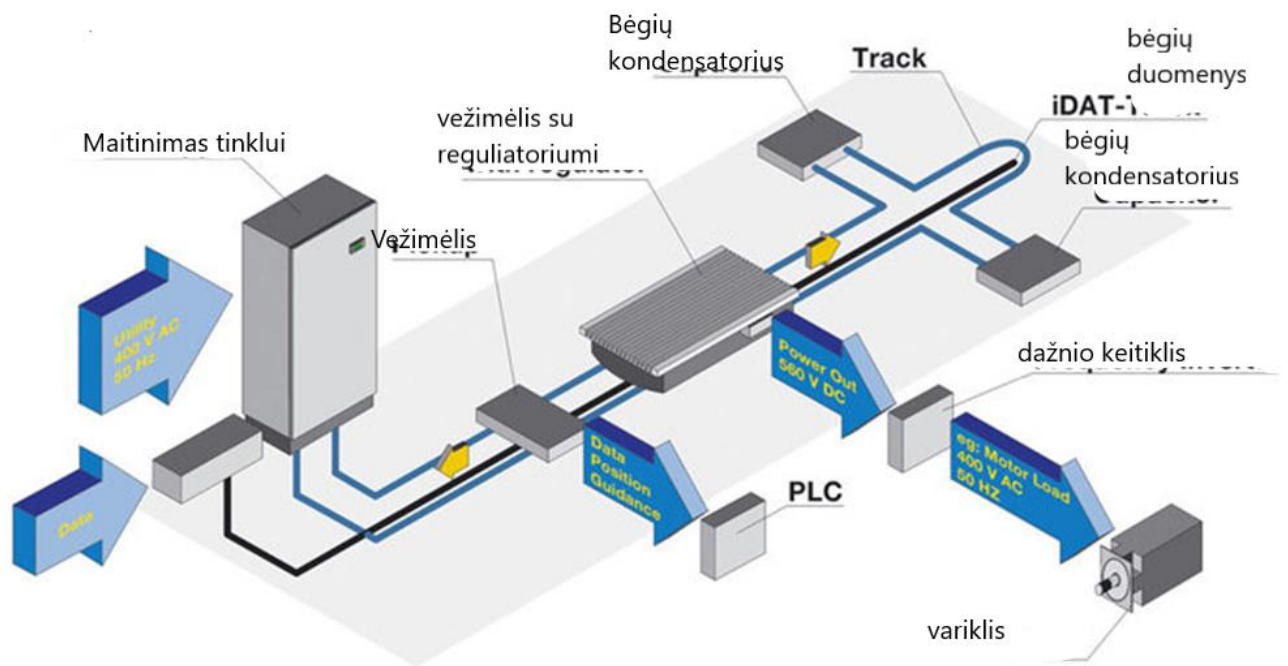
Yra žinoma, kad BEP taip pat gali pakeisti kitus įprastus sprendimus, pavyzdžiui, laidų grandines ar laidininkus bėgių ruožuose. BEP sprendimui yra tam tikrų reikalavimų, pavyzdžiui, jei vengiama įtampos lankų bėgių galuose arba jei prieiga po platformomis yra labai ribota [4].



1.8 pav. Indukcinės perdavimo sistemos bėginis modelis [4]

Grindų modelis:

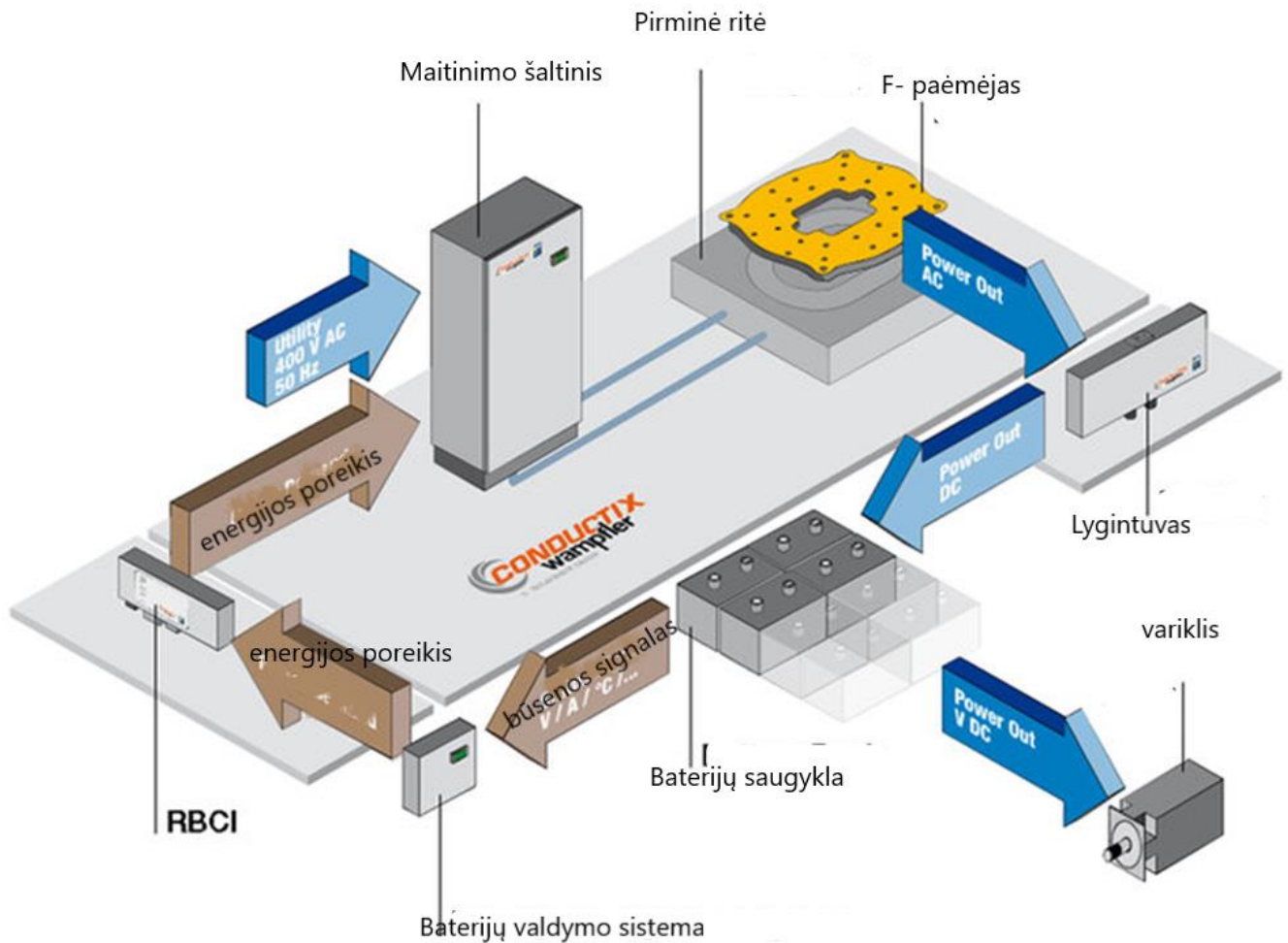
Paprastai pagrindinė „indukcinės galios perdavimo grindų“ sistemų funkcija yra tokia pati, kaip ir kitų „BEP sistemų. Tačiau reikia atsižvelgti į keletą papildomų ir specifinių aspektų. Kabelio kilpa turi būti įrengta taip, kad būtų užtikrintas visiškas transporto priemonių tiekimas visame važiavimo kelyje. Tokiu būdu įrengtas kabelių maršrutas, taip pat apibrėžia transporto priemonių važiavimo kelią. Naudojant „iDAT“ galima aptikti magnetinį lauką aplink kabelius ir pateikti valdymo signalą transporto priemonės valdikliui bei valdyti transporto priemonės judėjimą. Taip pat galima apibrėžti įvairius kelius. Jungikliai, perėjos ir kt. nėra problema. „Pikapą“ reikia tiesiog pastatyti taip, kad jis būtų pakankamai veikiamas magnetinio lauko. Tokios sistemos brėžinys pateikiamas 1.9 paveiksle [5].



1.9 pav. Indukcinės perdavimo sistemos grindinis modelis [5]

Įkrovimo modelis:

„Indukcinės galios perdavimas — (krovimas)“ yra indukcinė sukabinimo sistema, užtikrinanti automatizuotą, visiškai be intervencijos, efektyvų, akumuliatorių įkrovimą. Taip pat užtikrinamas įkrovimas visų rūšių transporto priemonėms, pramoniniams sunkvežimiams ir daugumai kitų panašių transporto priemonių. 1.10 paveiksle pavaizduotas BEP pramoninis įkrovimo modelis [6].



Wampfler“ IGP krovimo sistemos geometrija leidžia pagrindinei ritei ir imtuvui magnetinį lauką sulaikyti daugiausia magnetolaidžio oro tarpelyje. Kai transporto priemonė yra ne įkrovimo padėtyje, bėgių tiekimas išjungia pagrindinę ritę [6].

3. Veikimo principas:

Kiekvieną IGP krovimo sistemą sudaro dvi dalys: pirminės ir antrinės, kurios yra magnetiniu būdu sujungtos, panašios į įprastą transformatorių. Pagrindinę konvejerio arba nejudančią pusę sudaro bėgių kelias ir viena ar daugiau pirminių ričių. Imtuvas, kuris taip pat yra transporto priemonės dalis, susideda iš vieno ar daugiau transporto priemonėje sumontuotų imtuvų ir lygintuvų. Skirtingai nuo įprasto transformatoriaus, kur siūstuvas ir imtuvas yra mechaniškai sujungiami, IGP įkrovimas yra laisvai sujungta sistema, veikianti su oro tarpu [6].

1.2. Belaidžių energijos perdavimo sistemų lyginamoji analizė

Šiame skyriuje pateikiami visi BEP būdai, išskiriant jų ypatybes ir pateikiant kiekvienos sistemos veikimo principus.

1.2.1. Energijos perdavimas mikrobangomis

Šis metodas naudoja „EMR“ mikrobangų spektrą, kad būtų suteikta galia įkrovai. 1.2.1 pav. pavaizduotas energijos perdavimas naudojant mikrobangas. Pirma, siūstuvas priima maitinimą iš maitinimo lizdo ar bet kurio kito stabilaus maitinimo šaltinio ir sureguliuoja šią kintamosios srovės galią iki reikiamo lygio. Tuomet perduodama galia suvartoja šio reguliuojamo maitinimo šaltinio energiją ir sukuria mikrobangas. Mikrobangos be jokių trukdžių keliauja oru, kad pasiektų imtuvą. Imtuve įrengiami atitinkami prietaisai, kurie priima šią mikrobangų spinduliuotę ir paverčia ją elektros energija. Ši konvertuota elektros energija yra tiesiogiai proporcinga mikrobangų spinduliuotės kiekiui, kurią pasiekia imtuvas. Tokiu būdu, pasiekiamas belaidis energijos perdavimas naudojant mikrobangų spinduliuotę [10].

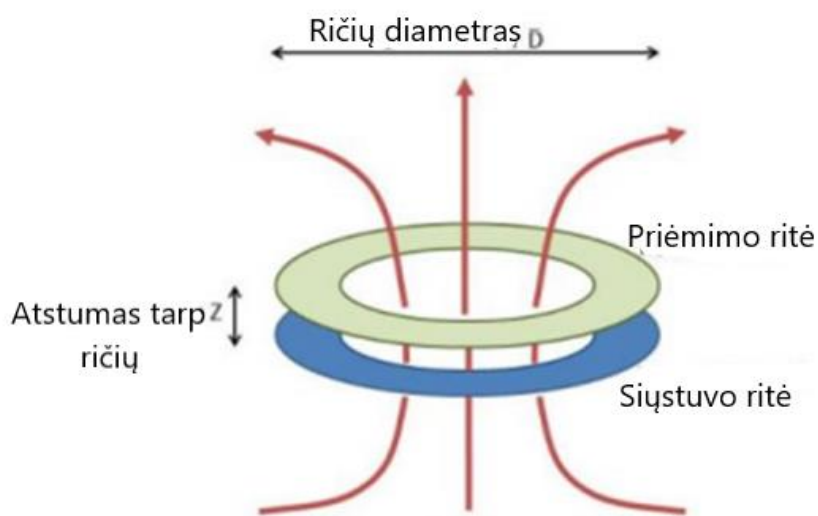


1.2.1 pav. Belaidis energijos perdavimas naudojant mikrobangas [10]

1.2.2. Indukcinis energijos perdavimas

Indukcinis perdavimo metodas, leidžia perduoti energiją belaidžiu būdu per indukcinę movą. Šis būdas naudojamas artimojo lauko energijos perdavimui, tačiau energijos perdavimas tarp dviejų laidžių medžiagų vyksta abipusiu induktyvumu, kuris paremtas transformatoriaus veikimo principu.

Indukcinis galios perdavimas sukuria kintamą magnetinį lauką, siųstuvo ritės pagalba paverčia gautą reiškinį į elektros srovę — imtuvo ritėje. Siųstuvo ritę valdo aukštas kintamosios srovės dažnis. Priklausomai nuo sukabinimo koeficiento, susidariusio magnetinio srauto dalis siųstuvo ritėje išsiskverbia į imtuvo ritę ir prisideda prie energijos pernešimo. Prie antrinės ritės sujungto srauto kiekis yra proporcingas magnetiniam laukui rodomam skerspjūviui. Puikus sujungimas, kuriuo turi sujungti yra tada, kai koeficientas $k = 1$ ir kai pirminės ritės sukurtas magnetinis srautas yra sujungtas su antrine rite. Didžiausią „ k “ galima gauti, kai antrinės ritės matmenys identiški pirminei bei abi ritės yra arti viena kitos. Įkrovimas yra jautrus procesas, nes jam įtakos gali turėti X ir Y nesutapimas. Siųstuvas ir imtuvas turi naudoti vienodo diametro rites, nes tokiu būdu galima gauti efektyviausią energijos perdavimo sistemą. Indukcinės energijos schema pateikta 1.2.2 paveiksle [30].

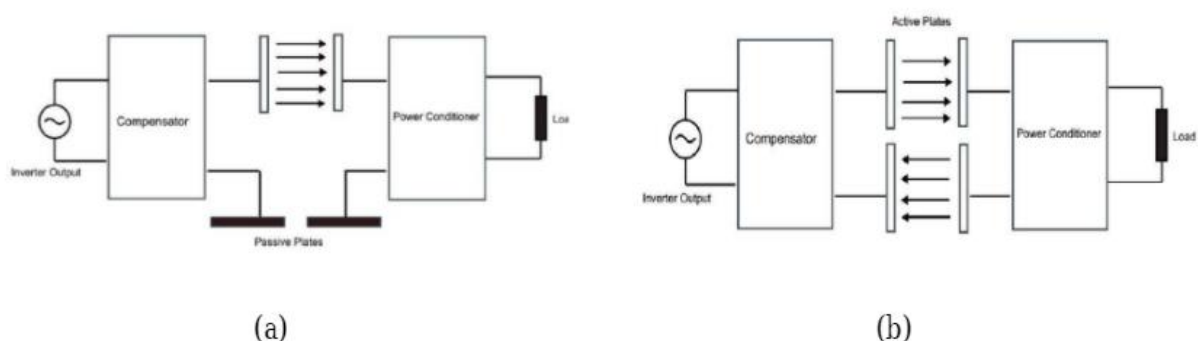


1.2.2 pav. Indukcinės energijos sukūrimo pavyzdys [30]

1.2.3. Talpinis galios perdavimas

Pagrindinė BEP su talpine koncepcija remiasi poliarizuotais kondensatoriais. Norint suprasti kondensatorių veikimo logiką, reikėtų ištirti pagrindines formules, kurios buvo įrodytos mokslininkų nuo praeities. Tačiau kondensatorių veikimo logiką nurodo tam tikros medžiagos — sujungimo

kondensatoriaus plokštės ir dielektrinės medžiagos. Yra du skirtingi talpinės galios perdavimo būdai. Bendras šių būdų demonstravimas parodytas 1.2.3 paveiksle [11].



1.2.3 pav. Vieno poliaus demonstracinė jungtis (a), bipolinė talpinės jungties demonstracija (b)

Norint pasiekti didelę perduodamą energiją, reikėtų kuo labiau sumažinti atstumą tarp dviejų jungiamųjų kondensatorių. Jei pradinį tašką bandoma tirti, pagrindinės kondensatorių formulės turėtų būti lygios 5 lygčiai :

$$Q = V \times C, \quad (5)$$

čia V , C ir Q atitinkamai reiškia įtampą, talpą ir krūvį.

Kondensatoriaus talpa apskaičiuojama atsižvelgiant į lygtį (6):

$$C = \epsilon \frac{A}{d}, \quad (6)$$

čia žymuo „ d “ rodo, atstumą tarp dviejų kondensatorių plokščių. „ A “ žymuo reiškia kondensatorių plokščių skerspjūvio plotą. „ ϵ “ žymuo yra laisvos vietos pralaidumas. Paprastai 6 lygties nepakanka norint įvertinti grandinės ekvivalentiškumo talpą. 7 ir 8 lygtys yra naudojamos atitinkamai lygiagrečios ir nuoseklios grandinės jungties talpai įvertinti. Srovė, kurią galima kaupti kondensatoriumi, apskaičiuojama pagal 9 lygtį. [11]

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n, \quad (7)$$

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}, \quad (8)$$

$$I = C \frac{dv}{dt}. \quad (9)$$

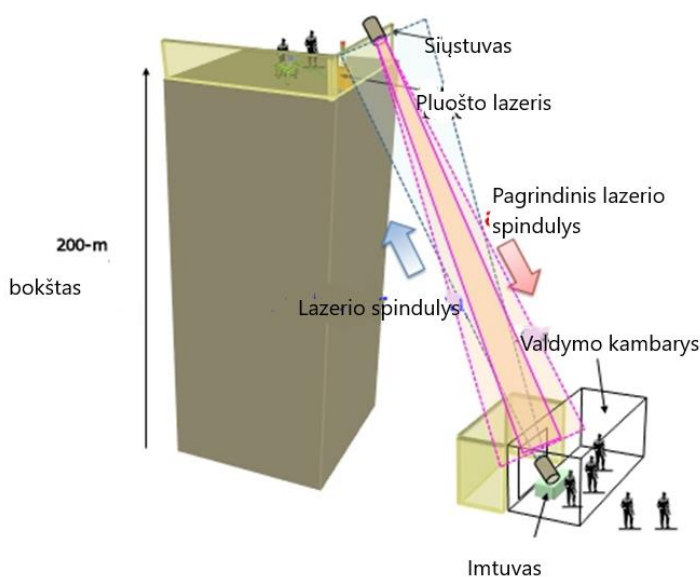
1.2.4. Lazerinis energijos perdavimas

Terminas „LASER“ reiškia šviesos stiprinimą stimuliuojant spinduliuote. Lazeriai yra dirbtinės šviesos forma, turinti vienodą fazę ir bangos ilgį. Pagrindinė lazerio savybė yra mažas

divergencijos kampas, kuris išsiskleidžia labai nedaug, kai jis išsikiša toliau nuo savo šaltinio. Lazeriai yra pakankamai maži, kad tilptų į kompaktišką aparatūrą, todėl jie idealiai tinka tarp Orbita esančioms optinio ryšio sistemoms ir kitoms sistemoms, skirtoms bendrauti dideliais atstumais. Lazeriai naudoja unikalias savybes, kurio saulės energiją, valdomą lazerio iš kosmoso siunčia į Žemę, kur ji paverčiama elektra. Lazerio spindulių pralaidumas priklauso nuo jų bangos ilgio. SSPS tyrimų grupė tyrė lazerio BEP technologiją, veikiančią maždaug 1070 nm (beveik infraraudonųjų spindulių) ir ištisinės bangos (CW) bangos ilgiu. BEP pavyzdys pateiktas 1.2.4 paveiksle [2].

