



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Automobilių belaidžio krovimo sistemų ričių geometrinių parametrų įtakos ryšio koeficientui tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Lukas Romikaitis

Projekto autorius

Prof. Robertas Lukočius

Vadovas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Automobilių belaidžio krovimo sistemų ričių geometrinių parametrų įtakos ryšio koeficientui tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Lukas Romikaitis

Projekto autorius

Prof. Robertas Lukočius

Vadovas

Doc. Gytis Svinkūnas

Recenzentas

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Lukas Romikaitis

Automobilių belaidžio krovimo sistemų ričių geometrinių parametrų įtakos ryšio koeficientui tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Lukas Romikaitis

Patvirtinta elektroniniu būdu

Romikaitis, Lukas. Automobilių belaidžio krovimo sistemų ričių geometrinių parametų įtakos ryšio koeficientui tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Robertas Lukočius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: indukcinio būdu sujungta belaidė energijos perdavimo sistema, elektromagnetinis suderinamumas, baigtinių elementų analizė.

Kaunas, 2021. 54 p.

Santrauka

Magistro baigiamajame projekte išanalizuota skirtingų ričių parametų įtaka ryšio koeficientui. Atstumo tarp ričių, apvijų kiekio, skirtingų topologijų, ričių diametro, skirtingų ričių kombinacijų tyrimai. Šio darbo tikslas, išanalizuoti kokią įtaką ričių parametrai turi ryšio koeficientui.

Darbe pateikiami aukščiau išvardintų tyrimų rezultatai. Visi tyrimai buvo atliekami naudojant „Ansys“ programinę įrangą. Kiekvieno skyriaus pabaigoje pateikiamas trumpas apibendrinimas, o darbo pabaigoje pateikiamos išsamios išvados.

Romikaitis, Lukas. Investigation of Coil Geometric Parameters' Influence on Coupling Coefficient in Wireless Charging Systems for Electric Vehicles. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Robertas Lukočius; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: inductively coupled wireless power transmission system, electromagnetic compatibility, finite element analysis.

Kaunas, 2021. 54 p.

Summary

The master's final project examines the impact of various coil parameters on the coupling coefficient. This entails investigating the spacing between coils, the number of windings, diverse topologies, coil diameters, and different coil configurations. The objective of this study is to assess how alterations in coil parameters affect the coupling coefficient.

The work presents the results of the above research. All tests were performed using „Ansys“ software. At the end of each chapter, a short summary is presented, and at the end of the paper, detailed conclusions are presented.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Informacinių šaltinių analizė.....	12
1.1. Techniniai apribojimai.....	12
1.2. Belaidis energijos perdavimas	13
1.3. Belaidžio energijos perdavimo tipų skirtumas	14
1.4. Elektromagnetinė indukcija ir magnetinis rezonansas	15
1.5. Belaidžio krovimo sistemos veikimo principas.....	16
1.6. Artimo lauko belaidis energijos perdavimas	17
1.7. Belaidės krovimo sistemos pranašumai ir trūkumai.....	19
1.8. Elektrinių transporto priemonių prošvaisa	20
1.9. Belaidės energijos perdavimo veikimo principas.....	21
1.10. Apibendrinimas	23
2. Ritės parametrų ir ritės padėties įtaka belaidės energijos perdavimo sistemos veikimui..	25
2.1. Magnetinio rezonanso sistema	25
2.2. Atstumo tarp ričių įtakos ryšio koeficientui tyrimas	28
2.3. Pridėtinių medžiagų įtaka ryšio koeficientui	30
2.4. Ritės vidinio diametro įtakos ryšio koeficientui tyrimas.....	33
2.5. Apvijų kiekio daroma įtaka ryšio koeficientui	37
2.6. Skirtingų topologijų palyginimas	40
2.7. „Ansys Maxwell“ programinio paketo gautų rezultatų palyginimas su realiu pavyzdžiu	44
3. Belaidės energijos perdavimo sistemos analizė.....	47
3.1. Schemos blokų paaiškinimas.....	47
3.2. Rezonansinis kontūras	47
3.3. Analizuotos sistemos galia ir efektyvumas	48
Išvados.....	50
Literatūros sąrašas	51

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Skirtingų elektromobilių prošvaisos dydžiai	20
2 lentelė. Naudojamo stačiakampio modelio parametrai	27
3 lentelė. Stačiakampės ritės be pridėtinių medžiagų skaičiavimo rezultatai.	29
4 lentelė. Ričių modelio su feritu rezultatai.	30
5 lentelė. Ričių modelio su feritu ir aliuminiu rezultatai.	31
6 lentelė. Rezultatai keičiant antrinės ritės parametrus.	33
7 lentelė. Rezultatai keičiant pirminės ritės parametrus.	33
8 lentelė. Antrinės ritės apvijų pokyčio rezultatai.	37
9 lentelė. Pirminės ritės apvijų pokyčio rezultatai.	39
10 lentelė. Ričių parametrai.	41
11 lentelė. Skirtingų topologijų ryšio koeficiento ir abipusio induktyvumo skaičiavimo rezultatai: be pridėtinių nelaidžių magnetinių medžiagų, su feritu ir feritu - aliuminiu.	41
12 lentelė. Skirtingų topologijų pirminių ir antrinių ričių savaiminio induktyvumo skaičiavimo rezultatai: be pridėtinių nelaidžių magnetinių medžiagų, su feritu ir feritu - aliuminiu.	42
13 lentelė. Skirtingų kombinacijų skaičiavimo rezultatai.	43
14 lentelė. Skirtingų kombinacijų savaiminių induktyvumų skaičiavimo rezultatai.	44
15 lentelė. Programinės įrangos „Ansys Electronics Desktop“ gautų ir realios turimos ritės tyrimo rezultatų palyginimas.	46

Paveikslų sąrašas

1 pav. Ričių formų pavyzdžiai	13
2 pav. Belaidžio energijos perdavimo būdai [3]	14
3 pav. Ryšio tarp ričių tipai [3]	14
4 pav. Magnetinio lauko jungties, magnetinio rezonanso jungties, elektrinio lauko jungties ir elektrinio rezonanso jungties pavyzdžiai [3]	15
5 pav. Elektromagnetinės indukcijos ir magnetinio rezonanso jungties schema [3]	16
6 pav. Energijos perdavimas naudojant elektromagnetinę indukciją [3]	16
7 pav. Belaidžio krovimo schema [11]	17
8 pav. Indukcinės galios perdavimo sistemos, be rezonatoriaus ričių, architektūra [10].....	18
9 pav. Indukcinės galios perdavimo sistemos, su rezonatoriaus ritėmis, architektūra [10]	19
10 pav. Talpinės galios perdavimo sistemos architektūra[10]	19
11 pav. Automobilio prošvaisa	20
12 pav. Pirminė ir antrinė apvijų belaidėje energijos perdavimo sistemoje.....	21
13 pav. Principinė belaidės energijos perdavimo sistemos schema	21
14 pav. Belaidės energijos perdavimo schemas vaizdas [15]	22
15 pav. Magnetinio rezonanso grandinė.	25
16 pav. Kompensavimo topologijų pavyzdžiai: a) SS. b) SP. c) PS. d) PP	26
17 pav. Suprojektuotos stačiakampės ritės.....	28
18 pav. Suprojektuotų ričių modeliai: (a) be pridėtinių medžiagų modelis, (b) į sistemą įtrauktas feritas, (c) į sistemą įtrauktas feritas ir aliuminis.....	29
19 pav. (a) ryšio koeficiento priklausomybė nuo tarpo tarp ričių, (b) abipusio induktyvumo priklausomybė nuo atstumo tarp ričių.	30
20 pav. modelis su feritu: (a) ryšio koeficiento priklausomybė nuo atstumo tarp ričių, (b) abipusio induktyvumo priklausomybė nuo atstumo tarp ričių.	31
21 pav. modelis su feritu ir aliuminiu: (a) ryšio koeficiento priklausomybė nuo atstumo tarp ričių, (b) abipusio induktyvumo priklausomybė nuo atstumo tarp ričių.....	32
22 pav. Ričių modeliai su pastoviu pirminės ritės vidiniu spinduliu: (a) antrinės ritės spindulys 10 mm, (b) Antrinės ritės spindulys 40 mm, atstumui tarp ričių esant 100 mm	34
23 pav. Variacijos, su kintančiu antrinės ritės spinduliu, rezultatai: ryšio koeficiento ir abipusio induktyvumo priklausomybė nuo vidinio ritės diametro pokyčio.....	34
24 pav. Variacijos, su kintančiu antrinės ritės spinduliu, rezultatai: pirminės ir antrinės ričių savaiminio induktyvumo priklausomybė nuo vidinio ritės diametro pokyčio.	35
25 pav. Ričių modeliai su pastoviu antrinės ritės vidiniu spinduliu: (a) pirminės ritės spindulys 10 mm, (b) Pirminės ritės spindulys 40 mm, atstumui tarp ričių esant 100 mm.....	35
26 pav. Variacijos, su kintančiu pirminės ritės spinduliu, rezultatai: ryšio koeficiento ir abipusio induktyvumo priklausomybė nuo vidinio ritės diametro pokyčio.....	36
27 pav. Variacijos, su kintančiu pirminės ritės spinduliu, rezultatai: pirminės ir antrinės ričių savaiminio induktyvumo priklausomybė nuo vidinio ritės diametro pokyčio.	36
28 pav. Magnetinio lauko ir srauto pasiskirstymas.....	37
29 pav. Antrinės ritės apvijų pokyčio rezultatai: ryšio koeficiento priklausomybė nuo apvijų pokyčio antrinėje ritėje, abipusio induktyvumo priklausomybė nuo apvijų pokyčio antrinėje ritėje.	38

30 pav. Antrinės ritės apvijų pokyčio rezultatai: savaiminių ričių induktyvumų priklausomybė nuo antrinės ritės apvijų pokyčio.....	38
31 pav. Pirminės ritės apvijų pokyčio rezultatai: ryšio koeficiento priklausomybė nuo apvijų pokyčio pirminėje ritėje, abipusio induktyvumo priklausomybė nuo apvijų pokyčio pirminėje ritėje.	39
32 pav. Pirminės ritės apvijų pokyčio rezultatai: savaiminių ričių induktyvumų priklausomybė nuo pirminės ritės apvijų pokyčio.	40
33 pav. Ričių topologijos: a) apvali b) stačiakampė c) šešiakampė ritės.....	41
34 pav. „Ansys Electronics Desktop“ aplinkoje sumodeliuotos dvi ritės su ferito plokštelėmis.	45
35 pav. Realųjų turimų ričių pavyzdys.	45
36 pav. Blokinė schema	47
37 pav. Naudingumo koeficiento kreivė prie 100 mm atstumo	48
38 pav. Naudingumo koeficiento kreivė prie 200 mm atstumo	48

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

ICWPT – indukciniu būdu susieta belaidė energijos perdavimo sistema (angl. *inductively coupled wireless power transfer*);

SMPS – perjungiamo režimo maitinimo šaltinis (angl. *switch-mode power supply*);

IGBT – izoliuotas bipolinis tranzistorius (angl. *insulated-gate bipolar transistor*);

MOS-FET – metalo, oksido ir puslaidininkio lauko tranzistorius (angl. *metal-oxide-semiconductor field-effect transistor*);

EMC – elektromagnetinis suderinamumas (angl. *electromagnetic compatibility*);

IPT – indukcinis galios perdavimas (angl. *inductive power transfer*);

CPT – talpinis galios perdavimas (angl. *capacitive power transfer*);

C – įkrovimo greitis (angl. *charging rate*);

EVJ – elektrovara (angl. *electromotive force*);

MVJ – magnetovaros jėga (angl. *magnetomotive force*);

WPT – belaidis energijos perdavimas (angl. *wireless power transfer*);

EV – elektromobiliai (angl. *electric vehicle*);

FEA - baigtinių elementų analizė (angl. *finite element analysis*);

FEM – baigtinių elementų metodas (angl. *finite element method*);

ICNIRP – tarptautinė apsaugos nuo nejonizuojančiosios spinduliuotės komisija (angl. *international commission on non-ionizing radiation protection*);

PWM - impulso pločio moduliacija (angl. *pulse width modulation*);

T_x – siųstuvas (angl. *transmitter*);

R_x – imtuvas (angl. *receiver*);

AC – kintamoji srovė (angl. *alternating current*);

DC – nuolatinė srovė (angl. *direct current*);

Ivadas

Šiandien negalime įsivaizduoti savo kasdienio gyvenimo be daugybės elektros prietaisų, kuriems elektros energija tiekama laidais. Tačiau daugybė laidų gali sukelti painiavą ir nemažai nepatogumų. Ypač sudėtinga situacija yra, kai negalima naudoti laidų, o prietaisai turi būti prijungti prie elektros tinklo. Visa tai skatina ieškoti alternatyvių sprendimų, pavyzdžiui, energijos perdavimo belaidžiu ryšiu. Ši idėja ne nauja - ji buvo pristatyta daugiau kaip šimtą metų prieš tai, kai Nikolas Tesla ją sugalvojo [9].

Belaidį energijos perdavimą, galima panaudoti įvairiai būdais, pradedant nuo mažų prietaisų, tokių kaip: mobiliųjų telefonų, fotoaparatus, elektrinių dantų šepetėlių ir mini robotų baterijų įkrovimo, baigiant didesniais prietaisais, tokiais kaip: televizoriai ar elektromobilių akumulatoriai. Tačiau svarbu paminėti, kad belaidis energijos perdavimas turi savo trūkumų: mažas perdavimo atstumas, efektyvumo stoka ir nepakankamas, žinių apie energijos poveikį gyviems organizmams, kiekis.

Belaidis energijos perdavimas grindžiamas orinio transformatoriaus principu, naudojant elektromagnetinę indukciją, kuri leidžia perduoti elektros energiją iš vienos ritės į kitą. Pirminėje ritėje elektros energija virsta kintamuoju magnetiniu lauku, kuris sužadina elektros srovę antrinėje ritėje. Taip energija, be laidų, perduodama į apkrovą. Šio tyrimo tikslas - ištirti belaidžio energijos perdavimo veikimo principą ir parametrų pokyčio įtaką ryšio efektyvumui.

Tikslas:

Atlikti tyrimą ir išsiaiškinti automobilių belaidžio krovimo sistemų ričių geometrinių parametrų daromą įtaką ryšio koeficientui.

Uždaviniai:

1. Ištirti apvijų skaičiaus, atstumo tarp ričių daromą įtaką ryšio koeficientui.
2. Ištirti aliuminio ir ferito įvedimo į sistemą daromą įtaką ryšio koeficientui.
3. Ištirti ritės diametro daromą įtaką ryšio koeficientui.
4. Ištirti ir nustatyti, kuri iš trijų ritės formų, turi geriausią ryšio koeficientą.
5. Ištirti devynias trijų skirtingų ričių formų kombinacijas.
6. Palyginti realios ritės tyrimų rezultatus su „Ansys Electronics Desktop“ programinės įrangos gautais rezultatais.
7. Ištirti belaidę energijos perdavimo sistemą.

1. Informacinių šaltinių analizė

1.1. Techniniai apribojimai

Dėl oro tarpo, ICWPT sistemos projektavimas kelia neįprastų dizaino apribojimų, palyginti su tradiciniu, kompaktiškai sujungtu, dizainu. Ganėtinai didelis tarpas tarp energijos perdavimo ričių lemia mažą abipusį induktyvumą ir didelius magnetinio lauko nuostolius. Darbas su aukštais dažniais sukelia unikalių dizaino problemų, dėl padidėjusių šerdies nuostolių, magnetinio lauko nuostolių ir apvijų talpos. Patyrę perjungiamo režimo maitinimo šaltinių projektuotojai žino, kad SMPS veikimo efektyvumas labai priklauso nuo tinkamo magnetinių komponentų projektavimo ir įgyvendinimo. Parazitiniai elementai aukšto dažnio indukcinėse galios perdavimo sistemose sukelia įvairias problemas, įskaitant: didelius galios nuostolius, aukštos įtampos šuolius, prastą kryžminį išėjimų reguliavimą, triukšmingą sujungimą su įėjimu arba išėjimu, apribotą darbo ciklo diapazoną ir kt., [1].

Vieni iš didžiausių suvaržymų susijusių su dizainu ir praktiniu pritaikymu yra:

Galios poreikio patenkinimas - dažnai kyla sunkumų perduodant reikiamą galios kiekį apkrovai naudojant ICWPT sistemas dėl ribojamo ritės ploto imtuvo pusėje ir specifinių galios srauto taisyklių.

