



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Indukcinio krovimo sistemos elektromobiliams tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Paulius Staponkus

Projekto autorius

Doc. Gytis Svinkūnas

Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Indukcinio krovimo sistemos elektromobiliams tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Energijos technologijos ir ekonomika (6211EX073)

Paulius Staponkus

Projekto autorius

Doc. Gytis Svinkūnas

Vadovas

Prof. Alvydas Dosinas

Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Paulius Staponkus

Indukcinio krovimo sistemos elektromobiliams tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Pauliaus Staponkaus, baigiamasis projektas tema „Indukcinio krovimo sistemos elektromobiliams tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Staponkus, Paulius. Indukcinio krovimo sistemos elektromobiliams tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Gytis Svinkūnas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): energijos inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: energetika, ekonomika, elektromobiliai.

Kaunas, 2020. 53p.

Santrauka

Belaidis energijos perdavimas yra vis labiau populiarėjanti technologija, kurią bandoma pritaikyti vis įvairesnėse srityse. Ši sistema yra naudinga maitinant elektrinius prietaisus, kur neįmanoma, nesaugu ar nepatogu naudoti fizinius laidus. Technologijoje naudojamas abipusio induktyvumo principas. Viena iš būsimų taikymo sričių - automobilių pramonė. Ypač elektrinėse transporto priemonėse. Šiame darbe nagrinėjamas bevielių elektrinių transporto priemonių, naudojančių belaidį energijos perdavimą, įkrovimo sistemos veikimo principas. Pagrindinis tikslas sukurti efektyvią įkrovimo sistemą įtraukiant rezonansinę ritę bei iširti psistemos parametrus, turinčius didžiausią įtaką sistemos efektyvumui. Sistema susideda iš kintamos srovės šaltinio, perdavimo ritės, priėmimo ritės, įtampos keitiklio ir apkrovos.

Staponkus, Paulius. Evaluation of Induction Charging System for Electric Cars. Master's Final Degree Project / supervisor doc. Gytis Svinkūnas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): energy engineering, engineering sciences.

Keywords: energy, economic, electric cars.

Kaunas, 2020. 53p.

Summary

Wireless power transmission is an increasingly popular technology that is being applied in an increasingly diverse field. This system is useful for powering electrical appliances where it is impossible, unsafe, or inconvenient to use physical wires. The technology uses the principle of mutual inductance. One of the future applications is the automotive industry. Especially in electric vehicles. This paper examines the principle of operation of the charging system of wireless electric vehicles using wireless power transmission. The main goal is to create an efficient charging system by including a resonant coil and to investigate the system parameters that have the greatest impact on system efficiency. The system consists of an AC power source, a transmitter coil, a receiver coil, a voltage converter and a load.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Apžvalginė dalis	12
1.1 Elektromobiliai	12
1.1.1. Elektromobilių raida.....	12
1.1.2. Krovimo stotelės.....	12
1.1.3. Krovimo stotelių tipai.....	12
1.1.4. Indukcinio krovimo sistema	13
1.2. Bevielės krovimo stotelės veikimo principas	15
1.3. Elektromagnetinės indukcijos veikimo principas.....	17
1.4. Bevieliai krovimo sistemos taikymo pavyzdžiai	20
1.5. Ar belaidis įkrovimas yra saugus?.....	23
2. Praktinė dalis	24
2.1. Elektromobilių indukcinės krovimo sistemos moduliacija programine įranga	24
2.2. Plokštėje sumontuotos principinės krovimo stotelės tyrimas.....	27
2.2.1. Realios grandinės pereinamieji procesai	27
2.2.2. Tyrimas reguliuojant atstumą tarp sistemos ričių.....	29
2.2.3. Tyrimas keičiant kondensatorius talpą siųstuvo grandinėje	31
2.2.4. Tyrimas įvedant rezonansinę ritę tarp sistemos siųstuvo ir imtuvo	34
3. Taikomojo modelio tyrimas.....	37
3.1. Elektromobilio krovimo stotelės prototipo struktūra, parametrai bei charakteristika	37
3.2. Tyrimas, keičiant diodų tiltelio parametrus	40
3.3. Diodų temperatūrinė charakteristika, keičiant sistemos dažnį	41
3.4. Siųstuvo ričių parinkimas ir dažnio įtaka su skirtingomis ritėmis tyrimas	44
3.5. Tyrimas, keičiant imtuvo ritės parametrus	46
3.6. Bevielės energijos perdavimo sistemos magnetinio ir elektrinio laukų tyrimas	49
Išvados	51
Informacijos šaltinių sąrašas	52

Lentelių sąrašas

2-1 lentelė. Sistemos charakteristika keičiant atstumą tarp ričių.....	30
2-2 lentelė. Siųstuvo bei imtuvo charakteristikos keičiant kondencatoriaus talpą	32
2-3 lentelė. Sistemos charakteristika įvedant rezonansinę ritę	35
3-1 lentelė. Sistemos veikseną keičiant atstumą.....	38
3-2 lentelė. Sistemos charakteristika keičiant diodų stiprumą	40
3-3 lentelė. Imtuvo diodų charakteristika atsižvelgiant į laiką bei galią	42
3-4 lentelė. Siųstuvo charakteristika keičiant ritės parametrus	44
3-5 lentelė. Imtuvo charakteristika keičiant ritės parametrus.....	47
3-6 lentelė. Sistemos galios ir nuotolio tarp ričių įtaka elektriniam laukui.....	49

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Bevielės krovimo sistemos struktūra	15
1.2 pav. Tyrimui naudotas energijos šaltinis	15
1.3 pav. Įtampos keitiklis.....	16
1.4 pav. Tyrimui naudota įranga.....	16
1.5 pav. Įtampos lygintuvas	17
1.6 pav. Sistemos siūstuvo ir imtuvo sąveika.....	17
1.7 pav. Indukcinės krovimo stotelės schema	18
1.8 pav. Indukcinės krovimo stotelės atstojamoji principinė schema	18
1.9 pav. Elektromagnetinių jėgų tarpusavio sąsaja.....	19
1.10 pav. Indukcinė krovimo „stotelė“ elektrotechnikai.....	21
1.11 pav. Bevielės energijos perdavimo sistemos taikymas medicinoje.....	21
1.12 pav. Indukcinis įrankų įkroviklis	22
1.13 pav. Autonominis „Wibitoic“ dronas	22
1.14 pav. Belaidės krovimo stoties struktūra.....	23
2.1 pav. Sistemos moduliacija „MATLAB“ programoje	24
2.2 pav. Sistemos charakteristika, kai kondensatoriaus talpa 1000pF	25
2.3 pav. Sistemos charakteristika, kai kondensatoriaus talpa 4700pF	25
2.4 pav. Sistemos charakteristika, kai kondensatoriaus talpa $10,000\text{pF}$	26
2.5 pav. Praktinis bevielės energijos perdavimo modelis surinktas modeliavimo plokštelėje.....	27
2.6 pav. Sistemos charakteristika, kai siūstuvo kondensatoriaus talpa $C = 1\text{nF}$	28
2.7 pav. Sistemos charakteristika, kai siūstuvo kondensatoriaus talpa $C = 4,7\text{nF}$	28
2.8 pav. Sistemos charakteristika, kai siūstuvo kondensatoriaus talpa $C = 10\text{nF}$	29
2.9 pav. Imtuvo grandinės reakciją į atstumo bei kondensatorių talpumo pokyčius.....	30
2.10 pav. Tyrimui naudoti kondensatoriai ($150\text{pF} - 27000\text{pF}$)	31
2.11 pav. Prototipinio modelio imtuvo schema.....	31
2.12 pav. Siūstuvo reakcija į kondensatoriaus talpumo pokyčius	32
2.13 pav. Siūstuvo charakteristika, didinant sistemos dažnį	33
2.14 pav. Imtuvo charakteristika, didinant sistemos dažnį.....	33
2.15 pav. Sistemos charakteristika, didinant sistemos dažnį.....	34
2.16 pav. Įvestos rezonansinės ritės schema.....	35
2.17 pav. Imtuvo grandinės reakciją į atstumą be rez. ritės ir su rez. rite	36
3.1 pav. Indukcinės krovimo stotelės pritaikomojo prototipo struktūra.....	37
3.2 pav. Sistemos principinė schema.....	37
3.3 pav. Matavimo prietaisų pajungimo schema	38
3.4 pav. Sistemos efektyvumas keičiant nuotolį tarp ričių	38
3.5 pav. Įtampų ir srovių charakteristikos, keičiant atstumą tarp ričių.....	39
3.6 pav. Sistemos galios pokyčiai didinant atstumą	39
3.7 pav. Sistemos naudingumo koeficientas, keičiant diodų parametrus	41
3.8 pav. Prijungtų matavimo prietaisų pajungimo schema.....	42
3.9 pav. Diodų t ($^{\circ}\text{C}$) priklausomybė nuo laiko ir skirtingo šaltinio dažnio	43
3.10 pav. Imtuvo charakteristika keičiantis temperatūrai.....	43
3.11 pav. Siūstuvo modelis su pakeistomis ritės vijomis	44
3.13 pav. Sistemos charakteristika su skirtingų parametrų ritėmis	45
3.12 pav. Siūstuvo maksimali išgauta galia su skirtingomis ritėmis dirbant tuščiaja veika.....	45

3.14 pav. Sistemos efektyvumas su skirtingais ričių fiziniais parametrais	45
3.15 pav. Sistemos dažnio charakteristika su skirtingais ričių parametrais.....	46
3.16 pav. Imtuvo tyrimas keičiant ritės parametrus.....	47
3.17 pav. Sistemos efektyvumas su skirtingais ričių parametrais	48
3.18 pav. Galių pasiskirstymas sistemoje su skirtingais ričių parametrais.....	48
3.19 pav. Siųstuvo elektrinio lauko tyrimas	49
3.20 pav. Siųstuvo elektromagnetinių laukų charakteristika, didinant galią.....	50
3.21 pav. Laukų charakteristika, keičiant atstumą	50

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

IPT - Induktyvus galios perdavimas

EVJ - elektrovara

EV- elektromobilis.

AC - kintamoji elektros srovė

HF AC – aukšto dažnio kintanti srovė

DC - nuolatinė elektros srovė

CCS - standartinio laidinio krovimo sistema

CHAdeMO - nuolatinės srovės greito krovimo sistema.

Įvadas

Induktyvus galios perdavimas (IPT), tai inovatyvi technologija, kuri neseniai pradėta naudoti daugelyje sričių - nuo telekomunikacijos prietaisų iki medicinos aparatų, bei ateityje yra numanoma didelė perspektyva elektromobilių belaidžio įkrovimo stotelėse. IPT, arba induktyvusis įkrovimas, elektromagnetinės indukcijos principu perduoda aukšto dažnio, kintamąją energiją iš siųstuvo ritės į imtuvo ritę magnetinio lauko pagalba.[1]. Palyginti su tradiciniais įkrovikliais, indukciniai įkrovikliai valdomi patogesniu, estetiškesniu ir saugesniu būdu. Nors IPT technologija turi reikšmingų pranašumų, palyginti su tradiciniu laidinio krovimo naudojimu, indukcinis EV įkrovimas turi problemų, kurios smarkiai riboja jos praktinį pritaikymą. Viena problema yra ta, kad oro tarpas tarp siunčiančios ir priimančios ritės yra maždaug 10 ~ 25 cm. Didelis oro tarpas tarp mašinos dugno ir kelio dangos paviršiaus lemia mažą sąsają tarp siųstuvo ir imtuvo ričių. Nevisiškas lygiagretumas (arba horizontalus poslinkis) tarp ričių dar labiau sumažina jungties efektą. Norėdami pagerinti magnetinį sujungimą, tyrėjai pasiūlė keletą metodų. Pavyzdžiui, ferito strypai yra naudojami priverstinai nukreipti magnetinį srautą, o mechaniniai metodai gali būti naudojami siekiant sumažinti oro tarpą ir sumažinti horizontalų poslinkį. Tačiau magnetinis veikimo koeficientas tarp siunčiančiosios ir priimančiosios ritės vis dar yra daug mažesnis nei tradiciniuose transformatoriuose. Bendras ričių sąsajos koeficiento diapazonas yra nuo 0,1 iki 0,25. Mažas sąsajos efektas daro tiesioginę įtaką dviem svarbiausiems įkrovimo sistemos įvertinimo parametrams: efektyvumui ir galios perdavimui [2]. Galios koeficientas taip pat mažėja, kai mažėja magnetinė sąsaja, kuri yra visiškai priklausoma nuo oro tarpo tarp ričių, kurį taip pat galima pakeisti krovimo laikotarpiu sumažinus slėgį padangose. Praktinis IPT pritaikymas taip pat yra ribotas, nes šiuo metu nėra universalus įkroviklio, tinkančio įvairių dizainų EV. Šiais laikais rinkoje yra įvairių EV modelių, ateityje jų bus išleista daugiau. Susidūrusi su sparčiai augančia elektromobilių rinka, vis svarbesnis taps universalus įkroviklio dizainas [3]. Dabartiniai IPT standartai apribojo kai kuriuos pagrindinius parametrus, tokius kaip kintamosios srovės dažnis, vardinė įtampa ir trys galios lygiai. Tačiau šių standartų nepakanka norint suprojektuoti universalų belaidį įkroviklį. Taigi būtina parengti universaliosios įkrovimo sistemos projektavimo schemą, įskaitant siųstuvo energijos šaltinio, rezonansinių grandinių, valdymo strategijos, ryšių ir pan. projektą.

1. Apžvalginė dalis

1.1 Elektromobiliai

1.1.1. Elektromobilių raida

Elektromobilis – transporto priemonė, kurios varomoji jėga- elektrinis variklis, kuris energiją gauna iš baterijos. Pirmoji veikianti elektra varoma transporto priemonė išrasta 1832 metais- Škotijoje. Tačiau ji buvo labai primityvi ir turėjo svarų minusą- transporto priemonę varančios baterijos nebuvo įmanoma įkrauti antrą kartą, tad šis išradimas buvo nepriimtinas tam laikotarpiui [4].

Neužilgo, sparčiai pradėjus kristi iškastinio kuro kainai, pradėjo populiarėti naftos produktais varomų automobilių gamyba, ko pasekoje elektromobiliai buvo pamiršti.

Praėjus beveik dviem šimtams metų, 2008m. užfiksuotas augantis elektromobilių populiarumas. Didelis dėmesys šioms transporto priemonėms imtas skirti dėl keleto esminių privalumų. Pirmasis ir bene esminis – mažos eksploatavimo išlaidos. [5]

Tai siejama su talpesnių baterijų sukūrimu, iškastinio kuro brangimu, didesniu dėmesiu globalioms ekologinėms problemoms.

1.1.2. Krovimo stotelės

Elektrinių transporto priemonių įkrovimo stotelė, dar vadinama EV įkrovimo stotimi- yra infrastruktūros, tiekiančios elektros energiją, elementas. Elektrinių automobilių savininkai turi galimybę įkrauti transporto priemones namuose, darbe ar pakeliui iš jo. Kai kurios elektrinės transporto priemonės turi įmontuotus keitiklius, kurių pagalba galima pasijungti elektromobilį į įprastą 220V elektros lizdą. Kiti gali pasikrauti naudojant tik įkrovimo stotį, kuri turi galimybę užtikrinti elektros keitimą, parametrų stebėjimą ar saugos funkcijas [6]. Šios stotys taip pat reikalingos keliaujant, ir daugelis jų palaiko greitesnį įkrovimą esant aukštesnei įtampai ir srovei, nei galima gauti iš gyvenamose vietose įrengtose krovimo taškuose. Paprastai viešosios įkrovimo stotelės yra gatvėse įrengtos elektros komunalinių paslaugų įmonės arba prekybos centruose, restoranuose ir automobilių stovėjimo aikštelėse įrengtos krovimo stotelės, kurias valdo daugybė privačių įmonių

Įkrovimo stotelėse yra įvairios- itin patvarios ir specialios jungtys, kurios atitinka skirtingus standartus. Normaliam nuolatiniam naudojimui, faktiniu rinkos standartu tapo įkrovikliai su dviem ar trimis kombinuotosios įkrovimo sistemomis - CCS, CHAdeMO ir AC (nuolatinės įtampos) greituoju krovimu [7].

1.1.3. Krovimo stotelių tipai

Krovimo stotelės skirstomos į šias pagrindines kategorijas:

- **Gyvenamuosiuose namuose įrengtos privačios krovimo stotelės-** elektromobilio savininkas, grįžęs namo, įkrauna transporto priemonę naudodamasis įprastu namų elektros lizdu, o automobilis įkraunamas per naktį. Namų įkrovimo stotelėje paprastai nėra vartotojo autentifikavimo, nėra atskiro apskaitos matavimo prietaiso.
- **Stacionarios krovimo stotelės (įskaitant viešąsias įkrovimo stoteles)** – šias paslaugas paprastai teikia privačios ar komercinės už atitinkamą mokestį arba nemokamai (kartais

siūloma bendradarbiaujant su automobilių stovėjimo aikštelės savininkais). Šios stotelės gali būti kelių tipų- lėto bei greito krovimo ir dažnai skatina elektromobilių savininkus įkrauti savo automobilius, kol jie naudojami netoliese esančiomis paslaugomis. Tai gali būti automobilių statymas pačios organizacijos darbuotojams, automobilių statymas prekybos centruose, mažuose centruose ir viešojo transporto stotyse.

- **Greito krovimo stotelės**, kurių galia didesnė kaip 50 kW, ir per 15–40 minučių gali nuvažiuoti didesnę nei 150 kilometrų atstumą. Paprastai šios stotelės būna įrengtos poilsia vietėse šalia magistralinių kelių, kad būtų galima keliauti elektromobiliais dideliais atstumais [7].
- **Naujoji programa CARB**, kuri populiarėja užsienio šalyse, tačiau turinti didelę perspektyva ir ateityje yra numatoma ja pasinaudoti ir Lietuvoje. Tai baterijų apsikeitimo programa, kuri leidžia per 15min gauti papildomus 320 km. Ši paslauga labiau populiarnė kaip avarinė serviso paslauga sustojus vietovėje, kur aplink nėra galimybės pasikrauti transporto priemonės, tačiau gali būti naudojama ir degalinėse norint sutaupyti laiką krovimui.

Akumuliatorių talpos ir krovimo greičio poreikis tik didėja, todėl įkrovimo metodus reikėjo pakeisti ir patobulinti. Taip buvo pristatytos naujos galimybės: mobiliąsias įkrovimo stotys, bei įkrovimas naudojant elektromagnetinės indukcijos principą.

1.1.4. Indukcinio krovimo sistema

Įprastai, elektrinių automobilių įkrovimas yra varginantis ir ilgai trunkantis procesas. Elektromobilio savininkas turi ieškoti įkrovimo vietos, suradęs prijungti maitinimo kabelį (kas ištiesų apsunkina neįgudusį elektromobilio vartotoją) ir palikti automobilį kelioms valandoms iki pasiekiamas pakankamas įkrovos lygis. Neskaitant šių nepatogumų, tai nėra ir pats saugiausias krovimo būdas - laidai gali būti pažeisti nuo dažno jų mechaninio lankstymo, temperatūrų skirtumo, mechaninio pažeidimo (pervažiuojant mašina). Taip pat gali įvykti gedimas, ne tik pažeidus laidus, bet ir įvykus gedimui elektros rozetėje bandant pajungti kito tipo kabelį ar netyčia patekus vandens ar kitokių svetimkūnių.

Elektromagnetinės indukcijos krovimo galimybė buvo atrasta prieš daugiau nei šimtą metų, tačiau įvertinus to meto itin žemą technologijos efektyvumą- sistema nebuvo naudojama elektromobilių baterijoms įkrauti. Elektromagnetinės indukcijos veikimo principas- tai magnetinis laukas, sukurtas kintamos srovės siūstovo ritėje, tam tikru atstumu esančioje antroje ritėje sukuria elektrinį lauką, kurio dėka srovė pradeda tekėti apkrovai, kuri prijungta prie antrosios ritės- imtuvo.

Ši technologija buvo atrasta dar XIX amžiaus pradžioje, kai mokslininkas Michael Faraday išrado patį elektromagnetinės indukcijos principą. Mokslininkas įrodė, kad dvi vario ritės pastatytos viena šalia kitos ir vieną jų pajungus prie kintančio maitinimo šaltinio, susidarys magnetinis laukas, kuris kuria elektrinį lauką kitoje ritėje, kurio dėka antrąja rite pradeda tekėti srovė. Šio bandymo rezultatas- galime perduoti energiją oru, be jungiamųjų laidų. Ši technologija apima platų pritaikymo spektrą- nuo mažos galios dantų šepetėlių krovimo, iki didelės galios elektrinių transporto priemonių. Šiais inovacijų laikais, ši technologija itin sparčiai vystosi nuo teorinių žinių iki komercinių produktų.

Ilgainiui, belaidė krovimo technologija yra vystoma dvejomis kryptimis: energijos spinduliavimo (radiaciniu) perdavimo būdu (arba radijo dažnio pagrindu), bei neradiaciniu būdu (ričių sistemai

sąveikaujant elektromagnetiniame lauke). Radiacinis perdavimas veikia naudojant elektromagnetinį lauką, mikro-bangomis ar radijo dažnio bangomis kaip terpę energijos tiekimui radiacijos pavidalu. Dėl radiacinės spinduliuotės keliamų saugos reikalavimų, tokio tipo energijos perdavimas galimas tik itin mažos galios energijos perdavimui. Pavyzdžiui kryptinė radiacija galima tik iki 10mW galios energijos spinduliavimui tačiau galimas spinduliavimo atstumas siekia didelius atstūmus. Kai tuo tarpu neradiaciniu būdu, kurio veikimas pagrįstas elektromagnetiniu laukui sąveikaujant tarp dviejų ričių, kur perduodamos energijos kiekis yra neribojamas, tačiau veikimas yra saistomas atstumu tarp siųstuvo ir imtuvo (atstumas yra pagrindinis neigiamas kriterijus šiam energijos perdavimo būdai, o tai yra pasakoje to, kad elektromagnetinio lauko magnetinis laukas slopsta žymiai greičiau nei elektrinis)[8]. Atsižvelgiant į vartotojų saugą, daug priimtinesnis naudojimas neradiaciniu principu pagrįstas energijos perdavimas, kaip kad sutinkame tai belaidžiuose elektriniuose dantų šepetėliuose ar telefonų krovikliuose.