Lazerių ypatybės:

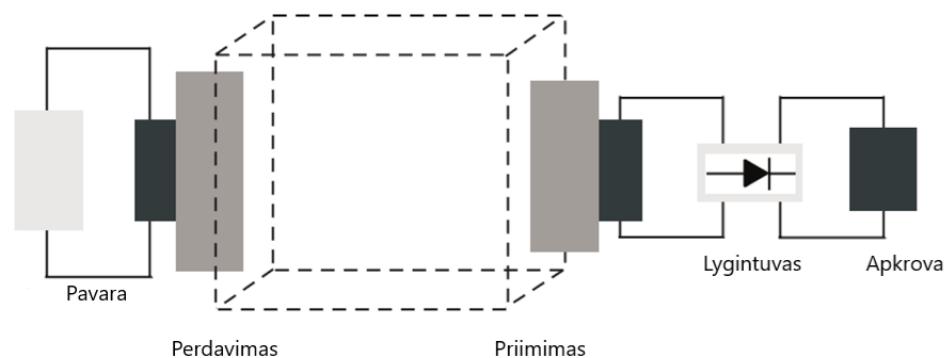
- Lazeriai gali būti pritaikyti kompaktiškoms priemonėms;
- Lazeriai negali prasiskverbti pro debesis ar kritulius;
- Lazeriai yra jautrūs atmosferos sutrikimams;
- Lazeriai reikalauja griežtų saugos reikalavimų, kad apsaugotų žmogaus regėjimą. (Lazeriai yra labai pavojingi žmogaus akiai) [2].



1.2.4 pav. Antžeminė demonstracija naudojant 200 m vertikalų lazerinį BEP (konceptualus piešinys) [2]

1.2.5. Akustinis energijos perdavimas

Akustinis energijos perdavimas naudoja energiją norint perduoti garsą, paprastai megahercų diapazone (0,5–2,25 MHz). Daviklis paverčia elektros energiją mechanine, vibruodamas aktyvią sritį. Tada terpė, su kuria keitiklis yra prijungtas, pavyzdžiui, oras ar siena, rezonuoja ir skleidžia vibraciją per visą terpę. Pasklidusi vibracija pasiekia imtuvą ir vėliau iš mechaninės energijos virsta elektros. Ši metodika pavaizduota 1.2.5 pav. [11].

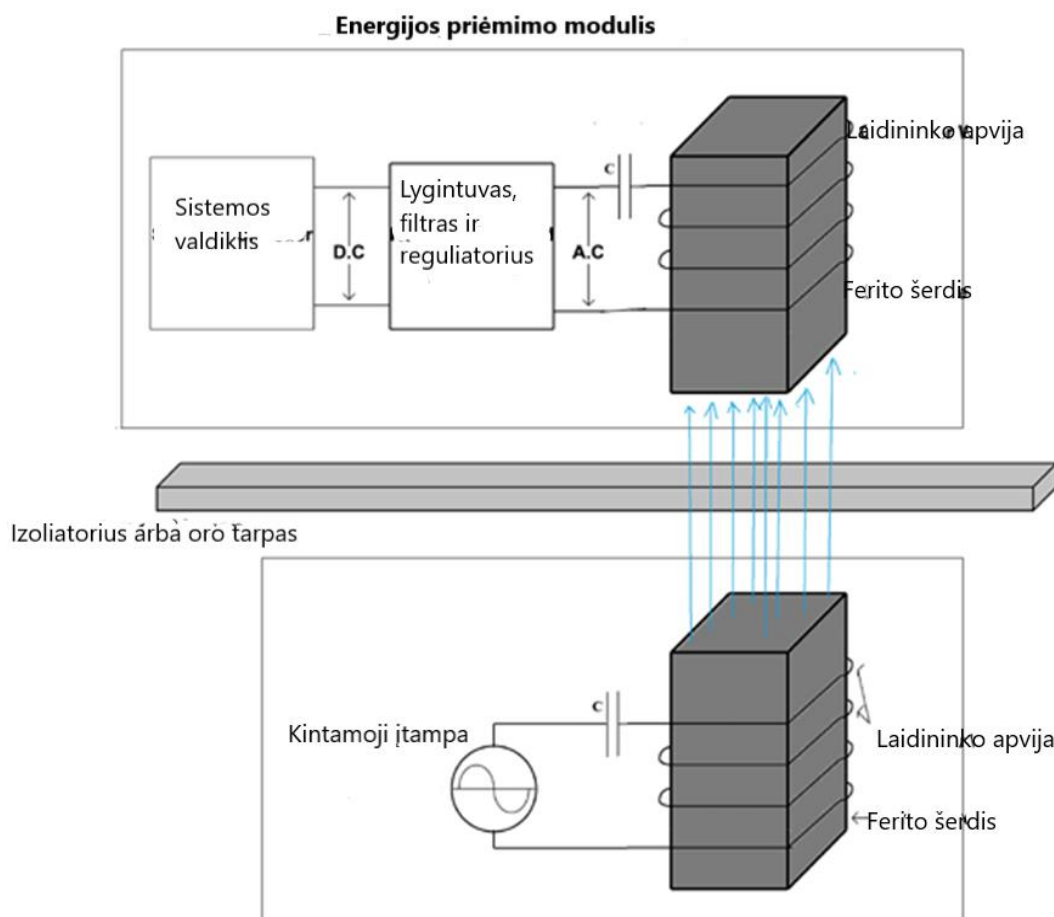


1.2.5 pav. Akustinio perdavimo pavyzdys [11]

Ši technologija dažniausiai taikoma mažos galios biomedicininų implantų įrenginiuose (mW). Buvo pasiektas vidutinės ir didelės galios 62 W ir 1 kW perdavimas esant ne orui, mažas perdavimo atstumas buvo atitinkamai 70 ir 5 mm. Jie skirti uždaroms aplinkoms, tokioms kaip konteineriai su pavojingais daiktais. Maksimalus efektyvumas, pasiektas perduodant orą, buvo 4 % esant 0,045 m perdavimo atstumui [11].

1.2.6. Magnetinio rezonanso indukcijos pagrindu veikiantis belaidis energijos perdavimas

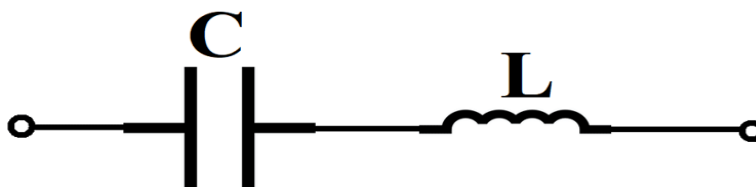
Magnetinio rezonanso indukcija yra jungties forma, kai galia magnetiniais laukais perduodama tarp dviejų rezonansinių grandinių. Magnetinio rezonanso indukcijos grandinės nustatymas turi būti labai panašus į indukcinio sujungimo grandinę [11].



1.2.6 pav. Magnetinės indukcijos veikimo pavyzdys [11]

Veikimas:

Šio modelio veikimui būtinos sąlygos, kad siųstuvo ir imtuvo grandinės būtų sureguliuotos veikti rezonansiniu dažniu. Kondensatoriai nuosekliai sujungti su abiem ritėmis, kad būtų pasiektas šis rezonansinis efektas. Magnetinės indukcijos pavyzdys pateiktas 1.2.6 pav. [11].



1.2.7 pav. L — C grandinė [11]

Iš literatūros yra žinoma, kad kondensatorius nuosekliai su induktoriumi sudarys serijinę L — C grandinę, kaip parodyta 1.2.7 paveiksle. Rezonansiniu dažniu, kuriuo ši grandinė veiks, vertė gali būti apskaičiuota pagal formulę:

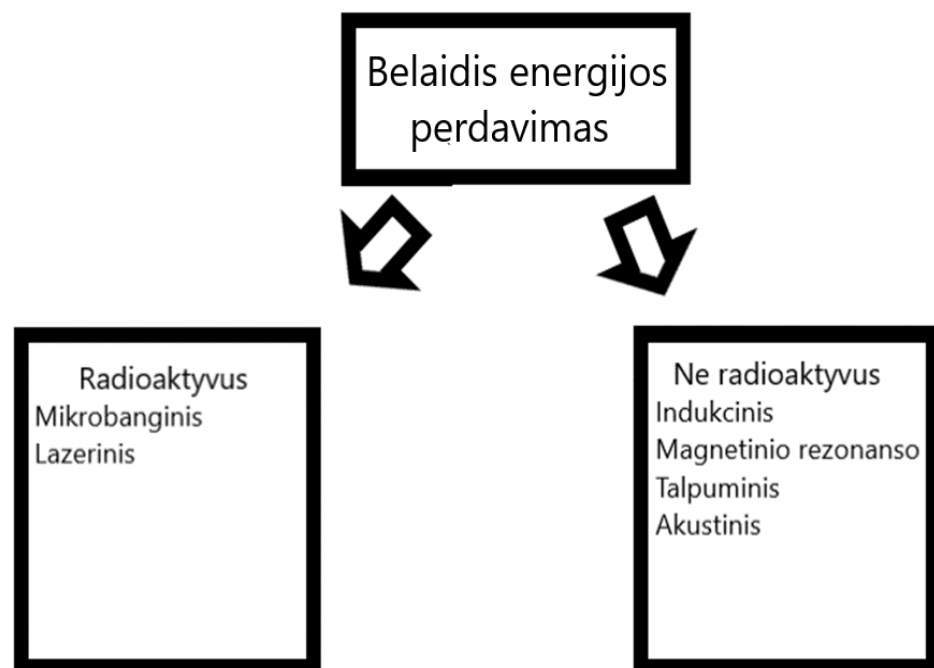
$$F_r = 1 / 2\pi (LC)^{1/2}, \quad (10)$$

čia L = induktoriaus vertė ir C = kondensatoriaus vertė.

Naudojant pateiktą 10 formulę, (apskaičiuotą siųstuvo grandinės rezonansinio dažnio vertę) pritaikoma kintamosios srovės šaltinio dažnį pagal tą apskaičiuotą vertę. Suregulius šaltinio dažnį, siųstuvo grandinė kartu su imtuvo grandine veiks rezonansiniu dažniu. Po to EMF turi būti sukeltas imtuvo grandinėje pagal Faraday'as indukcijos dėsnį. Šis sukeltas EMF bus ištaisytas, filtruojamas ir reguliuojamas, kad gautų tinkamą nuolatinę įtampą. Iki šiol aptartos įvairios technologijos, kurios gali būti naudojamos belaidžiam energijos perdavimui, kartu su joms būdingomis taikymo grandinėmis. Magnetinio rezonanso susijungime naudojami šie metodai kuriant visų tipu BEP sistemas, tokias kaip belaidis įkroviklis, belaidžio elektrinio transporto įkrovimo sistema, belaidis bepilotis orlaivis [11].

1.2.7. Belaidžių perdavimo sistemų klasifikacijų palyginimas

BEP galima skirstyti į radiacinę ir neradiacinę. Dvi literatūroje naudojamos radiacinės galios perdavimo technologijos yra mikrobangų galios perdavimas (MGP) ir lazerinės energijos perdavimas (LGP). Neradiacinės energijos perdavimo technologijos yra indukcinis galios perdavimas (IGP), magnetinio rezonanso energijos perdavimas (MREP), talpinės galios perdavimas (TGP) ir akustinės galios perdavimas (AGP) (žr.1.2.8 pav.). Kiekviena technologija gali būti toliau skirstoma į tiesioginį arba foninį energijos surinkimą. Skirtumas tarp šių dviejų yra tas, kad pirmasis gauna energiją iš šaltinio, kuris buvo įrengtas siekiant perduoti energiją imtuvui. Tačiau svarbu pabrėžti, kad pastaroji surenka foninę energiją, kuri yra kito proceso šalutinis produktas [24].



1.2.8 pav. BEP sistemų klasifikacija

Klasifikacijų palyginimas tarp perduotos energijos atstumo:

1 lentelė. Naudingumo priklausomybė nuo perdavimo atstumo paremta 2019 metų duomenimis [15].

	AGP	TGP	IGP	LGP	MREP	MGP
Maksimalus naudingumas	4 %	90 %	98 %	14 %	85 %	62 %
Maksimalus atstumas (m)	0.05	0.3	7	1000	3	1600

Perdavimo atstumai:

- **Labai mažo nuotolio:**

AGP yra vienintelė technologija, kuri apsiriboja labai mažo nuotolio veikimu. Ji taip pat turi mažiausią efektyvumą, todėl nėra laikomas perspektyviu mobiliųjų robotų BEP sprendimu [15].

- **Trumpas atstumas:**

TGP apsiriboja tik trumpojo nuotolio operacijomis (maksimalus perdavimo atstumas 0,3 m). Šis apribojimas yra dėl mažos talpos, atsirandančios dėl erdvės pralaidumo. Talpa padidinama didinant talpriosios plokštės matmenis bei sumažinant perdavimo atstumą, kurie abu yra sudėtingi, nes imtuvo matmuo yra ribotas mobiliajame robote [15].

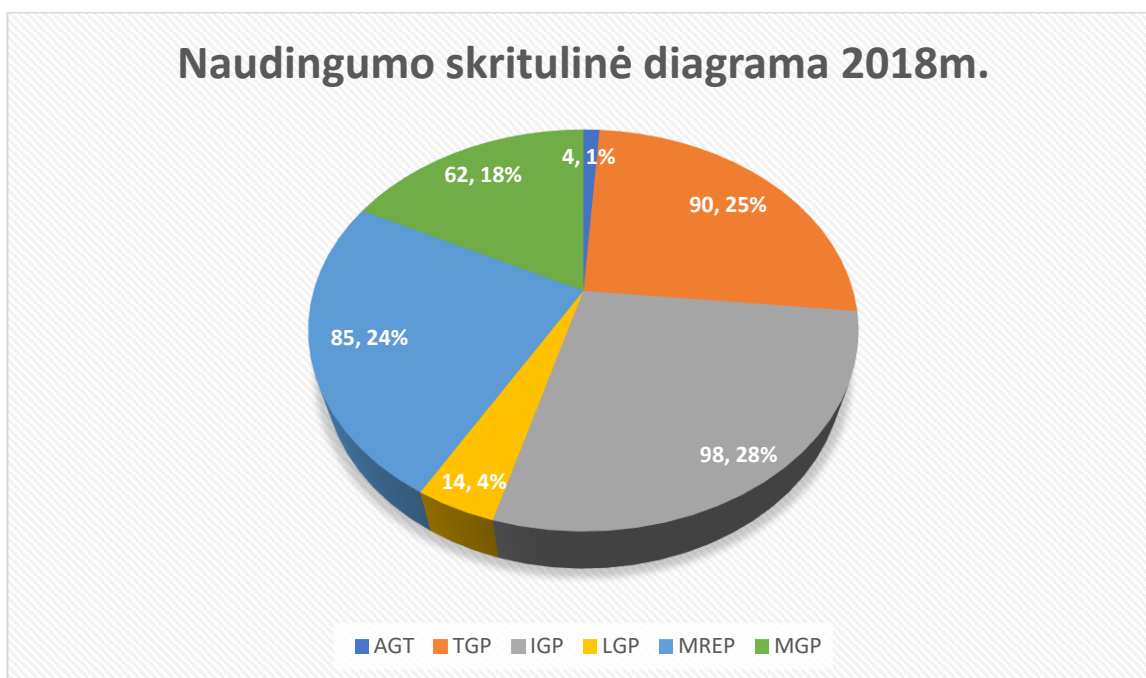
- **Vidutinės klasės:**

MREP yra vidutinio nuotolio perdavimo būdas. Ritės skersmuo MREP yra vienas iš ribojančių perdavimo atstumo veiksnių, nors patobulinimų galima pasiekti padidinus apvijų skaičių, kad padidėtų ričių sukabinimo koeficientas. Ritės taip pat gali būti suprojektuotos taip, kad ant spausdintinių plokščių būtų kvadratinės spiralinės ir, kad ritės plotas būtų kuo didesnis [15].

- **Toli ir labai toli:**

Naujausia IGP pažanga leidžia pasiekti tolimąjį perdavimo atstumą esant apatinei šio diapazono ribai. Tai pasiekama naudojant ilgą ferito šerdį, kad magnetinio srauto linijos tarp siųstuvo ir imtuvo būtų sujungtos .

Radiacinės energijos perdavimo technologijos, būtent MGP ir LGP, yra pageidaujamos tolimam ir labai tolimam atstumui, nes perdavimo efektyvumas paprastai yra daug didesnis nei neradiacinės technikos ir nereikia sukabinimo sąsajos, o tai riboja perdavimo atstumą. Vis dėlto pagrindinis efektyvumo didinimo veiksnys yra perėjimas iš elektrinės į elektromagnetinę energiją ir atvirkščiai, kuris yra palyginti mažas, lyginant su ne radiaciniais metodais. Kiti radiacinių technologijų trūkumai yra regėjimo linijos, reikalaujančio tikslios stebėjimo sistemos ir galimo pavojingo poveikio žmonėms jos spinduliavimo lauke [15].



1.2.9 pav. BEP sistemų 2019 m. naudingumo skritulinė diagrama

Tiek iš 1 lentelės, tiek iš skritulinės diagramos (žr. 1.2.9 pav.) matoma, kad naudingiausia sistema tais metais buvo IGP, o mažiausiai naudinga sistema AGP.

1.3. Belaidės energijos efektyvumo gerinimo būdai

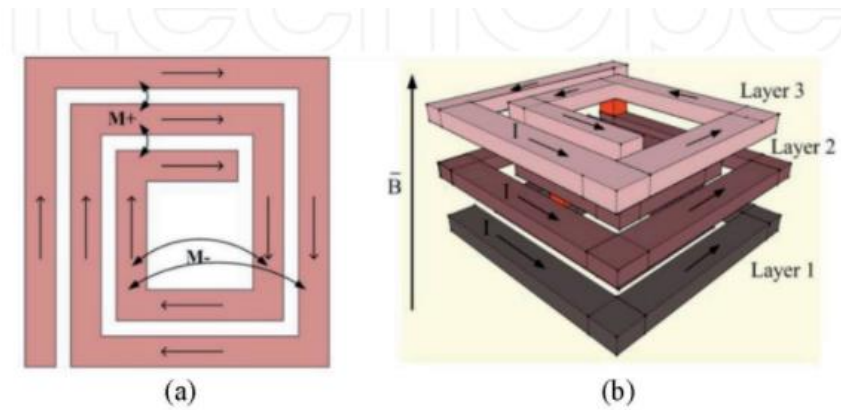
BEP sistemos veikimas gali būti įvertintas pagal energijos perdavimo efektyvumą (PTE), kuris priklauso nuo susijungimo koeficiento „K“. Santykis svyruoja nuo 0 iki 1, kuris yra didžiausia vertė esant visiškai galios perdavimui. „Q“ yra siųstuvo arba neapkrautos kokybės koeficientas imtuvo ritė ir ji galima apskaičiuoti pagal ritės induktyvumą, kaip nurodyta 10 lygtį [18].

$$Q = \frac{\omega L}{R}, \quad (10)$$

čia ω yra kampinis dažnis, L yra ritės induktyvumas, o R — ritės atsparumas nuostoliams. Pats PTE apskaičiuojamas pagal 11 lygtį.