Perjunginėjimo greitis - darbas aukštuose dažniuose gali padėti sumažinti ICWPT sistemą. Nepaisant to, jungčių perjunginėjimo greitis yra vienas iš pagrindinių minusų. Vieni iš geriausiai tinkančių junginėjiančių komponentų skirtų ICWPT yra izoliuoti bipoliniai tranzistoriai IGBT, esantys komerciniuose produktuose ir pasiekiantys iki 3kV/2kA galią, ir junginėjimosi dažnį iki 80 kHz. Metalų, oksido ir puslaidininkio lauko tranzistoriai MOS-FET gali persijunginėti iki MHz lygio dažniais, bet jų įtampa yra per maža, kad juos būtų galima pritaikyti aukštos galios ICWPT prietaisams.

Naudingumas - dėl įvairių vario ir ferito nuostolių, pasiekti aukštą sistemos galios perdavimo koeficientą, yra labai sudėtinga užduotis.

Pritaikymas įvairių temperatūrų aplinkoms - tai yra vienas iš svarbesnių aspektų, sistemos pritaikymas dirbti pageidaujame temperatūrų ruože, ypač kai sistema yra naudojama esant specifinėms klimato sąlygoms[2].

Sistemos dydis ir svoris - svoris ir dydis yra ganėtinai riboti faktoriai projektuojant ICWPT sistemas. Konversijos procesams, galios elektronikoje, gauti yra naudojami magnetiniai komponentai, kurie paprastai yra sunkiausi ir masyviausi, esantys grandinėje. Tokių komponentų projektavimas turi didžiulę įtaką galutinės sistemos dydžiui ir svoriui, galios konversijos naudingumui ir kainai.

Sistemos stabilumas ir valdymas - visada yra pravartu turėti stabilią sistemą, esant visam apkrovos ir magnetinio sujungimo variacijų diapazonui, kurią būtų galima pritaikyti praktikoje. Įvairių dažnių kontroliuojami ICWPT energijos šaltiniai gali lengvai tapti nestabilūs, jei bus netinkamai suprojektuoti.

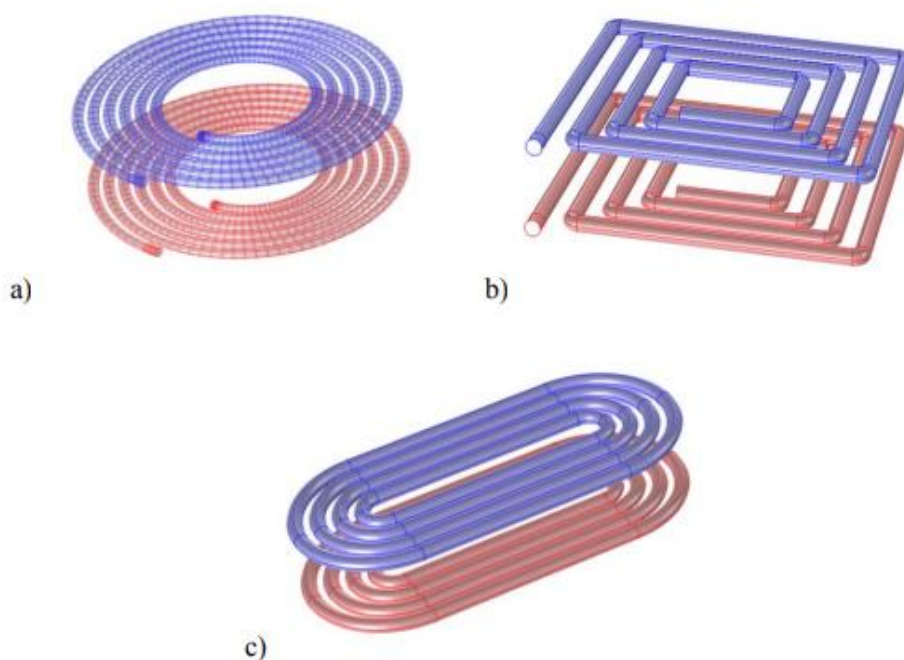
Įtaka kainai - egzistuojančios ICWPT sistemos yra brangesnės nei laidinės sistemos dėl savo sudėtingos galios elektronikos grandinės ir magnetinės jungties konstrukcijos [3].

Testavimas - galutinis ICWPT sistemos produktas turi praeiti elektromagnetinio suderinamumo EMC testus ir atitikti saugumo standartus, kas gali būti labai sudėtinga inžinerinio projektavimo užduotis. [1]

1.2. Belaidis energijos perdavimas

Kaip Džeimsas Klerkas Maksvelas numatė radijo bangų egzistavimą 1864 m., tyrimai tęsėsi iki duomenų ir energijos perdavimo belaidžiu būdu, o energijos perdavimo idėją, pirmiausia 1899 m., eksperimentiškai išbandė Nikolas Tesla [14]. Jis bandė perduoti elektromagnetinę energiją naudojant elektrodinamikos principą be kontakto tarp Amerikos ir Europos statant „Wardenclyffe“ bokštą [14], [15]. Belaidžio įkrovimo istorijoje mokslininkai susidūrė su daugybe sunkumų dėl ribotos galios, kurią galima perduoti iš siųstuvo į imtuvo anteną. Šiais laikais, ypač nuo 1978 m., belaidis energijos perdavimas yra taikomas įvairiose srityse: biomedicinoje, išmaniųjų telefonų baterijų įkrovime, puslaidininkių indukciniam šildyme ir t. t.

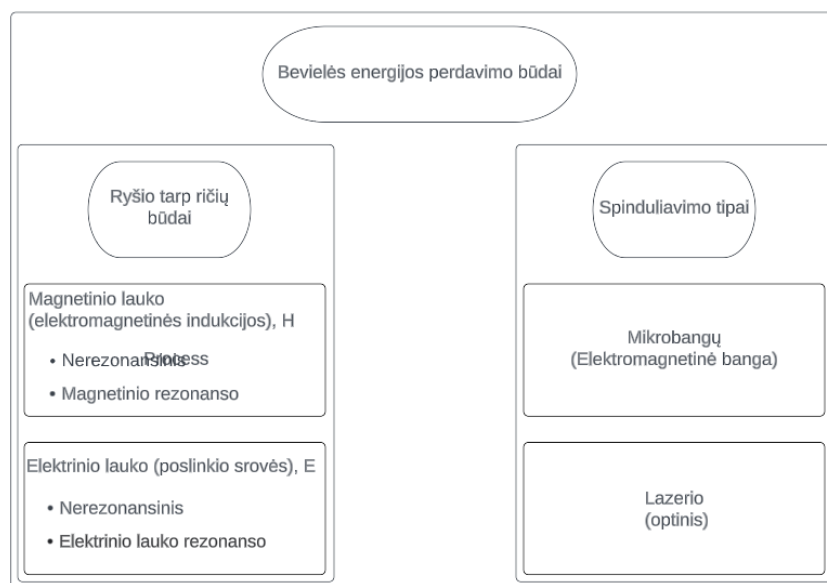
Tiek pirminei, tiek antrinei dalims galima pasirinkti daugybę formų: apskritimo, kvadrato arba elipsės formos ritės (žr. 1 pav.). Naudojamos ritės, yra pagamintos iš izoliuoto „Litz“ laido. Apskritai pirminės ir antrinės ritės yra suprojektuotos simultaniškai, kad būtų pasiektas tam tikras visos sistemos našumas. Siekiant pagerinti ryšį tarp ričių, naudojamas tam tikras ekranavimas. Siekiant padidinti abipusį induktyvumą, didinamas magnetinis srautas tarp jų. Nelaidžios magnetinės medžiagos kartais pridedamos kaip ekranavimas, o dvi ritės yra įterptos tarp dviejų ekranavimo sluoksnių. Feritas paprastai naudojamas, nes jis turi didelę elektrinę varžą, kuri padeda išvengti sūkurinių srovių susidarymo ritės sistemoje. Šios srovės gali sukelti energijos praradimą ir trukdžius. Dėl šios magnetinės grandinės, indukcija daugiausia sutelkta tarp dviejų ričių, o tai padeda pagerinti ryšį ir taip pat neleidžia įkaisti laidžioms dalims šalia indukcinės jungties.



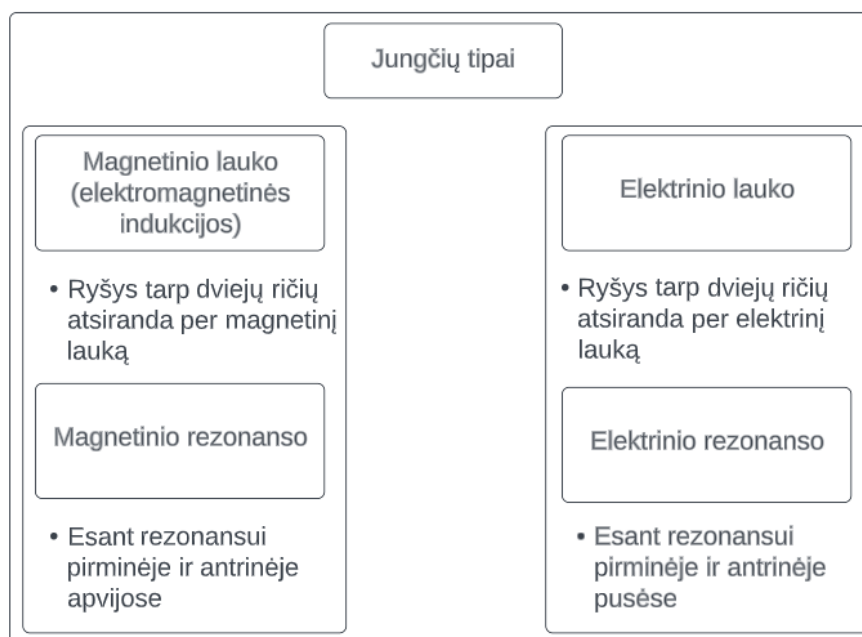
1 pav. Ričių formų pavyzdžiai

1.3. Belaidžio energijos perdavimo tipų skirtumas

Paveiksle (žr. 2 pav.) pavaizduoti belaidžio energijos perdavimo tipai. Jie plačiai skirstomi į du tipus, kurie aprašyti žemiau.



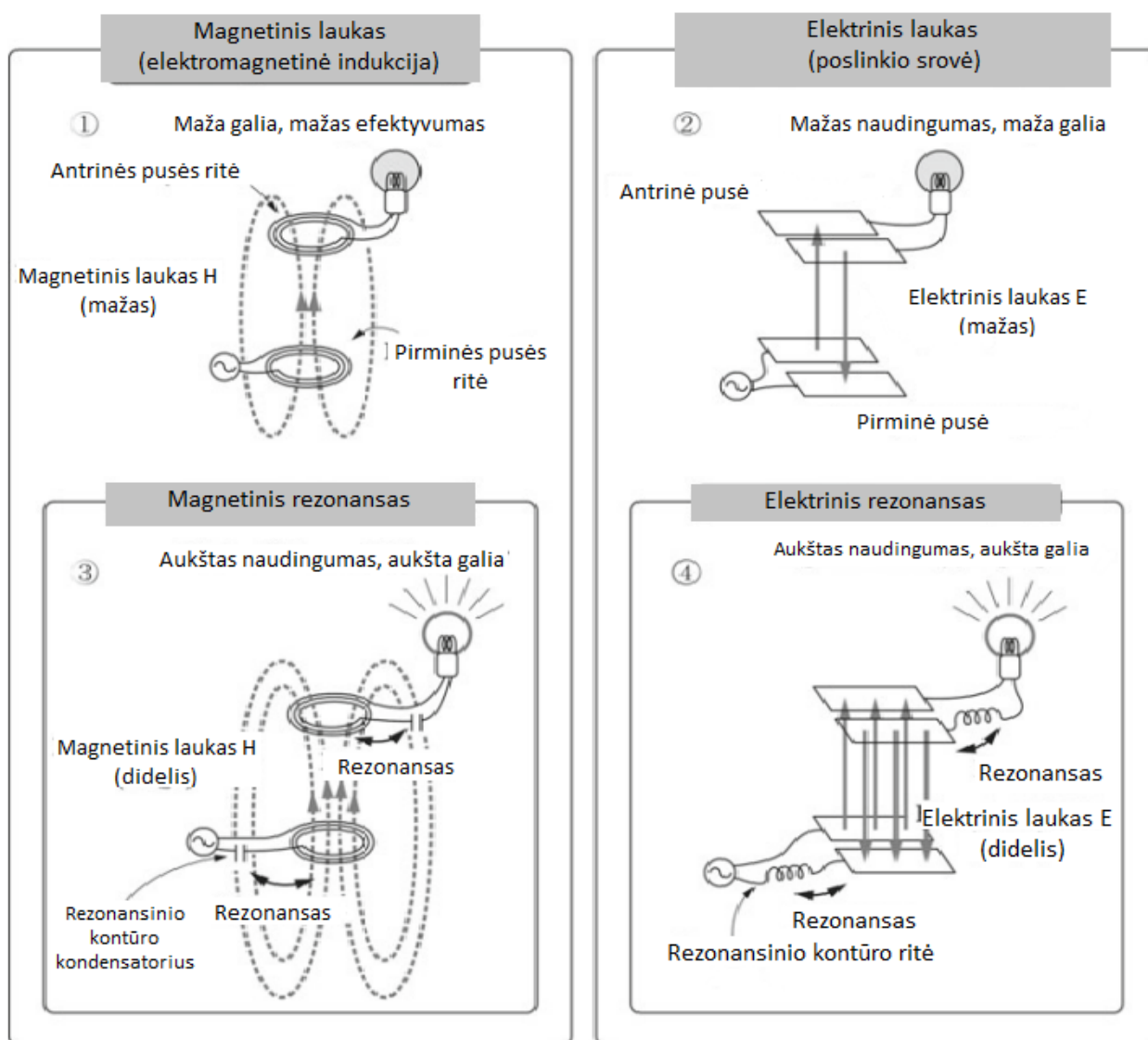
2 pav. Belaidžio energijos perdavimo būdai [3]



3 pav. Ryšio tarp ričių tipai [3]

(žr. 3 pav.) pavaizduoti jungčių tipai, o (žr. 4 pav.) pavaizduotos atitinkamos ryšio tarp ričių schemos. Pirmiausiai, pirminę pusę mes vadiname galios perdavimo puse, o energijos priėmimo pusę - kaip antrinę pusę. Taigi, sujungimo tipą galima suskirstyti į magnetinio lauko (elektromagnetinės indukcijos) ir elektrinio lauko (slinkties srovės), priklausomai nuo to, ar jungtis veikia magnetiniu lauku H, ar elektriniu lauku E. Ryšio tarp ričių tipai dar skirstomi į keturis tipus. Magnetinio lauko jungties tipas paprastai naudoja elektromagnetinę indukciją. Elektrinio lauko jungties tipas naudoja elektrinį lauką, o ne magnetinį lauką. Be to, įvedus rezonansinį

kondensatorių, vykstant elektromagnetinės indukcijos procesui, kondensatorius rezonuos su rite, todėl rezonansinis dažnis galios perdavimo pusėje bus toks pat kaip galios priėmimo pusėje. Tai leidžia pasiekti aukštą efektyvumą ir didelę galią, taip pat didelį oro tarpą. Kitaip tariant, sumanus rezonanso reiškinio panaudojimas vadinamas magnetinio rezonanso jungtimi. Paprasčiau tariant, rezonanso reiškinys (elektromagnetinė indukcija arba elektrinio lauko jungtis) dažnai naudojamas energijos perdavimo koeficientui pagerinti. Tačiau magnetinis rezonansas ir elektrinis rezonansas neveiks, jei rezonansui atsirasti sąlygos nebus tinkamos. Galios perdavimas yra įmanomas, kai galią perduodanti pusė ir galią priimanti pusė turi gerą ryšį per magnetinį ar elektrinį lauką. Sujungimo dalis paprastai vadinama rezonatoriumi arba, iš dalies, kaip antena, nors ji dažnai vadinama rite, kai ji yra sujungta su magnetiniu lauku, ir jungtimi arba plokšte, kai sujungiama su elektriniu lauku.[3]