Lyginant šių dienų populiarijį krovimą laidu ir indukcinio būdu, pastarasis turi daugelį privalumų, tokių kaip:

- Nereikalingi jokie jungiamieji kabeliai, kurių įvairovė apsunkina vartotoją įkrauti automobilį turint kito gamintojo ar kito tipo krovimo laidą.
- **Mažesnės talpos akumulatoriai - mažesnė elektromobilių masė**, kas sąlygoja mažesnes sąnaudas. Kaip pavyzdį galima priskirti Pietų Korėjoje sukurtą indukcinio krovimo sistemą viešojo transporto (autobusų) infrastruktūrai. Šie sustoję stotelėse išlaipinti ir priimti keleivius, per tą laiką įkraudavo baterijas, ir šios energijos pilnai užtekdavo nuvykti iki kito sustojimo, kas leido sumažinti autobusų baterijų talpą daugiau nei trečdaliu, kai šioji sudaro ketvirtadalį autobuso su keleiviais masės. Lengviesiems automobiliams baterijos talpos mažinimas taip pat gali būti ateities galimybė priimant idėja, kad šie gali krauti važiuojant elektromagnetinės indukcijos veikiamu kelio paviršiumi [9].
- **Daugiau galimybių išnaudoti populiarėjančią atsinaujinančią energiją.** Elektros energijos poreikį belaidžiai įkrovimo sistemai gali iš dalies tiekti atsinaujinanti energija, tokia kaip saulės parkai, įrengti lygiagrečiai kelių magistralių. Be to tai padėtų išspręsti Lietuvoje esančia opią energijos balansavimo problematiką.
- **Tai užtikrina ilgesnį sistemos ilgaamžiškumą**, kadangi nėra jokių kontaktinių dalių, kurios būtų veikiamos mechaninio poveikio kiekvieną dieną, be to visos dalys yra paslėptos po pagrindo paviršiumi- tai užtikrina ilgesnę eksploataciją.
- **Ši inovacija suteikia platesnį galimybių racioną**- ypač tiems prietaisams, kur sudėtinga pakeisti išsikrovusias baterijas ar neįmanoma prijungti laidų baterijų įkrovimui, kaip pavyzdžiui kūno implantai ir panašūs dalykai [10].

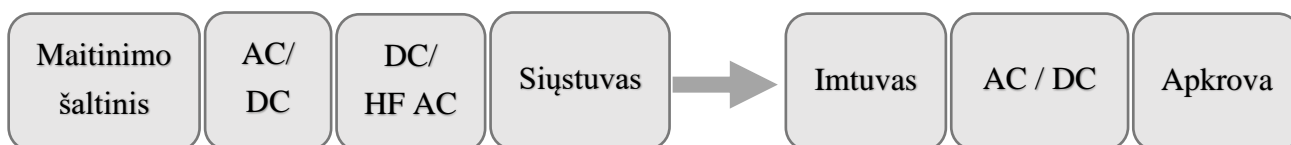
Kartu su privalumais galime įžvelgti ir tam tikrus trūkumus, tokius kaip:

- Šios technologijos įdiegimo kaina daug brangesnė nei standartinės laidinės krovimo stotelės.
- Indukcinė krovimo sistema išskiria daugiau šilumos nei laidinė, kas lemia mažesnę sistemos efektyvumą.

- Itin svarbu išlaikyti kiek įmanoma mažesnę atstumą tarp siųstuvo ritės ir imtuvo, kas reikalauja papildomų išlaidų tiek automobilių projektavime tiek krovimo sistemos kūrime.
- **Techninės kliūtys.** Standartinės, laidinės krovimo stotelės efektyvumas siekia maždaug 80–93%, kai rezonansinės elektromagnetinės indukcijos pagrindu veikianti sistema tegali siekti 70–85%. Taip pat kyla iššūkių įvertinti greitai judančių priemonių suvartojimo apskaitą ir priskyrimą EV savininkams, atsiskaitymui už šias elektromobilių krovimo paslaugas [11].

1.2. Bevielės krovimo stotelės veikimo principas ir taikymas

Krovimo stotelės, pagrįstos elektromagnetinės indukcijos veikimu, struktūrinė schema pateikta 1.1 paveiksle.



1.1 pav. Bevielės krovimo sistemos struktūra

Šią energijos perdavimo sistemą sudaro:

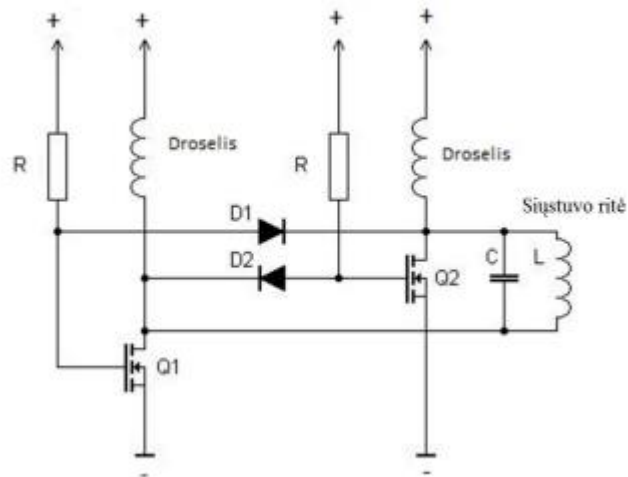
Maitinimo šaltinis – tai prietaisas, kuris sujungtas su laidais, lemia uždaro kontūro srovės tekėjimą. Elektros srovės maitinimo šaltinių paskirtis itin svarbi: atskirti teigiamas elektringąsias daleles nuo



1.2 pav. Tyrimui naudotas energijos šaltinis

neigiamų ir gauti elektros energiją, kurią būtų galima tiekti vartotojams. Elektros srovės maitinimo šaltiniai gali būti elektros mašinos (generatoriai), galvaniniai elementai, akumulatoriai.

Įtampos keitiklis – tai sistemos dalis, kuri nuolatinę šaltinio elektros įtampą konvertuoja į kintamąją. Bevieliam energijos perdavimui reikalinga aukšto dažnio kintamoji įtampa, tad jai gauti iš pradžių yra išlyginama įtampa kuri yra gaunama iš tinklo, ir konvertuojama keitikliu į aukšto dažnio kintamą

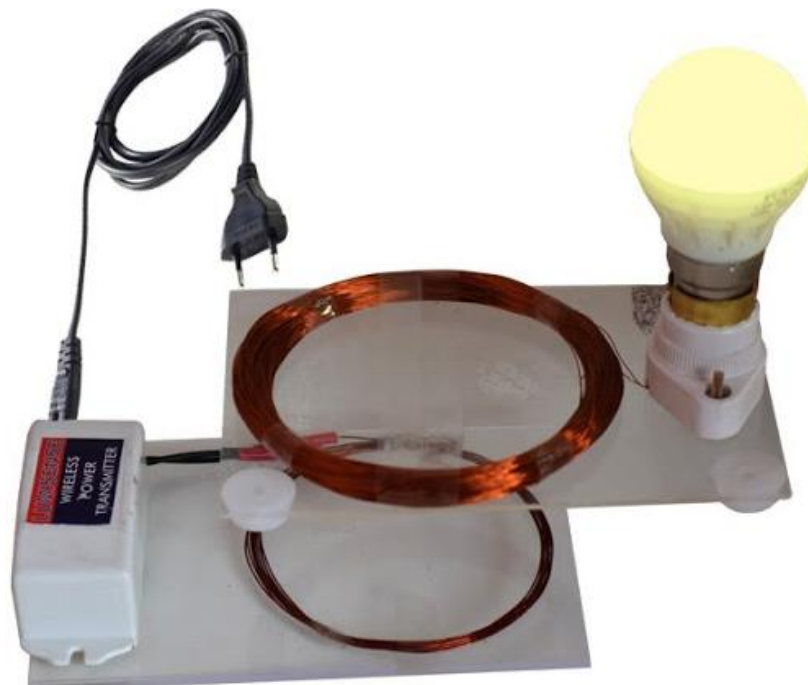


1.3 pav. Įtampos keitiklis

įtampą. Siųstuvo ritę pajungus prie kintamos įtampos energijos šaltinio, joje atsiranda kintamas magnetinis laukas, kuris imtuvo ritėje kuria elektrinį lauką, ir šis indukuoja EVJ (elektrovara) [11, 20]. Keitiklio, keičiančio kintamą el. srovę į nuolatinę, schema pateikta 1.3 paveiksle.

Siųstuvo ritė – tai sistemos dalis, kuri yra prijungta prie kitamos energijos šaltinio, ir kuri spinduliuoja magnetinį lauką.

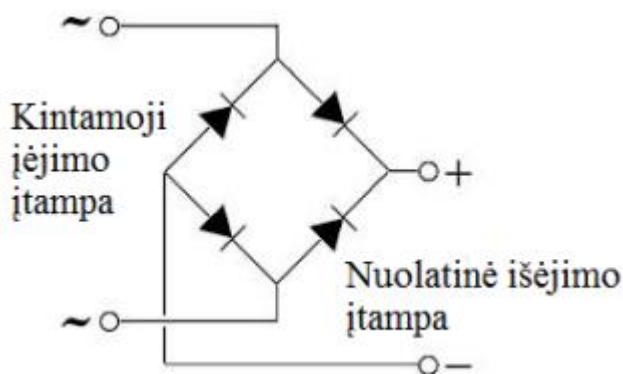
Imtuvo ritė – tai sistemos dalis, kuri per keitiklį yra prijungta prie apkrovos ir kurioje siųstuve išspinduliuotas magnetinis laukas kuria elektrinį lauką kurio dėka susidaro elektrovara.



1.4 pav. Tyrimui naudota įranga

Įtampos lygintuvas – tai elementarus lyginimo diodų tiltelis, kuris imtuvo ritėje gautą kintamąją įtampą keičia į nuolatinę. Diodų tiltelio sandara pavaizduota 1.5 paveikslėlyje.

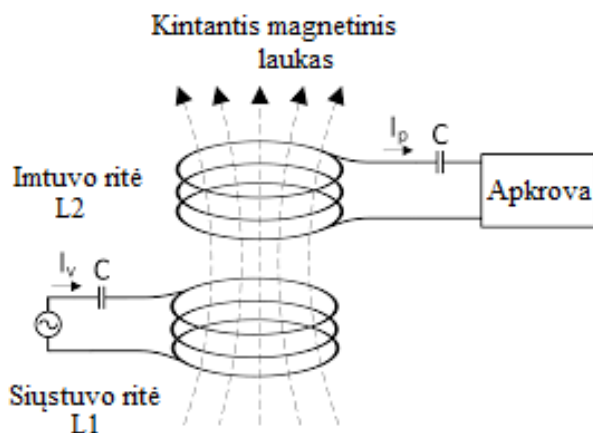
Apkrova/ imtuvas – išlygintą, nuolatinę įtampą naudojantis prietaisas (pvz., elektromobilio baterija).



1.5 pav. Įtampos lygintuvas

1.3. Elektromagnetinės indukcijos veikimo principas

Indukcinės galios perdavimo (IPT) technologijos principas yra identiškas gerai žinomų elektromechaninių įtaisų, tokių kaip transformatoriai ir indukciniai varikliai, principui. Pagrindinę tipinio induktyviojo įkroviklio struktūrą sudaro kintamos energijos šaltinis, siųstuvo ritė, imtuvo ritė, įtampos keitiklis ir akumuliatoriaus įkroviklis [12]. Preliminarus veikimo principas pavaizduotas 1.6 paveiksle.

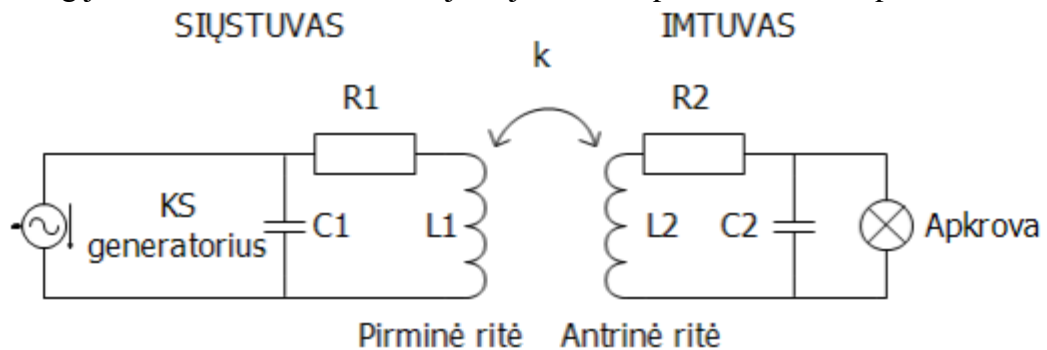


1.6 pav. Sistemos siųstuvo ir imtuvo sąveika

Pirma, energijos šaltinis sukuria kintamąją galią siųstuvo ritėje, kur L yra ritės induktyvumas. Siųstuvo ritėje susidaro kintantis magnetinis laukas, kuris tuo pačiu veria ir imtuvo ritę. Kintantis magnetinis laukas kuria imtuvo ritėje elektrinį lauką, kuri sjoje induuoja elektrovarą. Galiausiai akumuliatoriaus įkroviklis, konvertuoja kintamą srovę į nuolatinę ir teikia energiją EV baterijoms. Maitinimo šaltinis ir pagrindinis keitiklis gali būti traktuojami kaip kintamosios srovės įvestis, o antrinis keitiklis ir akumuliatoriai veikia kaip lygiavertė apkrova. Pagrindinę IPT sistemos topologiją sudaro dvi LC rezonansinės grandinės: įkroviklio pirminė rezonansinė grandinė pirminėje pusėje ir antrinė rezonansinė grandinė apkrovoje [13]. Yra įvairių rūšių induktorių L (įkrovimo ritė ir kiti induktoriai) ir kondensatorių C rezonansinės grandinės tipai, pavyzdžiui, serijinės arba lygiagrečiai sujungtos LC grandinės, LCC grandinės ir pan. Rezonansinės grandinės parenkamos atsižvelgiant į

konkrečius parametrus, įskaitant įtampą ir srovę, kintamosios srovės dažnių diapazoną, galios lygius ir pan. [14, 20]. Pagrindinė indukcinio įkrovimo sistemos struktūra pavaizduota 1.7 paveiksle.

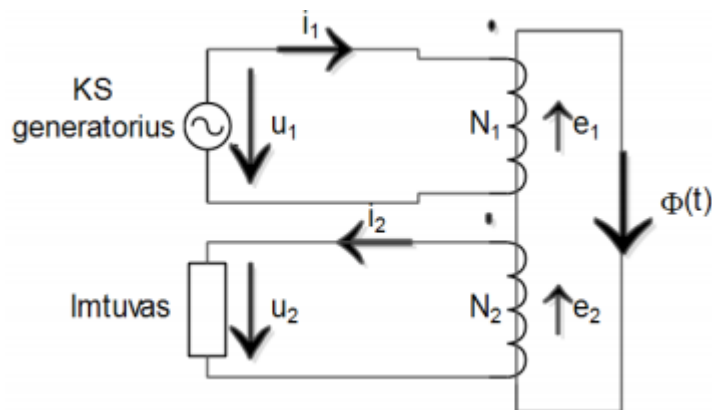
Bevielės energijos sistemos elektrinė atstojamoji schema pavaizduota 1.8 pav. Sistema apjungta



1.7 pav. Indukcinės krovimo stotelės schema

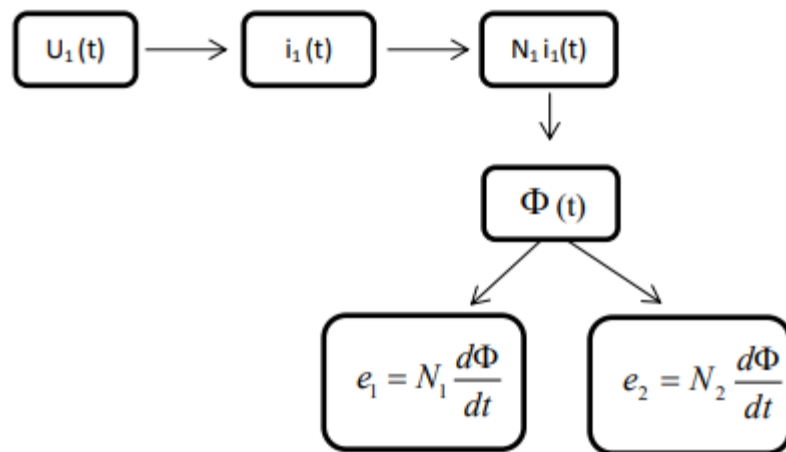
atviru magnetolaidžiu- oru, kuriame sąveikauja magnetinis laukas tarp pirmos ir antros ritės. Pirminė ir antrinė ritės yra elektriškai nesusietos tačiau jas abi veikia bendras magnetinis srautas Φ , tad jų sąsaja yra ne elektrinė, bet magnetinė. Siųstuvo ritė, kuriai tiekama kintama elektros energija, yra vadinama pirmine. Antrine apvija vadiname tą ritę, prie kurios prijungta apkrova ir kurioje indukuojasi elektrovara. Visus sistemos pirminius dydžius žymime indeksu „1“, o (antrinius) – indeksu „2“.

Bevielės sistemos veikimas pagrįstas abipusės indukcijos reiškiniu. Prijungus pirminę ritę (jos vijų skaičius N_1) prie kintamo maitinimo šaltinio $U_1(t)$, apvijomis teka kintama srovė $I_1(t)$. Pirminėje ritėje atsiradusi EVJ $N_1 i_1$ sukuria ritėje kintamąjį magnetinį srautą $\Phi(t)$. Jis veria abi apvijas ir indukuoja jose EVJ $e_1(t)$ $e_2(t)$ [15]. Paveiksle 1.9 pav. paaiškinta magnetinių ir elektrinių dydžių loginė seka.



1.8 pav. Indukcinės krovimo stotelės atstojamoji principinė schema

Jei ši uždara bevielės energijos perdavimo sistema yra apkraunama, antrine apvija ir jos kontūru teka srovė. Jei grandinė atvira (be apkrova), sistema veikia tuščiosios eigos režimu.



1.9 pav. Elektromagnetinių jėgų tarpusavio sąsaja

Sistemos elektrinių dydžių ir magnetinio srauto sutartinės teigiamos kryptys pavaizduotos paveiksle (1.8 pav.). Pirminiame kontūre yra imtuvas, todėl teigiama, kad i_1 srovės kryptis yra tos pačios krypties, kaip laisvai pasirinktos U_1 kryptis. Savi indukcijos elektrovaros e_1 teigiama kryptis ta, kuri yra priešinga negu srovės i_1 kryptis.

Tiek pirmąjį, tiek antrąjį kontūrus apimančio magnetinio srauto Φ kryptį žymime, taikant jam dešiniojo sraigto taisyklę (sraigto galvos judėjimo kryptis tokia pati, kaip srovės kryptis, o sraigto sukimosi kryptis sutampa su magnetinio lauko linijų kryptimi). Antrajame kontūre elektrovaros e_2 kryptis sutampa su e_1 kryptimi, nes abi ritės yra sudarytos iš apvijų, kurios suvyniotos ta pačia kryptimi ir jas veikia tas pats vientisas magnetinis srautas.

Antrajame kontūre, ritė yra maitinimo šaltinis, kurio elektrovara yra e_2 . Kaip ir pirmajame kontūre, srovės i_2 kryptis sutampa su e_2 kryptimi. Apkrova jungiama prie įtampos u_2 , kurios kryptis pažymėta pagal srovės i_2 kryptį antrajame kontūre. I_2 srovės kuriamas magnetinis laukas yra priešingos krypties, nei pirminės srovės i_1 (tai matome iš dešiniojo sraigto taisyklės) [16].

Pirmojo ir antrojo kontūro elektrovara. Nagrinėdami sistemos elektromagnetinius reiškinius, (elektrinius dydžius bei magnetinį srautą) turime išreikšti kompleksiniais dydžiais. Elektrovaros jėgas užrašome šitaip:

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.1)$$

$$e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.2)$$

Čia :

N_1, N_2 – Pirminės ir antrinės ričių vijų skaičius;

$\frac{d\Phi}{dt}$ – magnetinio srauto kitimo greitis;

$d\Phi$ – magnetinio srauto pokytis.

Laikydami, kad magnetinio srauto kitimas sinusinis dydis, išreiškiame:

$$-\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (1.3)$$

Čia Φ – magnetinis srautas,

Φ_m - magnetinio srauto didžiausias dydis,

ω - harmoninio dydžio fazės kitimo sparta.

Atlikę veiksmus, gauname:

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (1.4)$$

$$e_2 = E_{2m} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (1.5)$$

Čia E_{1m} , E_{2m} – maksimalios elektrovaros pirminėje ir antrinėje ritėje.