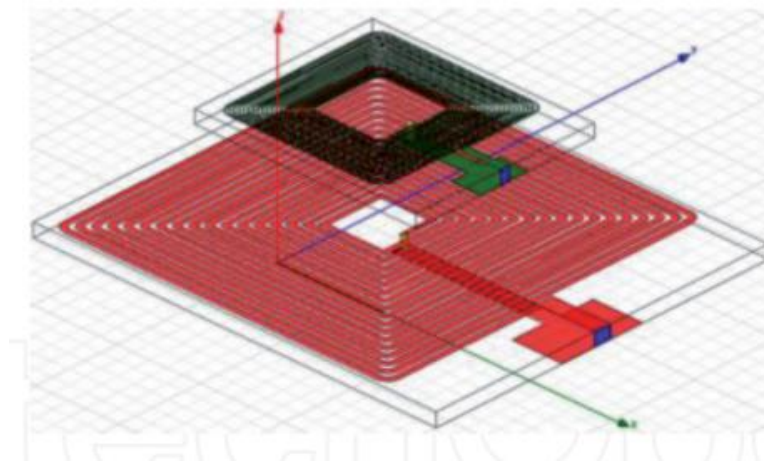
$$PTE = \frac{k^2 Q Q}{(\sqrt{1+k^2 Q Q})^2} \times 100 \% \quad (11)$$

Siųstuvo ir imtuvo induktyvumą labiausiai padidina atspausdintos spiralinės ritės, kurios uždėdamos viena ant kitos taip, kad tekėtų srovė. Srovė visad teka viena kryptimi kaip parodyta 1.3.1 paveiksle.



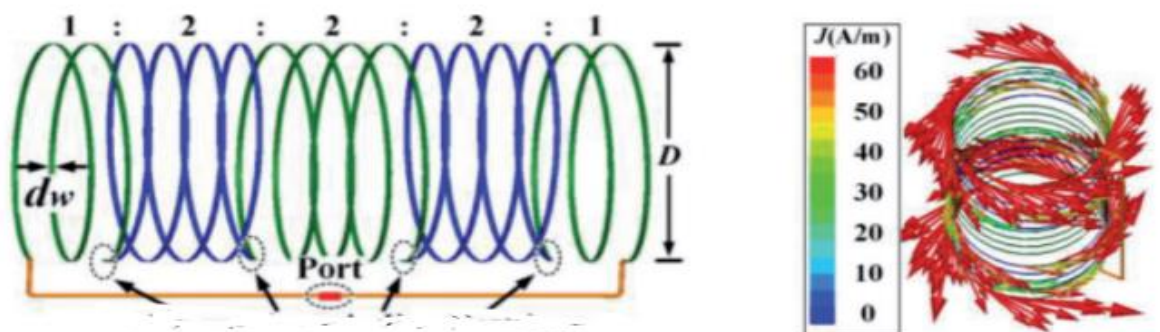
1.3.1 pav. Daugiasluoksnės sukrautos ritės — (a) vaizdas iš viršaus, — (b) 3D geometrija [17]

Tuo tarpu, biomedicinoje naudojami implantuoti mikroelektroniniai prietaisai, kurių sudėtyje yra spausdintų spiralinių ritinių ir kurie skirti maksimaliai padidinti indukcinio energijos perdavimo efektyvumą. Tokio pavyzdžio dizainas pateiktas 1.3.2 paveiksle.



1.3.2 pav. Spausdintų spiralinių ritinių poros dizainas [17]

Norint gauti didelio efektyvumo indukcinę galią galima rinktis visas prieinamas alternatyvas. Vienas tokių pavyzdžių — apvijos ritės struktūra, kuri pateikta 1.4.3 paveiksle.

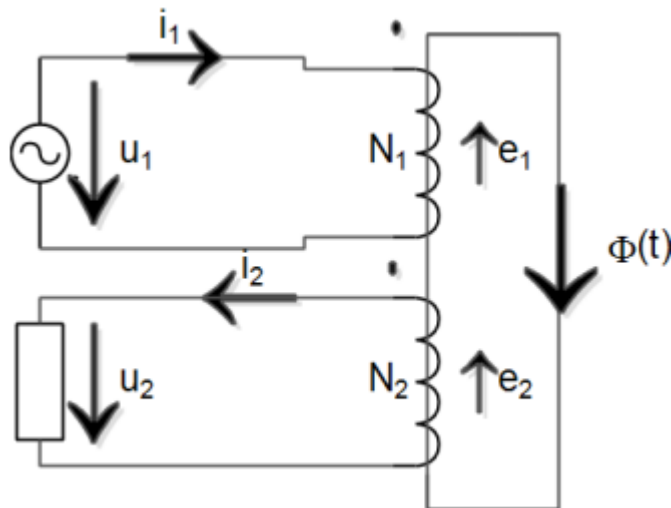


1.3.3 pav. Alternatyvios apvijos ritės geometrija ir jos srovės pasiskirstymas [20]

2. TEORINIAI TYRIMAI

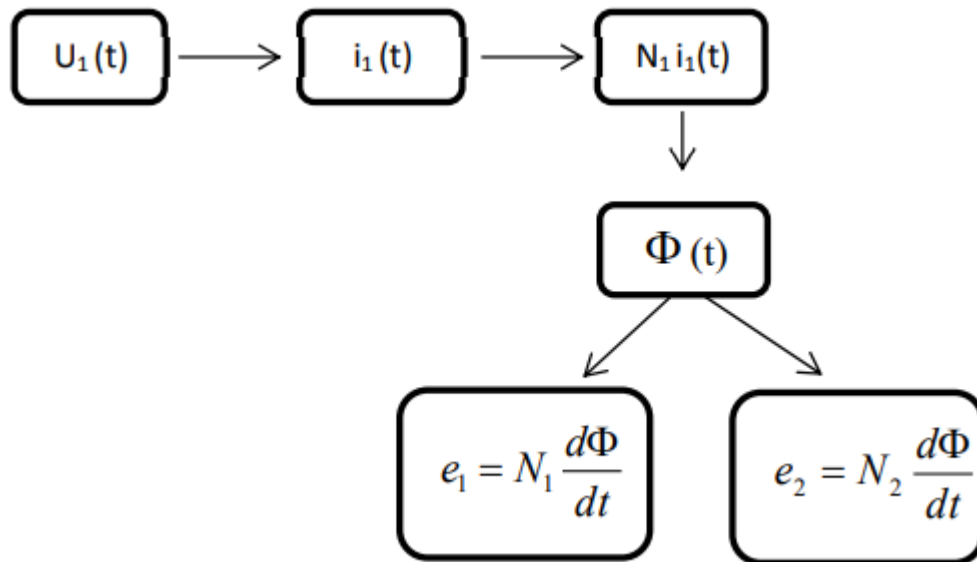
Šioje darbo dalyje pateikiamos belaidės energijos principinės ir atstojamosios schemas, „Mathalb — Simulink“ imitacinio modelio schema bei blokinė schema. Iš imitacinio modelio, gaunamos oscilagramos, kurių pagalba analizuojami rezultatai.

2.1. Indukcinės belaidės energijos perdavimo sistemos atstojamoji schema



2.1 pav. Belaidės energijos perdavimo atstojamoji schema [14]

Belaidės energijos perdavimo veikimo principas pagrįstas jos apvijų abipusės indukcijos reiškiniu. Prijungus belaidės energijos perdavimo sistemos pirminę apviją, kurios vijų skaičių N_1 , prie kintamosios įtampos $U_1(t)$, apviją pradeda tekėti kintamoji srovė $I_1(t)$. Atsiradusi pirminė MVJ N_1 sukuria magnetolaidyje kintamąjį magnetinį srautą $\Phi(t)$. Jis veria abi apvijas ir indukuoja jose EVJ $e_1(t)$ ir $e_2(t)$ 2.2 paveiksle paaiškinta elektrinių ir magnetinių dydžių ryšio loginė seka (žr. 2.1 pav) [14.]



2.2 pav. Elektrinių ir magnetinių dydžių ryšio loginė seka [13]

Jei antrinė grandinė atvira (neprijungta apkrova), tuomet belaidė energijos perdavimo sistema veikia tuščiosios eigos režimu. Jei uždara, tuomet sistema yra apkraunama, t.y. antrinėje apvijoje ir imtuvu teka srovė.

Belaidės energijos perdavimo sistemos elektrinių dydžių ir magnetinio srauto sutartinės teigiamos kryptys parodytos 2.2. paveiksle. Pirminė apvija yra imtuvas, todėl teigiama srovės kryptis yra pažymėta priklausomai nuo laisvai pasirinktos u_1 krypties. Saviindukcijos EVJ e_1 teigiama kryptimi laikoma tokia, kuri yra priešinga negu srovės i_1 .

Magnetinio srauto Φ kryptis pažymėta taikant jam ir pirminę apvija tekančiai srovei i_1 dešiniojo sraigto taisyklę. EVJ e_2 kryptis yra tokia pat kaip e_1 , nes abi apvijos suvyniotos tokia pačia kryptimi ir jas veria tas pats magnetinis srautas Φ [13].

Antrinė apvija yra šaltinis, kurio EVJ yra e_2 . Dėl to antrinėje grandinėje teka srovė i_2 , kurios kryptis yra tokia pat, kaip e_2 . Imtuvas jungiamas prie antrinės įtampos u_2 , kurios sutartinė teigiama kryptis pažymėta pagal i_2 kryptį. Pritaikę dešiniojo sraigto taisyklę antrinei apvijai gaunasi, kad antrinė srovė kuria magnetinį srautą, kurios kryptis yra priešinga pirminės srovės kuriamo magnetinio srauto kryptiai [13].

Apvių elektrovaros jėgos.

Nagrinėjant belaidėje energijos perdavimo sistemoje vykstančius elektromagnetinius reiškinius, elektrinius dydžius bei magnetinį srautą galima užrašyti kompleksiniais dydžiais.

Pirminės ir antrinės elektrovaros jėgas galime užrašyti taip:

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}; e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (12)$$

čia N_1, N_2 — ričių vijų skaičius, $d\Phi$ — magnetinio srauto pokytis, $dt/d\Phi$ — srauto kitimo greitis.

Laikoma, kad magnetinis srautas yra sinusinis (žr. 13 lygtį):

$$-\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_m \sin \omega t, \quad (13)$$

čia Φ — magnetinis srautas, Φ_m — magnetinio srauto maksimali vertė, ω — kampinis dažnis. Atlikus veiksmus, gaunasi išplėstinė lygtis:

$$e_1 = E_{1m} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right); \quad e_2 = E_2 \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right), \quad (14)$$

čia E_{1m}, E_{2m} , — maksimali pirminės ir antrinės apvijos EVJ.

Toliau lygtis užrašoma kompleksiniais dydžiais:

$$E_1 = E_{1e} e^{j\pi/2}; \quad E_2 = E_{2e} e^{j\pi/2} \quad (15)$$

Efektinės vertės yra lygios:

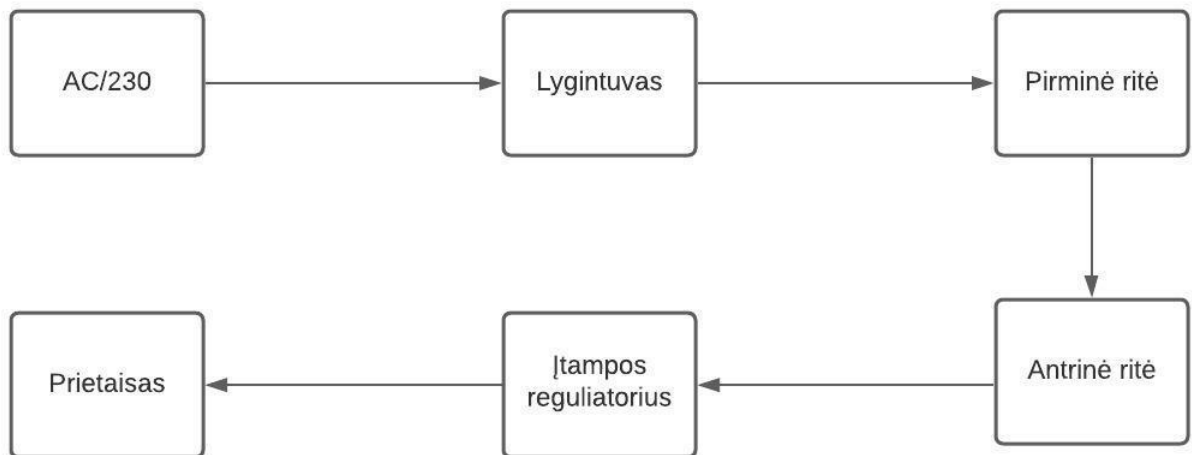
$$E_1 = 4,44fN_1\Phi_m; \quad E_2 = 4,44fN_2\Phi_m \quad (16)$$

čia f — dažnis (Hz).

BEP transformacijos koeficientas yra didesnėsios EVJ vertės santykis su mažesniąja. Pavyzdžiui, jei žeminimo $E_1 > E_2$; tai jo transformacijos koeficientas lygus:

$$K = E_1/E_2 = N_1/N_2 \quad (17)$$

2.2. Funkcinė schema



2.3 pav. Belaidės sistemos funkcinė schema

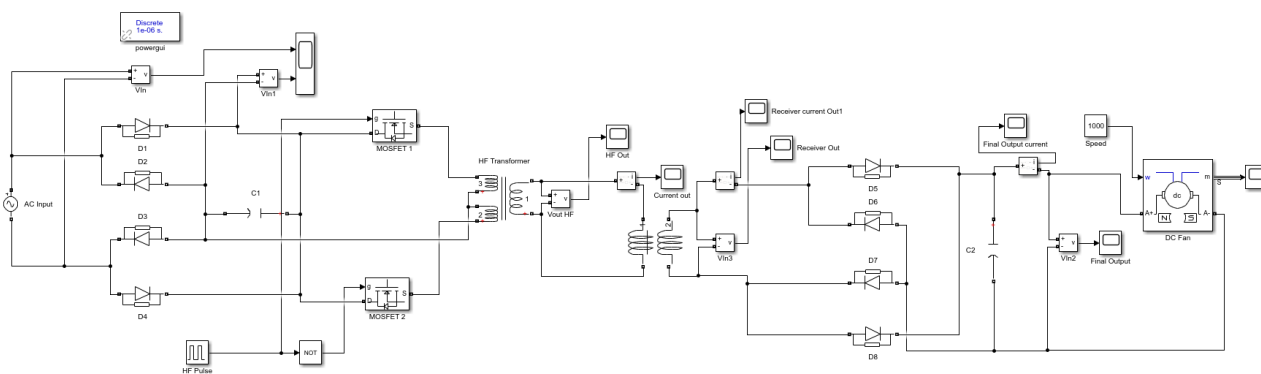
Blokinės diagramos aprašymas:

Iš 2.3 paveiksle pateiktos schemos matoma, BEP pagrindinių dalių veiksmų seką: paduodamas kintamosios įtampos maitinimas, kuris lygus 230 V. Kintamoji srovė verčiama į nuolatinę srovę. Tranzistorius „MOSFET“ sustiprina srovę, kuri tiekiamą į siųstuvo ritę. Kai imtuvo ritė dedama į artimąjį lauką, kuriamas magnetinis laukas. Įtampa tiekiamą į įtampos reguliatorių LM7812, kuris užtikrina fiksuotą įtampą. Gautas rezultatas yra 12 V nuolatinė įtampa.

2.3. Imitaciniai indukcinės belaidės energijos perdavimo sistemos tyrimai

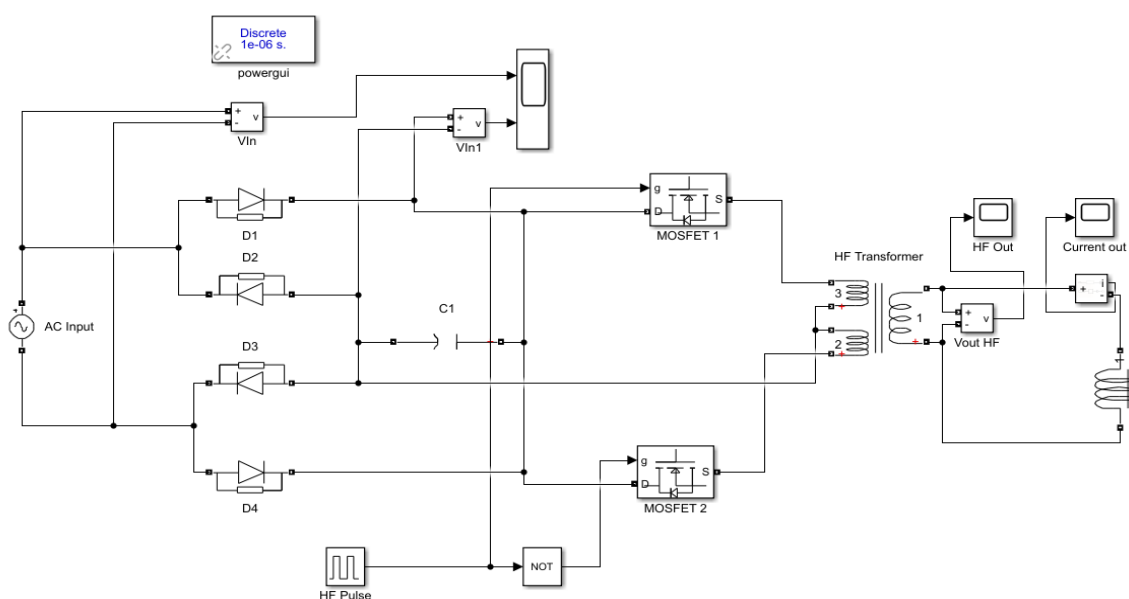
Elektrinės grandinės modelio duomenys:

- Kintamos įtampos maitinimo šaltinis: $U = 230 \text{ V}$;
- Keramikiniai kondensatoriai: $C_1 = 4700 \times 10^{-6} \text{ F}$; $C_2 = 1000 \times 10^{-6} \text{ F}$;
- Tranzistoriai su izoliuota lauko užtūra;
- Siųstuvo ritė su vidurio tašku: $L_{1,2} = 1,1 \times 10^{-3} \text{ H}$;



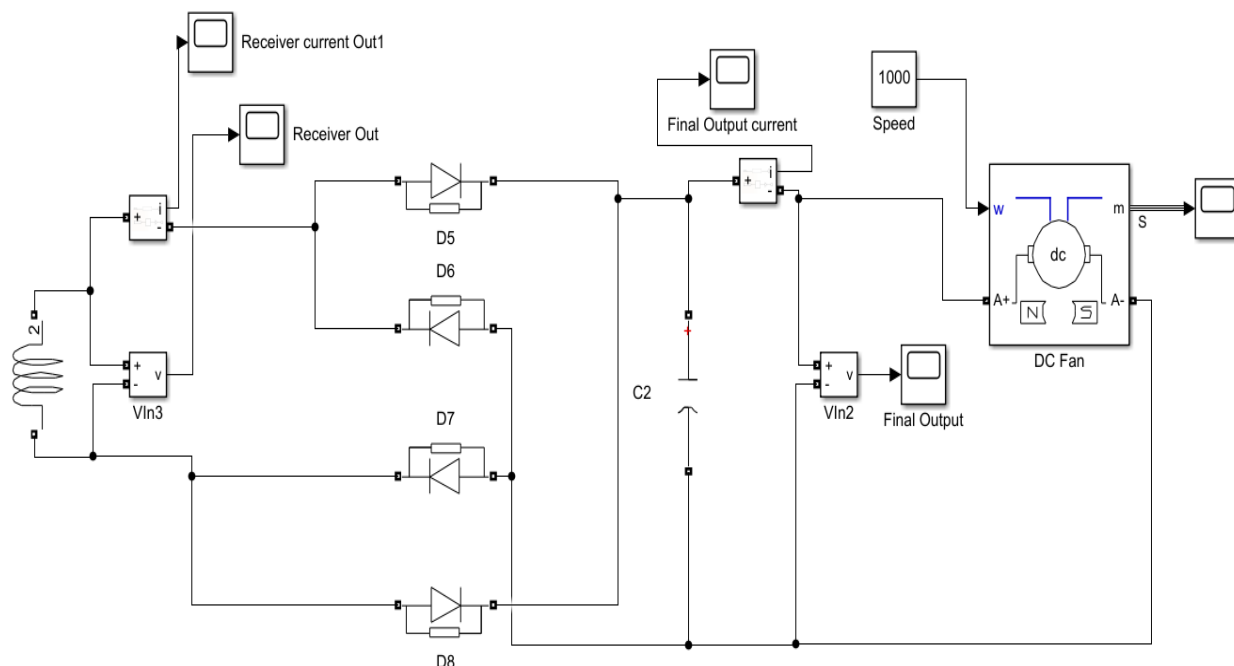
2.4 pav. BEP principinis modelis

2.4 paveiksle pateikta schema, kaip visa BEP sistema transformuojama į lygiavertę grandinę (parodytos pirmosios dvi kintamosios srovės tinklo, lygintuvo ir H tilto keitiklių dalys). Modeliui sudaryti buvo panaudotas diodų tiltelis bei kondensatorius, kuris veikia kaip filtras. Pirminėje pusėje (žr. 2.5 pav.) panaudotas 4700 μF vertės kondensatorius ir du „mosfet“ tranzistoriai, kurie išlygina įtampą ir paverčia ją į signalą. Vienas tranzistorius veikia normaliu režimu, yra neinvertuotas, o kitas „mosfet“ tranzistorius su „hf pulse“ bei „logic operator NOT“ invertuoja tranzistoriaus vertes. Toliau transformatoriaus pagalba žeminama įtampa, nes tik pažėmus įtampą galima perduoti ją belaidžiu būdu. Belaidžiam būdu parinktos dvi ritės, kurių santykis yra 1:1 bei jų induktyvumas siekia 1,1 mH vertes. Gauta įtampa išlyginama diodu tilteliu bei pasitelkus filtrą, kondensatorių (1000 μF) atliekamas norimas uždavinys. Diodu tilteliais bei filtro pagalba susidaro pereinamasis vyksmas, kurio pasekoje gaunamas norimas rezultatas — nuolatinės srovės įtampą 12 V, kuri tinkama ventiliatoriui.