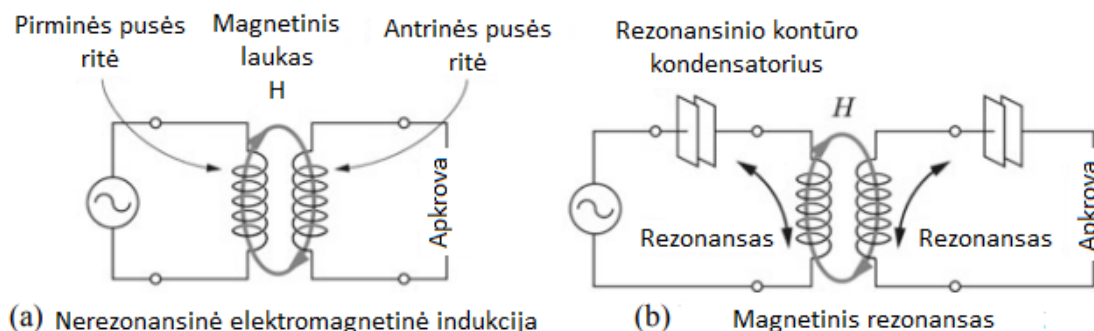


4 pav. Magnetinio lauko jungties, magnetinio rezonanso jungties, elektrinio lauko jungties ir elektrinio rezonanso jungties pavyzdžiai [3]

1.4. Elektromagnetinė indukcija ir magnetinis rezonansas

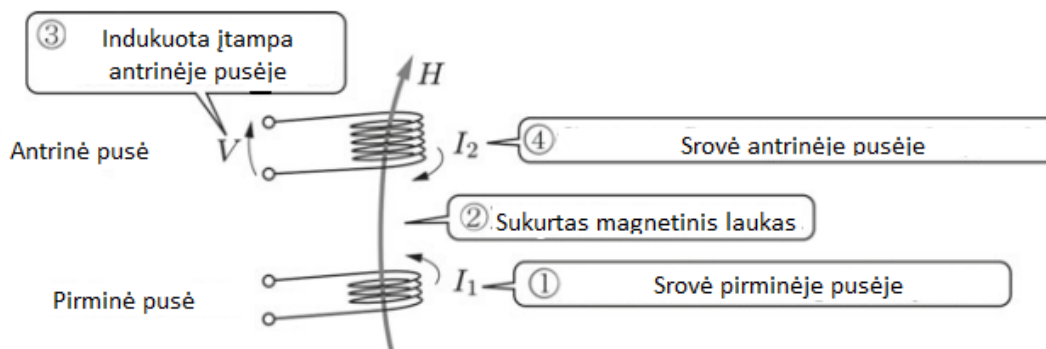
Magnetinio rezonanso ir elektromagnetinės indukcijos metodas apima sujungimą per magnetinį lauką, o elektromagnetinės indukcijos principas naudojamas komponentams sujungti abiejuose metoduose. Tačiau naudojant magnetinį rezonansą, kaip pavaizduota paveiksle (žr. 5 pav.), sudarant

rezonansinę grandinę tiek pirminėje, tiek antrinėje pusėje, susidaro grandinės topologija (grandinės struktūra), kuri gerai išnaudoja magnetinio rezonanso sąsają. Taigi, didelis efektyvumas ir didelė galia yra pasiekiami, net esant dideliems oro tarpams.[3]



5 pav. Elektromagnetinės indukcijos ir magnetinio rezonanso jungties schema [3]

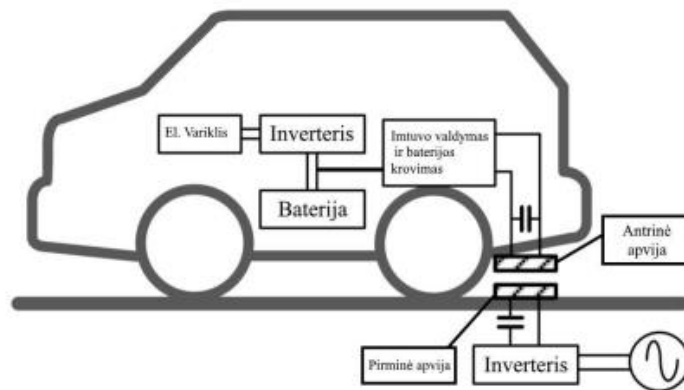
Kaip pavaizduota paveiksle (žr. 6 pav.), dėl magnetinio lauko, kurį sukuria srovė I_1 , tekanti į pirminę pusę, einanti per antrinės pusės ritės kilpą, energija perduodama antrinei pusei. Taigi, įtampa V sužadina kryptimi, priešinga magnetiniam laukui antrinėje pusėje, o galia perduodama srovės I_2 srauto pavidalu. Kai tai įvyksta, energija sklinda ne vien tik magnetiniu lauku H .



6 pav. Energijos perdavimas naudojant elektromagnetinę indukciją [3]

1.5. Belaidės krovimo sistemos veikimo principas

Energijos perdavimas per oro tarpą yra gana nauja sritis ir šiomis dienomis tokios sistemos nėra plačiai naudojamos. Belaidžio krovimo sistemos našumas gali kisti nuo 80 iki 95 %, priklausomai kaip tiksliai buvo suprojektuota sistema ir kaip yra išsidėsčiusios ritės. Kad būtų gaunamas labai aukštas sistemos naudingumas, aukštesnis nei 90 %, atstumas tarp pirminės ir antrinės ričių turi būti išlaikomas minimalus, tai yra nuo 15 iki 70 mm. [3].



7 pav. Belaidžio krovimo schema [11]

Belaidžio krovimo sistema yra sudaryta iš dviejų pagrindinių dalių: siųstuvo ir imtuvo. Kintanti srovė tekanti siųstuvu generuoja magnetinį lauką, kurio linijos kertą imtuvą. Taip imtuve yra generuojama elektros energija ir tiekama baterijai (žr. 7 pav.) [10]. Pirminę ir antrinę sistemos sudarančios ritės yra pritvirtinamos prie ekranuojančios feritinės plokštės. Feritas sukurtą magnetinį srautą priverčia judėti belaidėje energijos perdavimo grandinėje [10].

Tokiose sistemose labai svarbus parametras yra rezonansinis dažnis, kuris yra labai kruopščiai apskaičiuojamas norint pasiekti didžiausią sistemos naudingumą. Toliau yra apskaičiuojamos varžos, talpos ir apvijų induktyvumai [11]. Šios sistemos yra labai jautrios įvairių parametru pokyčiams, net mažiausias nesutapimas tarp ričių ar atstumo pasikeitimas gali stipriai sumažinti naudingumą ir į sistemą įvesti trikdžius [11].

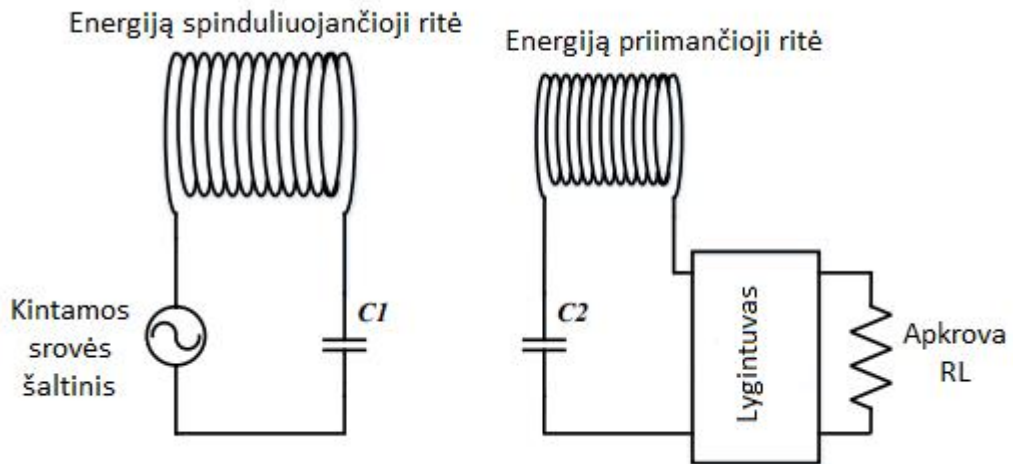
Norint išvengti šių problemų reikia sukurti universalią sistemą, kuri tiktų įvairiems automobiliams ir jos efektyvumas būtų minimaliai arba visiškai neįtakojamas tam tikrų parametru pasikeitimo. Sprendimas galėtų būti imtuvo priartinimas prie energiją generuojančio siųstuvo. Tai padėtų suvienodinti atstumą tarp ričių, stabilizuoti sistemą, išlaikyti aukštą ir tolygų efektyvumą.

1.6. Artimo lauko belaidis energijos perdavimas

Artimojo lauko belaidžio energijos perdavimo atstumas yra nuo kelių milimetrų iki metrų ir veikia didesniu efektyvumu nei tolimojo lauko belaidis energijos perdavimas ir pasiekia didesnę didžiausios galios perdavimą. Artimo lauko energijos perdavimo technologijas galima plačiai suskirstyti į dvi kategorijas:

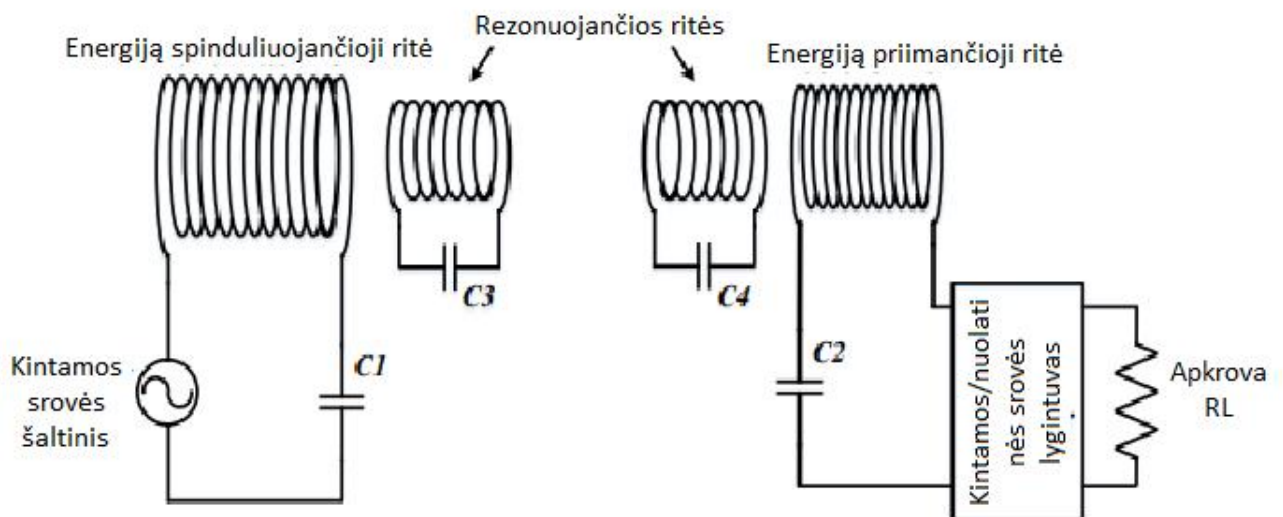
Indukcinis galios perdavimas IPT: belaidis įkrovimas pasiekiamas magnetiniu būdu, sujungus dvi rites. Siųstuvo ritėje sužadinama aukšto dažnio kintamosios srovės galia, kuri generuoja, laikui bėgant, kintantį magnetinį srautą. Dėl Faradėjaus indukcijos dėsnio imtuvo ritėje, indukuojama įtampa. Prijungus apkrovą prie imtuvo ritės, belaidis įkrovimas tampa įmanomas.[6] Prie

kiekvienos ritės prijungiamas kompensacinis kondensatorius - rezonatorius, kai aukšto dažnio kintamoji srovė tiekiami į rezonansinį kontūrą, kaip parodyta paveiksle (žr. 8 pav.). Kompensacija būtina norint sumažinti indukcinės ritės reaktyvumą, kuris sukuria fazės poslinkį tarp įtampos ir srovės ir padidina naudojamą reaktyviąją galią. Esant minimaliam fazių skirtumui tarp įtampos ir srovės, galios elektronikos nominalioji galia, puslaidininkių nuostoliai sumažėja. Indukcinės galios perdavimo sistemos yra lengvai įdiegiamos, saugios ir labai veiksmingos nedideliais perdavimo atstumais. Didėjant perdavimo atstumui, efektyvumas greitai mažėja. Didesniems perdavimo atstumams IPT sistemose paprastai naudojamos kelios rezonatoriaus ritės, padidinti siųstuvo ir imtuvo ryšį, kaip parodyta paveiksle (žr. 9 pav.).



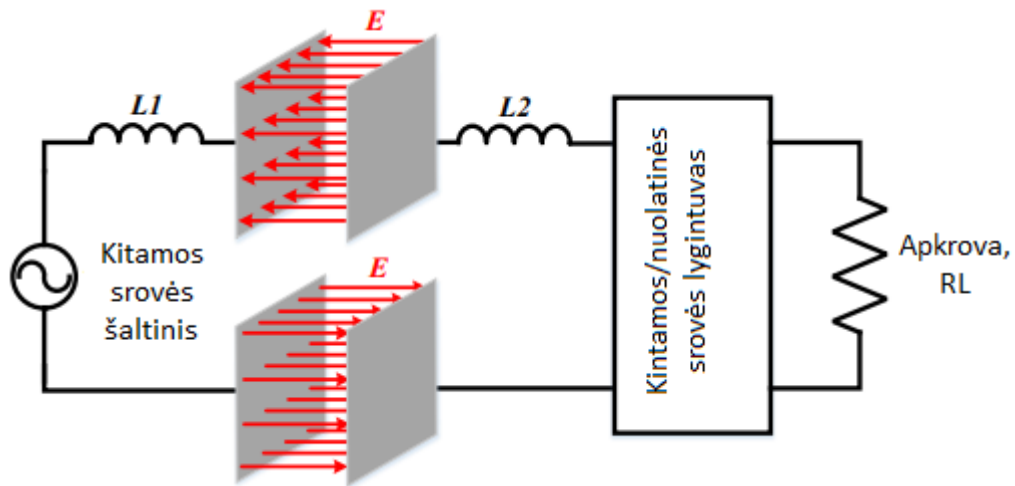
8 pav. Indukcinės galios perdavimo sistemos, be rezonatoriaus ričių, architektūra [10]

Šis sisteminga grandinė paprastai vadinama magnetinio rezonanso sistema. Rezonatoriaus ritė yra lygiagrečiai sujungta su kondensatoriumi ir sužadinant siųstuvo ritę, esant jų rezonansiniam dažniui, aukštas efektyvumas išlaikomas, net esant didesniam perdavimo atstumui. Indukcinės galios perdavimo sistemų kaina išauga, nes yra pridedamos šios kelios ritės. Be to, jų efektyvumas greitai mažėja, kai ričių pozicionavimas nesutampa[7]. Taigi, šios sistemos naudoja dideles ritės, kad išlaikytų gerą ryšį ričių nesutapimo metu, o tai padidina tiek sistemos dydį ir kainą.



9 pav. Indukcinės galios perdavimo sistemos, su rezonatoriaus ritėmis, architektūra [10]

Talpinis galios perdavimas CPT: nors indukcinė ir magnetinio rezonanso jungtis perduoda galią per magnetinius laukus, talpinė jungtis perduoda galią belaidžiu būdu per elektrinius laukus, kaip parodyta paveiksle (žr. 10 pav.). Talpiniu būdu sujungtose sistemose siūstuvai ir imtuvai yra metalinės plokštės, sujungtos su elektriniu lauku. Induktoriai naudojami kompensavimui ir reaktyviosios galios mažinimui talpinės galios perdavimo sistemose. Panašiai kaip indukcinės galios perdavimo sistemos, rezonansinis kontūras yra sužadinas aukšto dažnio kintamosios srovės su AC-DC lygintuvu, jungiančiu imtuvą su apkrova.



10 pav. Talpinės galios perdavimo sistemos architektūra [10]

Talpinės galios perdavimo sistemos turi mažus nuostolius, nereikšmingą elektromagnetinę spinduliuotę, ir jokių sukurinių srovių nuostolių. Šias sistemas ribojantis veiksnys yra elektrinių laukų tankis, kuris yra maždaug 104 kartus mažesnis už magnetinius laukus. Dėl to talpinės galios perdavimo sistemos negali pasiekti tokių pat galios lygių kaip indukcinės galios perdavimo sistemos.

Indukcinės sistemos yra geriausias pasirinkimas elektromobiliams įkrauti. Jos užtikrina didesnę efektyvumą, esant tam tikram galios lygiui ir atstumui tarp ričių, nei talpinės galios perdavimo sistemos. Be to, dėl mažesnio talpinės galios perdavimo sistemų elektrinio lauko tankio, indukcinėse sistemose pasiekiamas daug didesnis galios lygis.

1.7. Belaidės krovimo sistemos pranašumai ir trūkumai

Baterijoms tobulėjant elektriniai automobiliai galės įveikti vis didesnius atstumus. Todėl automobiliai su vidaus degimo varikliais galiausiai bus išstumti iš rinkos. Nors automobilis su vidaus degimo varikliu gali nuvažiuoti iki tūkstančio kilometrų, o elektriniai automobiliai su mažesnėmis baterijomis, nuvažiuoja iki 200 km vienu baterijos įkrovimu, tačiau elektromobilius reikia dažnai įkrauti. Tai palengvinti galėtų belaidės įkrovimo sistemos.