Šiuos dydžius turime išreikšti kompleksiniais dydžiais:

$$E_1 = E_{1m} e^{j\pi/2} \quad (1.6)$$

$$E_2 = E_{2m} e^{j\pi/2} \quad (1.7)$$

Elektrovarų efektinės vertės išreiškiamos:

$$E_1 = 4,44fN_1\Phi_m \quad (1.8)$$

$$E_2 = 4,44fN_2\Phi_m \quad (1.9)$$

Čia f – maitinimo šaltinio dažnis (Hz)

Bevielės energijos perdavimo koeficientas apskaičiuojamas pirminio kontūro elektrovaros santykiu su antrinio kontūro elektrovara:

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.10)$$

1.4. Beveliai krovimo sistemos taikymo pavyzdžiai

Padėkliukai smulkiajai elektrotechnikai krauti

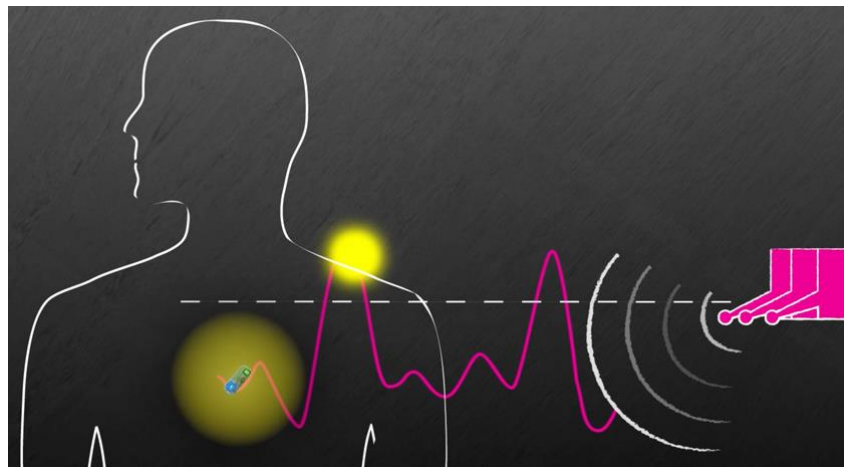
Dar 2009 metais buvo pristatytas pirmasis bevielio krovimo prototipo modelis, tačiau didelio susidomėjimo nesulaukė. Normalu – bevielio krovimo technologija nebuvo tiek išsivysčiusi, kad būtų efektyvu ja naudotis, tad galima sakyti labiau priminė futuristinę idėją, o ne realiai panaudojamą prietaisą. Tačiau per paskutiniuosius dešimt metų, ši technologija išstobulėjo tiek, kad šiai dienai j būtina kiekvieno išmanaus mobiliojo savininkui. Vis daugėja gamintojų, kurie belaidžio krovimo standartą „Qi“ pritaiko net ir išmaniesiems priedams – ausinėms ar laikrodžiams bei kitai smulkiajai technikai. 1.10 paveiksle pavaizduotas vienas iš daugybės galimų bevielės energijos perdavimo būdų.



1.10 pav. Indukcinė krovimo „stotelė“ elektrotechnikai

Proveržis medicinoje

Nepaisant to, kad technologijos, kurias galima implantuoti į organizmą, sparčiai tobulėja, belaidės įkrovimo sistemos, kurios palaiko jų veikimą, yra visiškai elektrinių implantų ateitis. Paprastai ryžių krupos dydžio elektriniai prietaisai skirti mūsų organizmui yra implantuojami žmogaus organizme ir gali būti įkraunami belaidžiu būdu iš siūstuvo (kaip paveikslėlyje 1.11), kurį pacientas gali nešiotis tiesiog marškinių kišenėje ar netoli vietos, kur jis yra implantuotas. Nebereikalingi laidai, išeinantys žmogui iš kūno.



1.11 pav. Bevielės energijos perdavimo sistemos taikymas medicinoje

Taikymas įrankių gamyboje

Elektrinių įrankių gamintojas „Bosch“ pirmasis pradėjo belaidį įrankių įkrovimą. Indukcinis įkroviklis perduoda elektros energiją į akumuliatorių, esantį ant jo, o tai reiškia, jog pirmą kartą nereikia atsijungti įrankio nuo akumuliatoriaus, kad jį įkrauti. Pavyzdys 1.12 paveikslėlyje.



1.12 pav. Indukcinis įrankų įkroviklis

Induktyvumas robotikoje

„Akumuliatorių įkrovimas yra vienas didžiausių robotikos pramonės iššūkių, o patikima belaidė energija atvėrė pasakišką galimybių pasaulį“, - teigė Benas Watersas, „WiBotic“ generalinis direktorius robotikos tendencijoms.

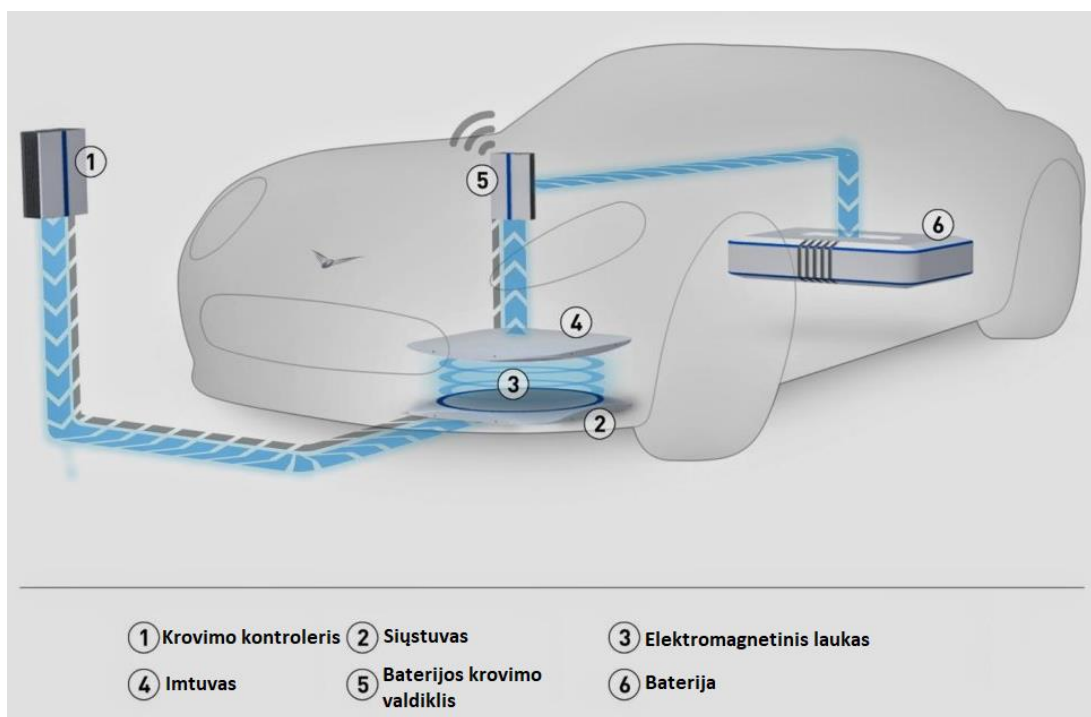
Įkroviklis, vadinamas „PowerPad“, yra „Wibotic“ įmonės strategijos dalis, kuria siekiama užtikrinti, kad dronai būtų visiškai savarankiški, ir patikima sistema, leidžianti orlaiviui atlikti savo funkcijas, ypatingai pasikrovimo, be žmogaus dalyvavimo. Ši technologija taip pat gali būti naudinga tokiose pramonės šakose kaip apsauga, kur privatų turtą prižiūrintys dronai turi būti greiti ir pastoviai besidarbuojantys. Wibotic tvirtina, kad jų technologija gali būti veiksminga naftos platformose, kur prioritetą yra stebėti dujų nutekėjimą sunkiai pasiekiamose vietose.



1.13 pav. Autonominis „Wibotic“ dronas

Indukcinė krovimo stotis automobiliams

Tipiška stacionari belaidė įkrovimo sistema parodyta 1.14 paveiksle. Jame pavaizduotas procesas, kaip EV įkraunama, kai yra pastatyta stovėjimo aikštelėje su įmontuotu specialiau siūstuvu po kelio dangą. Pirmiausia, maitinimo šaltinis siūstuvo bloke arba ritėje sukels aukšto dažnio kintamąsias sroves, kurios magnetinio lauko pagalba perduoda energiją į imtuvo ritę. Gavusi aukšto dažnio kintamą energiją, imtuve sumontuotas diodinis lygintuvas paverčia ją nuolatine-tinkama akumuliatoriui įkrauti. Tokios sistemos paprastai yra silpną sąryšį tarp siūstuvo ir imtuvo, todėl reikalingos rezonansinės sistemos ir aukšto dažnio veikimas [17].



1.14 pav. Belaidės krovimo stoties struktūra

1.5. Ar belaidis įkrovimas yra saugus?

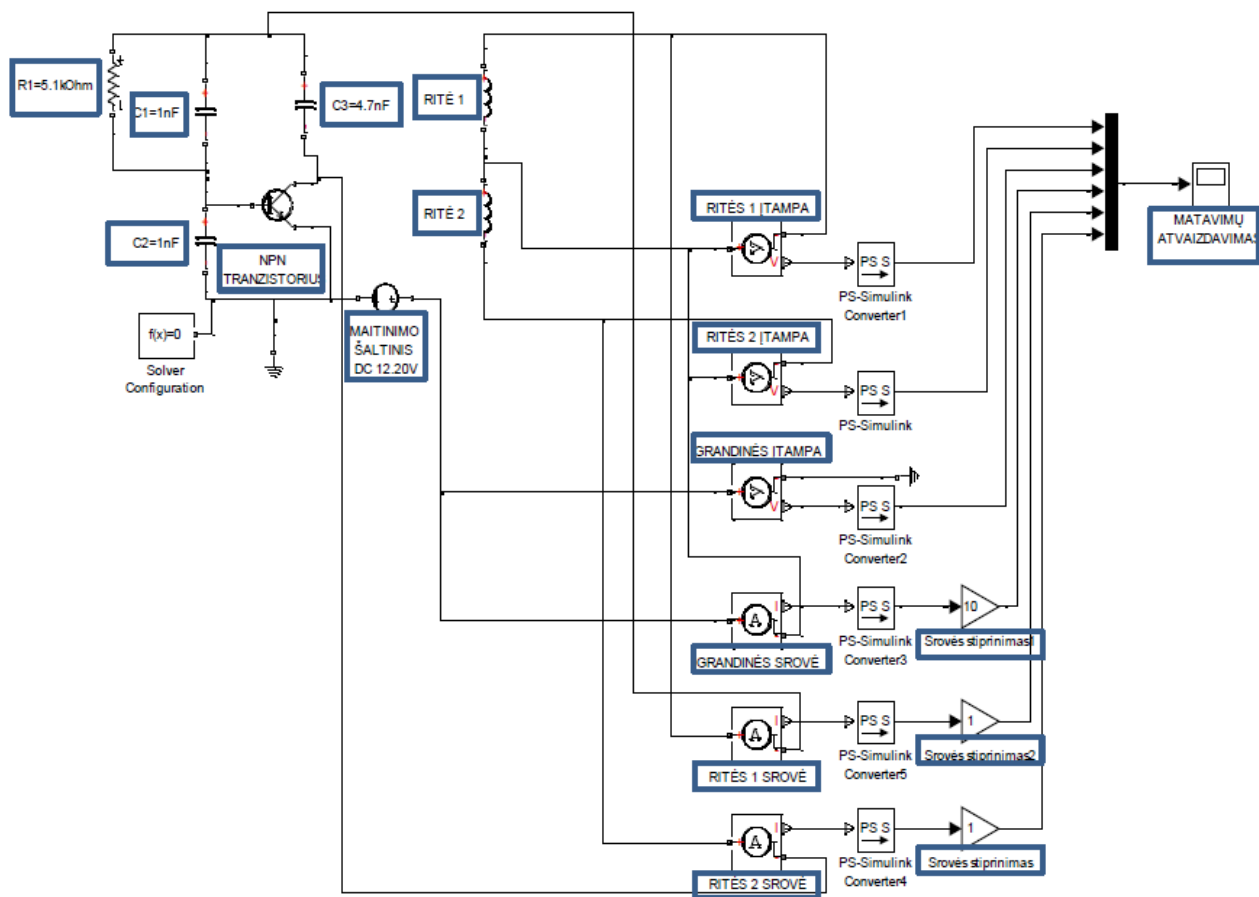
Dėl belaidžio įkrovimo saugos problemų nėra, nes elektromagnetinis laukas yra mažas, arba elektromobilio krovimo atveju - veikia nedideliu atstumu. Tarptautinė apsaugos nuo jonizuojančiosios spinduliuotės komisija (ICNIRP) paskelbė, kad esant IPT sistemoms dažniams (150 kHz – 6,78MGz) ir sistemos galiai iki 50kW, kūną veiktų 6,25uT magnetinio lauko jėga, kuri yra leistina žmogaus kūnui ir atitinka sveikatos reglamentus.[18]. Reikėtų pažymėti, kad tai yra vidutinė poveikio riba, o norint ją apskaičiuoti, reiktų įvertinti erdvinį vidurkį: stovinčiam asmeniui reikia atlikti keturių pavienių- galvos, krūtinės, kirkšnio ir kelių matavimų vidurkį. Be to, nė vienam individualiam lauko stiprumui neleidžiama viršyti 6,25uT ribų. 5 kW galios krovimo stotelė, kaip yra nurodyta 1.14pav. visiškai atitinka standarto reikalavimus 900 mm atstumu nuo centro, kurio visiškai užtenka, kad veikimo laukas nepasiektų žmogaus kūno.

Taip pat belaidė technologija yra visiškai atspari vandeniui, todėl nėra elektros smūgio ir gaisro tikimybės. Indukcinis belaidis įkrovimas jau daugelį metų naudojamas dantų šepetėliuose ir medicinos prietaisuose, nes yra saugesnis naudoti tokioje aplinkoje nei tradiciniai metodai.

2. Praktinė dalis

2.1. Elektromobilių indukcinės krovimo sistemos moduliacija programine įranga

Programinėje įrangoje „MATLAB“ buvo sumodeliuota sistema identiška, kurią būtų galima panaudoti elektromobilių krovimui. Ši sistemos schema pavaizduota 2.1 pav.



2.1 pav. Sistemos moduliacija „MATLAB“ programoje

Sumodeliuotos bevielės energijos perdavimo sistemos parametrai:

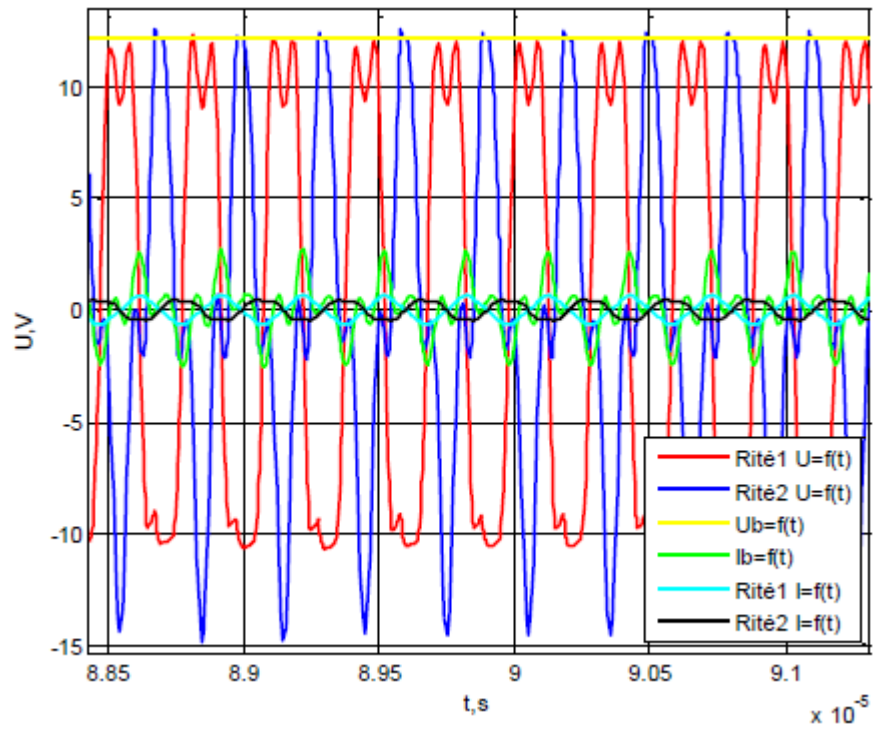
Imtuvo varža $R=5,1 \text{ k}\Omega$;

Maitinimo šaltinio įtampa (DC) $U=12,2\text{V}$;

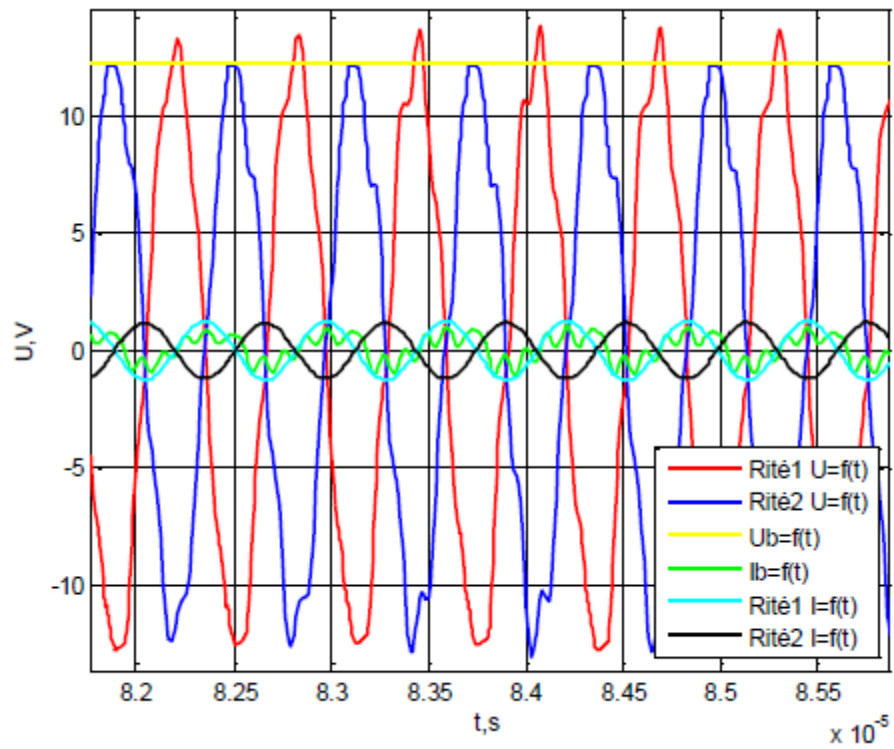
Kondensatorių talpos: $C_1=1000\text{pF}$; $C_2=1000\text{pF}$; $C_3=4700\text{pF}$;

Tranzistoriaus parametrai: NPN, $P=0,25\text{W}$, $U=60\text{V}$, $I=0,1\text{A}$;

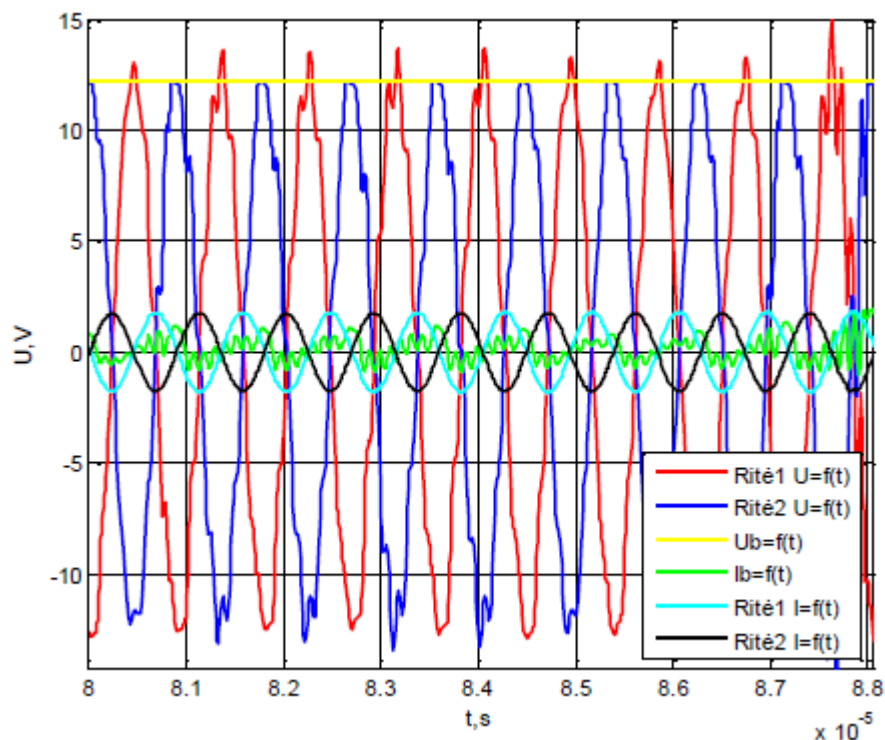
Ričių induktyvumas: $L_{1,2}=1\mu\text{H}$.



2.2 pav. Sistemos charakteristika, kai kondensatoriaus talpa 1000pF



2.3 pav. Sistemos charakteristika, kai kondensatoriaus talpa 4700pF



2.4 pav. Sistemos charakteristika, kai kondensatoriaus talpa 10,000pF

Pavaizduotuose grafikuose (2.2, 2.3, 2.4 pav.) matomi sistemos pereinamieji procesai:

Sistemos įtampa $U_b = f(t)$;

Sistemos srovė $I_b = f(t)$;

Įtampa ritėse_{1,2} $U = f(t)$;

Srovės ritėse_{1,2} $I = f(t)$.

Atliekant elektromobilių krovimo stotelės tyrimą, buvo keičiami kondensatorių talpumas. Pateiktuose grafikuose (2.2, 2.3, 2.4 pav.) pastebėta, kad didėjant C_3 kondensatoriaus talpai - dažnis mažėja, o mažėjant kondensatoriaus C_3 talpai - dažnis didėja. Taip pat pastebima, kad atvaizduojančiosios kreivės tampa netolydžios, bet iškraipytos.

Taip pat kreivėse matoma, kad tranzistorius perjunginėja įtampas ritėje₁ ir ritėje₂ ir jog įtampų kitimas laike - sinusinio pobūdžio. Tuo galima įsitikinti sulyginus maitinimo įtampą U_b , kuri yra nuolatinė (geltona kreivė), kuri kintant laikui išlieka pastovi ir tekanti viena kryptimi.

Siųstuvo ritės (mėlyna ir juoda kreivės) srovės, kaip galima pastebėti gautose grafikuose (2.2, 2.3, 2.4 pav.), atsilieka nuo įtampos tam tikru faziniu dydžiu. Tokį reiškinį gauname dėl savi indukcijos veikimo ritėje - įtampa pasiekia savo maksimalią vertę greičiau negu srovė [20].

Išvados

Iš šio tyrimo matoma išvada, kad pirminio kontūro kintamos įtampos generavimo dažnis yra priklausomas nuo grandinėje esančio kondensatoriaus C_3 talpumo. Dėl savi indukcijos reiškinio siųstuvo ritėje pasireiškia srovės atsilikimas grandinėje nuo įtampos kitimo dėl ritėje susidariusios savi indukcijos, kurios dėka: įtampa pasiekia savo maksimalią vertę greičiau negu srovė.