2.5 pav. Pirmoji perdavimo dalis — siųstuvai

Kaip ir kiti BEP, pagrindinė kintamosios srovės įtampa paverčiama „HF“ kintamosios srovės šaltiniu ir tiekama į siūstuvą arba pirminę apviją.



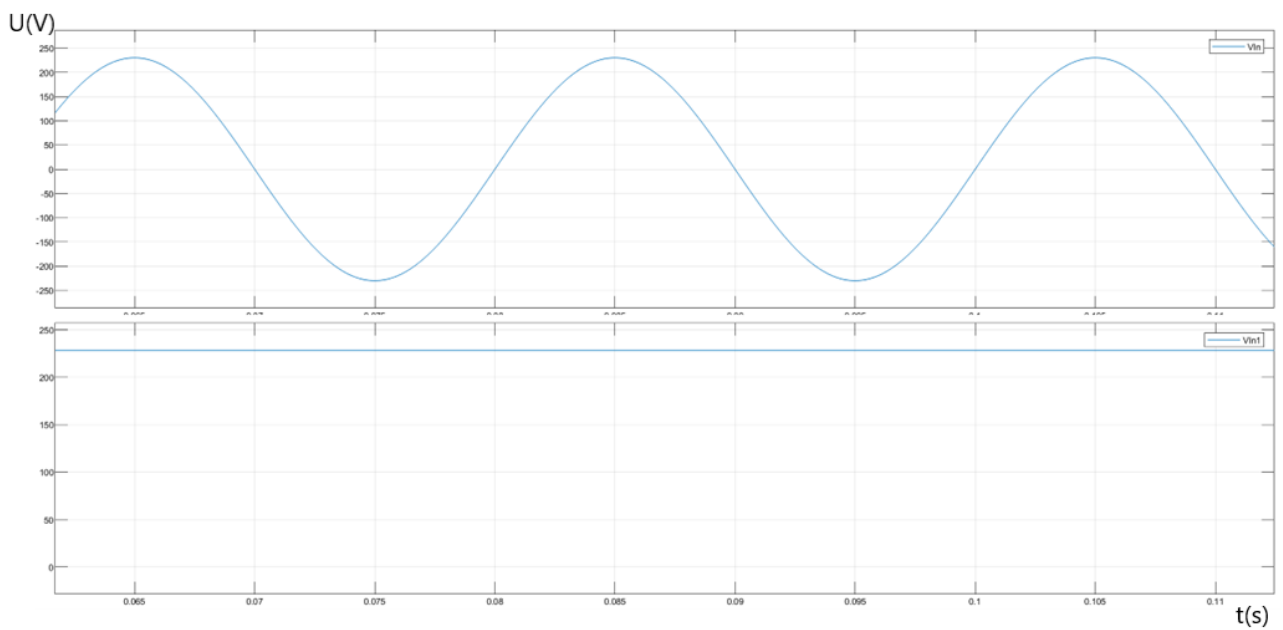
2.6 pav. Antroji dalis — imtuvas

Imtuvas arba antrinė ritė (žr. 2.6 pav.) gauna energiją per skirtingus magnetinius laukus. Gauta galia, panaudojant papildomą filtrą grandinėje, konvertuojama į NS, skirtą ventiliatoriui. Palyginti su tradiciniu IGP, papildomi nuoseklių arba lygiagrečių konfigūracijų kompensavimo tinklai pridedami prie pirminės ir antrinės apvijų, ne tik siekiant sukurti rezonansinį atvejį, bet ir norint sumažinti papildomus nuostolius.

Pirminės ir antrinės ritės rezonansinis dažnis yra atitinkamai siūstuvo ir imtuvo ričių savaiminio induktyvumo ir rezonansinio kondensatoriaus reikšmės. Suderinus pirminės ir antrinės ritės rezonansinius dažnius, galimas efektyvus galios perdavimas.

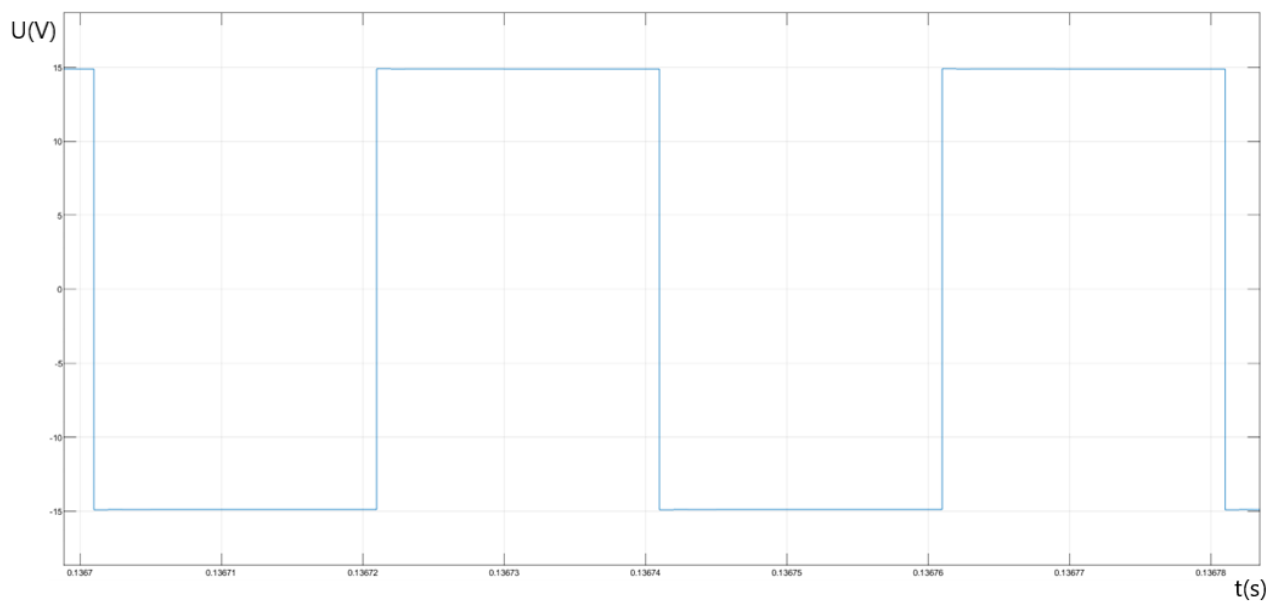
2.4. Modeliavimo rezultatai

Šioje skiltyje pateikiamos virtualios modeliavimo aplikacijos „Simulink“ gautos oscilogramos bei išnagrinėjama kiekviena oscilograma individualiai.



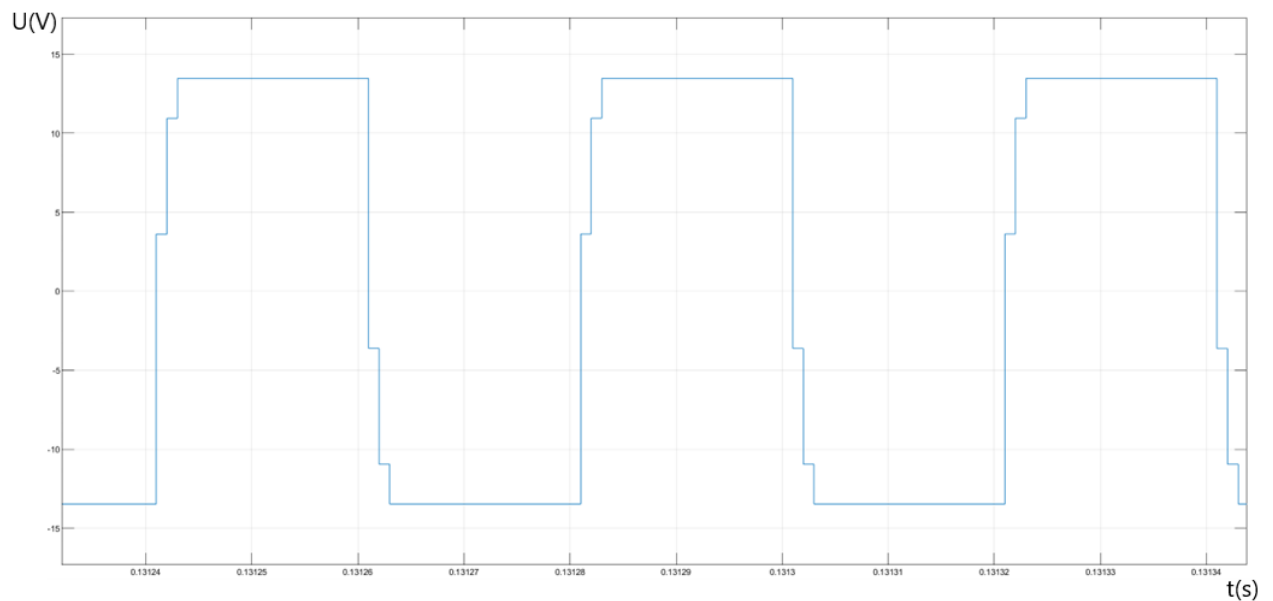
2.7 pav. Maitinimo šaltinio įtampos oscilograma

2.7 paveiksle pavaizduota sinusoide, kuri yra pradinės būsenos. Po to gaunama išlyginta įtampa, kuri paverčiama į nuolatinės įtampos oscilogramą.



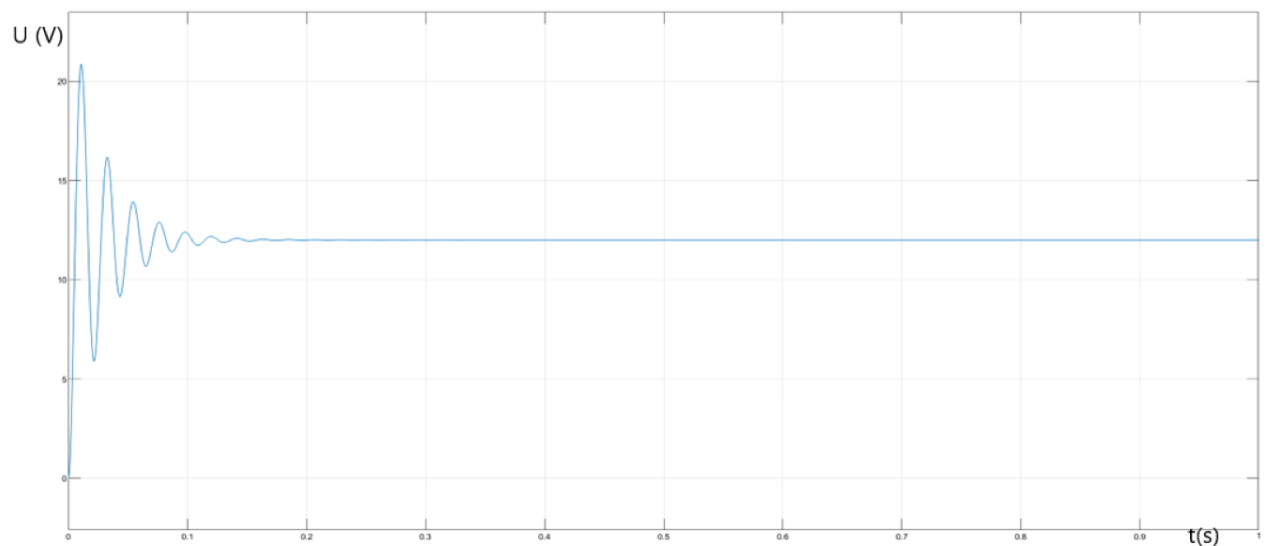
2.8 pav. Įtampos oscilograma — siųstuvas

Pagal 2.8 paveikslo pateiktus duomenis, įtampa oscilagrame, imtuve, siekia apie 15 V. Pati oscilograma yra taisyklinga, be jokių iškraipymų. Oscilogramai gauti buvo naudotas įtampos reguliatorius, kuris pavaizduotas „Simulink“ modelyje „pulse“. Jo pagrindinė funkcija yra sukurti įspūdį, kad įtampa yra tarsi signalas, nes tik tokiu būdu galima perduoti įtampą belaidžiu būdu bei pažeminti įtampą grandinėje.



2.9 pav. Įtampos oscilograma — imtuvas

Oscilogramoje 2.9 pav. pavaizduota perduota įtampa indukciniu būdu per rites. Iš pateiktos oscilogramos galima spręsti, kad įtampa perduota sėkmingai, nes įtampa pažemėjo minimaliai, lyginant su pirmine rites puse. Taip pat atsirado minimalūs iškraipymai, kurie neturėtų daryti labai didelės įtakos tolimesniam įtampos lyginimui.



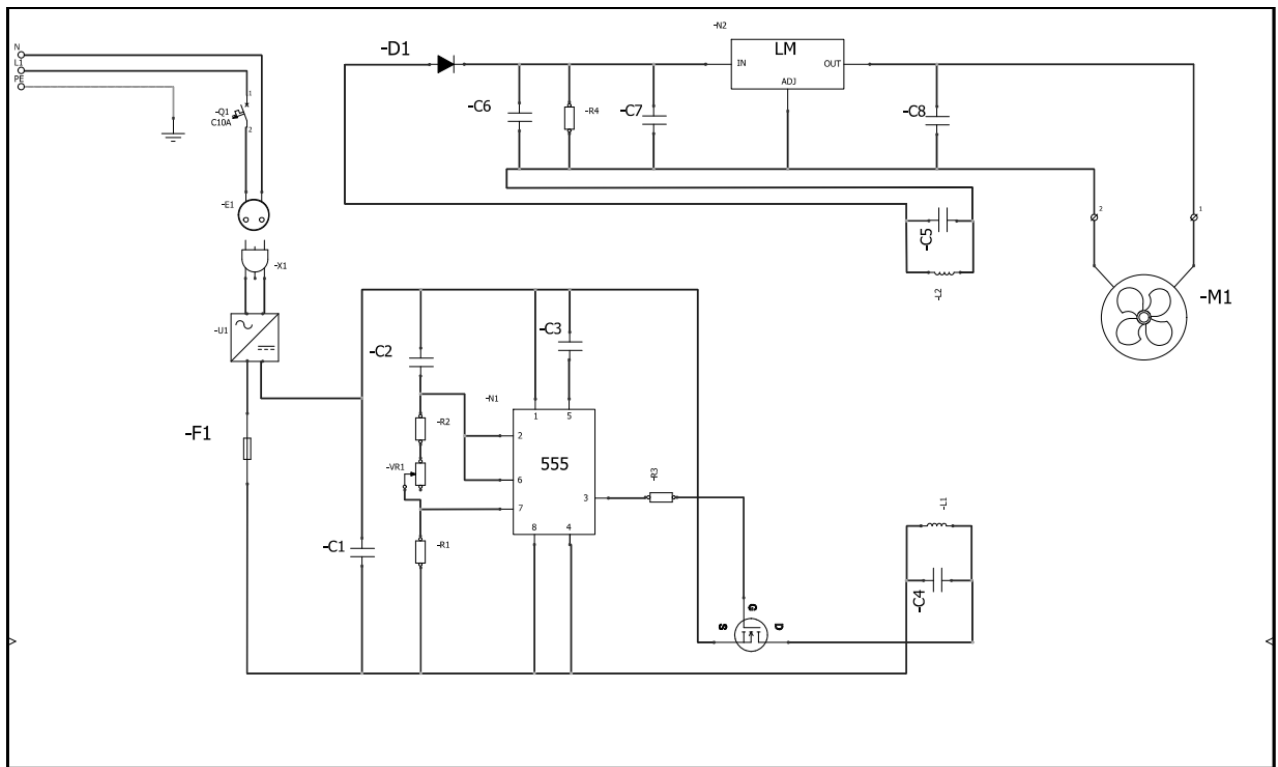
2.10 pav. Pereinamasis vyksmas už diodų tiltelio

2.10 pav. atvaizduoja antrinės apvijų įtampos oscilograma, po diodų tiltelio ir kondensatoriaus, kuris yra naudojamas kaip filtras. Remiantis pateiktais duomenimis, nuo 0 iki 0,15 s vyksta pereinamasis vyksmas, dėl ko nusistovi reikiama įtampa. Gautas rezultatas yra 12 V nuolatinės srovės įtampa, kuri tinka ventiliatoriui užmaitinti.

3. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

Šiame skyriuje pateiktas aprašymas realiam modeliui sudaryti, reikalingos medžiagos bei schemos. Atliekami tyrimai naudojant surinktą modelį, lyginami rezultatai tarp realaus ir virtualaus modelio, kuris sudarytas „Mathlab — Simulink“ programoje. Taip pat analizuojami privalumai bei trūkumai.

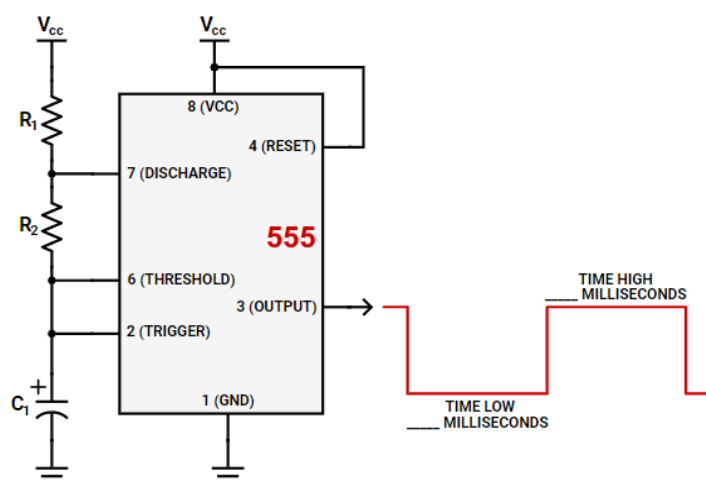
3.1. Tyrimų maketo schema



3.1 pav. BEP — tyrimų maketo schema

3.1 paveiksle pavaizduota schema, kurioje matomi naudoti komponentai skirti jai sudaryti. Schemai sudaryti panaudotas saugiklis, kuris žymimas F1 ir jo vertė yra 3 A. Taip pat matoma siūstuvo (L1) bei imtuvo (L2) ritės. Pagrindinis schemos komponentas, kurio yra didžiausia įtaka modelio veikimui tai laikmatis „555“.