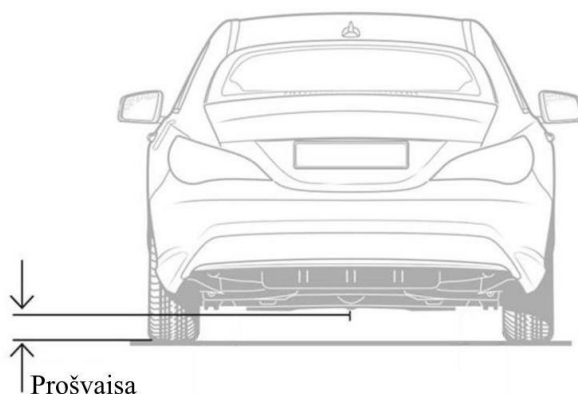
Dėl paprasto ir saugaus naudojimo, toks krovimo būdas gali ženkliai padidinti elektromobilių populiarumą. Ši sistema būtų itin saugi, dėl atvirų kontaktų nebuvimo. Todėl esant drėgmei žalos tikimybė yra ženkliai sumažinama. [12].

Pirminė belaidės perdavimo sistemos dalis gali būti integruojama ant žemės paviršiaus[12]. Tačiau tokiu atveju, oro tarpas, tarp pirminės ir antrinės apvijų, yra padidinamas. Siųstuvo apviją padedant ant paviršiaus yra sumažinamas atstumas tarp ričių, bet išsikišanti konstrukcija gali sukelti tam tikrų problemų.

Belaidžio krovimo sistemos efektyvumas dažniausiai yra nuo 5 iki 20% prastesnis nei energiją perduodant laidais, o tai padaro ją brangesnę ir sudėtingesnę [12]. Šis efektyvumas priklauso nuo daugelio veiksnių, įskaitant atstumą tarp apvijų, naudojamą dažnį, apvijų formą ir komponentų parinkimą. Norint pasiekti kuo didesnę efektyvumą, būtina, kad apvijos būtų tiksliai suderintos [12]. Belaidžio krovimo galinumas taip pat žymiai mažesnis nei krovimo galia naudojant laidus, su belaidžiu krovimu galima pasiekti tik nuo 1 iki 10 kW galinumą, palyginti su iki 400 kW galia, kurią galima pasiekti naudojant laidus [12]. Be to, prarandama nuo 5 iki 20% efektyvumo krovimo metu be laidų.

1.8. Elektrinių transporto priemonių prošvaisa

Prošvaisa, tai atstumas nuo transporto priemonės žemiausios dalies iki žemės paviršiaus(žr. 11 pav.). Šis atstumas vyrauja, priklausomai nuo skirtingo automobilio modelio. Maži automobiliai paprastai turi mažesnę prošvaisą, o didesnės transporto priemonės ją turi didesnę.



11 pav. Automobilio prošvaisa

Iš lentelėje matomų rezultatų (žr. 1 lentelę) galima pastebėti, jog elektromobilių prošvaisa kinta nuo 120 iki 160 mm. Didžiausią prošvaisą turi „Nissan Leaf“ elektromobilis– 160 mm, o „Renault ZOE“ mažiausią – 120 mm [18].

1 lentelė. Skirtingų elektromobilių prošvaisos dydžiai

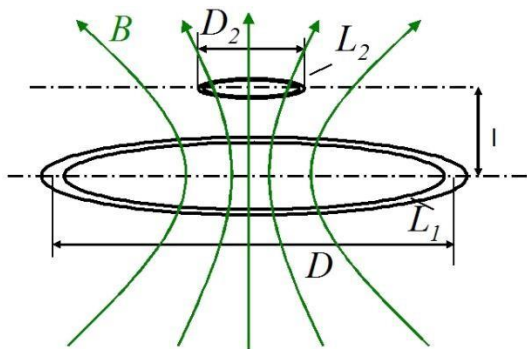
Elektromobilio modelis	Prošvaisa, mm
„Nissan Leaf“	160
„Volkswagen e-Golf“	126
„BMW i3“	139
„Renault ZOE“	120
„Hyundai IONIQ“	140
„Opel Ampera-e“	131

Reiktų atkreipti dėmesį, kad rinkoje atsiranda vis daugiau naujų elektromobilių modelių ir belaidis krovimas bus pritaikomas ne tik esamiems elektromobiliams, bet ir naujiems. Todėl dėl automobilių

prošvaisos didėjimo tendencijos galima spėti, kad ateityje važinėsiantys elektromobiliai taip pat turės didesnę prošvaisą.

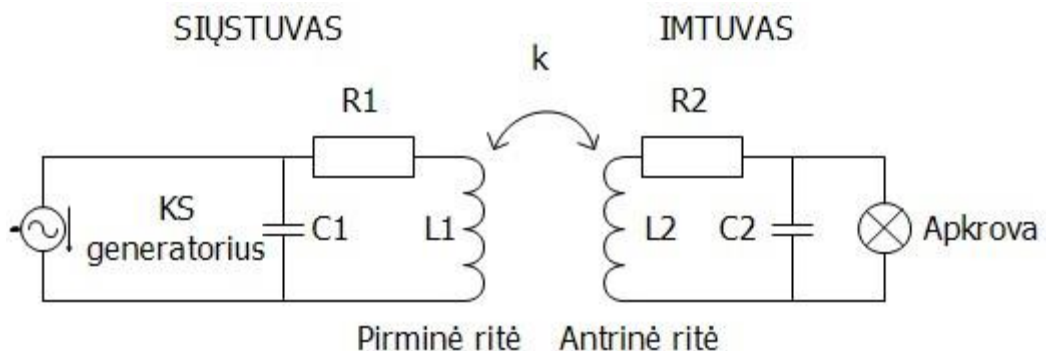
1.9. Belaidės energijos perdavimo veikimo principas

Elektromagnetinės indukcijos elektros energija, be laidų, gali būti perduodama iš vienos ritės į kitą. Pirminėje ritėje elektros energija paverčiama kintančiu magnetiniu lauku, kuris sužadina elektros srovę antrinėje ritėje. Tai leidžia energijai pasiekti imtuvą be jokių laidų.



12 pav. Pirminė ir antrinė apvijos belaidėje energijos perdavimo sistemoje

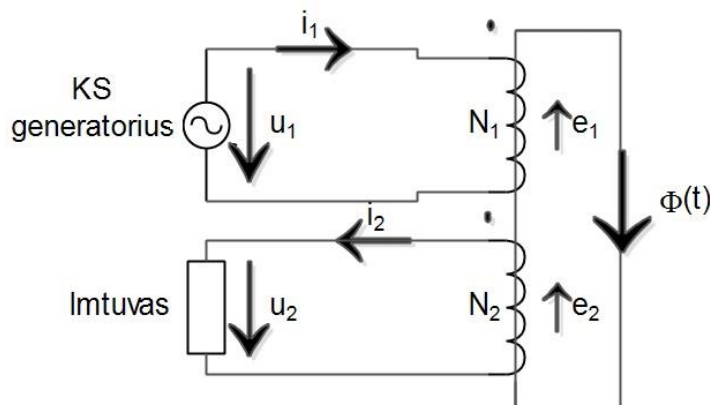
Pagrindinės komponentės belaidėje energijos perdavimo sistemoje yra pirminė ritė, pažymėta L_1 , ir antrinė ritė, pažymėta L_2 . Šios dvi ritės sudaro sistemą, kurioje veikia abipusis induktyvumas. Kintanti srovė pirminėje ritėje sukuria kintantį magnetinį lauką, kuris, savo ruožtu, indukuoja elektrovarą (EVJ) antrinėje ritėje, arba imtuve. Principinė belaidės energijos perdavimo sistemos schema pavaizduota paveiksle (žr. 13 pav.).



13 pav. Principinė belaidės energijos perdavimo sistemos schema

Belaidės energijos perdavimo struktūra pavaizduota paveiksle (žr. 14 pav.). Tai yra dvi apvijos, kurios yra atviraime magnetolaidyje. Šios apvijos nėra elektriškai sujungtos, bet jas sieja bendras magnetinis srautas Φ , todėl jų sąveika yra magnetinė. Siųstuvo apvija, į kurią teikiama elektros

energija, vadinama pirmine. Imtuvo apvija, kuri suteikia elektros energiją imtuvui, vadinama antrine. Visus belaidės energijos perdavimo įėjimo dydžius žymėsime indeksu „1“, o išėjimo - antriniais dydžiais, žymėsime „2“ [15].



14 pav. Belaidės energijos perdavimo schemos vaizdas [15]

Belaidės energijos perdavimo principas grindžiamas abipusės indukcijos reiškiniu tarp jos apvijų. Kuomet pirminei apvijai (turinčiai vijų skaičių N_1) prijungiama kintamoji įtampa $U_1(t)$, jos viduje pradeda tekėti kintamoji srovė $I_1(t)$. Ši srovė sukuria kintamą magnetinį srautą $\Phi(t)$ magnetolaidyje. Šis srautas sužadina elektrovarą (EVJ) $e_1(t)$ ir $e_2(t)$ abiejose apvijose.

Jei antrinė grandinė yra atvira (neprijungta apkrova), belaidė energijos perdavimo sistema veikia tuščios eigos režimu. Tačiau, jei sistema yra uždara ir apkraunama, srovė pradeda tekėti per antrinę apviją ir imtuvą.

Elektriniai dydžiai ir magnetinio srauto kryptys, belaidės energijos perdavimo sistemoje, parodytos schemoje (žr. 15 pav.). Pirminė apvija veikia kaip generatorius, todėl teigiama srovės i_1 kryptis yra nustatoma pagal pasirinktą u_1 kryptį. Saviindukcijos elektrovaros (EVJ) e_1 kryptis laikoma priešinga nei srovės i_1 kryptis.

Magnetinio srauto Φ kryptis pažymėta pagal dešiniojo sraigto taisyklės taikymą, priešingai nei pirminė apvija tekančiai srovei i_1 . EVJ e_2 kryptis yra tokia pati kaip ir e_1 , nes abi apvijos yra susuktos toje pačioje kryptyje ir jas veikia tas pats magnetinis srautas Φ [15].

Antrinė apvija veikia kaip imtuvas, kurio elektrovaros (EVJ) yra e_2 . Dėl to antrinėje grandinėje tekanti srovė i_2 turi tokios pačios krypties elektrovarą kaip ir e_2 . Imtuvas yra prijungtas prie antrinės įtampos u_2 , kurios teigiama kryptis pažymėta atitinkamai pagal i_2 kryptį imtuve.

Taikydami dešiniojo sraigto taisyklę antrinei apvijai, pastebime, kad srovė, tekanti per antrinę apviją, sukuria magnetinį srautą, kurio kryptis priešinga pirminės srovės sukurtam magnetiniam srautui [15].

Elektrovaros jėgas pirminėje ir antrinėje apvijose galime aprašyti kompleksiniais dydžiais, nagrinėjant belaidėje energijos perdavimo sistemoje, vykstančius elektromagnetinius reiškinius, kurie gali būti išreikšti taip:

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}; e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$$

čia N_1, N_2 – ričių vijų skaičius, $d\Phi$ – magnetinio srauto pokytis, $\frac{d\Phi}{dt}$ – srauto kitimo greitis.

Laikydami, kad magnetinis srautas sinusinis:

$$-\Phi = \Phi_m \sin \omega t, \quad (2)$$

čia Φ – magnetinis srautas, Φ_m – magnetinio srauto maksimali vertė, ω – kampinis dažnis.

Ir atlikę veiksmus, gausime:

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \pi/2); e_2 = E_{2m} \sin(\omega t + \pi/2), \quad (3)$$

čia E_{1m}, E_{2m} – didžiausia pirminės ir antrinės apvijos elektros jėga EVJ.

Galime išreikšti šias jėgas kompleksinėmis reikšmėmis:

$$\underline{E}_1 = E_1 e^{j\pi/2}; \underline{E}_2 = E_2 e^{j\pi/2}. \quad (4)$$

Efektinės vertės:

$$E_1 = 4,44 f N_1 \Phi_m; E_2 = 4,44 f N_2 \Phi_m, \quad (5)$$

čia f – dažnis (Hz).

Belaidės energijos perdavimo transformacijos koeficientas yra santykis tarp didesnės ir mažesnės elektros jėgos. Pavyzdžiui, žeminimo $E_1 > E_2$; jo transformacijos koeficientas:

$$K = E_1 / E_2 = N_1 / N_2. [7] \quad (6)$$

1.10. Apibendrinimas

Išnagrinėjus mokslinę literatūrą apie belaidžio krovimo sistemas ir įvairių ričių parametrų daromą įtaką, galima padaryti kelias išvadas. Tikslus ričių išdėstymas ir atstumas tarp jų yra pagrindinės

problemos, kurios sukelia energijos perdavimo nuostolius ir daro didelę įtaką ryšio koeficientui. Medžiagos, iš kurių pagamintos apvijos, kaip ir atstumai tarp jų, jų forma, skaičius ir t. t., taip pat atsiliepiama svarbiems parametrams. Siekiant aukščiausių rezultatų, reikia tobulai suderinti pirminę ir antrinę rites, kad jų ryšio koeficientas būtų kuo didesnis. Ryšio koeficientas ne tik atspindi gerą ryšį tarp ričių, bet yra vienas iš pagrindinių faktorių lemiančių aukštą energijos perdavimo efektyvumą. Šiame darbe naudojant „Ansys Maxwell“ programinę įrangą bus projektuojamos skirtingų parametru ritys ir stebima šių parametru daroma įtaka ryšio koeficientui.

2. Ritės parametrų ir ritės padėties įtaka belaidės energijos perdavimo sistemos veikimui

2.1. Magnetinio rezonanso sistema

Šioje dalyje bus nagrinėjama įkrovimo sistemos elektromagnetinė dalis ir aprašoma sistemos, paremtos rezonansinio dažnio veikimo principu, grandinės dalis. Ampero ir Faradėjaus dėsniai apibrėžia belaidžio energijos perdavimo veikimo principą. Pagal Ampero dėsnį, elektros srovei tekant per laidininką esantį erdvėje, susiformuoja magnetinis srautas. Ryšį, kuris susidaro, tarp magnetinio lauko B_T , ir pirmine rite tekančios srovės I_1 , nurodo formulė (7). Žemiau pateiktoje formulėje N_1 yra pirminės ritės apvijų kiekis, o Δl - laidininko ilgis.

$$\sum B_T \Delta l = \mu_0 I_1 N_1. \quad (7)$$

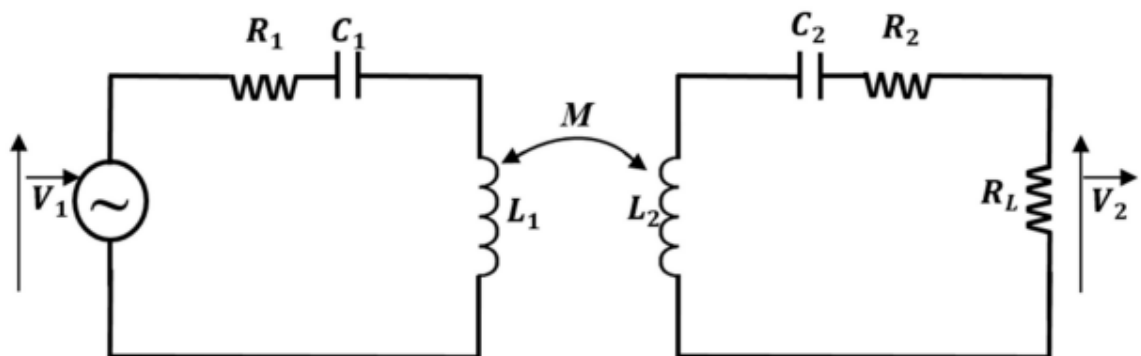
Faradėjaus dėsnis tvirtina: jei laike kintantis magnetinis laukas kerta laidininką, jame yra sužadinama įtampa. Formulėje (8) yra parodomas sąryšis tarp įtampos e ir magnetinio srauto pokyčio greičio $\dot{\phi}_B$, kai N_2 nurodo pirminės ritės apvijų kiekį.