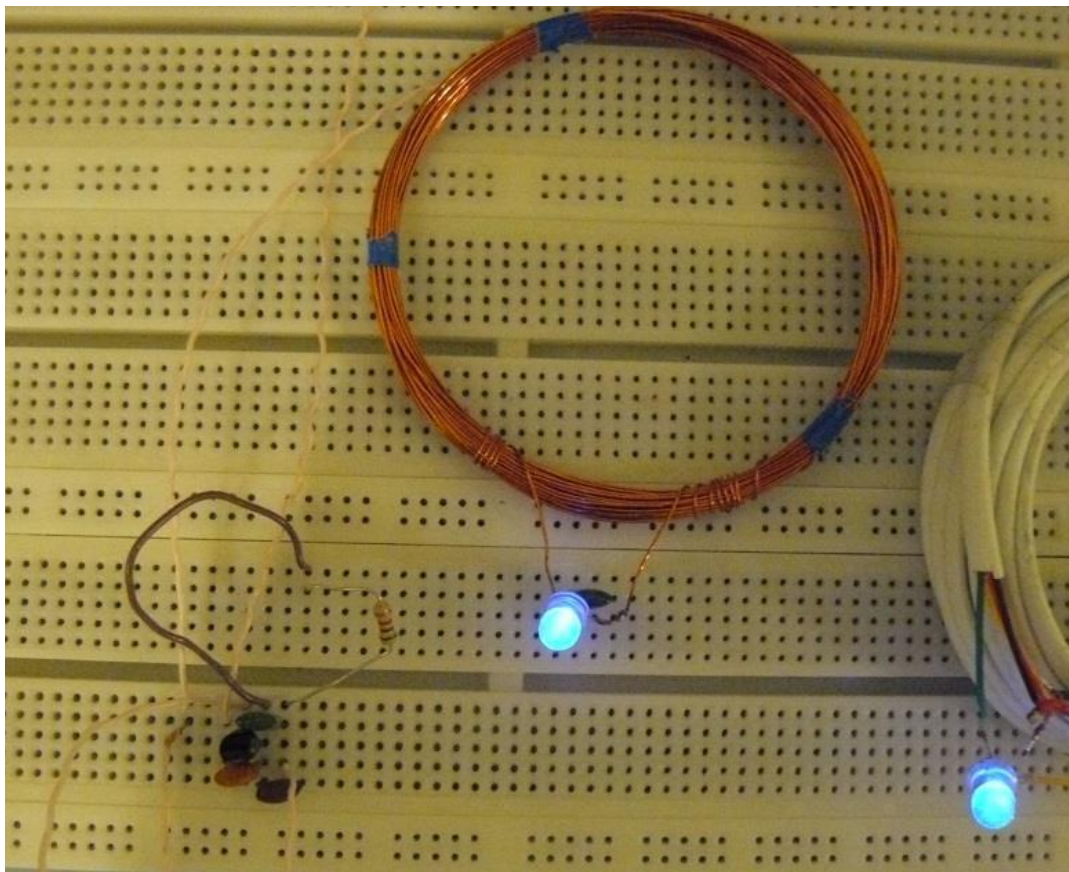
Šie rezultatai, prieš vykdant tolimesnius krovimo stotelės tyrimus, parodo, jog esant reikiamybei keisti sistemos dažnį, turime keisti kondensatorių talpumą.

2.2. Plokštėje sumontuotos principinės krovimo stotelės tyrimas

2.2.1. Realios grandinės pereinamieji procesai

Pagal modelį, kuris buvo sumodeliuotas „MATLAB“ programoje, surinkta reali grandinė atitinkanti tuos pačius parametrus. Šio darbo tikslas ištirti kaip stipriai skiriasi realios grandinės charakteristika nuo sumodeliuotos programine įranga. Sukonstruota reali bevielės krovimo stotelės grandinė pavaizduota 2.5 pav.

Praktiškai surinktas modelis buvo sukonstruotas ant specialios modeliavimo plokštės (2.5pav.).



2.5 pav. Praktinis bevielės energijos perdavimo modelis surinktas modeliavimo plokštėje

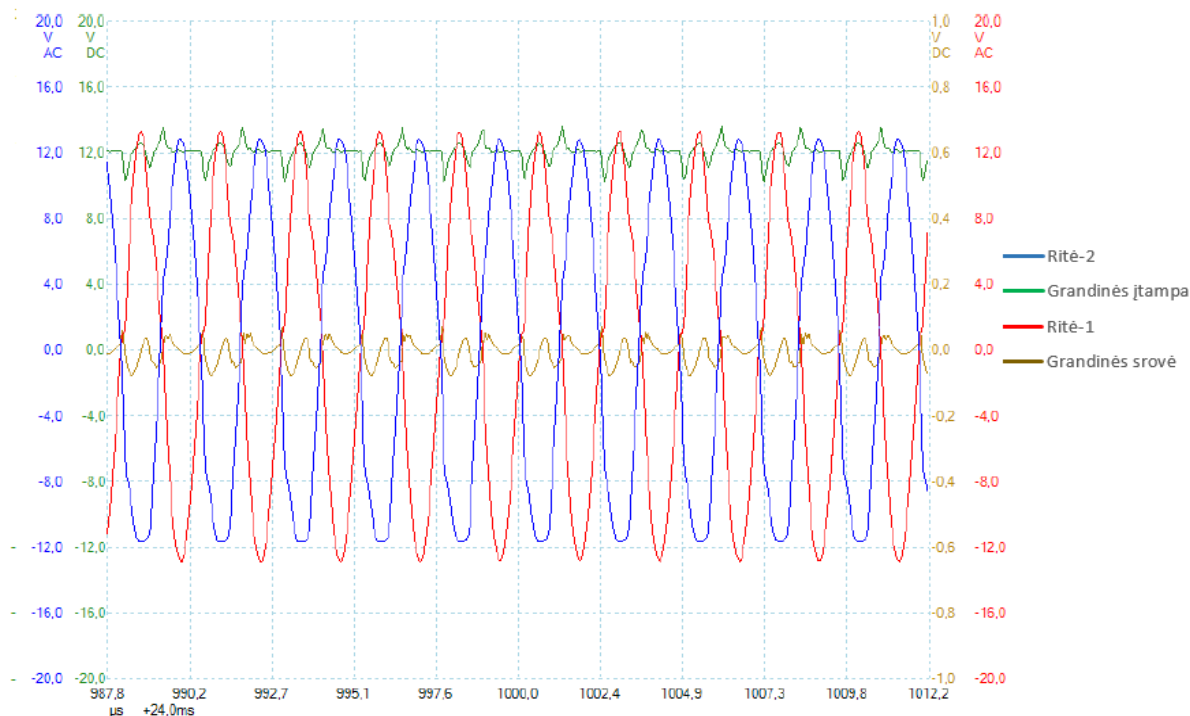
Bevielės energijos perdavimo sistemos techniniai parametrai:

- Maitinimo šaltinio įtampa: $U = 12,20V$,
- Maitinimo šaltinio srovė: $I = 0,83A$;
- Imtuvo varža: $R_1 = 5,1k\Omega$
- Kondensatorių talpos: $C_{31} = 1nF$; $C_{32} = 4,7nF$; $C_{33} = 10nF$
- Dvypolis *NPN* tipo tranzistorius: $U = 60V$, $I = 0.1A$, $P = 0.25W$;
- Ričių induktyvumas: $L_{1,2} = 2,6\mu H$.

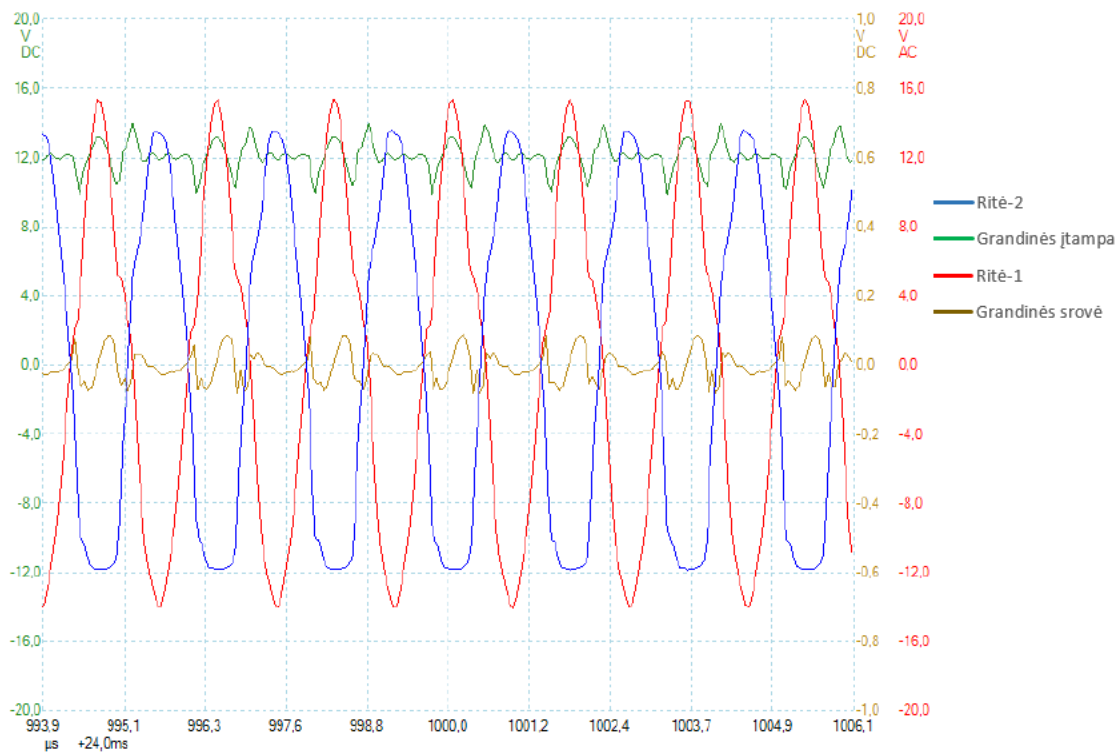
Energijos perdavimo sistemos pereinamieji procesai gauti pasitelkus oscilografo įrenginį. Pereinamieji procesai grandinėje išmatuoti su kompiuteriniu oscilografu. Srovės stiprumas taip pat

matuotas oscilografo pagalba sumontavus šuntą per apkrovą. Varža kaip ir kompiuterinėje programoje buvo imta 1Ω . Srovė apskaičiuojama pagal omo dėsnį. Formulė pateikta 2.1.

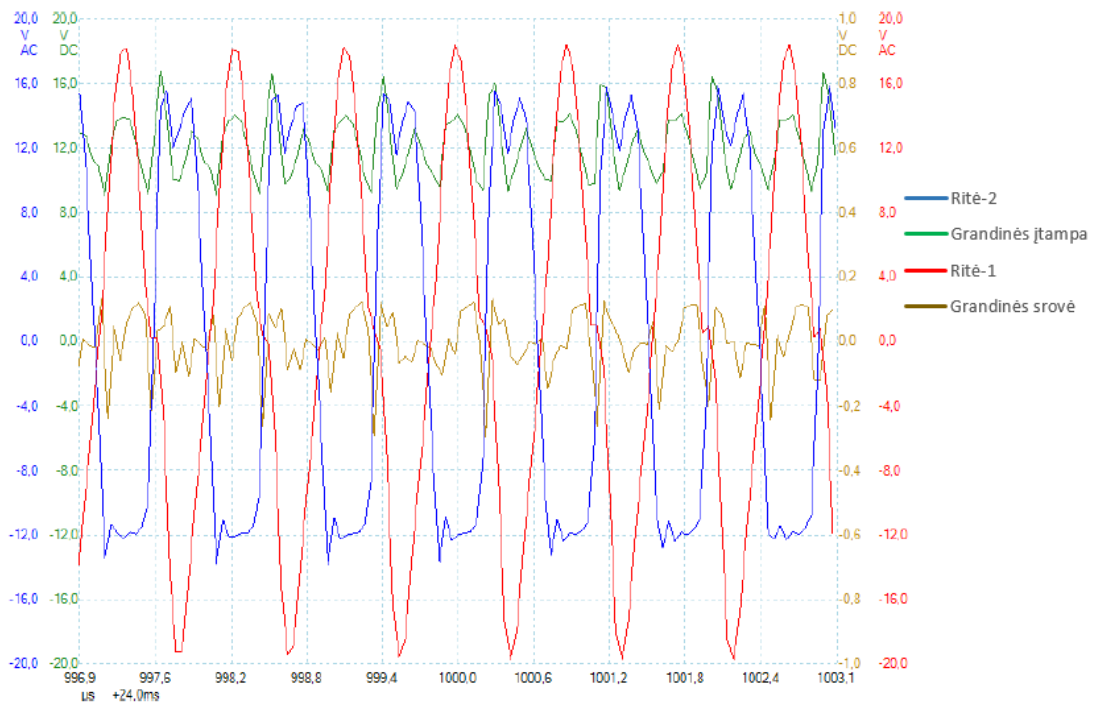
$$I = \frac{U}{R} \quad (2.1)$$



2.6 pav. Sistemos charakteristika, kai siūstovo kondensatoriaus talpa $C = 1nF$.



2.7 pav. Sistemos charakteristika, kai siūstovo kondensatoriaus talpa $C = 4,7nF$.



2.8 pav. Sistemos charakteristika, kai siūstovo kondensatoriaus talpa $C=10nF$.

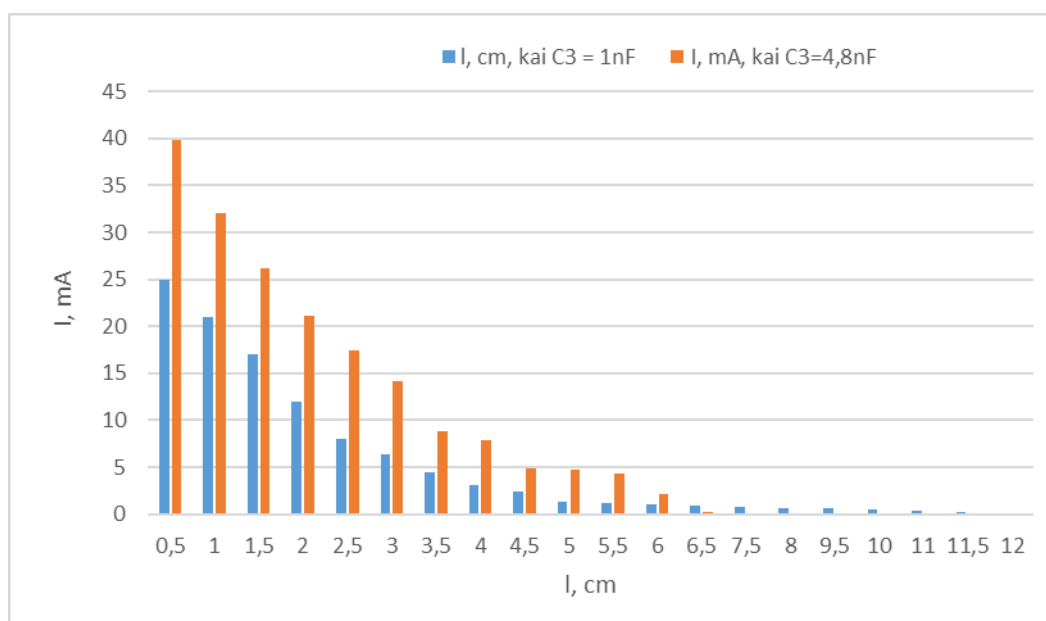
Gauti rezultatai iš realiai surinktos sistemos modeliavimo plokštėje galima sakyti sutampa su grandine, kuri buvo sumodeliuota programinėje įrangoje. Realios sistemos rezultatų grafikai pateikti (2.6-2.8 pav.). Siūstovo maitinimo šaltinio darbas perjunginėjant įtampas ko ne identiška sutampa su programuota sistema savo cikliškumu. Tačiau realioje grandinėje grafike gauta maitinimo šaltinio įtampa (2.6-2.8 pav.), (žalioji linija) yra netolygi, palyginus su modeliavimo programoje gautomis kreivėmis (2.2-2.5 pav.), (geltona kreivė). Toks rezultatas atsiranda kaip pasekmė, dėka esančių apkrovos kitimų, perjunginėjant įtampas ritėje₁ ir ritėje₂. Bet tikriausiai svarbiausia to priežastis yra maitinimo šaltinio galios trūkumas, ko pasėkoje menkiausias apkrovos pokytis virsta visos grandinės įtampos pokyčiu. Šio tyrimo rezultatas svarbus tuo, jog leidžia teigti, kad elektromobilio krovimo stotelės maitinimo šaltinis turės būti prijungtas prie galingo elektros tinklo, kitaip tariant- neužteks, kaip pavyzdys, elektromobilį krauti tiesiogiai nuo kelių saulės modulių, nes tai galimai išderintų visą krovimo sistemą.

2.2.2. Tyrimas reguliuojant atstumą tarp sistemos ričių

Tyrimo metu stebimi imtuvo srovės pokyčiai keičiant kondensatoriaus charakteristiką (talpą), bei keičiant nuotolį tarp siūstovo ritės ir imtuvo ritės. Tyrimo rezultatai pavaizduoti 2.1 lentelėje.

2-1 lentelė. Sistemos charakteristika keičiant atstumą tarp ričių

l , cm	I_i , mA, kai $C_3 = 1\text{nF}$	I , mA, kai $C_3=4,8\text{nF}$
0,5	25	39,79
1	21	32
1,5	17	26,2
2	12	21,1
2,5	8	17,5
3	6,4	14,1
3,5	4,5	8,8
4	3,1	7,9
4,5	2,4	4,9
5	1,3	4,8
5,5	1,2	4,3
6	1	2,2
6,5	0,9	0,2
7,5	0,8	0,1
8	0,7	0
9,5	0,6	0
10	0,5	0
11	0,4	0
11,5	0,3	0
12	0,1	0



2.9 pav. Imtuvo grandinės reakciją į atstumo bei kondensatorių talpumo pokyčius

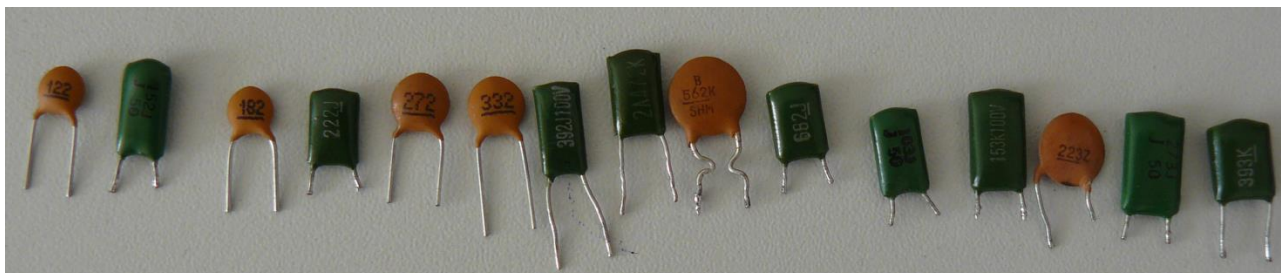
Bandyto, kai buvo keičiamas atstumas ir kondensatoriaus talpa, rezultatai grafiškai pavaizduoti 2.9 paveiksle. Grafike aiškiai matoma, jog kai buvo parinktas mažesnės talpos kondensatorius- srovės stipris imtuve buvo ženkliai mažesnis, tačiau sąveika tarp siųstuvo ir imtuvo buvo matoma atitolinus rites didesniu atstumu.

Srovės stipris imtuvo grandinėje buvo ženkliai didesnis (prie mažesnių atstumų) su kondensatoriaus $C = 4,7\text{nF}$ talpumu, tačiau siųstuvo sąsaja su imtuvu nutrūko beveik prie per pus mažesnio atstumo.

Iš šio tyrimo matyti, jog yra svarbu atrasti optimaliausią tašką, prie kurio būtų galima išnaudoti maksimalų atstumą bei sistemos galią, kurios pakaktų perduoti energijos elektromobilio krovimui.