3.2. Pasirinktų komponentų analizė



3.2 pav. Stabilus „555“ generatorius [23]

Dažnio skaičiavimo formulė, kuris veria laikmatį „555“ :

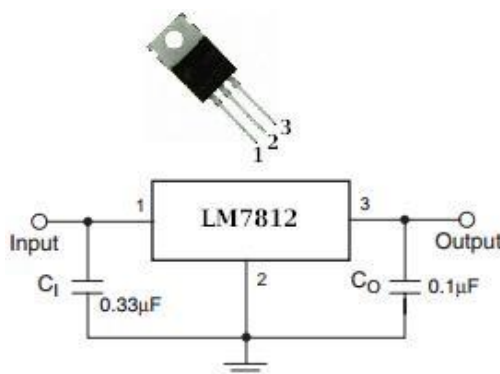
$$f = \frac{1,44}{(R_1 + 2R_2)C_1}, \quad (18)$$

čia R_2 diapozonas yra = (2–22) kΩ, $R_1 = 100 \Omega$, $C_1 = 0,00094 \mu\text{F}$;

Paskaičiuotas schemeje naudojamas dažnis:

$$f = \frac{1,44}{(100 + 2 \times 2730)0,00094} = 275,524 \text{ kHz}, \quad (19)$$

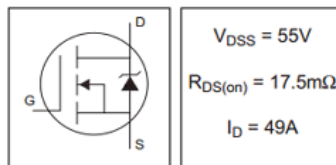
čia f — dažnis, Hz.



3.3 pav. Standartinė regulatoriaus prijungimo schema [22]

„LM7812” reguliatoriui tinkami kondensatoriai:

- $C_1 = 0,33 \mu\text{F}$;
- $C_0 = 0,1 \mu\text{F}$;



3.4 pav. IRFZ44N tranzistoriaus standartinė schema [19]

Tranzistoriaus techniniai duomenys:

- $V_{DS} = 55 \text{ V}$;
- $R_{DS(on)} = 17,5 \text{ m}\Omega$;
- $I_D = 49 \text{ A}$;

Siųstuvo ritės duomenys:

- $r = 3,4 \text{ cm}$
- $N = 25$
- $l = 6,8 \text{ cm}$
- $d = 0,4 \text{ cm}$

Induktyvumo apskaičiavimas:

$$L = \frac{0,8(N^2 \times r^2)}{9l + 6r + 10d}, \quad (20)$$

čia L (H) — induktyvumas, N — apvijų skaičius, r — spindulys, m^2 ; l — ritės ilgis, d — gylis, cm .

$$L = \frac{0,8(25^2 \times 3,4^2)}{9 \times 6,8 + 6 \times 3,4 + 10 \times 0,4} = 7,8 \text{ mH} \quad (20.1)$$

Imtuvo ritės duomenys:

- $r = 2,4 \text{ cm}$
- $N = 10$
- $l = 4,8 \text{ cm}$

- $d = 0,3 \text{ cm}$

Induktyvumo skaičiavimai:

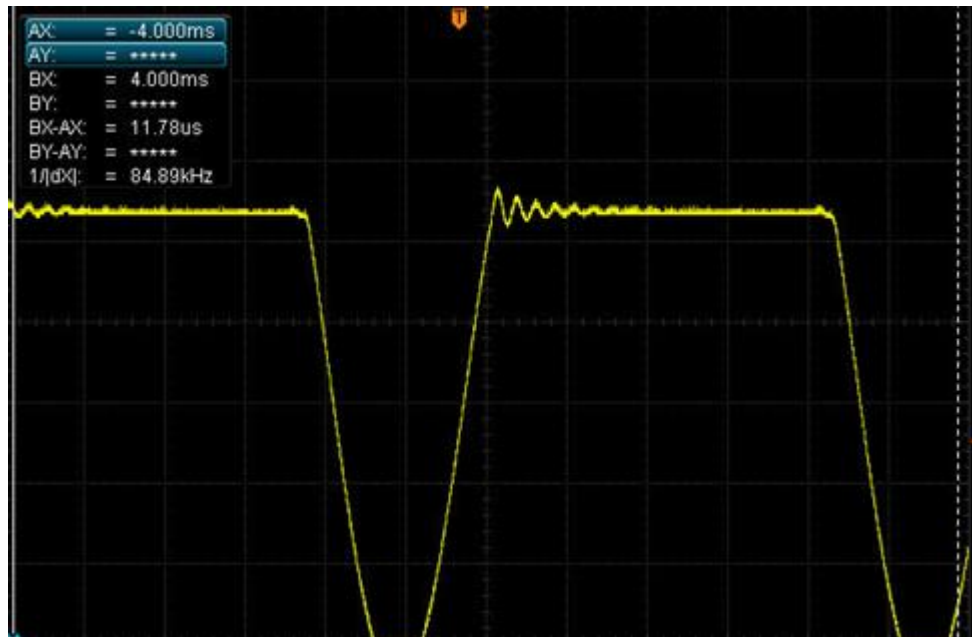
$$L = \frac{0,8(N^2 \times r^2)}{9l + 6r + 10d}, \quad (21)$$

čia L (H) — induktyvumas, N — apvijų skaičius, r — spindulys, m^2 ; l — ritės ilgis, d — gylis, cm .

$$L = \frac{0,8(10^2 \times 2,4^2)}{9 \times 4,8 + 6 \times 2,4 + 10 \times 0,3} = 0,849 \text{ mH} \quad (21.1)$$

3.3. Perduodamos energijos priklausomybės nuo atstumo tyrimas

Šiame skirsnyje daromi bandymai keičiant atstumą tarp siųstuvo ir imtuvo ričių. Nagrinėjamas maksimalus toliausias atstumas tarp ričių, bei minimaliausias nuotolis kuriame dar yra aptinkama įtampa. Taip pat optimaliausiais analizuojamas atstumas tarp siųstuvo bei imtuvo.



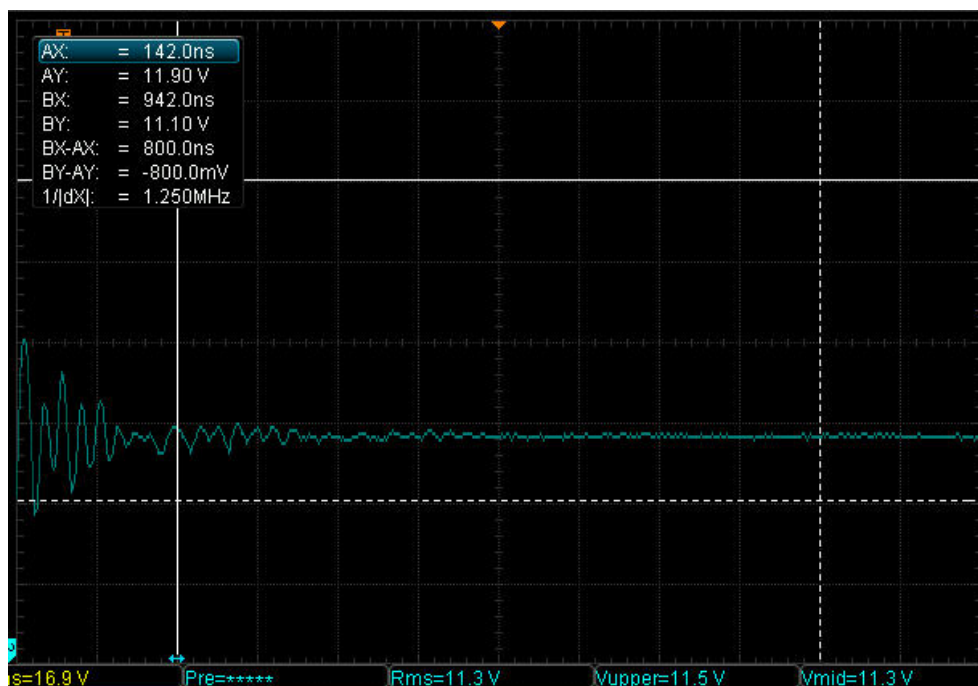
3.5 pav. Ritės 95 mm atstumu — siųstuvo pusė

Atliktas bandymas parodo, kad siųstuvo ir imtuvo komunikacija vis dar aptinkama prie 95 mm atstumo. Tokioje padėtyje įtampa siekia 0,01 V. 3.5 pav. atvaizduoja įtampos oscilogramą, kurioje matomas tranzistoriaus atsidarymas. Jis pavaizduotas viršutinėje kreivės dalyje. Pradžioje kreivė išauga, vėliau stabilizuojasi.



3.6 pav. Ritės mažiausiu atstumu — siųstuvo pusė

Oscilogramoje kuri pavaizduota 3.6 pav., gaunasi, kad kai atstumas yra minimalus tarp siųstuvo ir imtuvo, yra matomas didesnis pereinamasis vyksmas nei prieš tai atliktame bandyme, siųstuvo pusėje. Tokiu atstumu generuojamas dažnis siekia 125,0 kHz.

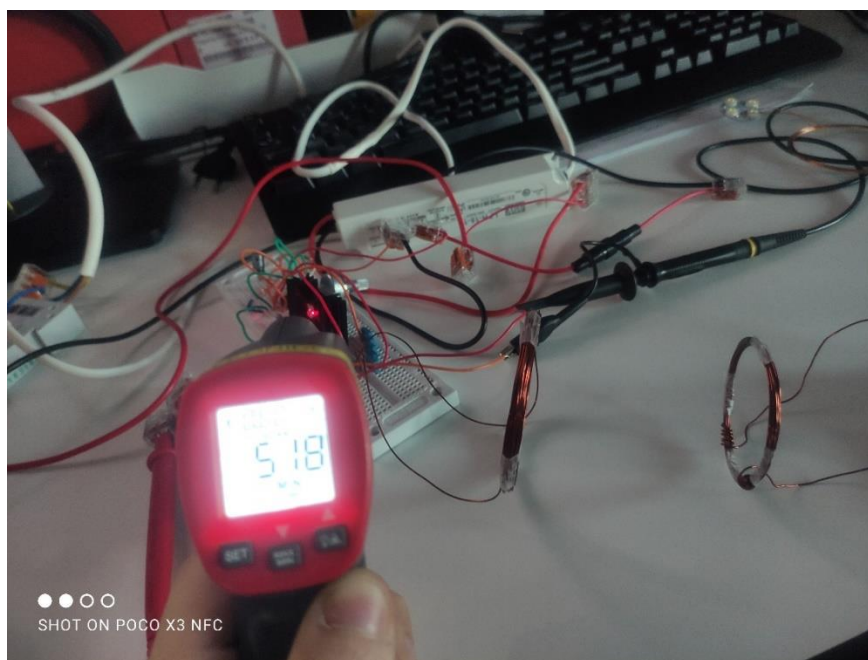


3.7 pav. Ritės mažiausiu atstumu — imtuvo pusė

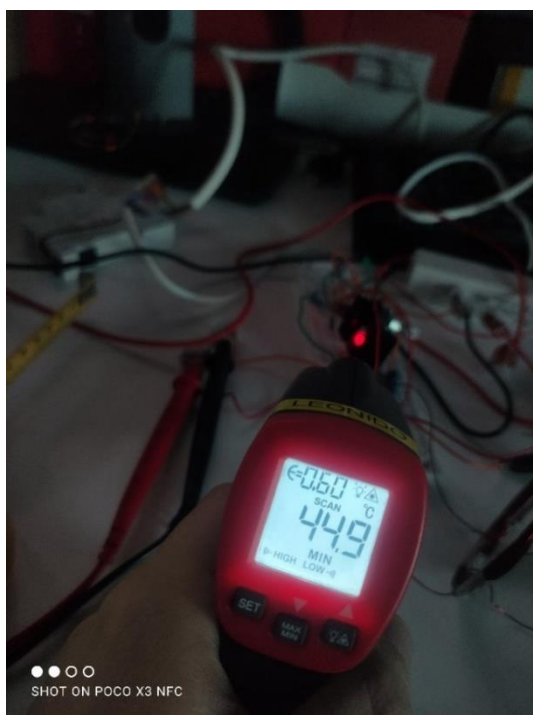
Grafike, kuris pavaizduotas 3.7 pav. matoma įtampa imtuvo galuose. Čia matoma oscilograma su iškraipymais, pastebimas pereinamasis vyksmas. Galutinė perduotos įtamos vertė ties minimaliu atstumu siekia 11,9 voltų. Išmatuotas dažnis oscilografo duomenimis siekė 1,250 Mhz.

Taip pat buvo nagrinėjama, tranzistoriaus — „mosfet“ temperatūra keičiant atstumą. Tam tikslui buvo panaudotas nuotolinis temperatūros matavimo prietaisas. Temperatūros vertės

pavaizduotos 3.8 pav. ir 3.9 pav. Bandymai buvo atlikti po 3 min modelio veikimo, kad būtų pasiekta nusistovėjusi temperatūra. Temperatūros stebėjimo tyrimas parodė, kad tranzistoriaus temperatūra svyruoja tarp 44,9–51,8 °C.



3.8 pav. Tranzistoriaus darbinė temperatūra, kai atstumas 95 mm. Po 3 min

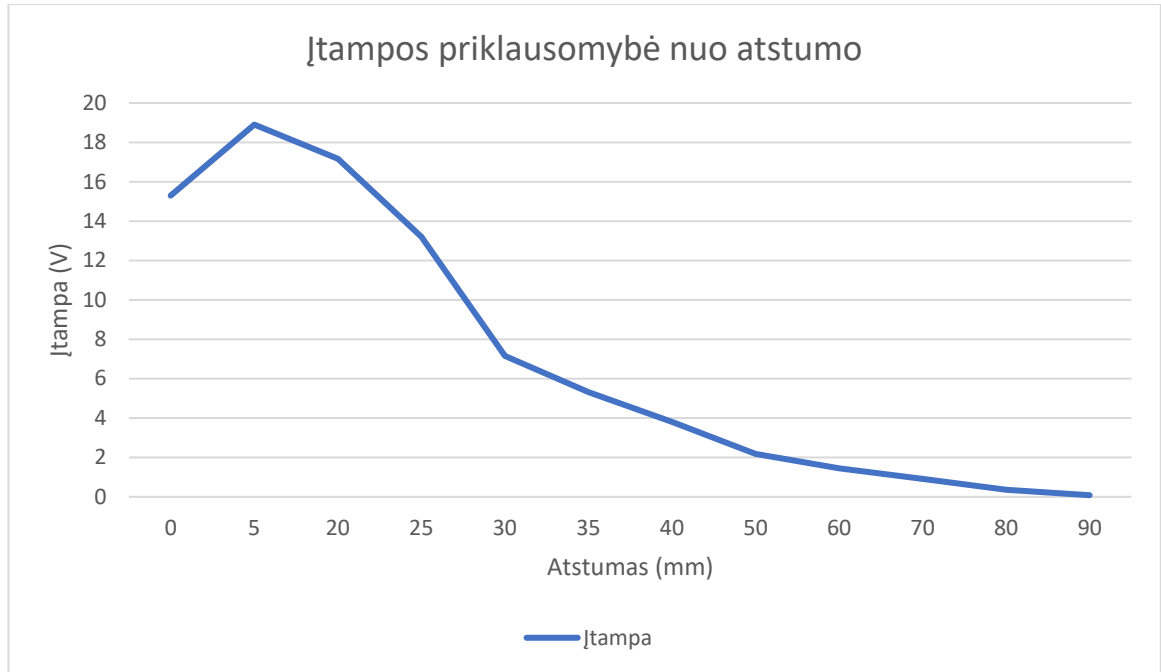


3.9 pav. Tranzistoriaus darbinė temperatūra — atstumas 0 mm. Po 3min

Atlikus pagrindinius bandymus buvo sudarytos kreivės kurios atvaizduoja įtampos pokyčio priklausomybę nuo atstumo. Įtampos pokyčio vertės pavaizduotos 2 lentelėje bei žemiau pateiktas 3.10 pav.

2 lentelė. Matavimo priklausomybės keičiant atstumą tarp siųstuvo ir imtuvo ričių

L (mm)	0	5	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
U (V)	15,3	18,9	17,16	13,20	7,15	5,31	3,81	2,17	1,45	0,91	0,35	0,08

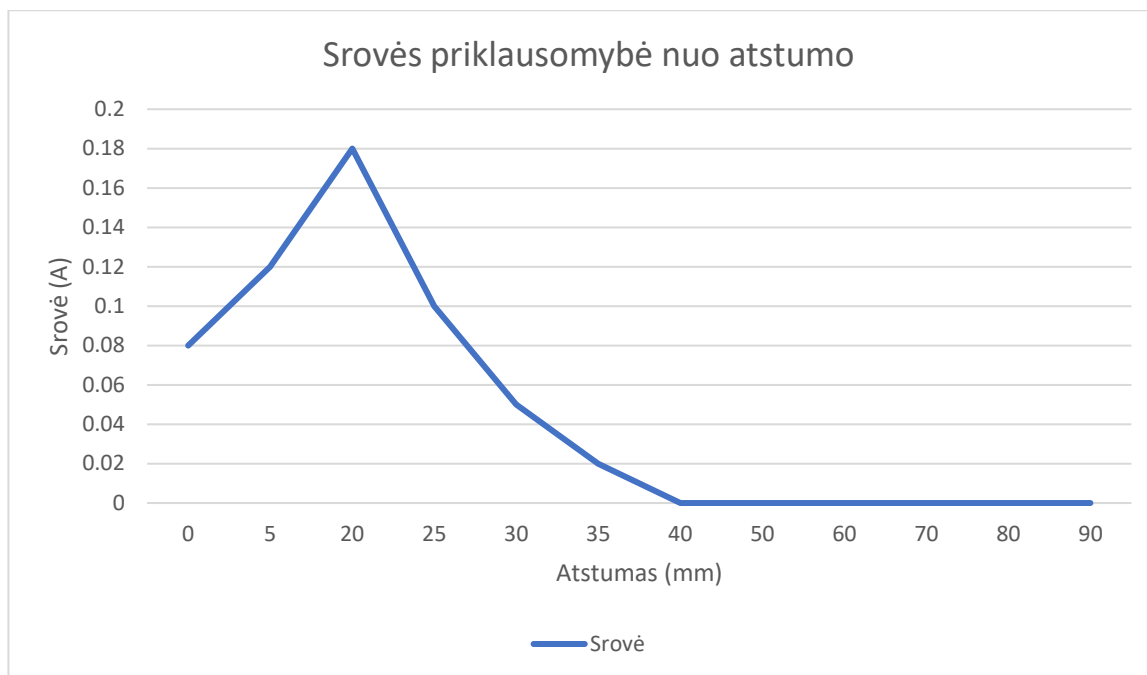


3.10 pav. Įtampos priklausomybės nuo atstumo grafikas

Toliau atliktos srovės priklausomybės nuo atstumo, vertės pavaizduotos 3 lentelėje. Taip pat po lentele atvaizduotas pokyčio grafikas 3.11 pav.