$$e = -N_2 \frac{d\phi_B}{dt}. \quad (8)$$

Belaidis energijos perdavimas vyksta tarp dviejų ričių, kurios yra atskirtos, viena nuo kitos, oro tarpu. Žemėje esanti pirminė ritė yra sužadinama kintamos srovės pagalba, kurios dažnis yra labai aukštas. Todėl, laikui bėgant, pagal Ampero dėsnį, yra sukuriamas kintamas magnetinis laukas. Elektromobilio dugne įmontuotoje antrinėje ritėje, sukurtas kintantis magnetinis laukas, sužadina elektros srovę. Dar vienas svarbus faktorius užimantis labai svarbią vietą, kalbant apie sistemos efektyvumą, yra ryšio koeficientas. Jį galima išreikšti naudojant formulę esančią žemiau (9):

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}. \quad (9)$$

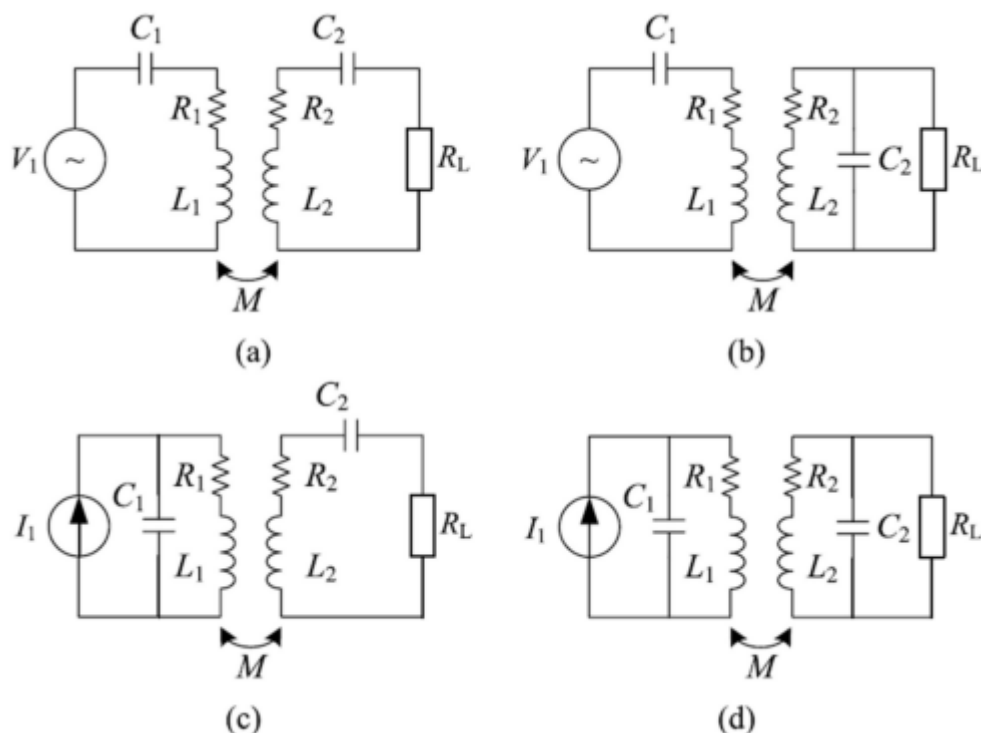
Žemiau esančioje iliustracijoje (žr. 15 pav.) yra pavaizduojama magnetinio rezonanso grandinė. Tai yra supaprastinta sistemos dalis naudojama elektrinėse transporto priemonėse. Kairėje pusėje esantys komponentai atitinka induktyvumą, varžą ir kondensatorių lygiai, taip pat kaip ir dešinėje pusėje. Na, M yra tarp ričių esantis abipusis induktyvumas, o varža R_L atitinka apkrovą arba bateriją.



15 pav. Magnetinio rezonanso grandinė.

Tam, kad antrinė ritė būtų sužadinama, reikia, kad sukurtas magnetinis laukas būtų pakankamai stiprus. Jei tai padaryti nepavyksta, galima daryti išvadą, kad magnetinis laukas yra per silpnas, ir srovė antrinėje ritėje yra labai maža. Be to, atstumas skiriantis ritės yra priežastis, kodėl sklaidos induktyvumas ir apvijų varža gali būti padidėjusi. Dėl to, kompensacinis kontūras yra naudojamas tiek pirminėje, tiek antrinėje pusėse.

Populiariausios kompensacinio kontūro topologijos yra keturios: lygiagretus - lygiagretus (PP), nuoseklus - nuoseklus (SS), nuoseklus - lygiagretus (SP) ir lygiagretus - nuoseklus (PS), jos parodytos žemiau esančiame (žr. 16 pav.) paveiksle. Be to, dar galima sutikti LCL ir LCC topologijas.[22]



16 pav. Kompensavimo topologijų pavyzdžiai: a) SS. b) SP. c) PS. d) PP

Besikeičiantis ryšio koeficientas nedaro įtakos SS topologijoje pirminėje pusėje esančiai talpai, ir ji tokia vienintelė. Kintant apkrovoms ši topologija yra viena iš geriausių, nes esant mažam abipusiam induktyvumui galima išgauti aukštą naudingumo koeficientą, kuris išlieka gana stabilus. Pagal žemiau nurodytas (10, 11) formules galima apskaičiuoti SS kompensavimo technologijos kondensatorių talpas:

$$C_1 = \frac{1}{\omega^2 L_1}. \quad (10)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega^2 L_2}. \quad (11)$$

Pirminės ir antrinės dalių įtampas lygtis gali būti aprašyta taip:

$$V_1 = Z_{T1} I_1 - j\omega M I_2. \quad (12)$$

$$j\omega MI_1 = Z_{T2}I_2, \quad (13)$$

kur Z_{T1} ir Z_{T2} yra pirminės ir antrinės ritės impedansai, kurie gali būti aprašyti taip:

$$Z_{T1} = \frac{1}{j\omega C_1} + R_1 + j\omega L_1. \quad (14)$$

$$Z_{T2} = \frac{1}{j\omega C_2} + R_2 + R_L + j\omega L_2. \quad (15)$$

Galiausiai išgavus rezonansinį dažnį įtampa V_1 ir srovė I_2 (10) – (12), susidariusi antrinėje pusėje, gali būti apibūdinama taip:

$$V_1 = R_1 I_1 - j\omega M I_2. \quad (16)$$

$$I_2 = \frac{j\omega M}{R_2 + R_L} \times I_1. \quad (17)$$

P_{in} yra galia gaunama pirminėje pusėje ir gaunama iš srovės šaltinio. Galia esanti antrinėje pusėje yra P_{out} , o jos aprašomos taip:

$$P_{in} = V_1 I_1 = \frac{R_1 \times (R_2 + R_L) + (\omega M)^2}{R_2 + R_L} \times I_1^2. \quad (18)$$

$$P_{out} = R_L I_2^2 = R_L \times \frac{\omega^2 M^2 I_1^2}{(R_2 + R_L)^2}. \quad (19)$$

Tada naudingumo koeficientas η yra:

$$\eta \approx \frac{1}{1 + \frac{R_1 R_L}{(\omega M)^2}}. \quad (20)$$

Rezonansinio dažnio užtikrinimas taip kaip ir aukštos abipusio induktyvumo vertės yra labai svarbūs kriterijai siekiant užtikrinti aukštą sistemos naudingumą.

Kad būtų išgautas sistemos veikimo maksimumas belaidė energijos perdavimo sistema turi būti optimizuota: atstumas tarp ričių, nukrypimas x ir y ašių atžvilgiu, apvijų skaičius, ričių diametras, jų topologijos ir t.t. Todėl šio tiriamojo darbo tikslas yra atlikti tyrimą ir įsitikinti kas labiausiai įtakoja ryšio koeficientą.

Visiems tyrimams atlikti buvo naudojama „Ansys Electronics Desktop“ programinė įranga.

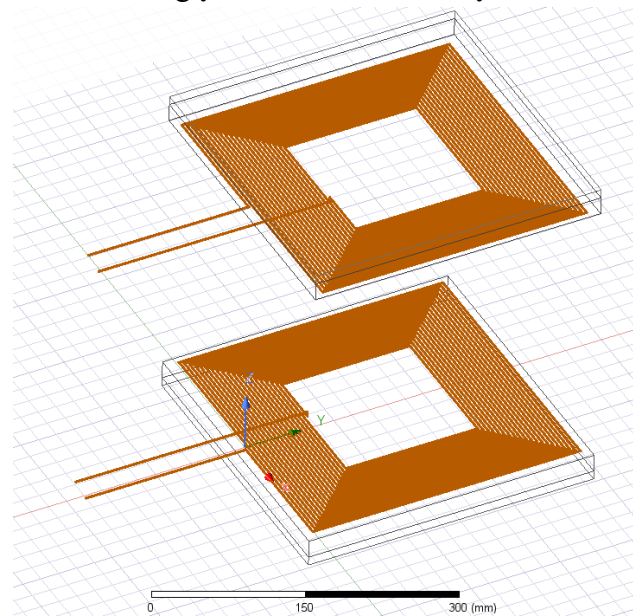
2 lentelė. Naudojamo stačiakampio modelio parametrai

Ritės medžiaga	Laidininko spindulys	Spiralės pradžios spindulys	Spindulio pokytis	Apvijų skaičius	Iškilimas
varis	1 mm	150 mm	2.05 mm	20	0

2.2. Atstumo tarp ričių įtakos ryšio koeficientui tyrimas

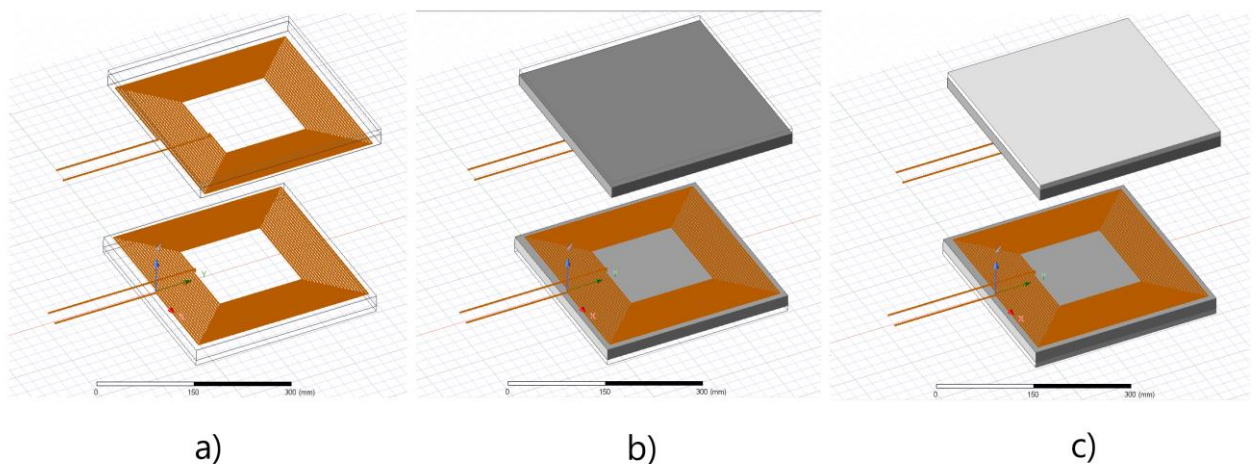
Šiame skyriuje bus tiriamas, atstumo tarp ričių poveikis, ryšio koeficientui.

Buvo suprojektuotos stačiakampės ritės (žr. 17 pav.). Šis tyrimas yra atliekamas todėl, nes atstumas tarp ričių kinta priklausomai nuo skirtingų automobilio modelių.



17 pav. Suprojektuotos stačiakampės ritės.

Atstumas tarp ričių yra fiksuojamas nuo pirminės ritės viršutinio taško iki antrinės ritės paviršiaus. Būtent šią sistemą buvo pasirinkta suprojektuoti su tokiomis pačiomis stačiakampės formos ritėmis. Paveiksle (žr. 18 pav.) pavaizduoti trys variantai. Juodos spalvos medžiaga yra feritas, kuris yra dedamas po rite, esančia apačioje, ir virš ritės esančios aukščiau (žr. 18 pav. b). Baltos spalvos medžiaga yra aliuminis, kuris yra tvirtinamas tokia pačia seka prie sistemos su feritu (žr. 18 pav. c). Taip yra daroma visuose tyrimuose, kur buvo tiriama pridėtinių medžiagų įtaka be laidei energijos perdavimo sistemai.



a)

b)

c)

18 pav. Suprojektuotų ričių modeliai: (a) be pridėtinių medžiagų modelis, (b) į sistemą įtrauktas feritas, (c) į sistemą įtrauktas feritas ir aliuminis.

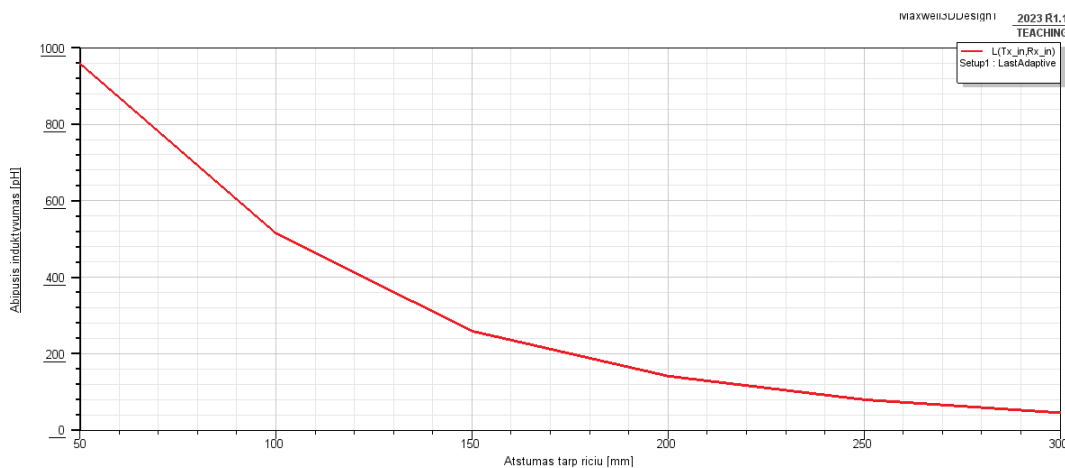
Tyrimo metu gauti rezultatai, atstumui tarp ričių kintant nuo 50 mm iki 300 mm, yra matomi lentelėje (žr. 3 lentelę) ir paveiksle (žr. 19 pav.).

Iš gautų rezultatų yra matoma, kad ryšio koeficientas sparčiai mažėja, didėjant atstumui tarp ričių. Tokia pati tendencija yra pastebima ir su abipusiu induktyvumu. Taigi, didėjant atstumui sparčiai didėja ir energijos perdavimo nuostoliai.

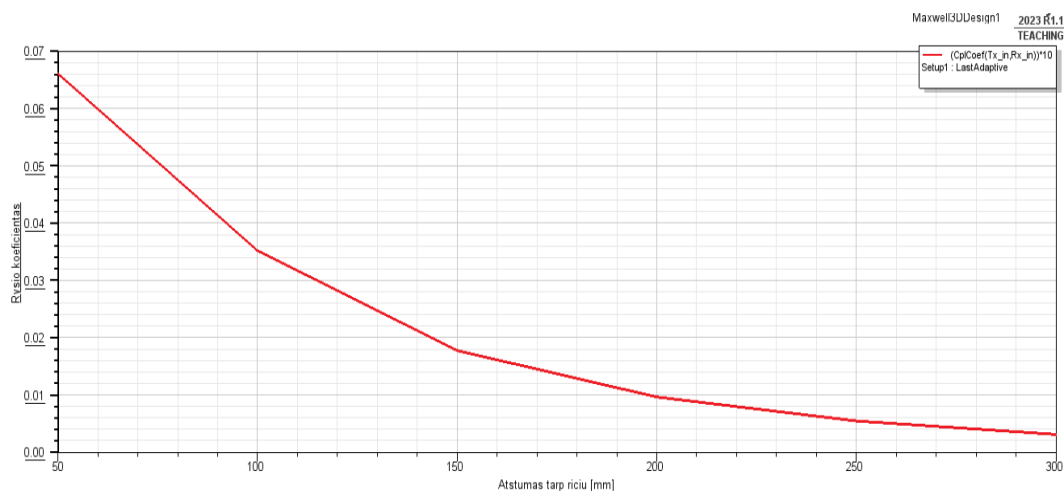
Šių sistemų patiriami nuostoliai kol kas neleidžia jų taip plačiai naudoti. Norint pagerinti rezultatus, į sistemą dažniausiai yra įterpiamas feritas ir kitos, magnetinį lauką geriau nukreipti padedančios, nelaidžios magnetinės medžiagos.

3 lentelė. Stačiakampės ritės be pridėtinių medžiagų skaičiavimo rezultatai.