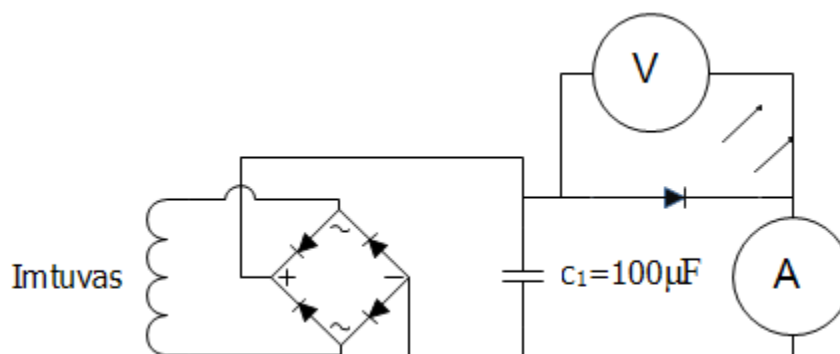
2.2.3. Tyrimas keičiant kondensatorius talpą siūstuvo grandinėje

Įvertinus tai, jog praeitame tyrime rezultatai stipriai kito dėl skirtingo kondensatorių talpumo, buvo nuspręsta atlikti papildomą bandymą su 15 skirtingo talpumo kondensatorių. Šis bandymas buvo daromas didinant kondensatoriaus talpą nuo 150 – 27000 pF (2.10 pav.). Taip pat šio tyrimo metu



2.10 pav. Tyrimui naudoti kondensatoriai (150pF - 27000pF)

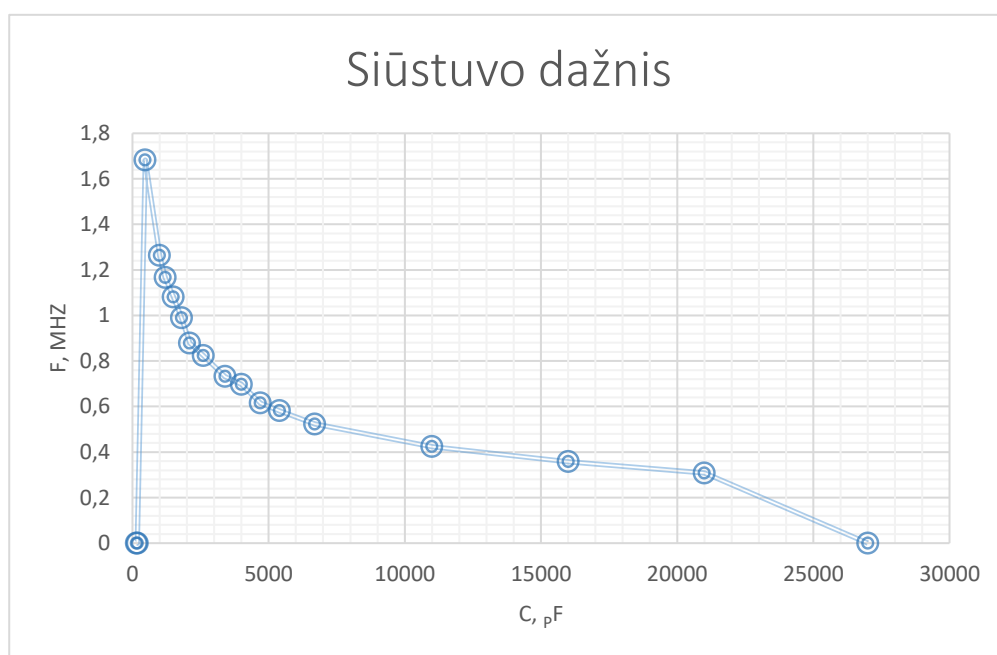
buvo stebima siūstuvo srovės stipris (I_s), grandinės įtampa (U_s) bei taip pat imtuvo srovės stipris (I_i), bei įtampa (U_s) ir imtuvo dažnis (f_i). Atstumas šiam tyrimui buvo parinktas nedidelis- 1,5cm tarp ričių, kad būtų matomas aiškus srovės stiprumo pokytis imtuve, būtent dėl pačių kondensatorių talpumo. Tyrimui naudotos imtuvo grandinės elektrinė principinė schema pateikta 2.11paveiksle. Šio tyrimo rezultatai pateikti 2.2 lentelėje.



2.11 pav. Prototipinio modelio imtuvo schema

2-2 lentelė. Siūstuvo bei imtuvo charakteristikos keičiant kondensatoriaus talpą

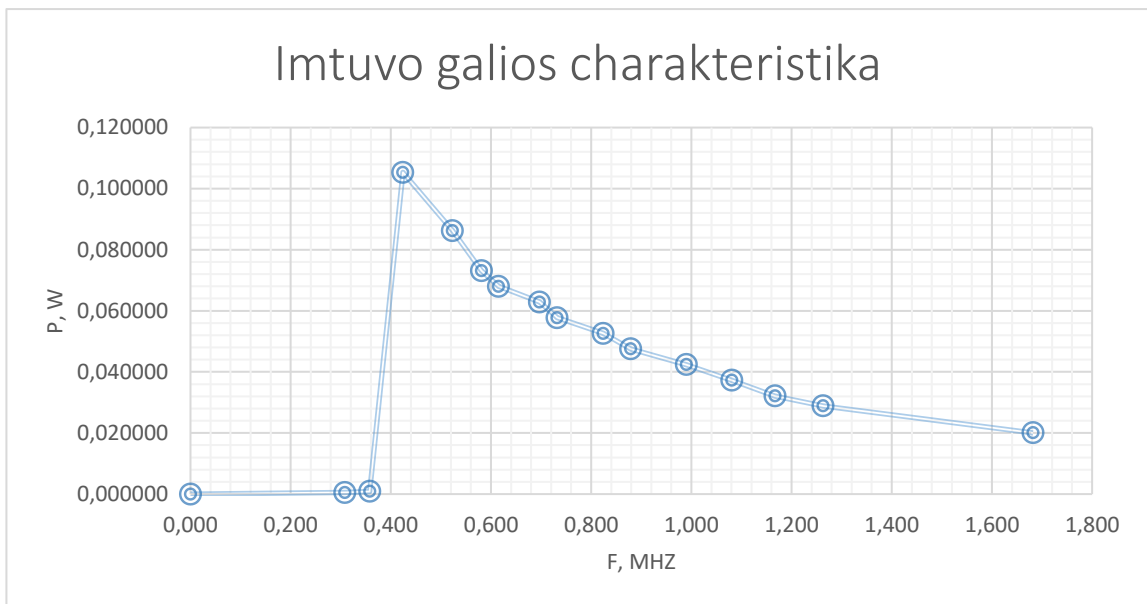
Eil.Nr.	U_s, V	C_3, pF	U_i, V	I_s, A	I_i, mA	f_i, MHz	P_s, W	P_i, W
1	12,3	150	1,913	0,100	7,20	-	1,220	0,013611
2	12,3	180	1,921	0,090	7,50	-	1,098	0,014593
3	12,3	470	1,947	0,039	10,20	1,682	0,487	0,020065
4	12,3	1000	1,994	0,040	14,60	1,263	0,488	0,028883
5	12,3	1200	1,996	0,057	15,80	1,167	0,734	0,032110
6	12,3	1500	2,010	0,040	18,20	1,081	0,487	0,037239
7	12,3	1800	2,022	0,061	19,00	0,990	0,736	0,042368
8	12,3	2100	2,048	0,038	23,45	0,879	0,487	0,047496
9	12,3	2600	2,049	0,071	23,60	0,824	0,852	0,052625
10	12,3	3400	2,068	0,079	26,70	0,732	0,978	0,057754
11	12,3	4000	2,087	0,052	30,10	0,697	0,632	0,062883
12	12,3	4700	2,108	0,060	34,10	0,615	0,736	0,068012
13	12,3	5400	2,112	0,078	32,40	0,581	0,987	0,073141
14	12,3	6700	2,143	0,071	40,20	0,523	0,856	0,086231
15	12,3	11000	2,180	0,082	48,30	0,424	0,987	0,105312
16	12,3	16000	1,794	0,140	0,50	0,358	1,830	0,000896
17	12,3	21000	1,756	0,145	0,30	0,308	1,830	0,000537
18	12,3	27000	0,000	0,150	0,00	0,000	1,830	0,000000



2.12 pav. Siūstuvo reakcija į kondensatoriaus talpumo pokyčius

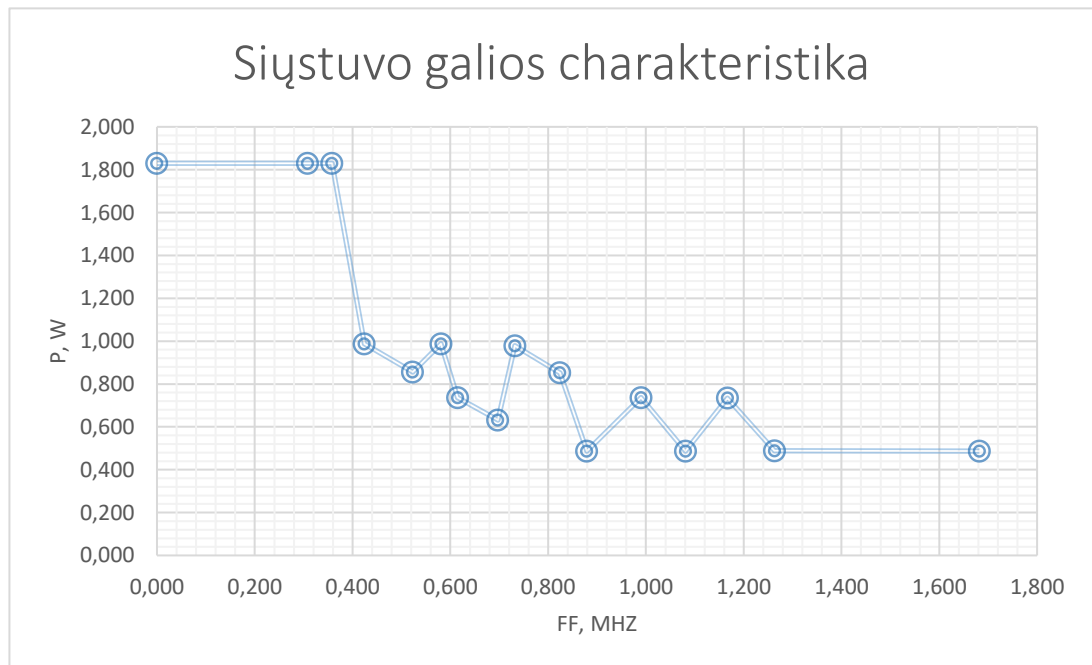
Iš rezultatų matyti, kad nuo kondensatoriaus talpos pokyčio priklauso ne tik srovės stiprumas, bet taip pat didelę įtaką turi sistemos veikimo dažniui.

2.12 grafike pavaizduota siūstuvo dažnio charakteristika keičiant kondensatoriaus talpumą. Siūstuvo sistemos dažnis didėja, kai talpumas yra mažinamas, ir atvirkščiai- sistemos dažnis mažėja, didinant talpumą.



2.14 pav. Imtuvo charakteristika, didinant sistemos dažnį

Rezultatuose, kurie pateikti (2.12 pav.) matoma aiški riba, kai ties 27000 pF sistemos dažnis yra nulinis. Taip pat iš šių rezultatų matomas dar vienas reiškinys- sumontavus didesnės talpos kondensatorių siųstuvo grandinėje, tranzistorius visiškai nustoja veikęs ir siųstovo kontūras dirba atidarytu režimu. To priežastis- mažas ritės induktyvumas dėl parinkto mažo vijų skaičiaus. Kaip pasekmė- siųstuvo maitinimo šaltinis nustoja veikti [19, 20].

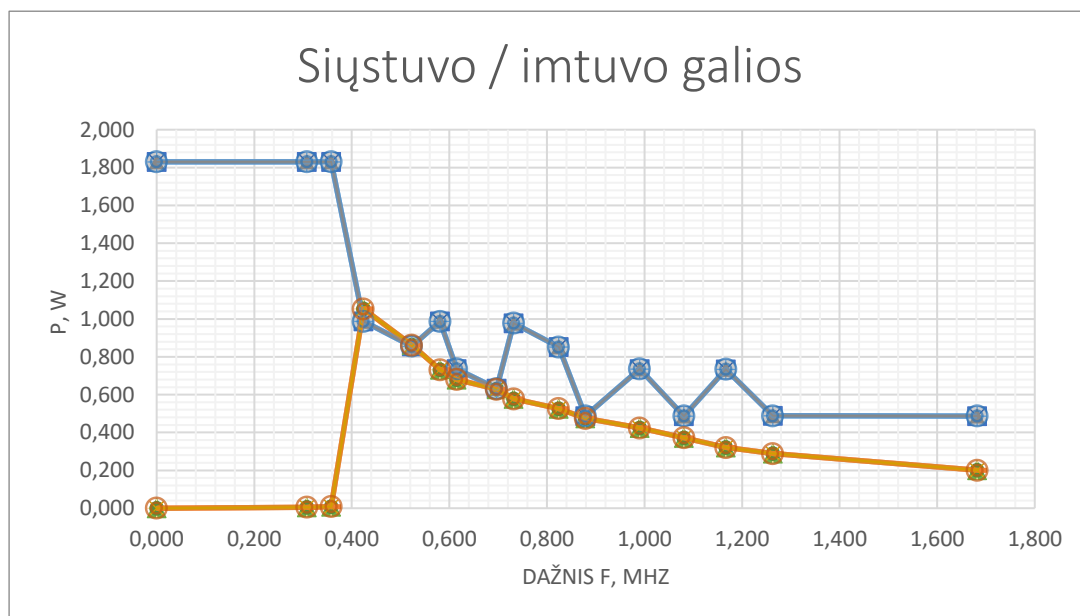


2.13 pav. Siųstuvo charakteristika, didinant sistemos dažnį

Taip pat grafike matoma, jog tyrimas prasideda nuo sumontuotos 470 pf kondensatoriaus talpos. Šis sprendimas buvo apribos dėl techninių kliūčių- todėl, kad prie aukšto dažnio laboratorinis multimetras nebeatvaizdavo duomenų.

Atlikus šį tyrimą, pasirodė dar vienas dėsningumas- kai atstumas tarp siųstuvo ir imtuvo išlieka tas pats (1,5cm) didėjant sistemos dažnį – galia pradžioje didėja, bet netrukus pradeda mažėti. Maksimali elektromobilio krovimo stotelės prototipo galia išgauta, kai dažnis buvo nustatytas 425 kHz.

Kai maitinimo šaltinio dažnis lygus 0 Hz (kitai tariant jis nedirba), bet kondensatorius yra įkrautas, tai siųstuvo kontūre tranzistoriaus darbo režimas vadinamas – atviru režimu ir iš generatoriaus pareikalauja daugiau galios kurią grandinės elementai pagrinde išspinduliuoja šilumos pavidalu (2.15 pav.).



2.15 pav. Sistemos charakteristika, didinant sistemos dažnį

Pagrindinės šio tyrimo rezultatų išvados yra pagrįstos 2.15 paveikslu. Jame pavaizduoti siųstuvo ir imtuvo galios tiesių palyginimai priklausomai nuo dažnio. Siųstuvo galios kreivė netolygi, matomi galios svyravimai dėl galimo elementų nesuderinamumo, kai imtuvo kreivė tolygiai mažėjanti dažniui didėjant. Toks pasireiškimas atsiranda dėl didelio dažnio siųstuvo schemeje, kai visi schemas elementa tampa talpuminio pobūdžio, kurie to pasekoje iššaukia rezonansinius reiškinius. Norint išvengti tokių pasekmių, reikalinga itin kruopščiai suderinti grandinės komponentus, kad pasiekti maksimalų elektromobilių krovimo stotelių efektyvumą.

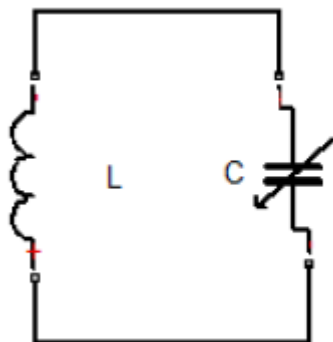
2.2.4. Tyrimas įvedant rezonansinę ritę tarp sistemos siųstuvo ir imtuvo

Tyrimo metu yra sumontuojama dar viena grandinė, kuri susideda iš reguliuojamo kondensatoriaus ir ritės, tarp siųstuvo ir imtuvo grandinių. Rezonansinės grandinės principinė schema pateikta (2.16 pav.). Tyrimo metu bus daromi du bandymai (su rezonansine rite, ir be jos) ir stebima kaip keičiasi srovės stipris (I_i , mA) imtuvo grandinėje, ir kokia sistemos reakcija į atstumą.

Matavimai atliekami tokia eile:

1. Bandymas vykdomas **be** rezonansinės ritės, didinant atstumą tarp siųstuvo ir imtuvo.
2. Bandymas vykdomas **su** rezonansinės ritės, didinant atstumą tarp rezonansinės ritės ir imtuvo.

Pirmojo atvėjo metu, imtuvo ritė yra tolinama nuo siūstuvo ritės kas 1cm ir kiekvieno centimetro atstumu

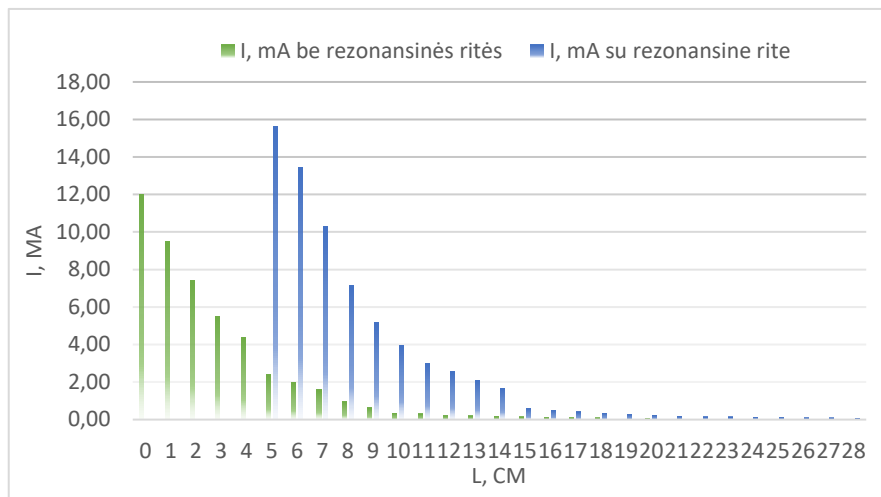


2.16 pav. Įvestos rezonansinės ritės schema

yra užfiksuojame duomenys apie srovės stiprį. Antro bandymo metu, duomenų fiksavimas pradedamas, kai rezonansinės grandinės kondensatoriaus talpa yra sureguliuojama taip, kad susidarytu rezonansas tarp šios ritės bei imtuvo ir siūstuvo ričių. Gauti abiejų bandymų duomenys pateikti 2.3 lentelėje.

2-3 lentelė. Sistemos charakteristika įvedant rezonansinę ritę

Atstumas tarp ričių be rezonansinės ritės l, cm	I_i , mA	Atstumas tarp ričių su rezonansine rite l, cm.	I_i , mA
0	12,00	Rezonansinė ritė pastatyta 4cm atstumu nuo pirminės ritės	-
1	9,50	5	15,62
2	7,40	6	13,43
3	5,50	7	10,28
4	4,40	8	7,13
5	2,40	9	5,15
6	2,00	10	3,97
7	1,58	11	3,00
8	0,95	12	2,55
9	0,62	13	2,10
10	0,35	14	1,67
11	0,30	15	0,60
12	0,22	16	0,50
13	0,20	17	0,41
14	0,18	18	0,35
15	0,15	19	0,28
16	0,12	20	0,24
17	0,11	21	0,18
18	0,10	22	0,15
19	0,,9	23	0,14
20	0,06	24	0,13
21	0,00	25	0,12
22	0,00	26	0,10
23	0,00	27	0,09
24	0,00	28	0,08



2.17 pav. Imtuvo grandinės reakciją į atstumą be rez. ritės ir su rez. rite

2.17 paveiksle yra pateikti tyrimo duomenų grafikas, kuriame vaizdžiai matomi rezultatai, kuris bandymas yra efektyvesnis. Bandyje su įterpta rezonansine rite gautas ne tik didelis srovės stiprio padidėjimas bet ir galimas didesnis atstumas tarp siūstuvo ir imtuvo. Iš ko galime daryti išvadą, kad rezonansinė ritė, bevieliam energijos perdavimui, turi didelę reikšmę ir yra būtina norint pasiekti maksimalų efektyvumą.

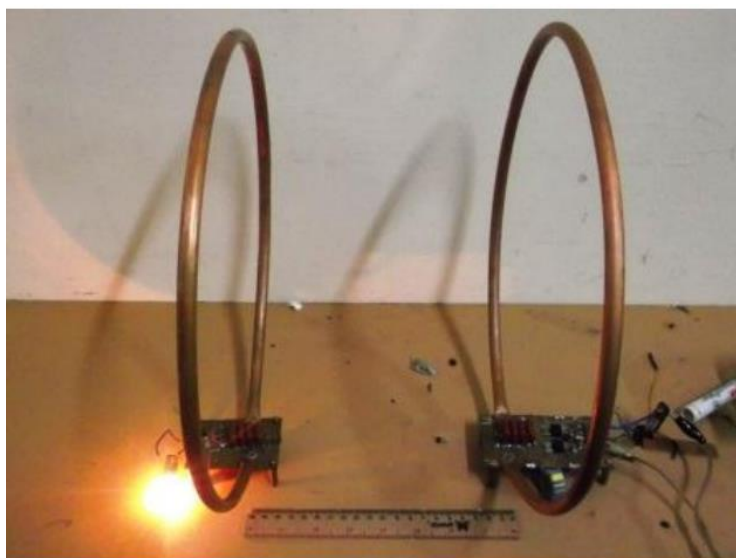
Skyriaus rezultatus apibendrinančios išvados:

- Iš pirmojo tyrimo gavome išvadą, kad bevielės perdavimo sistemos dažnis priklauso nuo kondensatoriaus talpumo- kad didėja kondensatoriaus talpa - dažnis mažėja, o mažėjant kondensatoriaus talpai- dažnis didėja
- Tyrimo metu pastebėta, jog grandinės srovės stipris pasiekia savo maksimalią vertę greičiau, negu įtampa savąją. Tai yra rezultatas savi indukcijos reiškinio.
- Bandyto metu buvo suprojektuotos dvi sistemos: programinėje įrangoje ir reali ant maketavimo plokštės. Realioje grandinėje maitinimo įtampa yra netolygi palyginus su programinės įrangos rezultatais. Toks rezultatas gautas dėl nuolat kintančių apkrovų, kurios parodo, jog buvo pajungtas per silpnas maitinimo šaltinis, kuris reagavo į bet kokį apkrovos kitimą.
- Sumontavus didesnės talpos kondensatorių siūstuvo schemoje, ši grandinė iš vis nustoja veikusi. Tai yra rezultatas to, jog grandinė pradeda dirbti atviru režimu, kas reiškia, kad dėl nepakankamo vijų skaičiaus siūstuvo ritėje, ši turi per mažą induktyvumą ir siūstuvo generatorius nustoja tiekti energiją.
- Siūstuvo galios kreivė netolygi, matomi galios svyravimai dėl galimo elementų nesuderinamumo. Norint išvengti tokių pasekmių, reikalinga itin kruopščiai suderinti grandinės komponentus, kad pasiekti maksimalų efektyvumą.
- Bandyje su įterpta rezonansine rite gautas ne tik didelis srovės stiprio padidėjimas bet ir galimas didesnis atstumas tarp siūstuvo ir imtuvo. Iš ko galime daryti išvadą, kad rezonansinė ritė, bevieliam energijos perdavimui, turi didelę reikšmę ir yra būtina norint pasiekti maksimalų efektyvumą. Tai pasiekti elektromobilio krovimo stotelėje būtų galima sumontuojant pakylančią platformą, kuri identifikuotų, jog elektromobilis sustojo virš jos, pakiltų, taip atsiradama pusiaukelėje- tarp siūstuvo ir imtuvo.