3 lentelė. Srovės priklausomybės keičiant atstumą tarp siųstuvo ir imtuvo ričių, siųstuvo pusė

L (mm)	0	5	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
I (A)	0,08	0,12	0,18	0,10	0,05	0,02	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

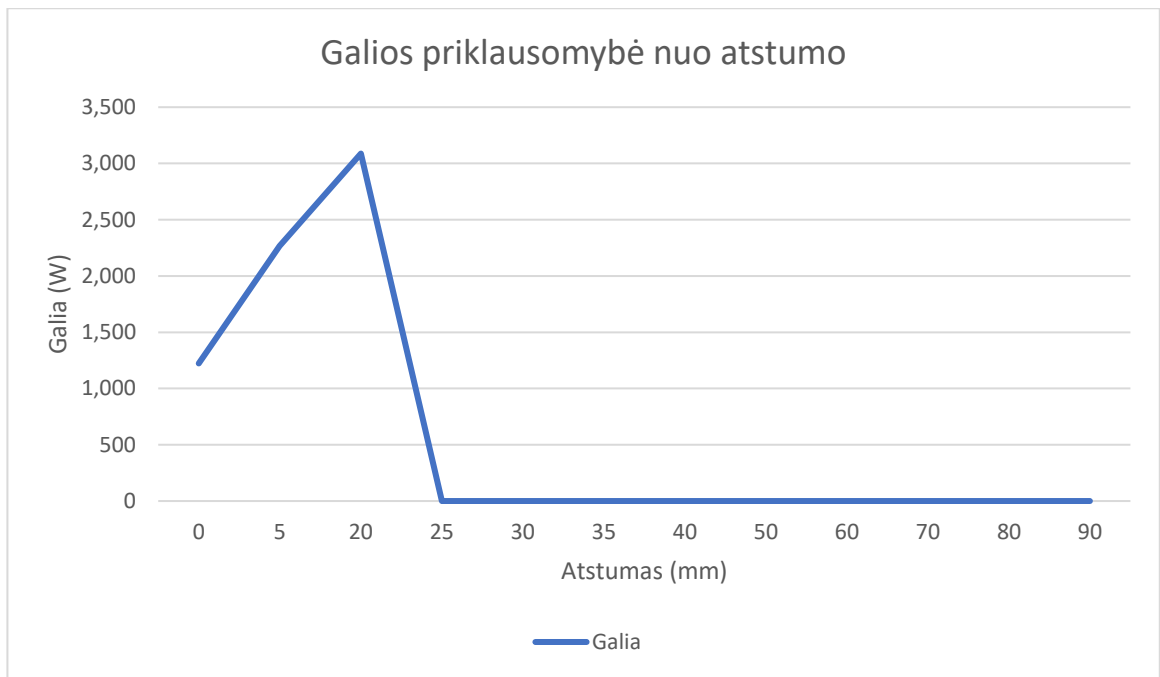


3.11 pav. Srovės priklausomybės nuo atstumo grafikas

Atliktas bandymas, kuriuo metu keičiant atstumą tarp imtuvo ir siųstuvo galima pastebėti skirtumą tarp tranzistoriaus atsidarymo, kuris yra ilgesnis, kai atstumas tarp ričių yra minimalus 0,0 mm, o mažiausias, kai atstumas yra 95 mm, kuriame fiksuojama įtampa. Prie mažiausio nuotolio ji siekia 11,9 V. Pagal srovės grafiką matome, kad srovės vertė yra didžiausia ties 20 mm atstumu, ji siekia 0,18 A, o po to ties 40 mm ji lygi nuliui. Temperatūros žymių pokyčių nepastebėta. Temperatūrai išsklaidyti panaudotas nemažas radiatorius, kuris apsaugo tranzistorių nuo perkaitinimo. Iš 3.11.1 pav. galima matyti, kur yra didžiausias gaunamas energijos kiekis bei kada sistema yra naudingiausia.

3.1 lentelė. Galio priklausomybė nuo atstumo

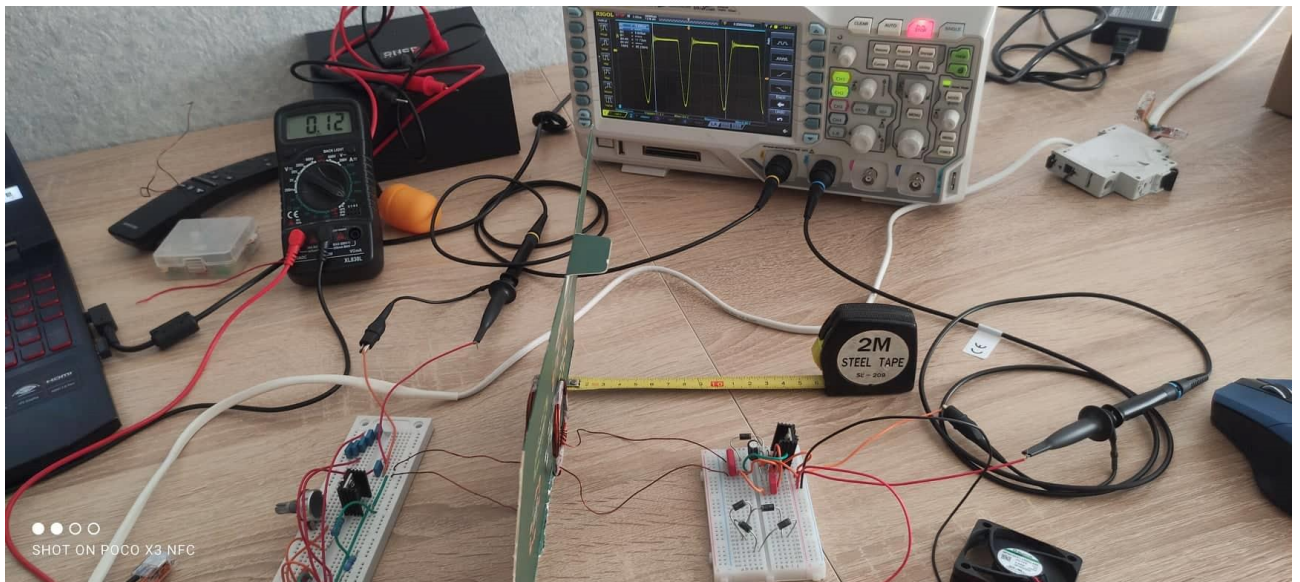
L (mm)	0	5	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
P (W)	1,224	2,268	3,088	1,32	0,3575	0,1062	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0



3.11.1 pav. Galios priklausomybė nuo atstumo grafikas

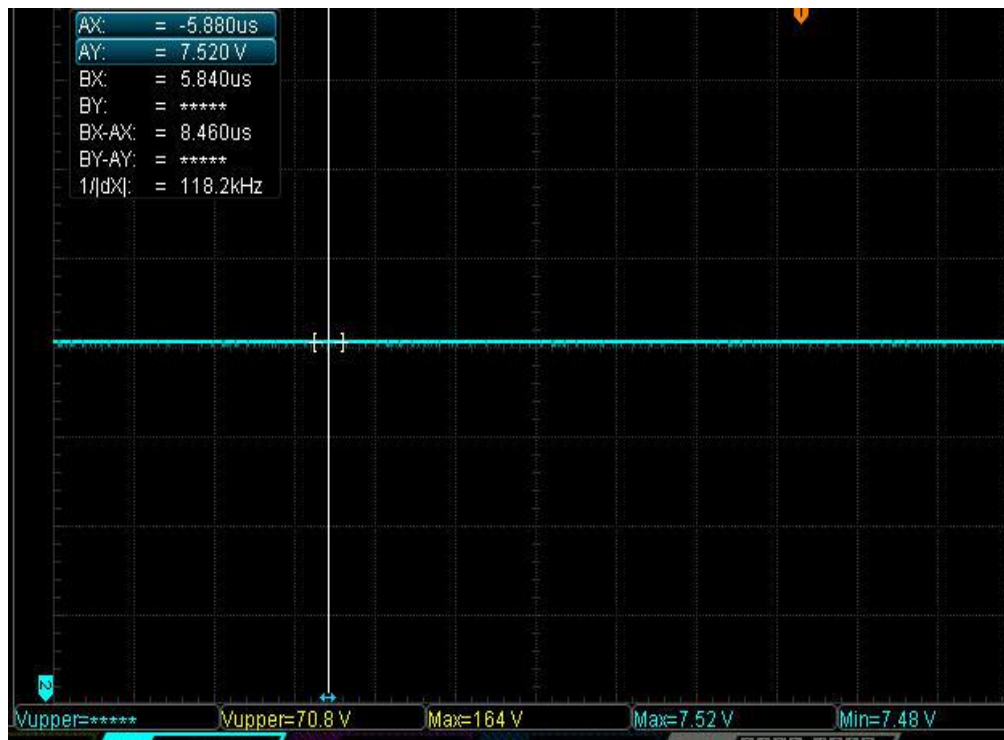
3.4. Perduodamos energijos priklausomybės tyrimas esant kliūtims

Šiame eksperimente nagrinėjamas įtampos pralaidumas tarp įdiegto trikdžio. Šiuo atveju trikdys yra kartonas kurio storis yra 2 mm.



3.12 pav. Kliūtis tarp siųstuvo ir imtuvo

Įvedant trikdį tarp ričių buvo taikytas minimalus atstumas 0,0 mm. Kliūtis daro įtaka įtampos pralaidumui, kadangi ji nukrito beveik du kartus. 3.13 pav. pateiktas įtampos grafikas išmatuotas imtuve.

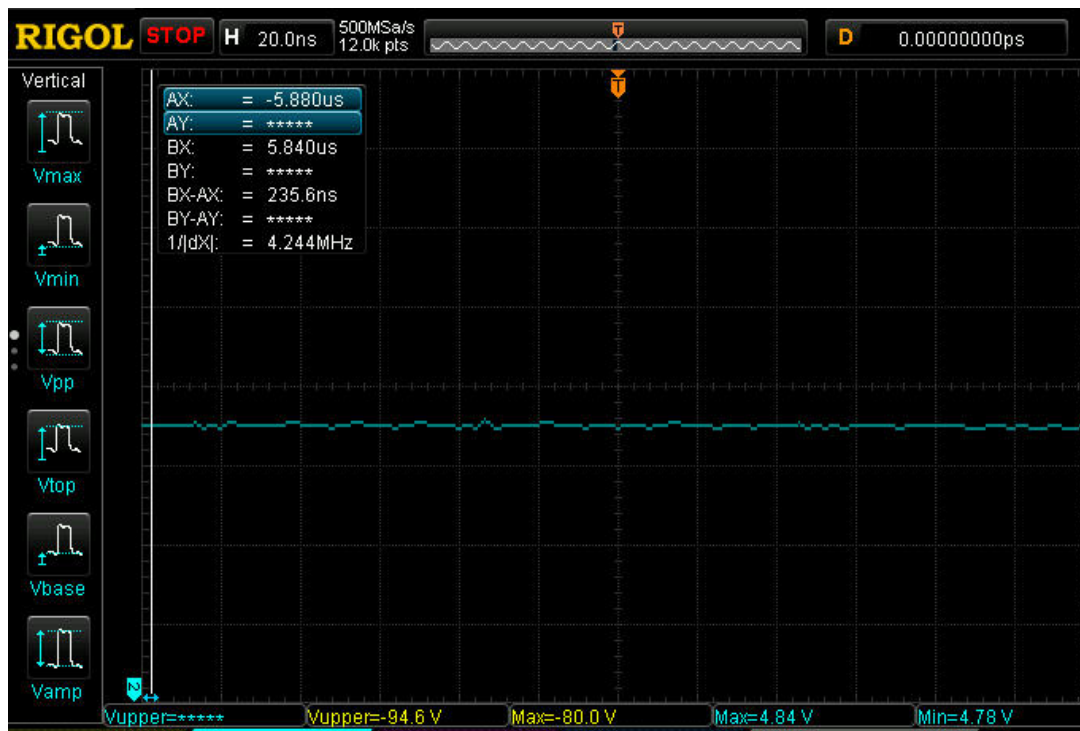


3.13 pav. Imtuvo pusė naudojant 2 mm kliūtį

Iš 3.13 pav. matoma, kad įtampa maksimaliai buvo pakilus iki 7,52 V, minimali 7,48 V. Taip pat dažnis kuris atsiranda imtuve siekia 118,2 kHz. Srovė su įterpta kliūtimi yra 0,12 A, kai taikomas minimalus atstumas.

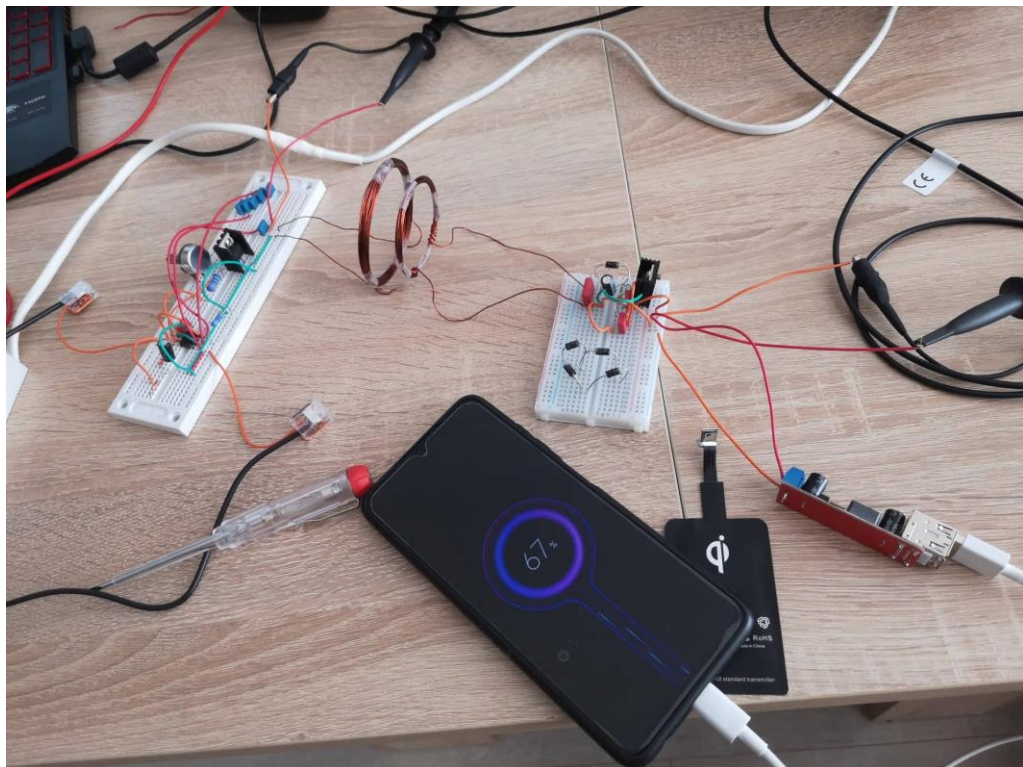
3.5. Tyrimas naudojant žeminamąjį keitiklį

Žeminančiojo keitiklio paskirtis yra 12 V įtampą pažeminti iki 5 V įtampos. Pasiekus tokią įtampą galima įkrauti telefoną belaidžiu būdu (jeigu yra integruota imtuvo ritė į telefoną) arba prijungus papildomą imtuvą prie įkrovimo lizdo. Imtuve gauta įtampos oscilograma pavaizduota 3.14 paveiksle.



3.14 pav. Imtuvo pusė naudojant žeminantį keitiklį

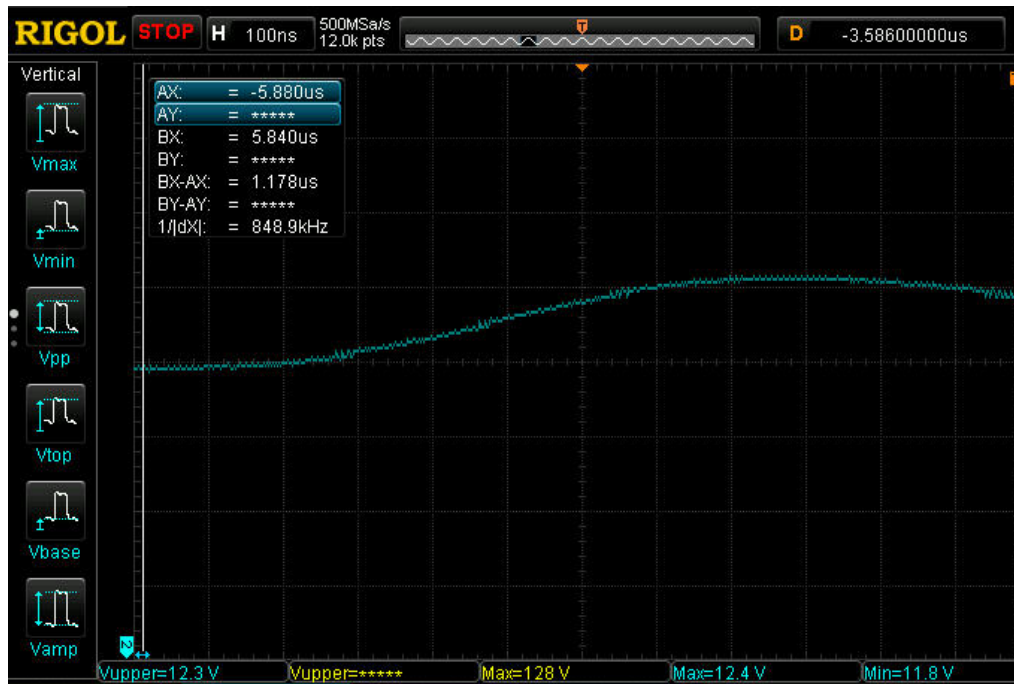
Iš 3.14 pav. galima pamatyti, kad įtampa svyruoja tarp 4,84–4,78 V. Taip pat dažnis siekia 4,244 Mhz. Įtampa gauta imtuve tinka įkrauti mobilų telefoną. Siekiant pagerinti įkrovimo spartą, siūstuve keičiant dažnį pakeliama tiekiamą srovė. 3.15 pav. pateiktas belaidis mobilaus telefono įkrovimo prietaiso vaizdas.



3.15 pav. Keitiklio panaudojimas praktiškai įkraunant telefoną

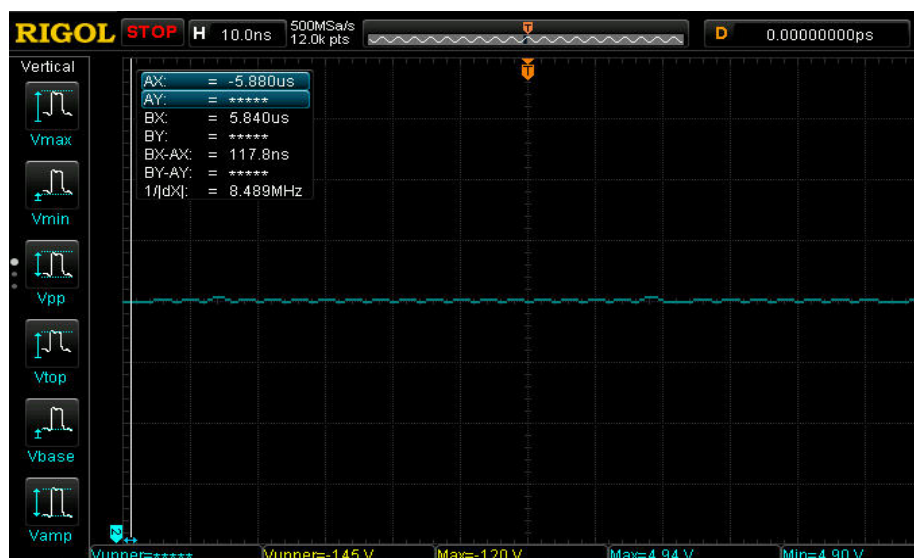
3.6. Įtampos pokyčio tyrimas su realiaja induktyviaja apkrova

Šis tyrimas skirtas išnagrinėti pokyčius prijungus apkrovą. Šiuo atveju apkrova yra 0,84 W ventiliatorius, kurio maitinimo įtampa 12 V. Esant apkrovai nagrinėjama priklausomybė tarp atstumo tarp imtuvo ir siūstuvo. Žemiau pateikti ventiliatoriaus veikimo grafikai, kai atstumas yra minimalus ir kai yra tolimiausias, kurio užtenka tiekti energiją ventiliatoriui.



3.16 pav. Įtampos oscilograma imtuve, arčiausiame taške

3.16 pav. matome grafiką kuriame imtuvas ir siūstuvai arčiausiai vienas kito — 0 mm. Ties tokiu atstumu įtampos oscilograma svyruoja ties 11,8–12,4 V. Dažnis kuriuo veikia imtuvas 848,9 kHz.