Atstumas tarp ričių (mm)	Ryšio koeficientas	Abipusis induktyvumas (pH)
50	0,066159	959,833065
100	0,035278	516.132895
150	0,017856	260,423569
200	0,009758	142,853107
250	0,005589	81,441849
300	0,003235	47,154104



b)



a)

19 pav. (a) ryšio koeficiento priklausomybė nuo tarpo tarp ričių, (b) abipusio induktyvumo priklausomybė nuo atstumo tarp ričių.

2.3. Pridėtinių medžiagų įtaka ryšio koeficientui

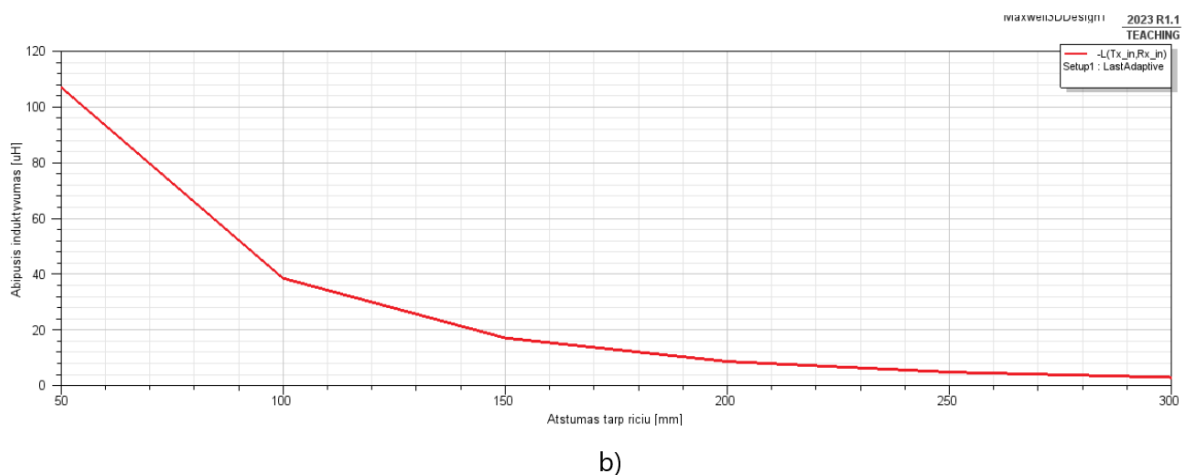
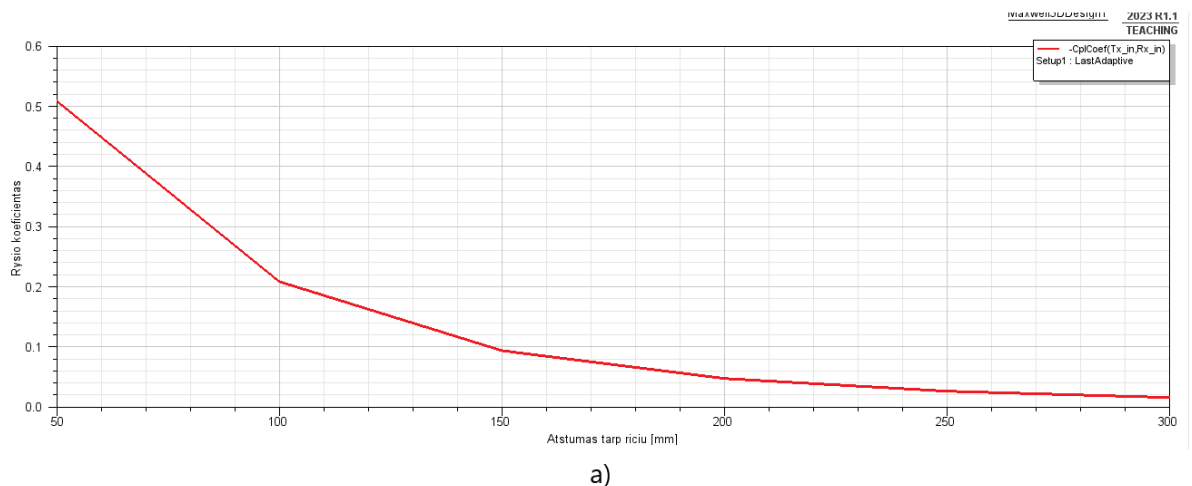
Norint pagerinti ryšio koeficientą ir kitus parametrus, dažniausiai į sistemą yra pridedamos nelaidžios magnetinės medžiagos. Dar viena priežastis, kodėl tai daroma yra ta, kad nuostoliai sumažėtų, o magnetinis laukas būtų labiau koncentruotas iš pirminės ritės į antrinę. Tai padaryti galima naudojant feritą [23]. Tyrimas yra pakartojamas su tos pačios formos ritėmis, tik į sistemą yra pridedamos ferito plokštelės. Paveiksle (žr. 18 pav. b) pavaizduota naudojama ritė su ferito plokštelėmis, kai atstumas tarp ričių yra 100 mm.

Lentelėje (žr. 4 lentelę) ir paveiksle (žr. 20 pav.) pavaizduoti tyrimo metu gauti rezultatai.

Pastebėta, kad kaip ir pirmojo tyrimo metu, reikšmės mažėja didėjant atstumui tarp ričių. Tačiau visi gauti rezultatai buvo ženkliai didesni nei pirmojo tyrimo metu. Šiems rezultatams didelės įtakos turėjo ferito panaudojimas sistemoje.

4 lentelė. Ričių modelio su feritu rezultatai.

Atstumas tarp ričių (mm)	Ryšio koeficientas	Abipusis induktyvumas (uH)
50	0,508967	107,023667
100	0,209223	38,574744
150	0,094766	17,208405
200	0,048512	8,778405
250	0,027485	4,975099
300	0,016966	3,084283



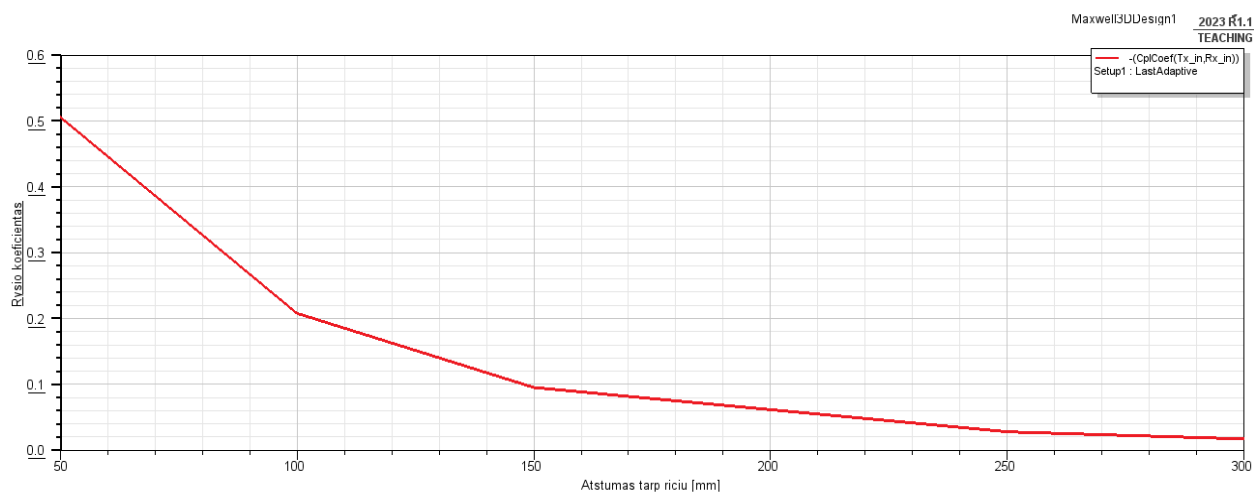
20 pav. modelis su feritu: (a) ryšio koeficiento priklausomybė nuo atstumo tarp ričių, (b) abipusio induktyvumo priklausomybė nuo atstumo tarp ričių.

Feritas gali padėti sumažinti žalingą poveikį žmogaus sveikatai. Nepaisant to, šios priemonės gali nepakakti geram ekranavimui užtikrinti, todėl prie ferito yra pridamas ir aliuminis. Paveiksle (žr. 18 pav. c) yra parodyta tyrime naudojamos ritės su feritu ir aliuminiu kombinacija. Rezultatai, gauti tyrimo metu, yra atvaizduoti lentelėje (žr. 5 lentelę) ir (žr. 21 pav.) paveiksle.

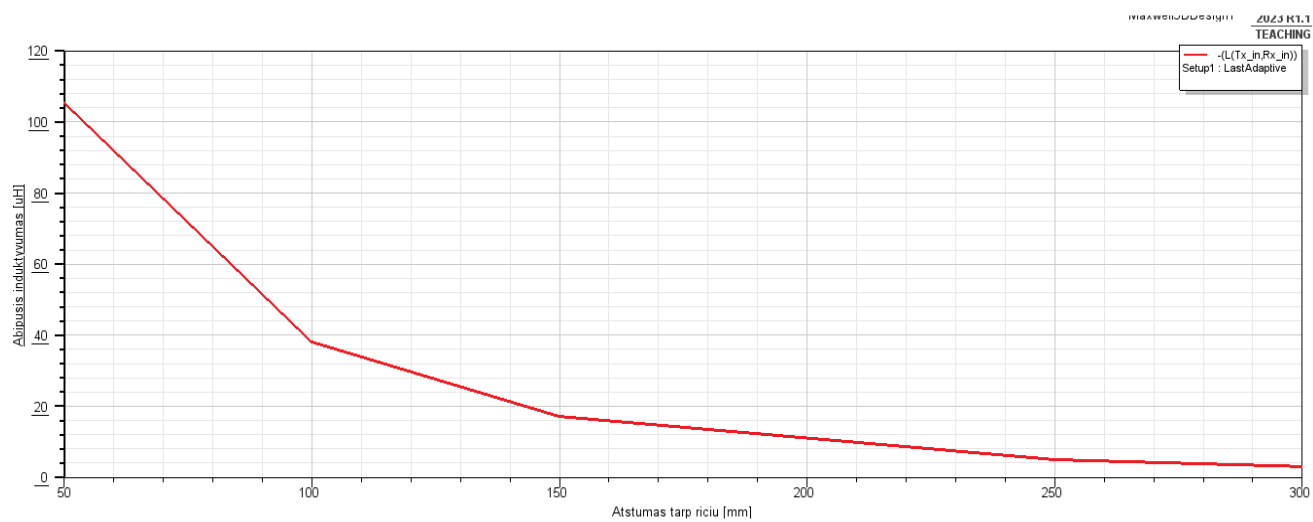
5 lentelė. Ričių modelio su feritu ir aliuminiu rezultatai.

Atstumas tarp ričių (mm)	Ryšio koeficientas	Abipusis induktyvumas (uH)
50	0,515132	108,720618
100	0,215213	39,794847
150	0,099558	18,068193
200	0,051781	9,366479

250	0,029853	5,395269
300	0,018652	3,369854



a)



b)

21 pav. modelis su feritu ir aliuminiu: (a) ryšio koeficiento priklausomybė nuo atstumo tarp rėčių, (b) abipusio induktyvumo priklausomybė nuo atstumo tarp rėčių.

Aukščiausi rezultatai gauti iš sistemos su feritu ir aliuminiu, nes nelaidžios magnetinės medžiagos padeda geriau ekranuoti ir nukreipti magnetinį lauką link antrinės ritės, taip pagerinant visus parametrus.

Taigi, šių medžiagų pridėjimas į sistemą yra neatsiejamas, norint užtikrinti geresnį veikimą ir ICNIRP reikalavimų atitikimą.

2.4. Ritės vidinio diametro įtakos ryšio koeficientui tyrimas

Šio tyrimo metu buvo keičiami vidiniai ričių spinduliai nuo 10 iki 40 mm. Priešingos ritės, kurios parametrai yra nekeičiami, jos spindulys yra paliekamas pastovus $R = 20$ mm. Paveiksle (žr. 22 pav.) yra pateikiamas pavyzdys. Be to, reiktų paminėti, kad ričių apvijų skaičius taip pat yra paliekamas pastovus = 20 apvijų. Antrinės pusės analizės variacija atlikta esant 100 mm atstumui tarp ričių, o rezultatai pateikiami lentelėse (žr. 6 lentelę) ir (žr. 23 pav.) bei (žr. 24 pav.) paveiksluose.

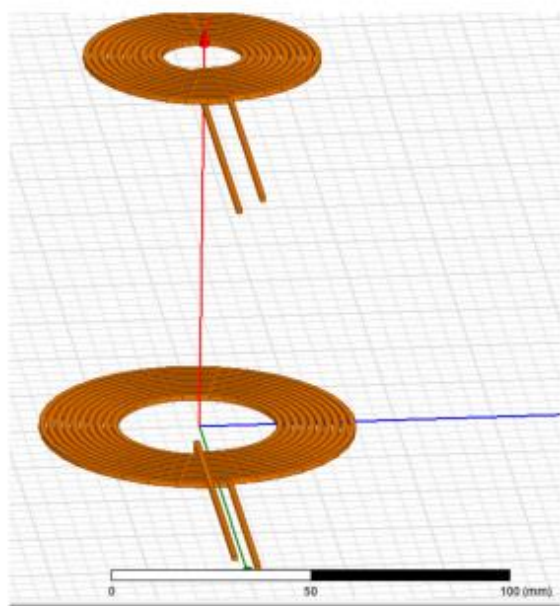
Paveiksle (žr. 25 pav.) parodytas antrasis analizės atvejis. Pirminės pusės analizė atlikta esant 100 mm atstumui tarp ričių, o rezultatai pateikiami (žr. 7 lentelę) ir (žr. 26 pav.) bei (žr. 27 pav.) paveiksluose.

6 lentelė. Rezultatai keičiant antrinės ritės parametrus.

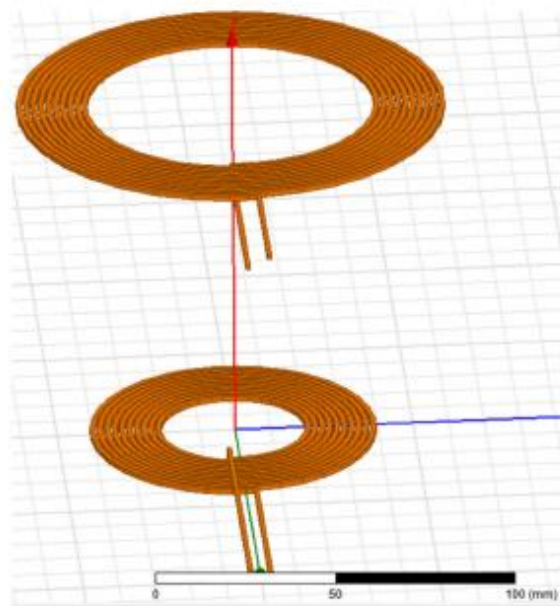
R_{RX} (mm)	10	15	20	25	30	35	40
Ryšio koeficientas	0,005712	0,007162	0,008413	0,009586	0,010464	0,011187	0,011685
Abipusis induktyvumas (nH)	30,424291	44,193951	59,199181	74,752331	89,813511	103,64981	115,51351
L₁ (μH)	7,308523	7,308523	7,308523	7,308523	7,308523	7,308523	7,308523
L₂(μH)	4,036472	5,617567	7,298442	8,276254	10,844591	11,25198	14,37702

7 lentelė. Rezultatai keičiant pirminės ritės parametrus.