3. Taikomojo modelio tyrimas

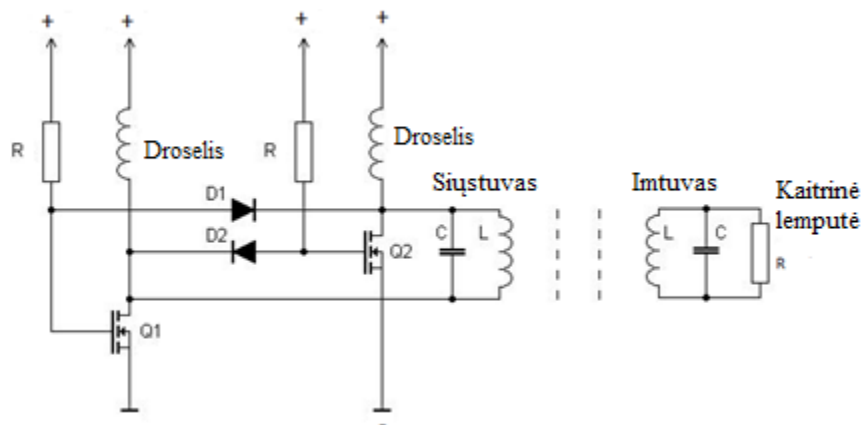
3.1. Elektromobilio krovimo stotelės prototipo struktūra, parametrai bei charakteristika

Šis demonstracinis modelis buvo sukurtas tam, kad įvertinti kaip skirsis realaus, pritaikomo realiai elektromobiliams, modelio parametrai, nuo tų proporcingai sumažinto modelio maketavimo plokštėje. Šis modelis pavaizduotas (3.1 pav.). Naujasis modelis, nuo ankstesniame skyriuje tirta, skiriasi ne tik dydžiu, bet ir tuo, jog ritės parinktos vientisos, siekiant kad būtų galima išspinduliuoti didesnį kiekį energijos. Sistemos struktūra paprasta: pagrindinės dalys: tai siųstuvas ir imtuvas. Elektrinė principinė schema pateikta 3.2 paveiksle.

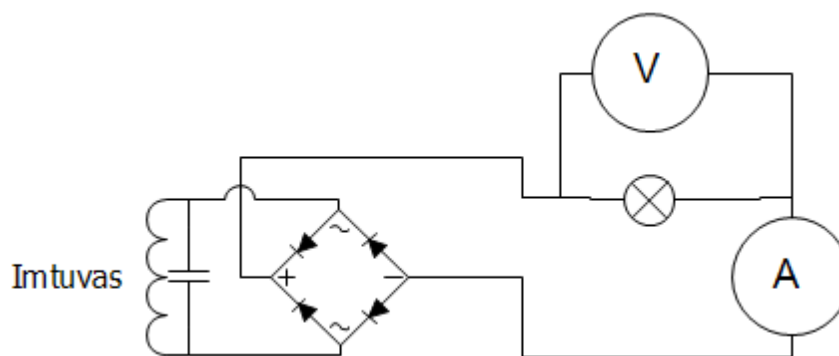


3.1 pav. Indukcinės krovimo stotelės pritaikomojo prototipo struktūra

Atliekant tyrimus su demonstraciniu modeliu, visų pirma buvo siekta išsiaiškinti koks yra sistemos naudingumo koeficientas. Tai buvo atliekama stebint siųstuvo ir imtuvo grandinių parametrus ir didinant atstumą tarp ričių. Schema, kaip buvo atlikti matavimai, pateikta 3.3pav. Matavimo rezultatai pateikti 3.1 lentelėje.



3.2 pav. Sistemos principinė schema



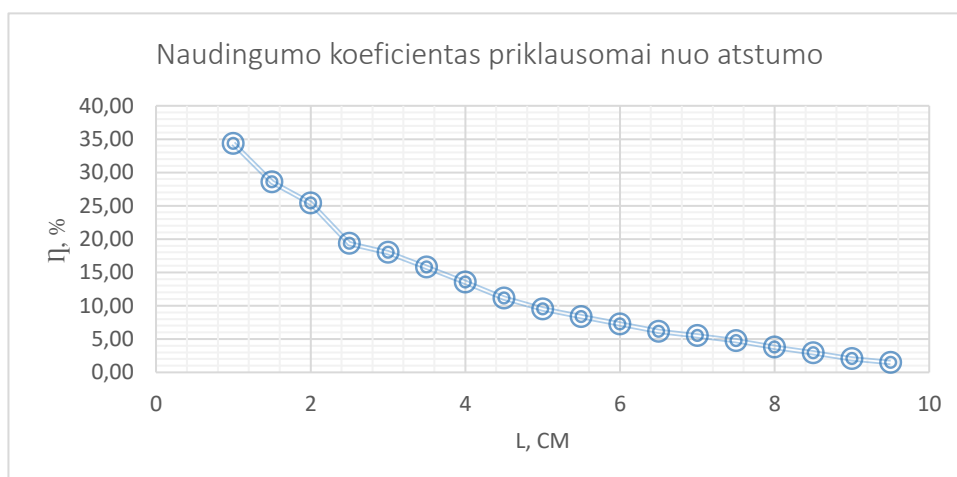
3.3 pav. Matavimo prietaisų pajungimo schema

Tyrimo metu, siūstuvus buvo prijungtas prie 12V generatoriaus. Imtuvo apkrova taip pat buvo 12V ir 0,7 A stiprio lemputė. Lyginimo diodai buvo parinkti (1 A, 30 ns). Siūstuvu, dirbančiu atviru režimu, teka 0,58 A srovė.

3-1 lentelė. Sistemos veikseną keičiant atstumą

l , cm	I_s , A	U_s , V	I_i , A	U_i , V	P_s , W	P_i , W	η , %
1	2,1	12	0,68	12,56	25,20	8,54	34,33
1,5	1,53	12	0,57	9,20	18,36	5,24	28,56
2	1,34	12	0,54	7,56	16,08	4,08	25,39
2,5	1,1	12	0,47	5,43	13,20	2,55	19,33
3	1,04	12	0,44	5,10	12,48	2,24	17,98
3,5	0,95	12	0,42	4,28	11,40	1,80	15,77
4	0,87	12	0,39	3,62	10,44	1,41	13,52
4,5	0,82	12	0,35	3,13	9,84	1,10	11,13
5	0,79	12	0,34	2,65	9,48	0,90	9,50
5,5	0,76	12	0,33	2,31	9,12	0,76	8,36
6	0,71	12	0,32	1,93	8,52	0,62	7,25
6,5	0,7	12	0,30	1,72	8,40	0,52	6,14
7	0,69	12	0,29	1,57	8,28	0,46	5,50
7,5	0,68	12	0,28	1,38	8,16	0,39	4,74
8	0,67	12	0,27	1,12	8,04	0,30	3,76
8,5	0,66	12	0,26	0,89	7,92	0,23	2,92
9	0,65	12	0,22	0,72	7,80	0,16	2,03
9,5	0,64	12	0,20	0,57	7,68	0,11	1,48

Rezultatų grafikas pateiktas 3.4 paveiksle, kuriame pavaizduotas energijos perdavimo sistemos naudingumo koeficientas. Rezultatuose matyti gan žemas 34,44% naudingumo koeficientas. Šiam

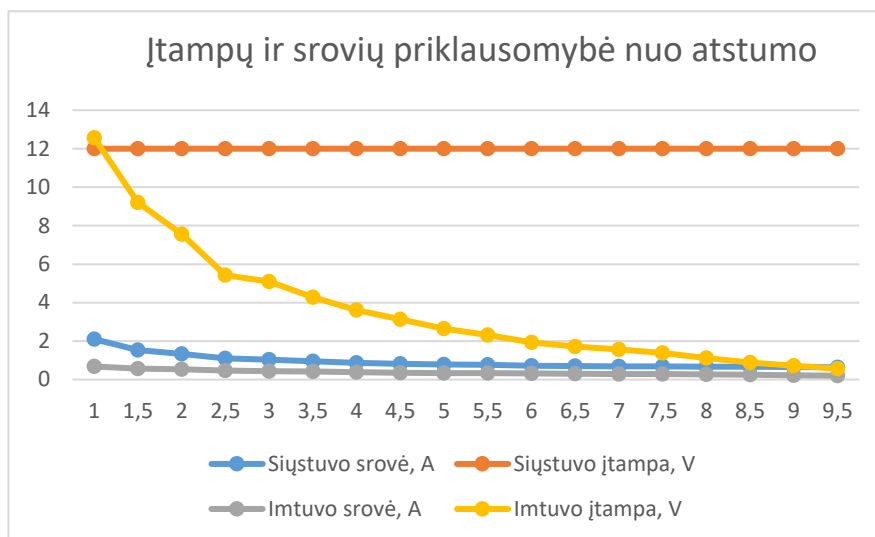


3.4 pav. Sistemos efektyvumas keičiant nuotolį tarp ričių

rezultatui įtakos turi siųstuvo grandinėje pajungtas aušintuvas kuris vartoja 7W energijos, kuria išspinduliuoja šilumos pavidalu.

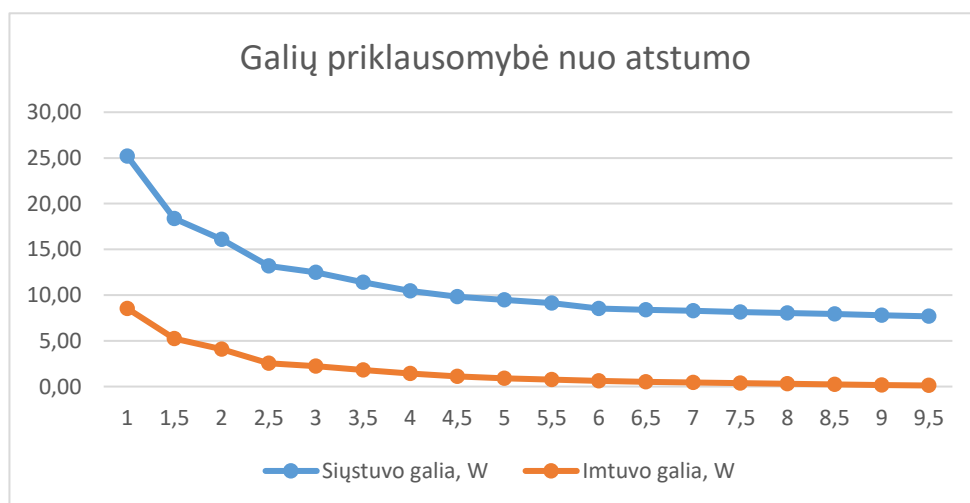
Sistemos naudingumo koeficientas atvirkščiai proporcingai mažėja atstumui, tarp siųstuvo ir imtuvo, didėjant (3.4 pav.).

Tyrimo rezultatai grafiškai pavaizduoti 3.5 paveiksle. Jame matyti, kad siųstuvo ir imtuvo srovės stiprumas, didėjat atstumui, mažėja skirtingu greičiu. Tokį rezultatą lemia siųstuvo generuojamas magnetinis laukas, kuris atstumui didėjant, sparčiai mažėja ir silpniau indukuoja imtuvo ritėje elektrovaros jėgą.



3.5 pav. Įtampų ir srovių charakteristikos, keičiant atstumą tarp ričių

3.6 paveiksle yra pavaizduoti gan dideli sistemos galios nuostoliai. Šis energijos netekimas susidaro, kadangi kintamas magnetinis laukas nėra sukoncentruotas į imtuvo ritę, bet sklinda orbitale į visas galimas puses. Taip pat prie nuostolių prisideda siųstuvo grandinėje šylantys komponentai, bei imtuvo grandinėje šylantis lyginimo tiltelis.



3.6 pav. Sistemos galios pokyčiai didinant atstumą

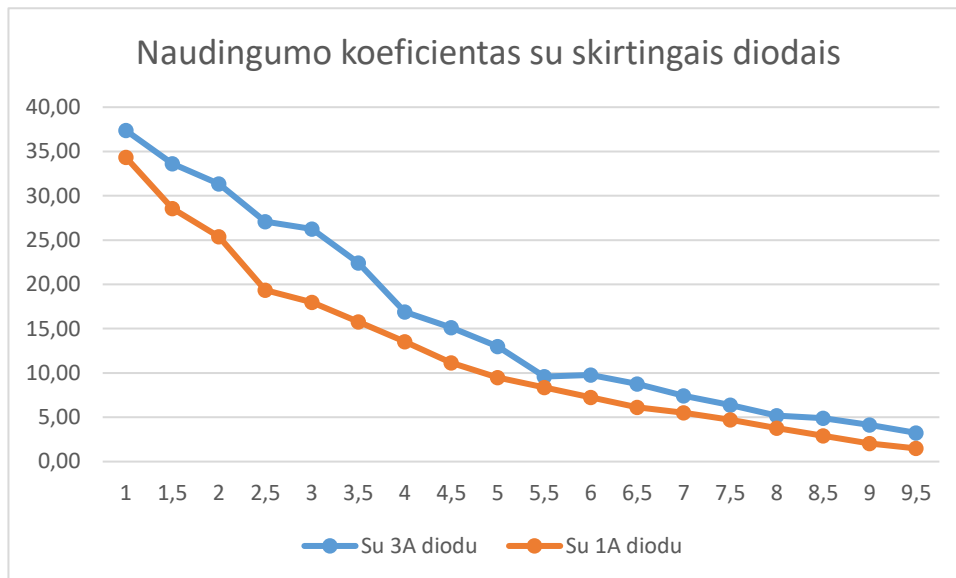
3.2. Tyrimas, keičiant diodų tiltelio parametrus

Iš anksčiau atliktų bandymų pastebėjome, kad imtuve, neskaitant pačios apkrovos, yra gan dideli galios nuostoliai diodų tiltelyje. Pirmame tyrimo bandyme buvo parinkti diodai su šiais parametrais: 1A, 30 ns. Nusistovėjusios grandinės srovės stipris buvo pasiektas 0,70A, tačiau net ir prie mažesnių galių buvo matytas suaktyvėjęs diodų kaitimas. Tyrimas buvo kartojamas, tačiau su kitokiais diodų parametrais. Šį kartą buvo parinkti 3A, 75 ns lyginimo diodai. Šie lyginant su jau naudotais, yra žymiai didesnių matmenų, ko pasekoje yra didesnis laidininko plotas, kas, kaip rezultatas, suteikia žymiai efektyvesnį aušinimą.

Bandymo matavimai gauti vis didinant tarpą tarp sistemos ričių. Tyrimo metu buvo stebimi šie parametrai: siūstovo srovės stipris (I_s), siūstovo įtampa (U_s), imtuvo srovės stipris (I_i) bei imtuvo įtampa (U_i). Tyrimo rezultatai pavaizduoti 3.2 lentelėje. Imtuvo dalyje (I_i) bei (U_i) gautos nuolatinės įtampos dalyje iškart po diodų tiltelio. Kaip buvo pajungti matavimo prietaisai, parodyta 3.4 paveiksle.

3-2 lentelė. Sistemos charakteristika keičiant diodų stiprumą

l , cm	I_s , A	U_s , A	I_i , A	U_i , V	P_s , W	P_i , W	η , %
1	2,11	12	0,69	12,57	26,60	9,94	37,37
1,5	1,54	12	0,58	9,21	19,76	6,64	33,62
2	1,35	12	0,55	7,57	17,48	5,48	31,36
2,5	1,11	12	0,48	5,44	14,60	3,95	27,07
3	1,05	12	0,45	5,11	13,88	3,64	26,25
3,5	0,96	12	0,43	4,29	12,80	2,87	22,42
4	0,88	12	0,40	3,63	11,84	2,00	16,89
4,5	0,83	12	0,36	3,14	11,24	1,70	15,12
5	0,80	12	0,35	2,66	10,88	1,20	13,00
5,5	0,77	12	0,34	2,32	10,52	1,01	9,60
6	0,72	12	0,33	1,94	9,92	0,97	9,78
6,5	0,71	12	0,31	1,73	9,80	0,86	8,78
7	0,70	12	0,30	1,58	9,68	0,72	7,44
7,5	0,69	12	0,29	1,39	9,56	0,61	6,38
8	0,68	12	0,28	1,13	9,44	0,49	5,19
8,5	0,67	12	0,27	0,90	8,39	0,41	4,89
9	0,66	12	0,23	0,73	8,21	0,34	4,14
9,5	0,65	12	0,21	0,58	8,03	0,26	3,24



3.7 pav. Sistemos naudingumo koeficientas, keičiant diodų parametrus

Bandymo rezultatai grafiškai pavaizduoti 3.7 paveiksle. Jame atvaizduota sistemos efektyvumo priklausomybė keičiant imtuvo diodų parametrus. Iš šių rezultatų matyti, kad elektromobilio indukcinio krovimo sistema dirba daug efektyvesniu režimu, kai yra naudojami galingesni diodai. Kadangi didesnė galia- reikalauja didesnio laidininko skerspjūvio, o šiam padidėjus, galios pralaidumas žymiai pagerėjo.

3.3. Diodų temperatūrinė charakteristika, keičiant sistemos dažnį

Net ir pakeitus imtuvo diodus į galingesnius, su didesniu skerspjūvio plotu, išspinduliuojamos šilumos kiekis ant imtuvo grandinės diodų paviršiaus nesumažėjo, kas itin mažina sistemos efektyvumą ir didina sistemos nuostolius. Tad šio bandymo tikslas, palyginti, kaip šilumos išspinduliavimui įtakos turi sistemos dažnis. Tyrimui buvo atlikti du bandymai: vienu atveju, buvo naudojamas standartinis žeminantysis transformatorius, o kitu atveju aukšto dažnio keitiklis. Tad gauti tokie sistemos parametrai:

Sistemos dažnis: 50Hz;

Sistemos gnybtų įtampa 12V;

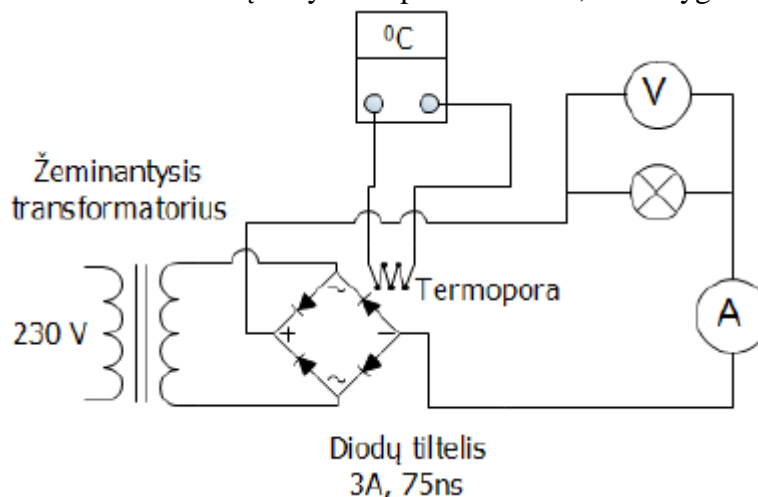
Pajungta apkrova: 8W;

Lyginimo diodai: 3 A, 75 ns.

Buvo gauti tiek imtuvo, tiek siūstovo grandinės srovės (I_a), įtampos (U_a) bei sistemos diodų temperatūra ($^{\circ}C$). Taip pat buvo matuojamos abiejų grandinių galios (P_a , W). Tyrimo rezultatai pateikti 3.3 lentelėje. Bandymo metu, galios matavimai buvo atlikti iš kart po lyginimo diodų nuolatinės srovės grandinės dalyje. 3.8 paveikslėlyje pateikta principinė schema, kur pavaizduotos galios atavimo prietaisų pajungimo vietos.

Antras bandymas buvo atliktas su specialiu bevielės energijos perdavimo įrenginiu, kurio dažnis siekė (1,213MHz). Šio maitinimo šaltinio įtampa siekė 4,92V, o srovės stipris 0,47 A. Tačiau imtuvo apkrovos komponento parametrai buvo 12V ir 0,7A lempa. Šio bandymo metu buvo fiksuojami tie

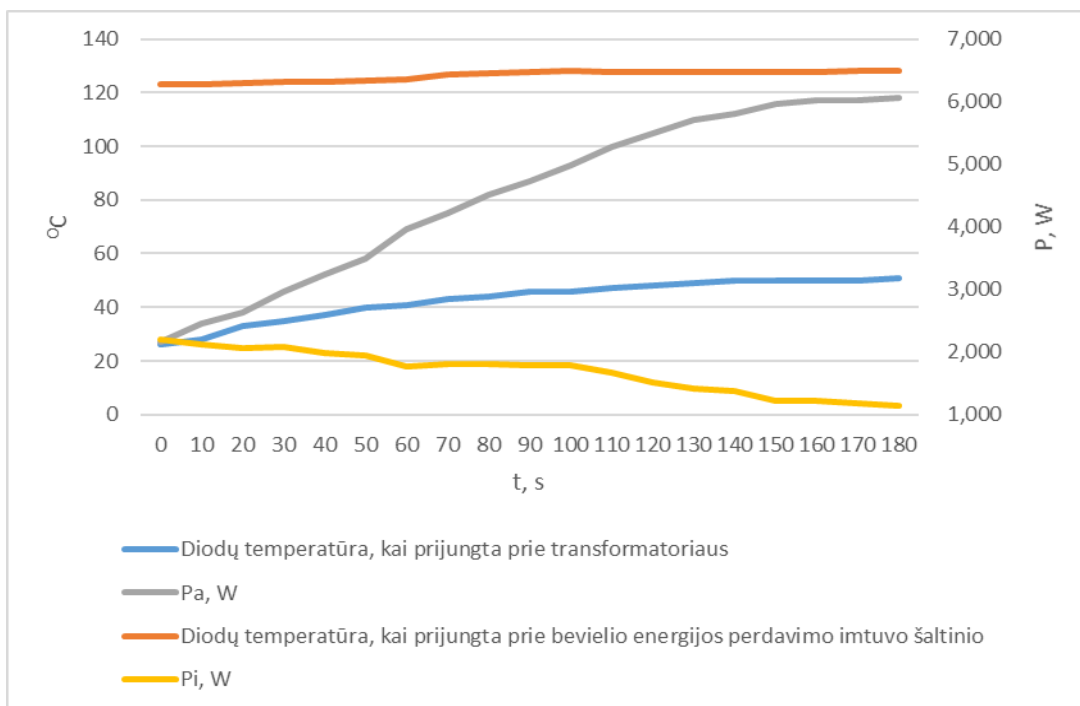
patys dydžiai kaip ir pirmajame bandyme. Taip pat abiejuose variantuose buvo nustatyta pastovus 5cm atstumas tarp siūstuvo ir imtuvo ričių. . Tyrimui panaudoti 3 A, 75 ns lyginimo diodai.