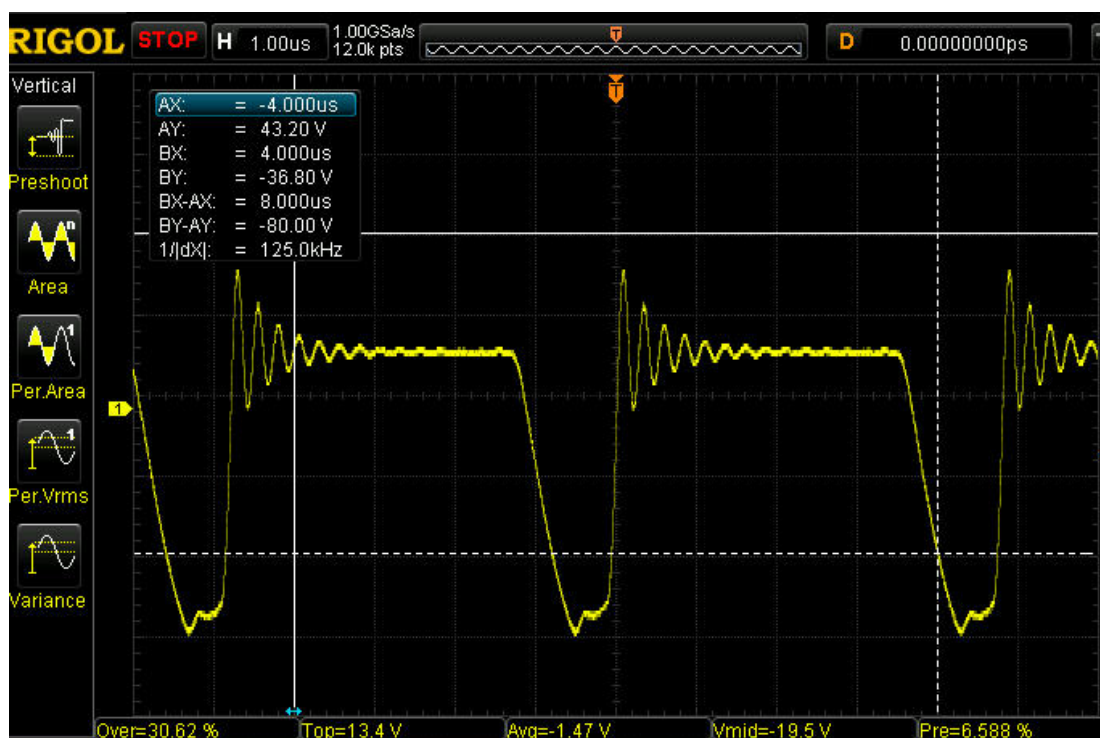


3.17 pav. Įtampos oscilograma imtuve toliausias atstumas kuriame sukasi ventiliatorius, 20 mm

Pagal 3.15 pav. rezultatus matoma, kad minimali įtampa kurioje vis dar sukasi ventiliatorius yra 4,90 V, maksimali 4,94 V. Atstumas ties kuria dar įsuka ventiliatorių yra 20 mm. Dažnis kuriuo veikia imtuvas yra 8,489 MHz. Analogiškai keičiant atstumą mažėja ir ventiliatoriaus greitis bei kinta srovės suvartojimas, kuris arčiausioje padėtyje yra didžiausias, toliausiai — mažiausias.

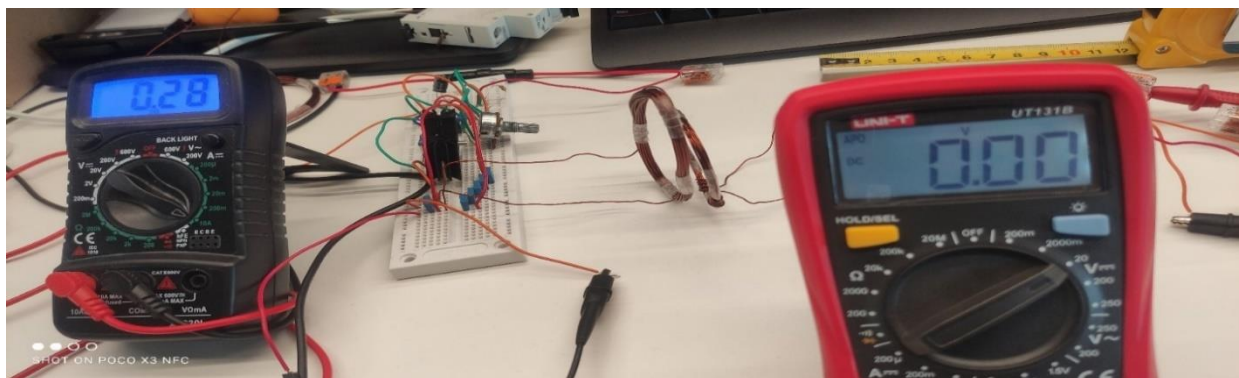
3.7. Ritės deformacijos įtakos tyrimas

Šiame skyriuje tiriamas deformacijos poveikis siūstuvo ritei. Pagrindiniams bandymams atlikti naudota ritė suspaudžiama, taip ji praranda standartinę formą. Žemiau pateiktame 3.18 pav. matosi, kad pati forma smarkiai nesiskiria nuo standartinės ne deformuotos ritės, perreguliavimas (angl. overshoot) yra toks pats kaip ir prieš deformaciją — 30,62 %. Tačiau šiek tiek skiriasi išduodama įtampa.



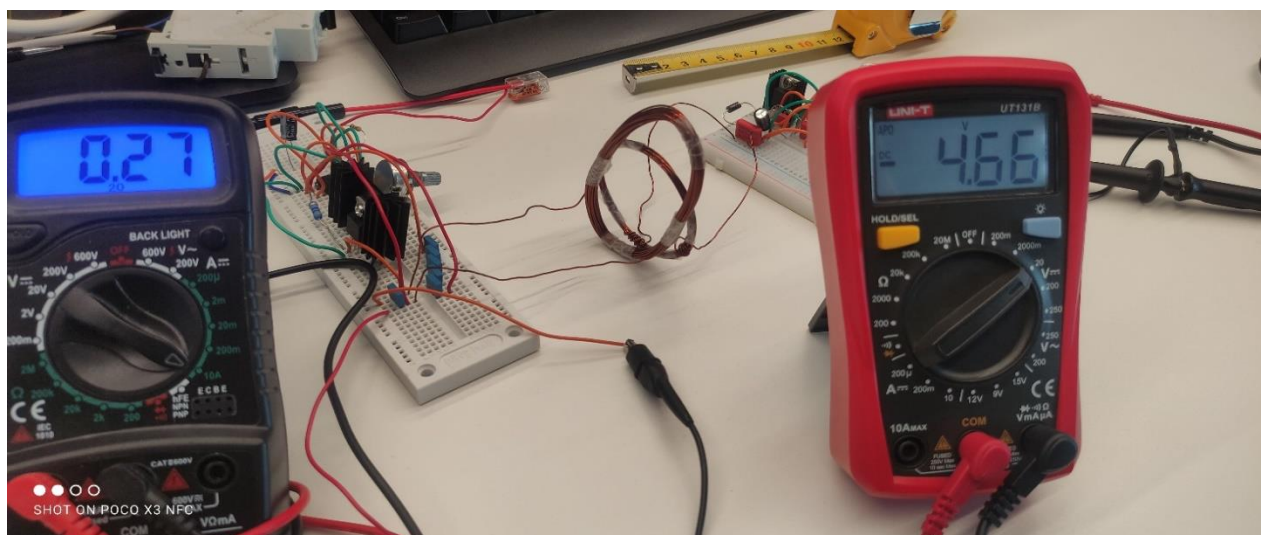
3.18 pav. Deformuotos siūstuvo ritės oscilograma

Atliekant bandymą buvo keičiamas atstumas iki 15 mm. Pakeistu atstumu tarp ričių negalima perduoti įtamos, tai galima pamatyti iš 3.19 pav. dešinėje esančio voltmetro. Ampermetras ties tokiu atstumu siūstuve fiksuoja 0,28 A srovę.



3.19 pav. Atstumas tarp ričių 15 mm

Bandymas su minimaliausiu atstumu atvaizduotas 3.20 pav. Pagal voltmetro duomenis, esant minimaliam atstumui įtampa siekia 4,66 V. Ampermetro parodymai beveik nesikeičia ir išlieka panašūs — 0,27 A. Lyginant su rezultatais prieš deformaciją srovė buvo 0,18 A, bet įtampa buvo gerokai didesnė — 11,9 V.



3.20 pav. Minimalus atstumas tarp ričių

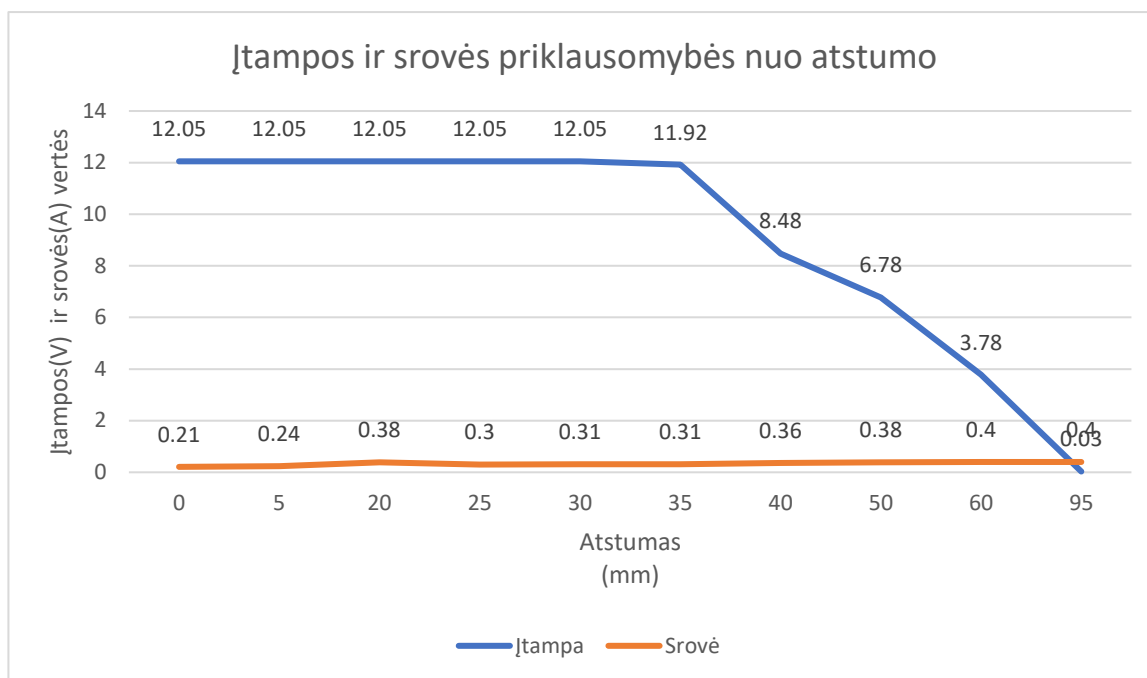
Atliktas bandymas formuoja išvadą, kad efektyviausias energijos perdavimas įvyksta tuomet, kai abi ritės yra vienodos ir proporcingai pasiskirsto magnetinio lauko linijos. Esant nors vienam ričių nesutapimui, elektromagnetinis laukas taip gerai nepasiekia kitos ritės ir atsiranda dar didesni nuostoliai. Taip pat nustatyta, kad keičiant atstumą smarkiai sumažėja ir perdavimo nuotolis.

3.8. Efektyvumo gerinimo būdai

Šioje dalyje atlikti bandymai siekiant pagerinti efektyvumą. Pirmasis bandymas — ričių skersmens keitimas. Duomenys pateikti 4 lentelėje.

4 lentelė. Atstumo keitimo duomenys naudojant didesnio skersmens rites.

U (V)	12,05	12,05	12,05	12,05	12,05	11,92	8,48	6,78	3,78	0,03
I (A)	0,21	0,24	0,38	0,30	0,31	0,31	0,36	0,38	0,40	0,40
L (mm)	0,0	5	20	25	30	35	40	50	60	95



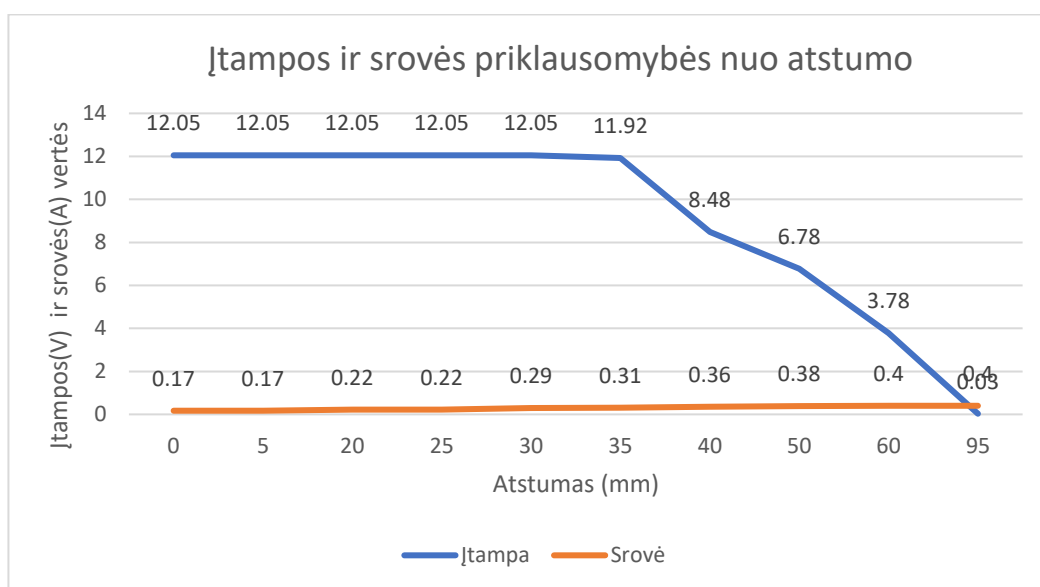
3.21 pav. Įtamos ir srovės priklausomybės grafikai nuo atstumo

Pagal gautą grafiką 3.21 pav. matome, kad įtamos vertė ilgiau išlieka fiksuota — 12,05 V, priklausomai nuo atstumo. Srovės grafikas žymiai nepakito lyginant su prieš tai naudotomis ritėmis.

Kitas bandymas atliktas su modifikuotomis ritėmis įdiegus ferito šerdis. Duomenys pateikti 5 lentelėje:

5 lentelė. Atstumo keitimo duomenys su ferito plokštėmis.

U (V)	12,05	12,05	12,05	12,05	12,05	11,92	8,48	6,78	3,78	0,03
I (A)	0,17	0,17	0,22	0,22	0,29	0,31	0,36	0,38	0,40	0,40
L (mm)	0,0	5	20	25	30	35	40	50	60	95



3.22 pav. Įtamos ir srovės priklausomybės grafikai nuo atstumo su ferito plokštėmis

Atlikus bandymą, kuris pavaizduotas 3.22 pav. ir pagal gautus grafikus matosi, kad esminių pokyčių neįvyko. Įterpus kliūtį kuri buvo ankščiau naudota (2 mm), pastebima, kad su didesnėmis ritėmis ir ferito plokštėmis atsiranda geresnis elektromagnetinis laidumas ir perduodama įtampa yra tokia pati kaip ir siųstuve. Ankstesnis bandymas buvo nesėkmingas, nes įtampa su tokia kliūtimi buvo 7,52 V, o dabar 12,05 V (žr. 3.23 pav.).



3.23 pav. Bandymas naudojant ferito plokštes



3.24 pav. Bandymas su prieš tai naudota 2 mm kliūtimi

Atliktas bandymas su kliūtimi, kuris pavaizduotas 3.24 pav. parodo, kad ferito plokštės pagerina laidumą. Naudojant tokias plokštes ilgiau išlieka fiksuota 12 V įtampa, o tai reiškia, kad yra patiriami mažesni nuostoliai.

3.9. Ričių parametrų priklausomybės nuo dažnio

Šioje skiltyje nagrinėjamos dažnio charakteristikos su LCR metru (žr. 3.25 pav.). Nagrinėjamos ričių savybės naudojant skirtingą dažnį. Dažnio diapazonas 10–100 kHz. Taip pat tiriamos viso maketo bei atskirų jo dalių savybės.

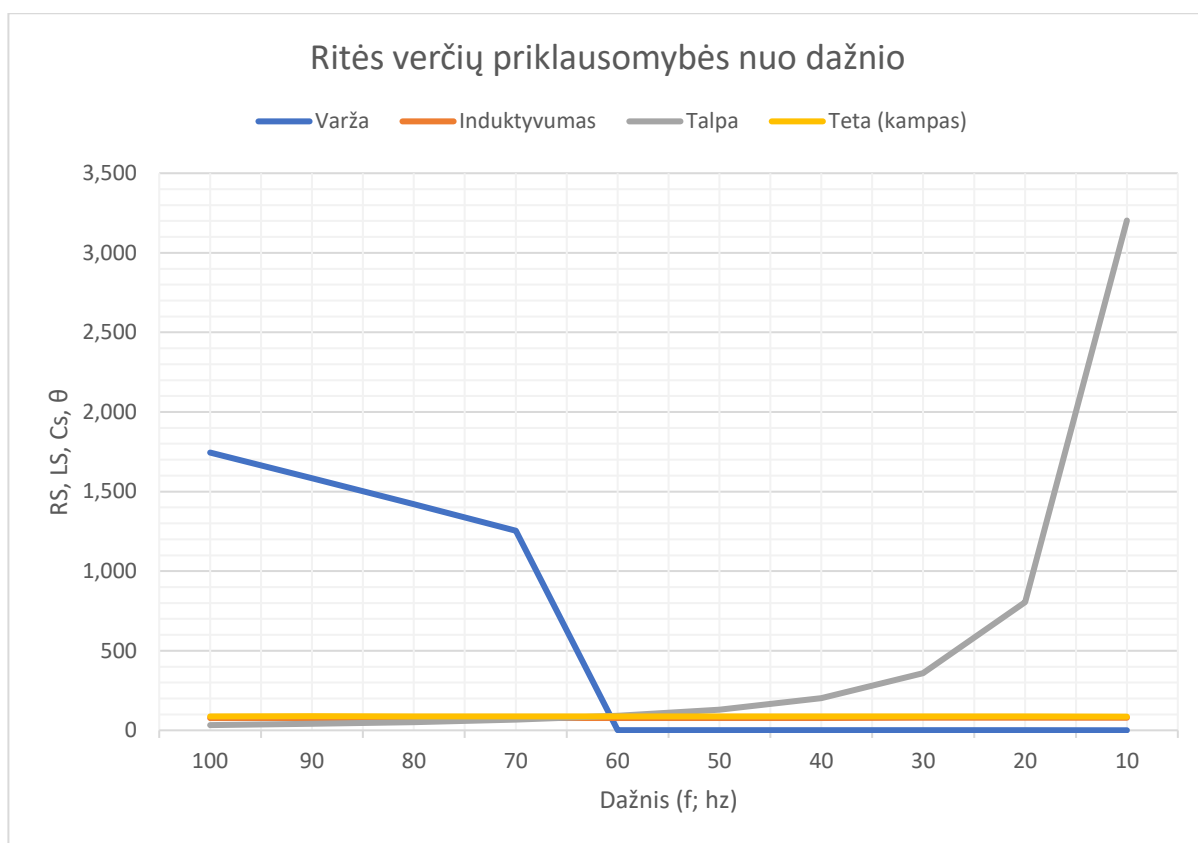


3.25 pav. LCR metras Hioki 3522-50

6 lentelė. Dažnio įtaka siųstuvo ritei.