R_{TX} (mm)	10	15	20	25	30	35	40
Ryšio koeficientas	0,005712	0,007096	0,008413	0,009606	0,010628	0,011419	0,011991
Abipusis induktyvumas (nH)	30,39109	44,18763	59,19919	74,67752	89,77744	103,5062	115,4118
L₁ (μH)	4,036472	5,307869	7,298442	8,276254	10,844591	11,25198	14,37702
L₂(μH)	7,308523	7,308453	7,298442	7,303526	7,305498	7,305498	7,307155

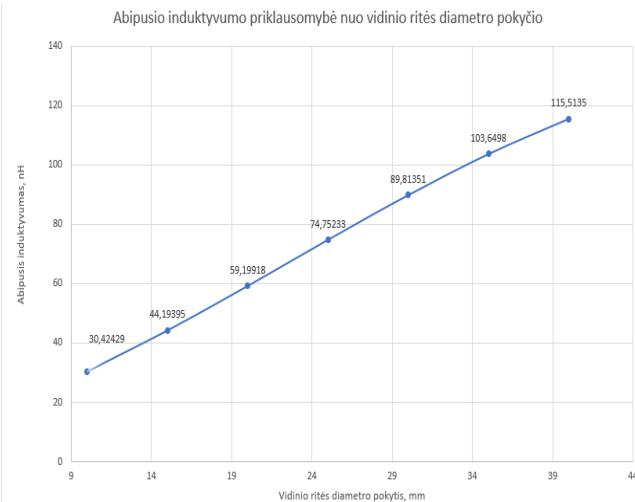
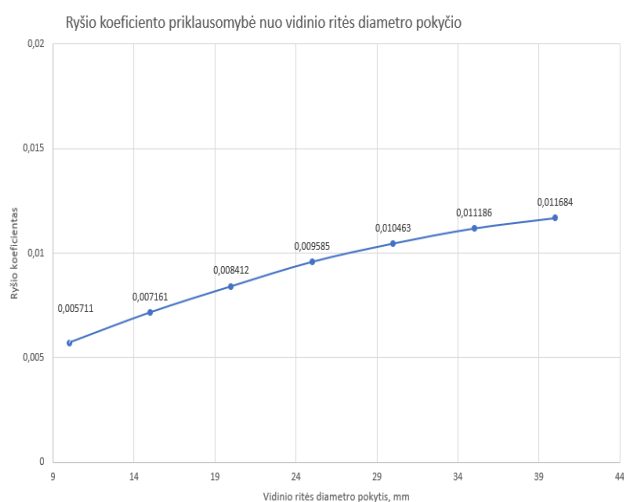


(a)

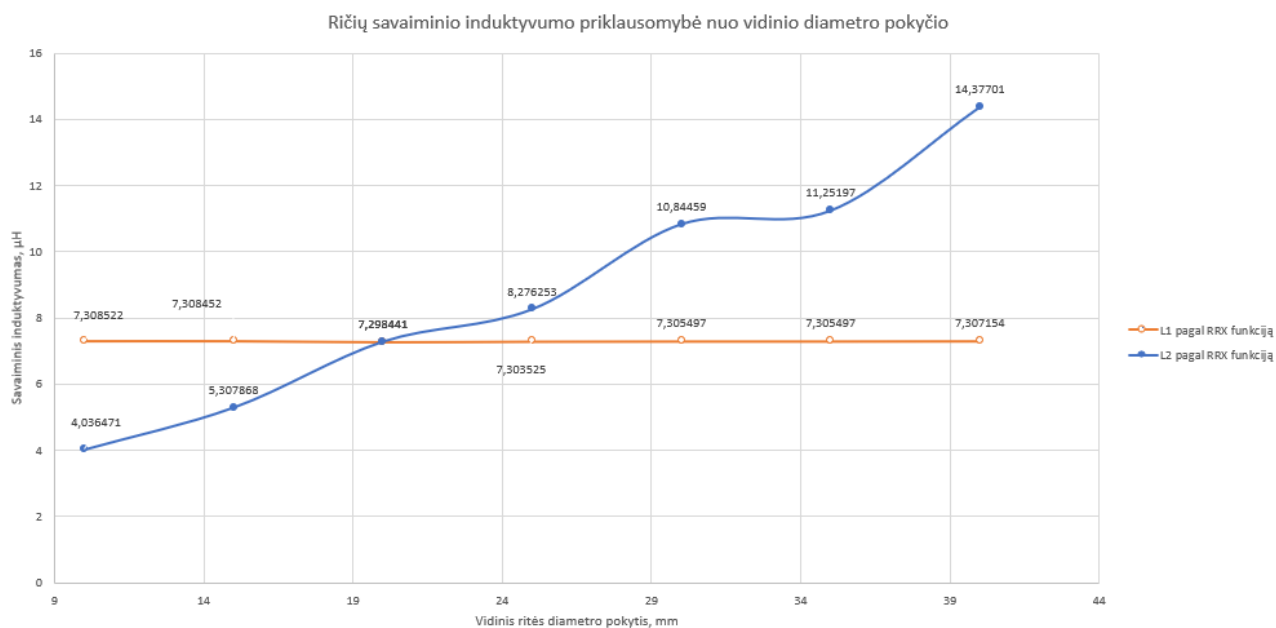


(b)

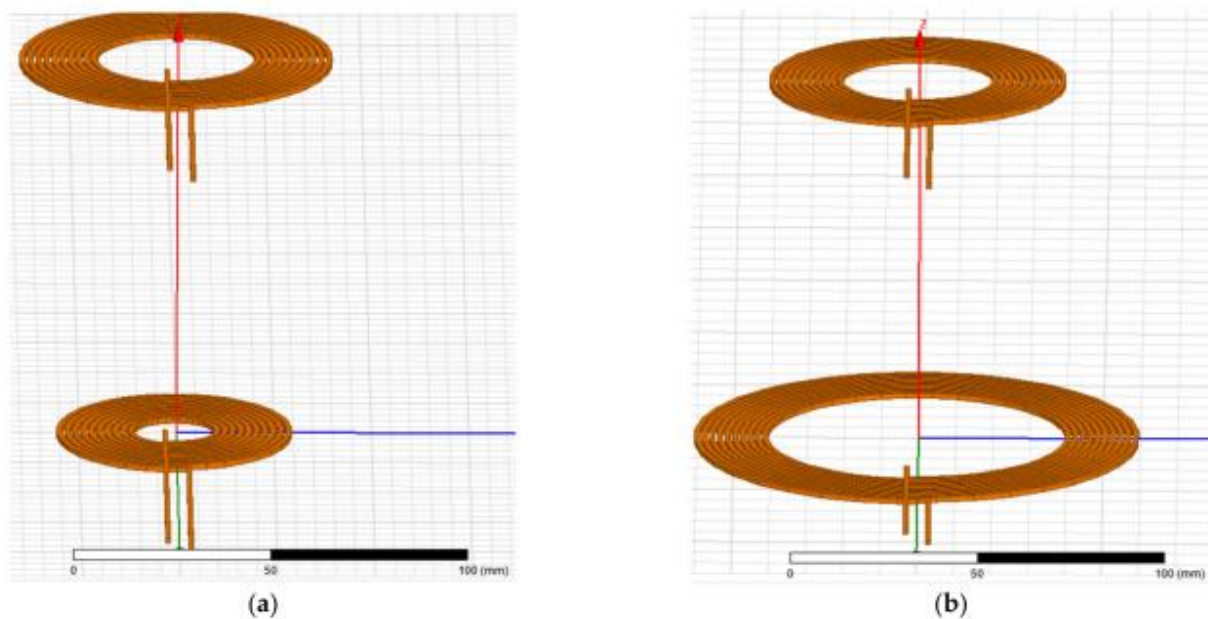
22 pav. Ričių modeliai su pastoviu pirminės ritės vidiniu spinduliu: (a) antrinės ritės spindulys 10 mm, (b) Antrinės ritės spindulys 40 mm, atstumui tarp ričių esant 100 mm



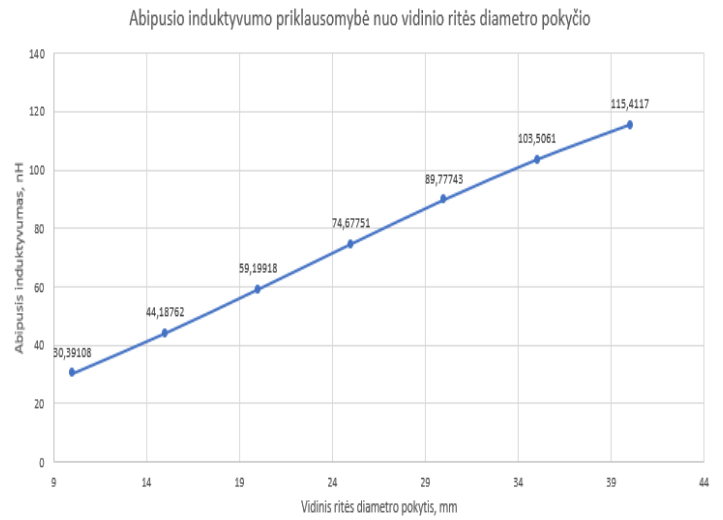
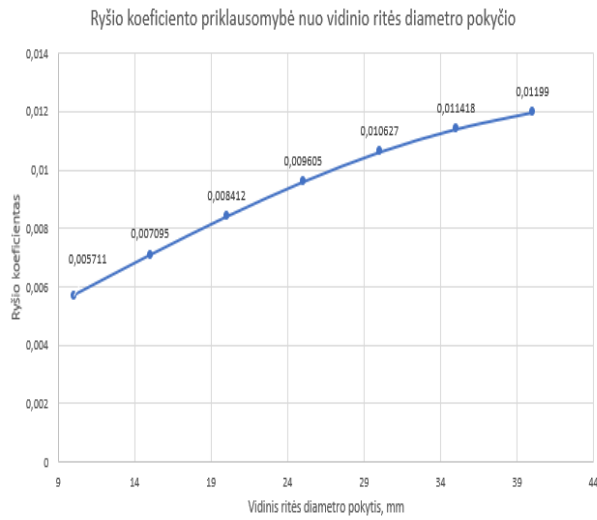
23 pav. Variacijos, su kintančiu antrinės ritės spinduliu, rezultatai: ryšio koeficiento ir abipusio induktyvumo priklausomybė nuo vidinio ritės diametro pokyčio.



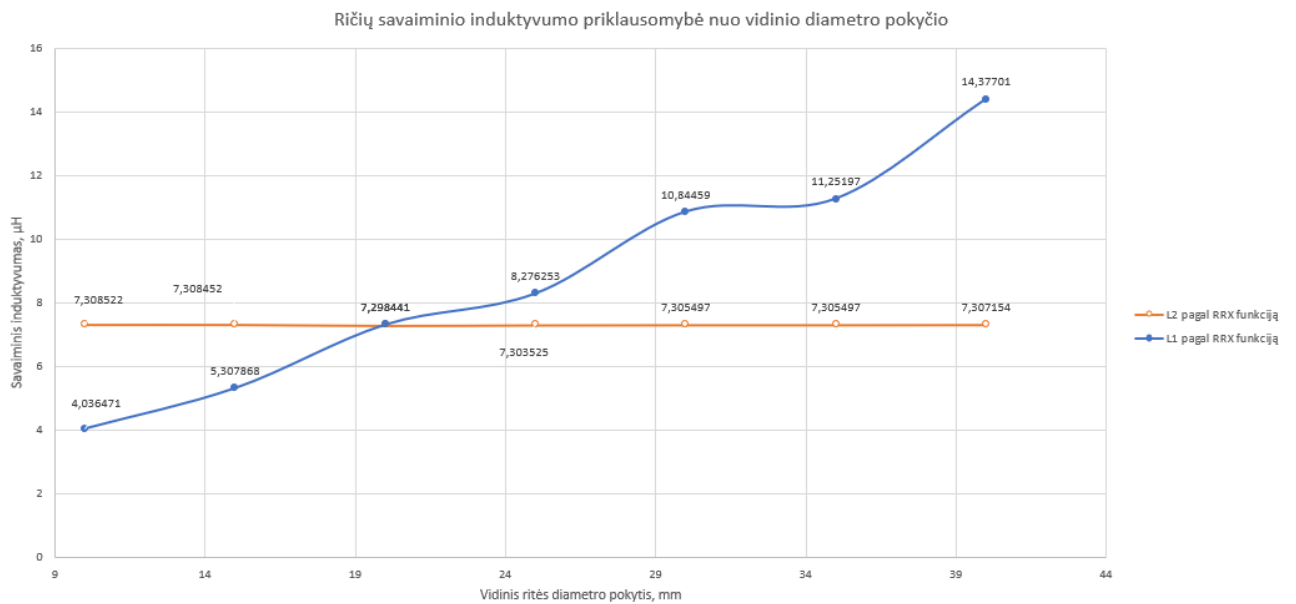
24 pav. Variacijos, su kintančiu antrinės ritės spinduliu, rezultatai: pirminės ir antrinės ričių savaiminio induktyvumo priklausomybė nuo vidinio ritės diametro pokyčio.



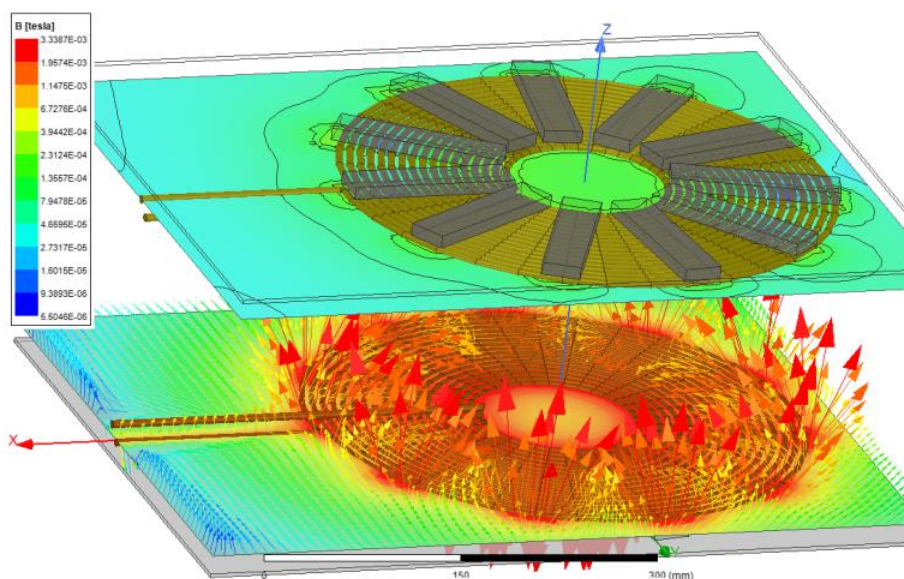
25 pav. Ričių modeliai su pastviu antrinės ritės vidiniu spinduliu: (a) pirminės ritės spindulys 10 mm, (b) Pirminės ritės spindulys 40 mm, atstumui tarp ričių esant 100 mm



26 pav. Variacijos, su kintančiu pirminės ritės spinduliu, rezultatai: ryšio koeficiento ir abipusio induktyvumo priklausomybė nuo vidinio ritės diametro pokyčio.



27 pav. Variacijos, su kintančiu pirminės ritės spinduliu, rezultatai: pirminės ir antrinės ričių savaiminio induktyvumo priklausomybė nuo vidinio ritės diametro pokyčio.



28 pav. Magnetinio lauko ir srauto pasiskirstymas

Pagal tyrimo rezultatus daroma išvada, kad didėjantis ritės spindulys pagerina ryšio koeficientą, tokia pati tendencija, tai yra rezultatų pagerėjimas, pastebimas ir abipusiam induktyvumui. Tačiau tai nereiškia, kad galime didinti ritės diametrą neribojamai. Dažniausiai antrinės ritės vieta automobilio dugne yra ribota ir jos dydis negali būti didinamas be pabaigos, bet jei vieta yra didesnė, vidinis spindulys, tokiu atveju, turi būti didinamas kiek įmanoma, kad būtų išnaudota visa galima erdvė. Nepaisant to, reikia atkreipti dėmesį į tam skirtus reikalavimus ir kainą, kas taip pat apriboja ričių diametro didinimo idėją.

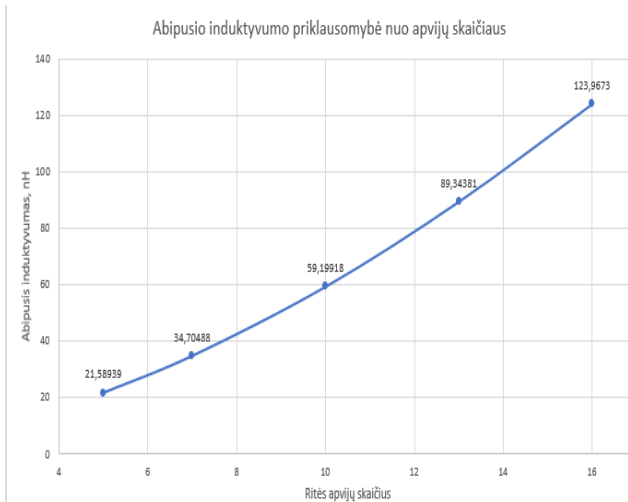
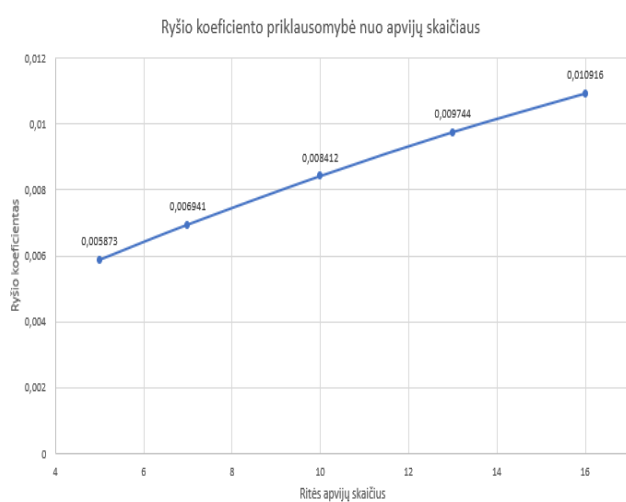
2.5. Apvijų kiekio daroma įtaka ryšio koeficientui

Atliekant šį tyrimą buvo keičiamas apvijų kiekis nuo 5 iki 16, paliekant priešingos ritės apvijų skaičių pastovų. Ričių spinduliai buvo nekeičiami ir paliekami pastovūs $R = 20$ mm. Tyrimo rezultatai, esant 100 mm atstumui tarp ričių, pateikiami žemiau esančioje lentelėje (žr. 8 lentelę) ir (žr. 29 pav.) bei (žr. 30 pav.) paveiksluose.