3.8 pav. Prijungtų matavimo prietaisų pajungimo schema

3-3 lentelė. Imtuvo diodų charakteristika atsižvelgiant į laiką bei galią

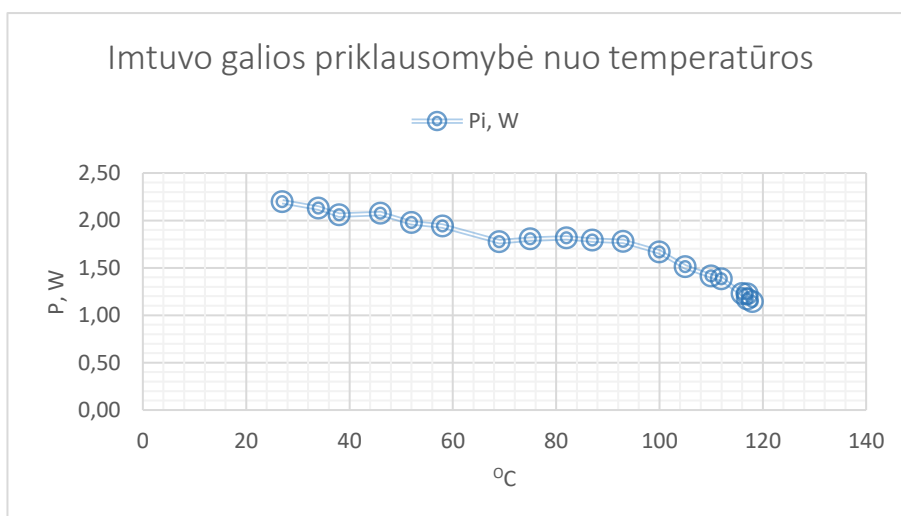
Diodų charakteristika panaudojant transformatoriaus šaltinį					Diodų charakteristika panaudojant bevielės energijos perdavimo imtuvo šaltinį						
t.s	I_a, A	U_a, V	$^{\circ}C$	P_a, W	I_s, A	U_s, V	I_i, A	U_i, V	$^{\circ}C$	P_i, W	P_s, W
0	0,62	10,29	26	6,281	1,03	12	0,46	4,87	27	2,20	12,25
10	0,62	10,31	28	6,293	1,04	12	0,46	4,72	34	2,13	12,37
20	0,62	10,33	33	6,305	1,07	12	0,46	4,66	38	2,06	12,73
30	0,62	10,36	35	6,324	1,10	12	0,45	4,57	46	2,07	13,09
40	0,62	10,37	37	6,330	1,13	12	0,44	4,58	52	1,98	13,45
50	0,62	10,38	40	6,336	1,16	12	0,44	4,50	58	1,94	13,81
60	0,62	10,41	41	6,354	1,17	12	0,43	4,21	69	1,77	13,93
70	0,63	10,41	43	6,458	1,21	12	0,43	4,28	75	1,80	14,41
80	0,63	10,43	44	6,470	1,23	12	0,43	4,31	82	1,82	14,65
90	0,63	10,44	46	6,477	1,26	12	0,43	4,25	87	1,79	15,01
100	0,63	10,45	46	6,483	1,27	12	0,43	4,22	93	1,78	15,13
110	0,63	10,44	47	6,477	1,28	12	0,42	4,05	100	1,67	15,25
120	0,63	10,44	48	6,477	1,25	12	0,41	3,76	105	1,51	14,89
130	0,63	10,42	49	6,464	1,22	12	0,40	3,61	110	1,41	14,53
140	0,63	10,43	50	6,470	1,20	12	0,40	3,49	112	1,38	14,29
150	0,63	10,44	50	6,477	1,18	12	0,39	3,33	116	1,23	14,05
160	0,63	10,44	50	6,477	1,17	12	0,39	3,23	117	1,22	13,93
170	0,63	10,45	50	6,483	1,15	12	0,38	3,15	117	1,17	13,69
180	0,63	10,45	51	6,483	1,13	12	0,38	3,07	118	1,14	13,45



3.9 pav. Diodų t ($^{\circ}\text{C}$) priklausomybė nuo laiko ir skirtingo šaltinio dažnio

3.9 paveiksle pavaizduoti tyrimo rezultatai, kai buvo parinkti skirtingi maitinimo šaltiniai su skirtingu dažniu. Grafike aiškiai matoma, jog bandyme, kuomet buvo parinktas aukštesnio dažnio maitinimo šaltinis, temperatūra pradėjo kilti kur kas greičiau, nei kai buvo pajungtas žemesnio dažnio maitinimo šaltinis. Iš šių rezultatų galima daryti išvadą, kad diodų tiltelis kaista dėl to, jog kuo didesnis sistemos dažnis, tuo srovė laidininke susikoncentruoja į to laidininko paviršių. Ir dėl didelio srovės kitimo, šis pradeda sparčiai kaisti. Tai vadinama paviršiniu efektu [20]. Šio efekto elektromobilio krovimo sistema turi būtinai išvengti, kadangi sistema yra montuojama po asfalto paviršiumi, kuris saulėtą dieną ir taip pasiekia aukštas temperatūras, o sumontuoti jame papildomą aušintuvą būtų sudėtinga ir ekonomiškai nepagrįsta.

Be to, rezultatai pateikti 3.10 paveiksle rodo, kad šylantys diodai didina sistemos varžą, kas sąlygoja galios mažėjimą ir naudingumo koeficiento slopinimą.



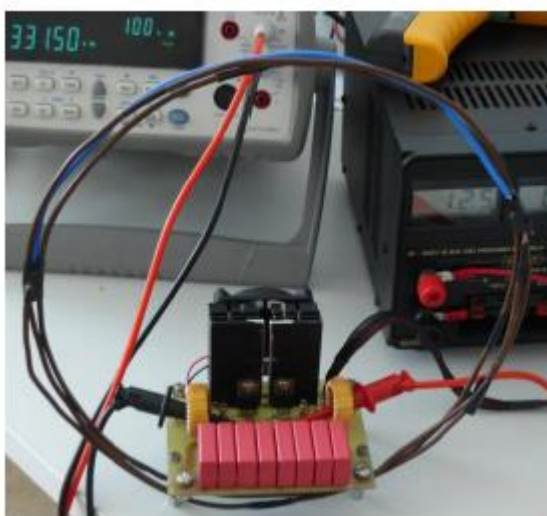
3.10 pav. Imtuvo charakteristika keičiantis temperatūrai

3.4. Siųstuvo ričių parinkimas ir dažnio įtaka su skirtingomis ritėmis tyrimas

Šio tyrimo tikslas yra išmėginti kelis ričių tipus, ir parinkti efektyviausią bevelei krovimo stotelei. Bandymams parenkami tokie ritės vijų skerspjūvio plotai: $1,5\text{mm}^2$, $2,5\text{mm}^2$, 4mm^2 , 6mm^2 ir 113mm^2 .

Taip pat buvo parinkti skirtingi tipai: minkštas daugiagyslis kabelis ir monolitas.

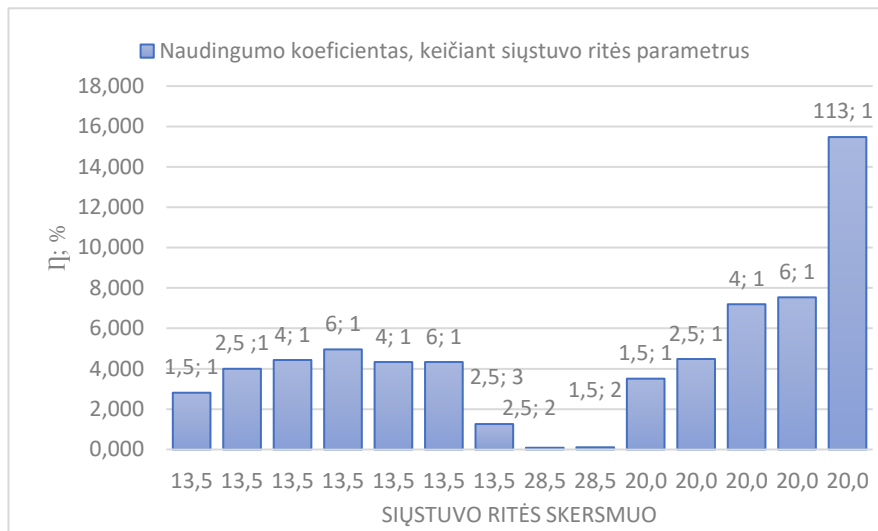
Siųstuvo ritė buvo bandoma įvairiausių tipų: suvytos vijos su skirtingu skerspjūviu, skirtingu bendru skersmeniu ir taip pat buvo parenkamas skirtingas vijų skaičių ritėje (3.11 pav.). Imtuvo ritės diametras buvo 20cm , ritės vijos skerspjūvio plotas $0,15\text{ cm}$, vijų skaičius 3vnt. Darant bandymus, siųstuvo ir imtuvo ritės buvo sugretintos 5cm atstumu. Buvo išmatuota siųstuvo grandinės srovės stipris (I_s), sistemos įtampa (U_s), imtuvo srovės stipris (I_i), imtuvo sistemos įtampa (U_i), taip pat siųstuvo dažnis (f_s) ir siųstuvo atviro kontūro srovės stipris (I_r) - kai dirba tuščiaja veika. Tyrimo rezultatai perteikti 3.4 lentelėje.



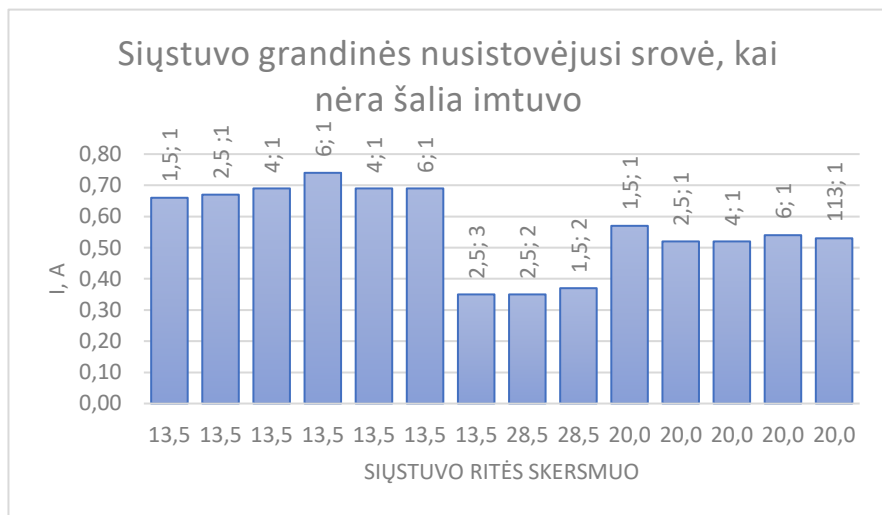
3.11 pav. Siųstuvo modelis su pakeistomis ritės vijomis

3-4 lentelė. Siųstuvo charakteristika keičiant ritės parametrus

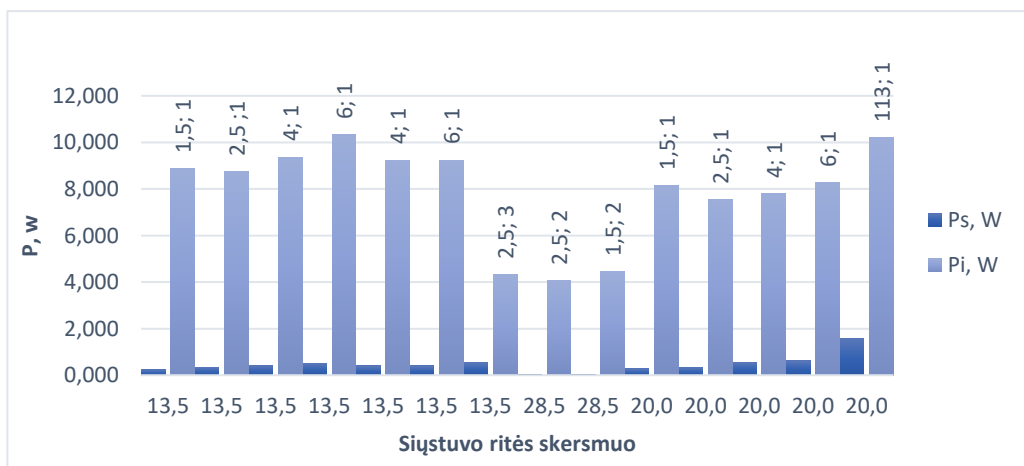
Eil. Nr.	I_s , A	U_s , V	I_i , A	U_i , V	mm^2	d , cm	f_s , MHz	N_s , sk	I_r , A	P_i , W	P_s , W	η , %
1	0,75	12	0,27	0,96	1,5	13,5	1,061	1	0,66	0,250	8,88	2,812
2	0,74	12	0,29	1,25	2,5	13,5	1,089	1	0,67	0,351	8,76	3,996
3	0,79	12	0,30	1,43	4	13,5	1,122	1	0,69	0,415	9,36	4,432
4	0,87	12	0,32	1,65	6	13,5	1,188	1	0,74	0,512	10,32	4,957
5	0,78	12	0,30	1,38	4	13,5	1,122	1	0,69	0,401	9,24	4,332
6	0,78	12	0,30	1,38	6	13,5	1,122	1	0,69	0,401	9,24	4,332
7	0,37	12	0,18	0,32	2,5	13,5	0,477	3	0,35	0,541	4,32	1,260
8	0,35	12	0,06	0,07	2,5	28,5	0,399	2	0,35	0,004	4,08	0,087
9	0,38	12	0,07	0,08	1,5	28,5	0,401	2	0,37	0,005	4,44	0,109
10	0,69	12	0,28	1,06	15	20,0	0,876	1	0,57	0,287	8,16	3,508
11	0,64	12	0,29	1,21	2,5	20,0	0,896	1	0,52	0,339	7,56	4,482
12	0,66	12	0,32	1,81	4	20,0	0,922	1	0,52	0,562	7,80	7,195
13	0,70	12	0,33	1,95	6	20,0	0,956	1	0,54	0,625	8,28	7,537
14	0,86	12	0,42	3,85	113	20,0	1,165	1	0,53	1,579	10,20	15,476



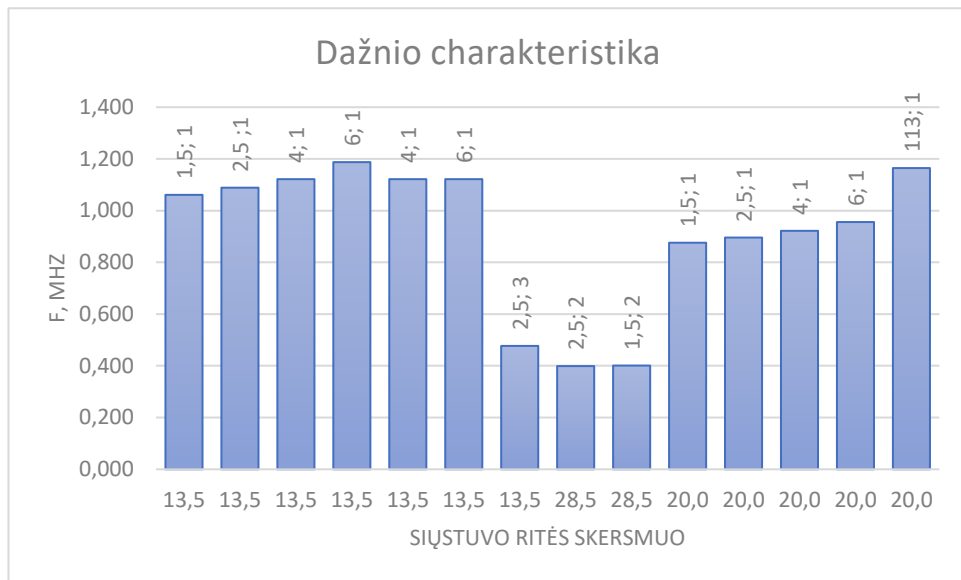
3.14 pav. Sistemos efektyvumas su skirtingais ričių fiziniais parametrais



3.13 pav. Siūstuvo maksimali išgauta galia su skirtingomis ritėmis dirbant tuščiaja veika



3.12 pav. Sistemos charakteristika su skirtingų parametru ritėmis



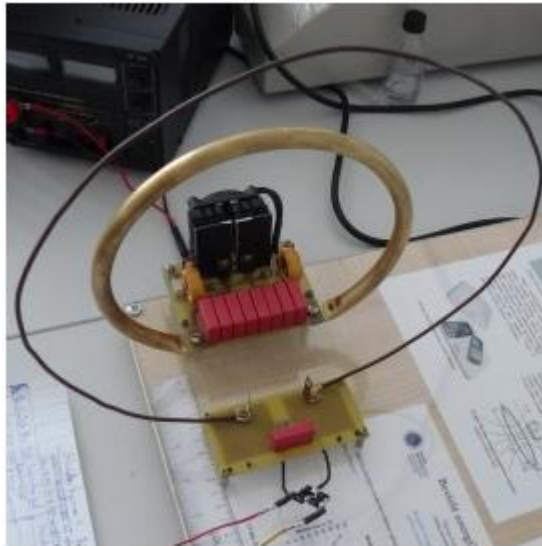
3.15 pav. Sistemos dažnio charakteristika su skirtingais ričių parametrais

Rezultatai pateikti 3.12 paveiksle demonstruoja, kad kaip kinta sistemos efektyvumas su viena ar kita rite. Išlaikant pastovų vijų kiekį, tik keičiant jų laidininkų skerspjūvio plotą gavome, kad didinant laidininkų skerspjūvi, didėjo ir efektyvumas. Tačiau skerspjūvi išlaikius vienodą, ir keičiant tik vijų skaičių pastebėta, kad naudingumas veikia atvirkščiai- krenta. Taip nutinka dėl padidėjusio ritės induktyvumo. Didinant ritės induktyvumą, didėja ir ritės induktyvinė varža ($X_L=2\cdot\pi\cdot f\cdot L$). Pavaizduotame 3.13pav. grafike vaizduojamas efektyviausias energijos perdavimas, kai sistemos ritės sutampa savo diametru (20cm) ir skerspjūviu (113mm). Rezultatauose pateiktuose 3.13 paveikslėlyje galime pastebėti, kad su mažesniais ričių skersmenimis ir didesniais laidininkų skerspjūvio plotais, siūstuvo dalyje srovės stipris didėjai šiai dirbant tuščiąja veika. Tok rezultatas išplaukia iš to, kad gaunamas trumpesnis laidininko ilgis, didesnis skerspjūvis, kas mažina aktyviają varžą. 3.14 paveiksle darytame tyrime buvo išlaikytas tas pats 5cm atstumas tarp siūstuvo ir imtuvo, ir gauti energijos perdavimo efektyvumo rezultatai buvo menki. Tai galimai įtakojo įvairūs nuostoliai, tokie kaip: šylantys bendrieji grandinės komponentai, kaistantis diodų tiltelis, bei tokios galios sistemai esančio palyginus dideliu oro tarpui tarp grandinių.

Iš 3.15 grafiko galime įsitikinti, kad prie kintančių ričių skiriasi sistemos dažnis. Didėjant siūstuvo vijų skaičiui iki 3vnt,- sistemos dažnis slopsta, o mažinant vijų skaičių- šis auga.

3.5. Tyrimas, keičiant imtuvo ritės parametrus

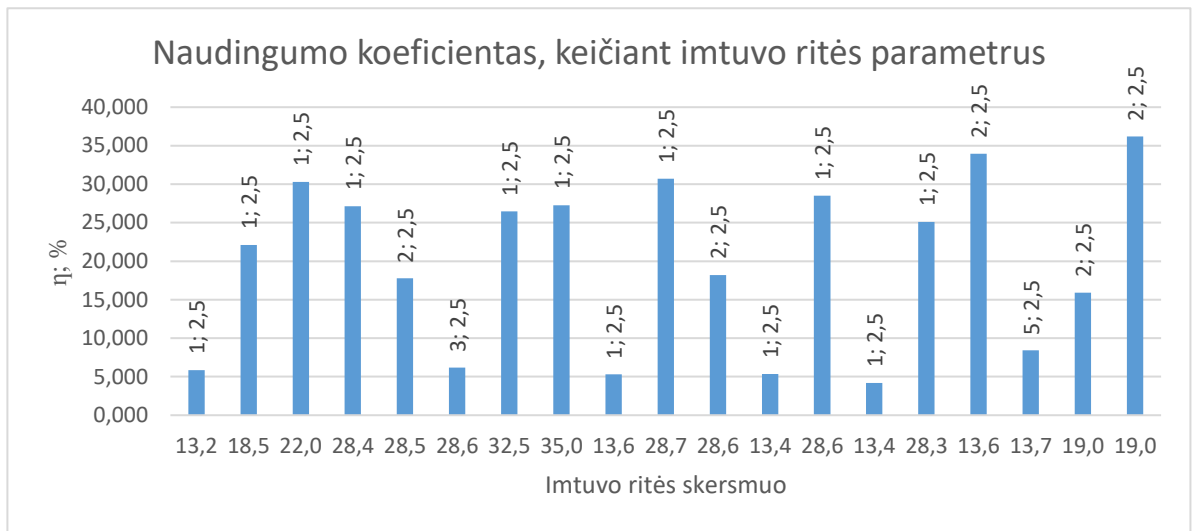
Šiuo tyrimu siekta išgauti maksimalų efektyvumą, parinkus tinkamiausią ritę, bevieliam energijos perdavimui. Tyrimui buvo parinkti variniai laidininkai, kurių skerspjūvis siekė: $1,5\text{mm}^2$, $2,5\text{mm}^2$, 4mm^2 ir 6mm^2 , tačiau 6mm^2 jau buvo parinktas minkštas daugiagydis varinis laidininkas. Imtuvo ritė buvo kiekvienam bandymui keičiama: skirtingų vijų skerspjūviu, ritės skersmeniu, taip pat skirtingu vijų skaičiumi (3.17 pav.). Siūstuvo ritė buvo išlaikoma tokia pati, ir skersmuo buvo parinktas 20 cm, vijos skerspjūvio plotas 1,13 mm. Darytame tyrime buvo išlaikytas tas pats 5cm atstumas tarp siūstuvo ir imtuvo. Buvo išmatuota siūstuvo grandinės srovės stipris (I_s), sistemos įtampa (U_s), imtuvo srovės stipris (I_t), imtuvo sistemos įtampa (U_s), taip pat siūstuvo dažnis (f_s) ir siūstuvo atviro kontūro srovės stipris (I_r) - kai dirba tuščiąja veika. Tyrimo rezultatai perteikti 3.5 lentelėje.