Dažnis (f ; kHz)	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
Varža (R_s ; Ω)	1,745	1,583	1,420	1,253	1,080	0,910	0,755	0,599	0,459	0,359
Induktyvumas (L_s ; μH)	77,10	77,15	77,27	77,45	77,65	77,88	78,15	78,45	78,79	79,09
Talpa (C_s ; nF)	32,85	40,52	51,22	66,75	90,60	130	202,5	358,8	804,8	3203
Teta (θ ; laipsniai)	87,94	88,89	87,90	87,90	87,89	87,87	87,78	87,68	87,34	85,85

Tiek pagal 6 lentelę, tiek pagal 3.26 pav. galima pastebėti kurie parametrai labiausiai kito. Keičiant dažnį nuo 100 iki 10 kHz pastebima, kad labiausiai yra paveikta varža bei talpa. Varža pakito nuo 1,745 iki 0,359 Ω , o talpa nuo 32,85 iki 3203 nF.



3.26 pav. Atlikto tyrimo su LCR metru charakteristikos

Dažnio charakteristikos naudojant imtuvo rite:

7 lentelė. Dažnio įtaka imtuvo ritei.

Dažnis (f; kHz)	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
Varža (Rs; Ω)	337,8	315,8	296,8	272,8	249,8	222,8	195,8	165,9	135,8	110,6
Induktyvumas (Ls; μH)	10,97	11,00	11,03	11,07	11,12	11,18	11,25	11,36	11,45	11,56
Talpa (Cs; nF)	0,23	0,284	0,358	0,466	0,632	0,906	1400	2499	5538	21920
Teta (θ; laipsniai)	87,20	87,07	86,98	86,79	86,60	86,39	86,00	85,58	84,68	81,36

Imtuvo ritės charakteristikos naudojant LCR metrą taip pat leidžia suprasti, kad parametrai kurie labiausiai priklausomi nuo dažnio yra varža bei talpa. Varža kinta nuo 337,8 iki 110,6 Ω, o talpa nuo 0,23 iki 21920 nF (žr. 7 lentelė).

Dažnio charakteristikos naudojant ferito plokštes:

8 lentelė. Dažnio įtaka siųstuvo ritei kartu su ferito plokšte.

Dažnis (f ; kHz)	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
Varža (R_s ; Ω)	2,148	1,888	1,683	1,486	1,273	1,059	0,855	0,678	0,520	0,417
Induktyvumas (L_s ; μH)	115,0	115,1	115,2	115,3	115,5	115,7	115,9	116,2	116,4	116,5
Talpa (C_s ; nF)	22,03	27,17	34,36	44,83	60,92	87,56	136,5	242,2	543,9	2174
Teta (θ ; laipsniai)	88,30	88,38	88,33	88,32	88,33	88,33	88,32	88,23	87,96	86,74

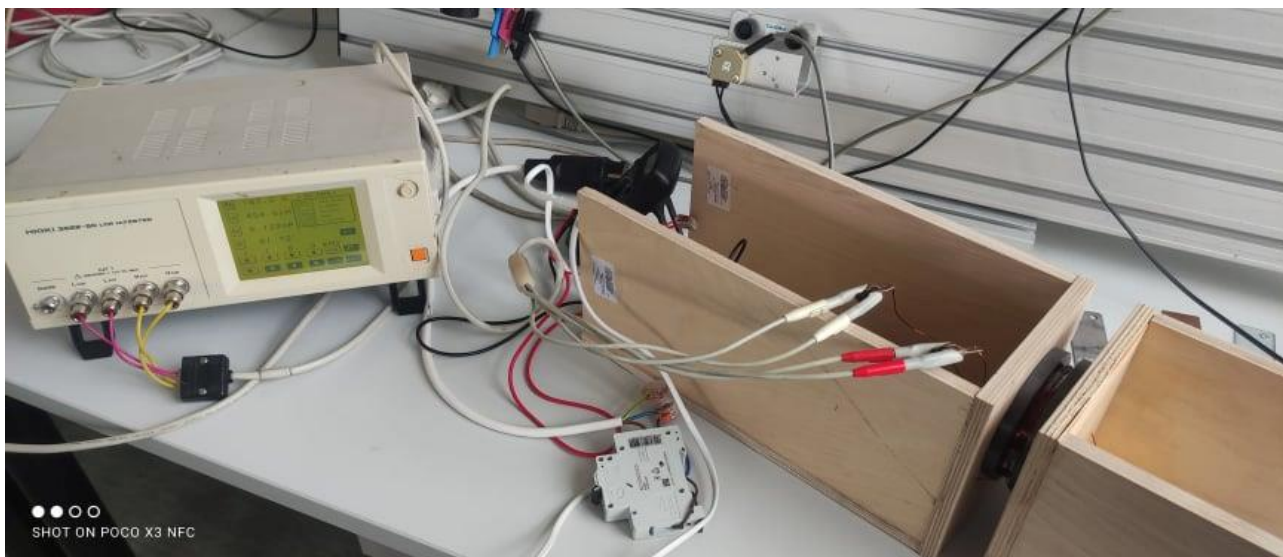
Atliekant tyrimą su ferito plokštėmis (žr. 8 lentelė) gautos pagerintos charakteristikos, lyginant su 6 lentele. Atitinkamai lyginant su 6 lentele pagerėjo visi parametrai prie (100–10) kHz dažnio diapazono. Naudinga tai, kad padidėjo induktyvumas, kuris nuo 77,10 μH pakilo iki 115,0 μH prie 100 kHz dažnio.

Belaidžio modelio – siųstuvo charakteristikos:

9 lentelė. Siųstuvo charakteristikos

Dažnis (f ; kHz)	100
Varža (R_s ; Ω)	244,2
Induktyvumas (L_s ; μH)	263,3
Talpa (C_s ; nF)	9,629
Teta (θ ; laipsniai)	-34,12

Išmatuotos charakteristikos su LCR metru prie artimo veikimo dažnio (žr. 9 lentelė). Pagal lentelę matosi, kad viso modelio induktyvumas yra daugiau nei du kartus didesnis už prieš tai nagrinėtos tik ritės induktyvumą (žr. 6 lentelė). Siųstuvo bei imtuvo matavimas modelio vaizdas pateiktas 3.27 paveiksle.



3.27 pav. Tyrimas LCR metru su artimu ryšiu tarp siųstuvo ir imtuvo

Belaidžio modelio — imtuvo charakteristikos:

10 lentelė. Imtuvo pusės charakteristikos

Dažnis (f ; kHz)	100
Varža (R_s ; Ω)	2,288
Induktyvumas (L_s ; μH)	16,65
Talpa (C_s ; nF)	151,1
Teta (θ ; laipsniai)	-77,66

Viso modelio charakteristikos:

11 lentelė. Siųstuvo ir imtuvo charakteristikos

Dažnis (f ; kHz)	100
Varža (R_s ; Ω)	162,2
Induktyvumas (L_s ; μH)	494,5
Talpa (C_s ; nF)	5,122
Teta (θ ; laipsniai)	61,72

Atlikti bandymai naudojanti LCR metrą parodo esminius parametrus kurie yra labiausiai priklausomi nuo dažnio. Labiausiai nuo dažnio priklauso varža ir talpa, o mažiausiai teta kampas bei induktyvumas tą galima pastebėti pažvelgus į 5–6 lenteles. Taip pat atliktas bandymas naudojant ferito plokštes, kurių dėka paaiškėjo kokią įtaką jos daro parametrų. Nustatyta, kad naudojant tokias plokštes pagerėja talpa bei pakeltas induktyvumas. Induktyvumas prie 100 kHz lyginant su

prieš tai atliktu bandymu pagerėjo nuo apytiksliai 78 μH iki 115 μH . Viso modelio parametrai (žr. 11 lentelė) prie artimojo dažnio ženkliai skiriasi nei tik imtuvo (žr. 10 lentelė) ar siųstuvo (žr. 9 lentelė) LCR parametrai. Prie artimojo dažnio induktyvumas yra 494,5 μH , kas yra svarbu perduodant energiją.

IŠVADOS

1. Apžvelgus teorinę dalį paaiškėjo belaidžio įkroviklio privalumai. Belaidis įkroviklis yra nekenksmingas aplinkai, juo galima įkrauti medicininius implantus, kurie pagerina gyvenimo kokybę, nėra problemų dėl maitinimo lizdo nusidėvėjimo. Išskirti ir belaidžio įkroviklio trūkumai: mažesnis efektyvumas ir didesni energijos nuostoliai, didesnė nei laidinio įkroviklio kaina, sudėtingesnė priežiūra ir remontas, netinkamas didelio galingumo tiekimui, esant apkrovai daugėja energijos nuostolių.

2. Atliekant įtampos priklausomybės nuo atstumo tyrimą buvo siekiama nustatyti, koks yra optimalus atstumas didžiausiai įtampai gauti. Pagal gautas įtampos ir srovių reikšmes sudarytas galios grafikas, kuris parodė, kad esant atstumui 20 mm, galia siekia 3,088 W. Panaudojus oscilografą nustatyta, kad keičiant atstumą siūstuvą generuoja dažnį, kuris yra 125 kHz.

3. Atliekant kliūties įtakos energijos perdavimui tyrimą, kaip kliūtis buvo pasirinktas 2 mm kartonas. Naudojant 2,4 cm spindulio imtuvo ritę ir 3,4 cm spindulio siūstuvo ritę, įtampa nukrito iki 7,52 V. Siekiant tokią įtampos šuolį sumažinti bei pagerinti efektyvumą, buvo panaudotos ferito plokštės ir didesnio skersmens ritės. Nustatyta, kad pasirinkus 4,1 cm spindulio rites ir ferito šerdis, įtampa ilgesnį laiką išliko fiksuota — 12,05 V. Įvedus 2 mm kliūtį pastebėta, kad įtampa nepakito ir tai leido suformuoti išvadą, kad kliūtis neturi reikšmingos įtakos energijos perdavimui.

4. Siekiant įvertinti deformuotos (suspaustos) siūstuvo ritės poveikį perduodamai energijai pastebėta, kad ties minimaliu atstumu įtampa siekia tik 4,66 V. Įtampos ties 15 mm atstumu užfiksuoti nebuvo įmanoma. Tokie gauti rezultatai leidžia teigti, kad deformuotos ritės ne taip gerai pataiko į magnetinių linijų zoną ir taip yra iššvaistoma energija.

5. Naudojant LCR metru buvo išnagrinėti induktyvumo, varžos, teta kampo bei talpos parametrai. Imtuvo bei siūstuvo ritei buvo paduoti skirtingi dažniai, kurie svyravo nuo 10 kHz iki 100 kHz ir buvo analizuoti gauti rezultatai. Aukščiausias siunčiamas dažnis buvo traktuojamas kaip artimas suprojektuotai realiai sistemai dažnis. Tiriant siūstuvo ritę paaiškėjo, kad labiausiai priklausomi parametrai nuo kintamo dažnio yra varža bei talpa, nes jie pakito nuo 1,745 Ω iki 0,359 Ω ir nuo 32,85 nF iki 3203 nF. LCR metro pagalba išmatavus viso modelio parametrus esant artimam dažniui nustatyta, kad induktyvumas siekė 494,5 μ H, varža — 162,2 Ω , talpa — 5,122 nF, teta kampas — 61,72 $^{\circ}$.

6. Teorinių bei eksperimentinių tyrimų dalis leidžia suprasti skirtumą tarp realios ir teorinės sistemos. Realioje sistemoje, priešingai negu teorinėje, yra daugiau veiksnių, lemiančių galios nuostolius. Realioje sistemoje egzistuoja tokių nuostolių, pavyzdžiui, šilumos, blogo kontakto, laidų varžos, komponentų nusidėvėjimo.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. A Defected Metasurface for Field-Localizing Wireless Power Transfer. Prieiga internetu: <<https://www.intechopen.com/chapters/74990> > , [žiūrėta 2022-03-24].
2. Analysis of Wireless Transmission of Power for Physical Security Use. Prieiga internetu: <<https://www.osti.gov/servlets/purl/1570551>>, [žiūrėta 2022-01-16].
3. Bevieles energijos perdavimas, istorija, technologija. Prieiga per internetą:<<https://lt.sodiummedia.com/3898404-wireless-transmission-of-electricity-history-technology-equipment> >, [žiūrėta 2020 11 30].
4. Conductix wampfler, Inductive Power Transfer IPT-Rail (2021). Prieiga internetu: <<https://www.conductix.us/en/products/inductive-power-transfer-iptr> >, [žiūrėta 2022-01-16].
5. Conductix wampfler, Inductive Power Transfer IPT-Floor (2021). Prieiga internetu:<https://www.conductix.us/en/products/inductive-power-transfer/inductive-power-transfer-iptr-floor?parent_id=5798 >, [žiūrėta 2022-01-16].
6. Conductix wampfler, Inductive Power Transfer battery charging (2021). Prieiga internetu:<https://www.conductix.us/en/products/inductive-power-transfer/wireless-charger-30-inductive-battery-charging?parent_id=5798 >, [žiūrėta 2022-01-16].
7. Sherif Hekal, Ahmed Allam, Adel B. Abdel-Rahman etc.(2016). Compact Size Wireless Power Transfer Using Defected Ground Structures.
8. Demands in Wireless Power Transfer of both Artificial Intelligence and Industry 4.0 for Greater Autonomy. Prieiga internetu: <https://www.researchgate.net/publication/329801929_Demands_in_Wireless_Power_Transfer_of_both_Artificial_Intelligence_and_Industry_40_for_Greater_Autonomy >, [žiūrėta 2022-01-16].
9. Dharani. Ma , Dr. Ravi. K. (2021), Systematic literature review on wireless power transmission.
10. Different Types of Wireless Power Transfer Technologies and their Working (2020). Prieiga internetu: <<https://circuitdigest.com/tutorial/different-types-of-wireless-power-transmission-technologies-and-their-working> >, [žiūrėta 2022-01-16].
11. Different Wireless Power Transfer Technologies and their Working. Prieiga per internetą: <<https://circuitdigest.com/tutorial/different-types-of-wireless-power-transmission-technologies-and-their-working> >, [žiūrėta 2020 12 22].
12. Editorial Staff. (2020), wireless power transfer. Prieiga internetu: <<https://www.powerelectronicsnews.com/wireless-energy-transfer/> >, [žiūrėta 2022-03-24].

13. Frequently Asked Questions: Wireless Power Transfer (WPT) & LTC4120. Prieiga internetu: < <https://www.analog.com/en/technical-articles/faq-wireless-power-transfer-wpt-ltc4120.html> > , [žiūrėta 2022-03-24].
14. GaN-Based High Efficiency Transmitter for Multiple-Receiver Wireless Power Transfer. Prieiga internetu: <https://trace.tennessee.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=7002&context=utk_graddiss > , [žiūrėta 2022-01-16].
15. Limitations of wireless power transfer technologies for mobile robots. Prieiga internetu: < https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/3D2A30DE128DB70C2E39BAB8F0CDC6CB/S2052841819000083a.pdf/limitations_of_wireless_power_transfer_technologies_for_mobile_robots.pdf > , [žiūrėta 2022-01-16].
16. Masiokas Stanislovas. *Elektrotechnika*. Vilnius, 1989. 259p. ISBN 5-420-00145-4. Prieiga internetu: < P05110110123.pdf (ajer.org) > , [žiūrėta 2022-01-16].
17. Mohamed Zellagui. (2020). A Defected Metasurface for Field-Localizing Wireless Power Transfer.
18. Mohamed Aboulalaa, Hala Elsadek and Ramesh K. Pokharel. (2020). WPT, recent Techniques for improving system efficiency.
19. Philips Semiconductors. (1999). N – channel enhancement mode trenchMOS transistor irfz44N.
20. Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system. Prieiga internetu: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221509861830154X> > , [žiūrėta 2022-01-16].
21. Sarawuth Chaimool, Chawalit Rakluea, Yan Zhao and Prayoot Akkaraekthalin, A Defected Metasurface for Field-Localizing Wireless Power Transfer.
22. Texas Instruments (2000 – rev. 2016). LM7812.
23. Texas Instruments. (2000 – rev. 2015). LM555 Timer.
24. Viskas apie elektros grandines. Prieiga internetu: < <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/introduction-to-wireless-power-transfer-wpt/> > . [žiūrėta 2022-03-24].
25. Vladimir Kindl, Michal Frivaldsky, Jakub Skorvaga and Martin Zavrel. (2020). Theoretical and Practical Design Approach of Wireless Power Systems.
26. Wireless Power Transfer Circuit and Its Working (2013 – 2022). Prieiga internetu: <<https://www.elprocus.com/wireless-power-transfer-circuit-and-working/> > , [žiūrėta 2022-03-24].

27. Wireless Power Transfer, Embedded Systems (2021). Prieiga internetu: <<https://www.watelectronics.com/wireless-power-transfer/>>, [žiūrėta 2022-03-24].
28. Alicia Triviño-Cabrera. (2020). Wireless Power Transfer for Electric Vehicles Foundations and Design Approach.
29. Tianjia Sun, Xiang Xie, Zhihua Wang (auth. (2013). Wireless Power Transfer for Medical Microsystems.
30. Naoki Shinohara.(2018). Wireless Power Transfer Theory, technology, and applications
31. Wireless power transmission, opening up a world of possibilities. Prieiga per internetą: <<https://emrod.energy/wireless-power-transmission/>>, [žiūrėta 2020 12 10].
32. Wireless power transmission technology with applications. Prieiga per internetą:<<https://aryacollegejaipur.medium.com/wireless-power-transmission-technology-with-applications-219357ef8aa2>>, [žiūrėta 2020 12 20].
33. Wireless Power Transfer by Using Magnetically Coupled Resonators. Prieiga per internetą: <<https://www.intechopen.com/books/wireless-power-transfer-fundamentals-and-technologies/wireless-power-transfer-by-using-magnetically-coupled-resonators>>, [žiūrėta 2020 12 23].
34. Wireless Power Transfer. Prieiga internetu: <<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/wireless-power-transfer>> , [žiūrėta 2022-03-24].
35. Xi Zhang. (2022). Wireless power transfer technologies for electrical vehicles.

PRIEDAI

Maketui sudaryti naudojami šie komponentai:

1. Potenciometras 22 k Ω ; 125 mW; $\pm 20 \%$; THT; 6 mm.
2. Mikroschema NE555D SO8.
3. Lyginimo diodas; THT; 1 kV; 1 A; Ammo Pack; Ifsm: 30 A; DO41; 500 ns DC COMPONENTS.
4. Rezistorius; fusible; THT; 2,2 k Ω ; 1 W; $\pm 10 \%$; Ø3,5 x 10 mm ROYAL OHM.
5. Plėv. Kondensatorius 0,1 uF 250 V MKS4 RM 10 mm.
6. Radiatorius, TO-220/202, 14 °C/W.
7. Plėv. Kondensatorius 0,022 uF 63 V MKS2 RM 5 mm.
8. Saugiklio 5 x 20 mm lizdas kabelinis su laidais.
9. Saugiklis 5 x 20 mm 0,25 A.
10. Jungiamieji laidai (jumper) eksperimentinei plokštei 140 vnt.
11. Eksperimentinė plokštė maketavimui 830 kontaktų.
12. Ventilatorius 50 x 50 x 10 mm 12 VDC 0,84 W 23m³/h 31 dBA vapo SUNON RoHS.
13. Tranzistorius MOS-N-Ch 55 V 41 A 110 W <0,022 R(25 A) TO 220.
14. Rezistorius 2 W 100 R 5%.
15. Plėv. Kondensatorius 0,1 uF 63 V MKS2 RM 5 mm.
16. Rezistorius 1 W 47 R 5%.
17. Plėv. Kondensatorius 0,01 uF 63 V MKS2 RM 5 mm.
18. Rezistorius 0,6 W 1 K 8 1% 10 vnt. pak.
19. Impulsinis maitinimo šaltinis LED 12 V 1.5 A, IP67, Mean Well + maitinimo laidas 1 m.
20. Varinė lakuota viela Ø1,0 mm ritėje 500 g.