3.16 pav. Imtuvo tyrimas keičiant ritės parametrus

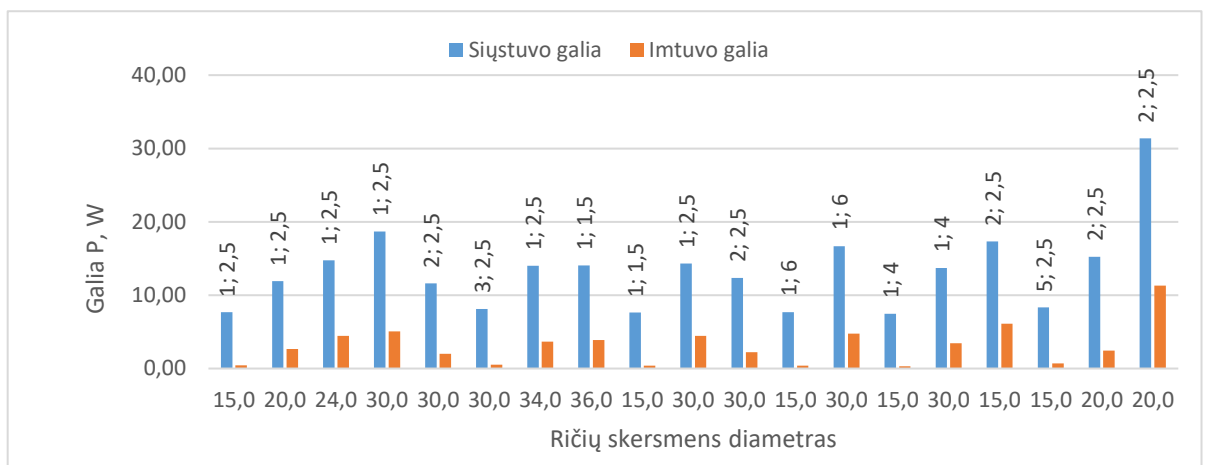
3-5 lentelė. Imtuvo charakteristika keičiant ritės parametrus

Eil. Nr	I_s , A	U_s , V	N_i , sk	mm^2	d , cm	P_s , W	U_i , V	I_i , A	P_i , W	η , %
1	0,63	12	1	2,5	13,2	7,67	1,50	0,29	0,430	5,860
2	1,00	12	1	2,5	18,5	11,90	5,53	0,49	2,670	22,100
3	1,24	12	1	2,5	22,0	14,77	7,86	0,56	4,470	30,290
4	1,56	12	1	2,5	28,4	18,68	8,55	0,58	5,073	27,140
5	0,96	12	2	2,5	28,5	11,63	4,60	0,45	2,003	17,770
6	0,67	12	3	2,5	28,6	8,13	1,70	0,29	0,503	6,178
7	1,18	12	1	2,5	32,5	14,00	6,98	0,53	3,684	26,461
8	1,19	12	1	2,5	35,0	14,04	7,20	0,55	3,878	27,271
9	0,64	12	1	1,5	13,6	7,62	1,39	0,28	0,401	5,312
10	1,20	12	1	1,5	28,7	14,30	7,75	0,56	4,438	30,691
11	1,03	12	2	1,5	28,6	12,33	5,10	0,46	2,243	18,201
12	0,63	12	1	4,0	13,4	7,67	1,43	0,31	0,409	5,334
13	1,38	12	1	4,0	28,6	16,66	8,20	0,59	4,750	28,511
14	0,63	12	1	6,0	13,4	7,45	1,17	0,28	0,321	4,183
15	1,15	12	1	6,0	28,3	13,69	6,54	0,53	3,433	25,091
16	1,48	12	2	2,5	13,6	17,34	9,63	0,64	6,124	33,968
17	0,67	12	5	2,5	13,7	8,32	2,13	0,35	0,699	8,419
18	1,26	12	2	2,5	19,0	15,21	5,22	0,44	2,451	15,891
19	2,55	12	2	2,5	19,0	31,40	14,71	0,78	11,321	36,213



3.17 pav. Sistemos efektyvumas su skirtingais ričių parametrais

Grafike 3.18 pavaizduotas elektromobilio krovimo stotelės efektyvumas, keičiant imtuvo ritės parametrus. Iš šio paveikslėlio matyti, kad didžiausias naudingumo koeficientas buvo pasiektas naudojant ritę, kurios skersmuo buvo parinktas 19cm, vijų skerspjūvio plotas $2,5\text{mm}^2$, bei buvo

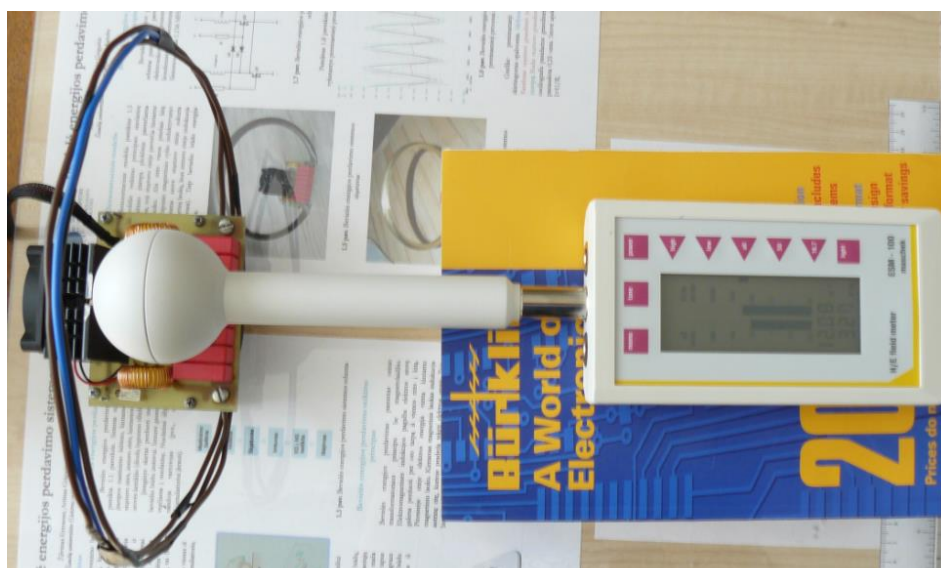


3.18 pav. Galių pasiskirstymas sistemoje su skirtingais ričių parametrais

suvytos dvi vijos. Taip pat prie šios ritės lygiagrečiai buvo prijungtas 4,6 nF talpumo kondensatorius. Šis kondensatoriaus pajungimas lėmė imtuvo galios padidėjimą, kuris išaugo įvykus rezonansiniam reiškiniui, kurį išaukė atitikę sistemų dažniai tarp siųstuvo ir imtuvo.

3.6. Bevielės energijos perdavimo sistemos magnetinio ir elektrinio laukų tyrimas

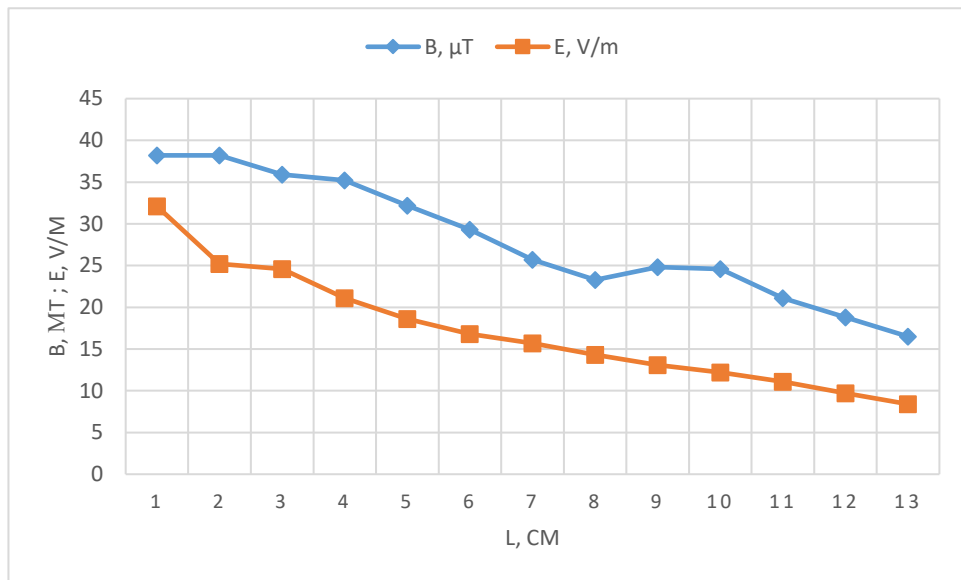
Atliekant šį tyrimą, buvo siekiama išanalizuoti kaip keičiasi magnetinio bei elektrinio lauko stipriai, keičiant sistemos įtampą. (3.21 pav.). Taip pat šių laukų charakteristika keičiant nuotolį iki ričių. Kad gauti teisingus šio tyrimo rezultatus, teko pakeisti ritės parametrus. Buvo naudojama 3 vijų suvyta ritė su $2,5\text{mm}^2$ laidininko skerspjūvio plotu bei 20 cm skersmens varinio daugiagydis minkštas kabelis. Šis sprendimas buvo priimtas todėl, kadangi prietaiso, kuris matuoja laukų parametrus, galimo dažnio diapazonas siekia iki 400 kHz, o nepakitusios ritės dažnis siekia 1,157MHz. Pakeitus ritės parametrus nurodytais, gautas sistemos dažnis siekė 332kHz, ko pilnai užtenka šiam matuokliui. Atlikto tyrimo metu gauti šie matavimai: grandinės srovės stipris (I_s), grandinės įtampa (U_s), magnetinio lauko srauto tankis (B), elektrinio lauko stipris (E). Matavimo duomenys pateikti 3.6 lentelėje.



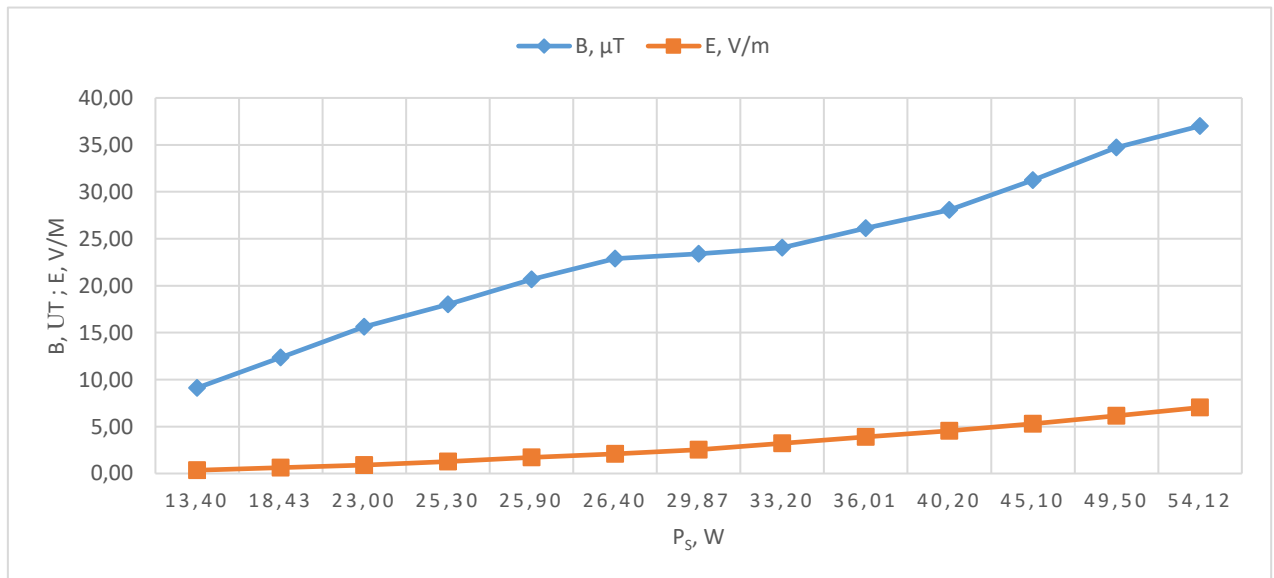
3.19 pav. Siųstuvo elektrinio lauko tyrimas

3-6 lentelė. Sistemos galios ir nuotolio tarp ričių įtaka elektriniam laukui

Keičiant sistemos įtampą					Keičiant ričių nuotolį		
U, V	I, mA	P _s , W	E, V/m	B, μT	l, cm	E, V/m	B, μT
7	90	14,00	0,35	9,12	0,5	32,1	39
7,5	150	18,43	0,63	12,34	1,5	25,2	38,2
8	170	23,00	0,91	15,62	2,5	24,6	35,9
8,5	200	25,30	1,27	18,01	3,5	21,1	35,2
9	220	25,90	1,71	20,67	4,5	18,6	32,2
9,5	250	26,40	2,08	22,89	5,5	16,8	29,3
10	260	29,87	2,55	23,40	6,5	15,7	25,7
10,5	300	33,20	3,22	24,05	7,5	14,3	23,3
11	340	36,01	3,91	26,11	8,5	13,1	24,8
11,5	360	40,20	4,56	28,08	9,5	12,2	24,6
12	380	45,10	5,31	31,23	10,5	11,1	20
14	410	49,50	6,16	34,71	11,5	10	18,8
17	460	54,12	7,03	37,01	12,5	8,4	16,5



3.21 pav. Laukų charakteristika, keičiant atstumą



3.20 pav. Siųstuvo elektromagnetinių laukų charakteristika, didinant galią

Grafike 3.20 pateikiama, kaip stipriai mažėja elektrinio lauko stipris bei magnetinio lauko srauto tankis didinant atstumą. Ties 8-9 cm diagramoje pastebimas magnetinio lauko srauto tankio netolygumas, kuram įtakos galėjo turėti pašalinai trukdžiai tyrimo metu (galbūt įneštas telefonas į netoliese esančią aplinką, ar maitinimo šaltinio įtampos šuolis. 3.21 grafike matoma elektromagnetinių laukų charakteristika, keičiant sistemos galią. Didinant elektromobilių krovimo stotelės galią, automatiškai stiprėja kintamas magnetinis laukas, kas kuria didesnę magnetinio lauko srauto tankį. Magnetinio srauto tankis ir elektrinio lauko stipris proporcingai tolygiai didėja didinant sistemos galią.

Išvados

Įvesta rezonansinė ritė, ženkliai padidina sistemos efektyvumą, bei atstumą tarp ričių, kas leistu šia bevielio krovimo sistema naudotis ir aukštesnės važiuoklės automobiliams. Rezonansinės ritės įtraukimas išdidina sąsajos atstumą dvigubai. Tyrimo atveju išaugo iki 30cm. Bet didinant sistemos galią, jis galimas ir didesnis.

Atlikus tyrimus indukciniai krovimo sistemai gauta, kad naudingumo koeficientas gali būti išgrynintas iki $\eta = 35\%$, kas leistu bateriją įkrauti per kiek daugiau nei valandą. Tačiau atsižvelgus į tai, jog sistema gali būti sumontuota sankryžose, parduotuvių aikštelėse, darbo stovėjimo aikštelėse-automobilis būtų nuolat besikraunąs, ir elektromobilių vairuotojai galėtų visiškai išsivaduoti nuo laiko eikvojimo automobilio pakrovimui.

Didinant sistemos dažnį, iš pradžių sistemos efektyvumas auga, tačiau tik iki tam tikros ribos. Po to, pradeda sparčiai kristi dėl susidariusio paviršinio efekto. Optimaliausias sistemos dažnis bevielio krovimo stotelei gautas 425 kHz.

Sistemos didžiausias efektyvumas pasiektas, kai ritės parametrai buvo parinkti: 20cm ilgio diametras ir 10mm^2 vijos skerspjūvio plotas, bei vienos vijos sistema. Kas įrodo, jog didelio dažnio sistemose, paranku montuoti vienos, bet storos vijos sistemą.

Atlikus šio tyrimo bandymus įsitikinta, jog ši technologija yra perspektyvi ir labai naudinga šiais laikais vis didėjančiam žmonių gyvenimo ritmui. Siekiant ją vystyti reikalingi dideli materialiniai išteklių bei papildomi tyrimai išgauti visiškam sistemos maksimumui. Ateities tyrimams būtų palanku įtraukti gilesnius rezonansinės ritės įtraukimo į sistema tyrimus, bei įvertinti sistemos efektyvumą, įtraukiant į sistemos aplinką atitinkamą metalo kiekį, kadangi, kaip žinia, automobiliai yra metaliniai, ir tai galimai mažina sistemos efektyvumą, kadangi elektromagnetinis laukas indukuojasi ir pačiame mašinos korpuse, kas šiame darbe nebuvo įvertinta.

Informacijos šaltinių sąrašas

1. H. H. Wu, A. Gilchrist, K. Sealy, P. Israelsen, and J. Muhs, "A Review on Inductive Charging for Electric Vehicles," In Proc. of IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), Niagara Falls, ON, May 2011.
2. H. Kim, C. Song, J. Kim, D. H. Jung, E. Song, S. Kim, and J. Kim, "Design of Magnetic Shielding for Reduction of Magnetic Near Field from Wireless Power Transfer System for Electric Vehicle," In Proc. of International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe), Gothenburg, Sweden, Sept. 2014.
3. R. Severns, E. Yeow, G. Woody, J. Hall, J. Hayes, "An Ultra-compact Transformer for a 100 W to 120 kW Inductive Coupler for Electric Vehicle Battery Charging," in Proc. of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, San Jose, CA, Mar. 1996.
4. U. K. Madawala and D. J. Thrimawithana, "A Bidirectional Inductive Power Interface for Electric Vehicles in V2G Systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 10, pp. 4789-4796, Oct. 2011.
5. N. Shinohara, Y. Kubo, and H. Tonomura, "Wireless Charging for Electric Vehicle with Microwaves," in Proc. of International Electric Drives Production Conference (EDPC), Nuremberg, German, Oct. 2013.
6. W. Liang, W. Xu, X. Ren, X. Jia, and X. Lin, "Maintaining Sensor Networks Perpetually via Wireless Recharging Mobile Vehicles," IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN), Edmonton, Canada, Sept. 2014.
7. Lin Z, Li J, Dong J. Dynamic wireless power transfer: Potential impact on plug-in electric vehicle adoption. SAE Technical Paper 2014-01-1965; 2014.
8. Kim HC, Wallington TJ, Arsenault R, Bae C, Ahn S, Lee J. Cradle-to-gate emissions from a commercial electric vehicle Li-ion battery: A comparative analysis. Environ Sci Technol 2016;50(14):7715-22.
9. S. Mohrehkesh and T. Nadeem, "Toward a wireless charging for battery electric vehicles at traffic intersections," in Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2011 14th International IEEE Conference on, 2011, pp. 113-118
10. Jones PT, Onar O. Impact of wireless power transfer in transportation: Future transportation enabler, or near term distraction. In: 2014 IEEE international electric vehicle conference (IEVC). IEEE; 2014. p. 1-7.
11. Bi Z, Kan T, Mi CC, Zhang Y, Zhao Z, Keoleian GA. A review of wireless power transfer for electric vehicles: Prospects to enhance sustainable mobility. Appl Energ 2016;179:413-25.
12. Kim HC, Wallington TJ. Life cycle assessment of vehicle lightweighting: A physics-based model of mass-induced fuel consumption. Environ Sci Technol 2013;47(24):14358-66.
13. U. K. Madawala and D. J. Thrimawithana, "A Bidirectional Inductive Power Interface for Electric Vehicles in V2G Systems," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 58, no. 10, pp. 4789–4796, Oct. 2011.
14. S. Chopra, "contactless power transfer for electric vehicle charging application" Delft University of Technology, the Netherlands, 2011.

15. F. Musavi and W. Eberle, "Overview of wireless power transfer technologies for electric vehicle battery charging," *Power Electronics, IET*, vol. 7, no. 1, pp. 60–66, Jan. 2014.
16. Y. Nagatsuka, N. Ehara, Y. Kaneko, S. Abe, and T. Yasuda, "Compact contactless power transfer system for electric vehicles," in *Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International*, 2010, pp. 807–813.
17. J. Sallan, J. L. Villa, A. Llombart, and J. F. Sanz, "Optimal Design of ICPT Systems Applied to Electric Vehicle Battery Charge," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 6, pp. 2140–2149, 2009.
18. H. Jiang, P. Brazis, M. Tabaddor, and J. Bablo, "Safety considerations of wireless charger for electric vehicles #x2014; A review paper," in *Product Compliance Engineering (ISPCE), 2012 IEEE Symposium on*, 2012, pp. 1–6.
19. F. Pellitteri, V. Boscaino, A. O. Di Tommaso, R. Miceli, and G. Capponi, "Inductive Power Transfer for 100W battery charging," in *Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE*, 2013, pp. 894–899.
20. Bevielio energijos perdavimo tyrimas, 2013. [žiūrėta 2020-03-20]. Prieiga per internetą: <<http://gs.elaba.lt/object/elaba:2070460/2070460.pdf> >.
21. F. Pellitteri, V. Boscaino, A. O. Di Tommaso, and R. Miceli, "Efficiency optimization in bi-directional inductive power transfer systems," in *Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS), 2015 International Conference on*, 2015, pp. 1–6.