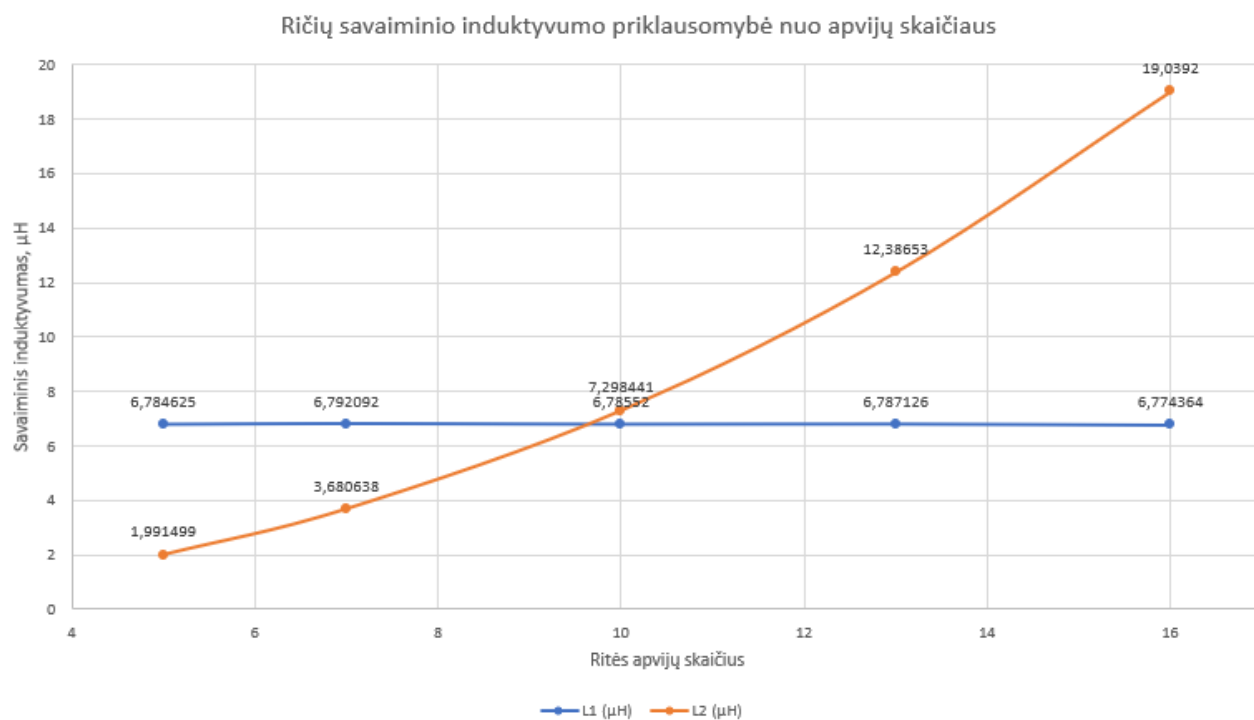
8 lentelė. Antrinės ritės apvijų pokyčio rezultatai.

Antrinės ritės apvijų skaičius	5	7	10	13	16
Ryšio koeficientas	0,005874	0,006942	0,008413	0,009745	0,010917
Abipusis induktyvumas	21,589391	34,704881	59,199181	89,343811	123,96731

(nH)					
L_1 (μH)	6,784626	6,792093	6,785521	6,787127	6,774365
L_2 (μH)	1,991499	3,680639	7,298442	12,386531	19,039201



29 pav. Antrinės ritės apvijų pokyčio rezultatai: ryšio koeficiento priklausomybė nuo apvijų pokyčio antrinėje ritėje, abipusio induktyvumo priklausomybė nuo apvijų pokyčio antrinėje ritėje.

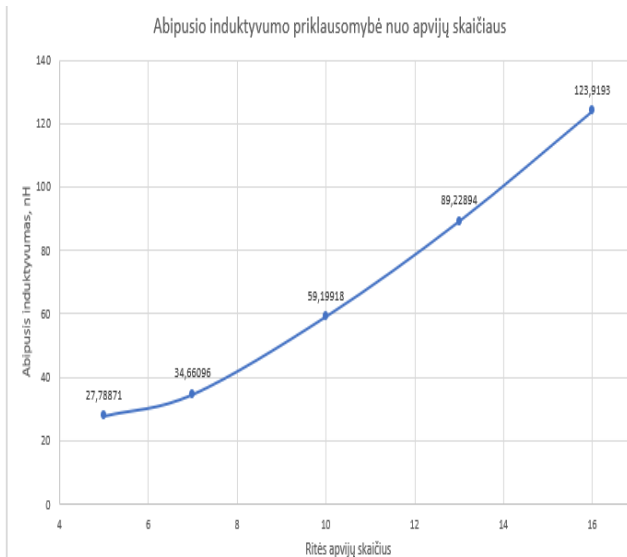
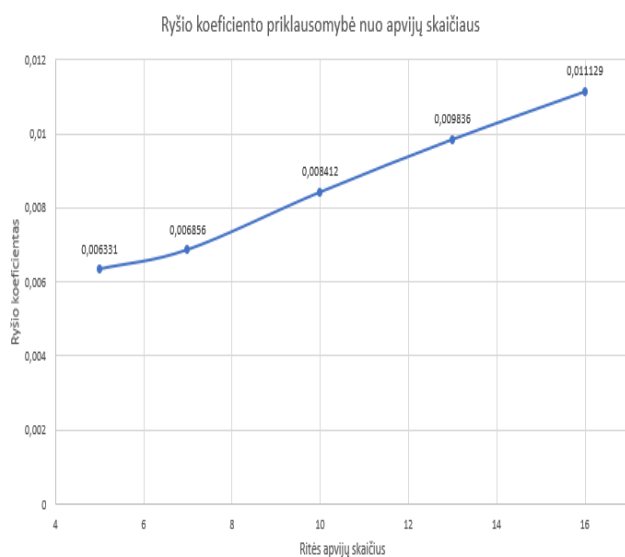


30 pav. Antrinės ritės apvijų pokyčio rezultatai: savaiminių ričių induktyvumų priklausomybė nuo antrinės ritės apvijų pokyčio.

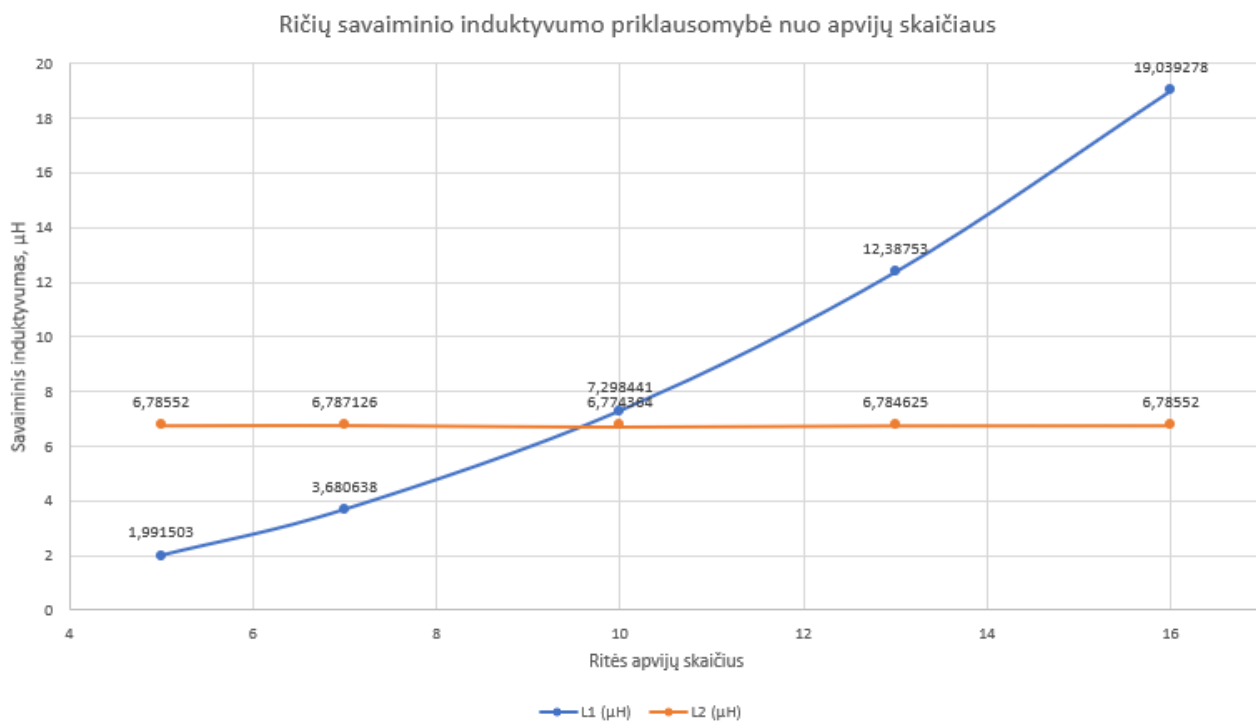
Toks pat tyrimas yra atliekamas ir pirminei ritei. Eksperimento rezultatai esant 100 mm atstumui tarp ričių pateikiami lentelėje (žr. 9 lentelę) ir (žr. 31 pav.) bei (žr. 32 pav.) paveiksluose.

9 lentelė. Pirminės ritės apvijų pokyčio rezultatai.

Pirminės ritės apvijų skaičius	5	7	10	13	16
Ryšio koeficientas	0,006332	0,006857	0,008413	0,009837	0,011129
Abipusis induktyvumas (nH)	27,788711	34,660961	59,199181	89,228941	123,91931
L1 (μH)	1,991504	3,680639	7,298442	12,387531	19,039279
L2 (μH)	6,785521	6,787127	6,774365	6,784626	6,785521



31 pav. Pirminės ritės apvijų pokyčio rezultatai: ryšio koeficiento priklausomybė nuo apvijų pokyčio pirminėje ritėje, abipusio induktyvumo priklausomybė nuo apvijų pokyčio pirminėje ritėje.

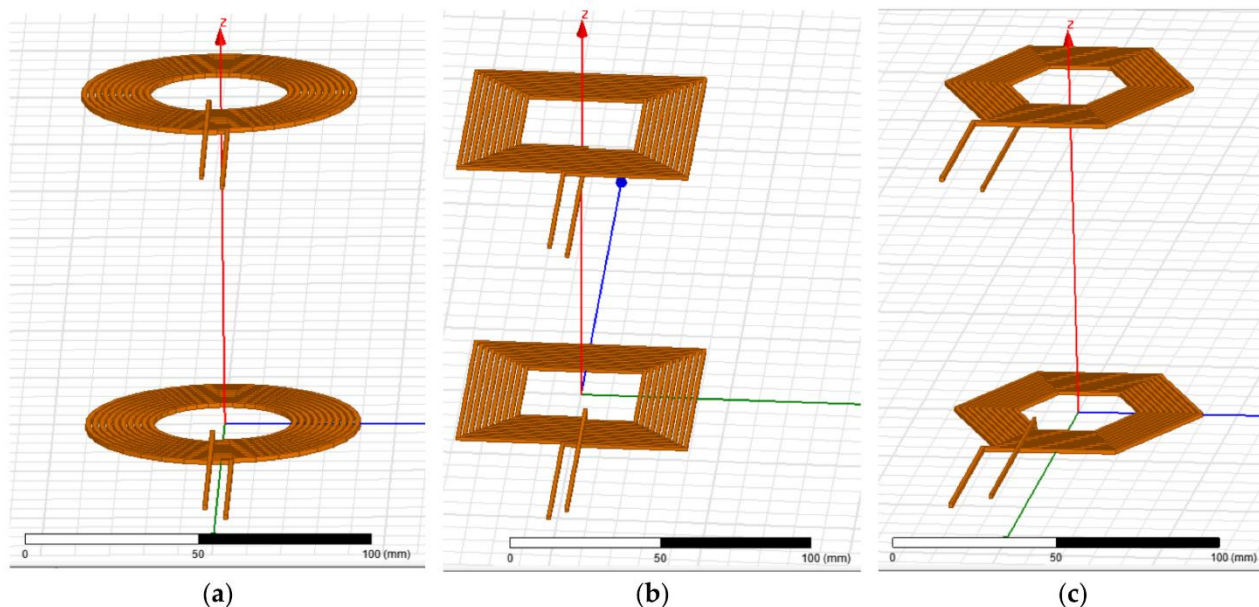


32 pav. Pirminės ritės apvijų pokyčio rezultatai: savaiminių ričių induktyvumų priklausomybė nuo pirminės ritės apvijų pokyčio.

Taigi, apvijų skaičiaus padidėjimas, taip pat pagerina ryšio koeficiento reikšmes bei kitus parametrus. Todėl norint pagerinti naudingumo koeficientą reiktų atkreipti dėmesį į apvijų kiekį ričių sistemoje.

2.6. Skirtingų topologijų palyginimas

Šio tyrimo esmė yra išsiaiškinti, kuri ritės forma yra geriausia belaidžiam energijos perdavimui. Pateikti trijų ričių topologijų deriniai (žr. 33 pav.). Šis tyrimas yra atliekamas, keičiant atstumą tarp ričių nuo 50 mm iki 300 mm ir, didinant atstumą kas 50 mm.



33 pav. Ričių topologijos: a) apvali b) stačiakampė c) šešiakampė ritės

Kad rezultatus būtų galima vėliau palyginti, visos ritės buvo suprojektuotos su vienodais parametrais. Suprojektuotų skirtingų topologijų ričių parametrai pateikti lentelėje (žr. 10 lentelę).

10 lentelė. Ričių parametrai.

Vidinis skersmuo	Išorinis skersmuo	Apvių skaičius	Atstumas tarp gretimų apvių	Dažnis	Pradinė srovė
40 mm	80 mm	10	0,7 mm	85 kHz	20 A

Šiems tyrimams buvo naudojamas 85 kHz dažnis, išlaikant ritės dydžius pastovius. Skaičiavimai buvo atliekami trimis atvejais: be pridėtinių nelaidžių magnetinių medžiagų, su feritu, su feritu ir aliuminiu – skaičiavimų rezultatai pateikti (žr. 11 ir 12 lenteles).

Toliau pateiktose lentelėse naudojami parametrai apibrėžiami taip:

- k_a yra apskritos ritės ryšio koeficientas;
- k_s stačiakampės ritės ryšio koeficientas;
- $k_š$ šešiakampės ritės ryšio koeficientas;
- M_a apvalios ritės abipusis induktyvumas
- M_s stačiakampės ritės abipusis induktyvumas
- $M_š$ šešiakampės ritės abipusis induktyvumas;
- L_{1a} pirminės apskritos ritės savaiminis induktyvumas;
- L_{1s} pirminės stačiakampės ritės savaiminis induktyvumas;
- $L_{1š}$ pirminės šešiakampės ritės savaiminis induktyvumas;
- L_{2a} apvalios antrinės ritės savaiminis induktyvumas;
- L_{2s} stačiakampės antrinės ritės savaiminis induktyvumas;
- $L_{2š}$ šešiakampės antrinės ritės savaiminis induktyvumas;

11 lentelė. Skirtingų topologijų ryšio koeficiento ir abipusio induktyvumo skaičiavimo rezultatai: be pridėtinių nelaidžių magnetinių medžiagų, su feritu ir feritu - aliuminiu.

Atstumo tarp ričių pokytis (mm)	k_a	M_a (pH)	k_s	M_s (pH)	$k_š$	$M_š$ (pH)
Be pridėtinių medžiagų						
50	0,063452	445,95401	0,068109	556,24342	0,057183	397,82521
100	0,008413	59,199181	0,009554	78,193682	0,007408	51,661351
150	0,001442	10,143701	0,001667	13,567362	0,001266	8,812502
200	0,000281	1,969709	0,000319	2,609368	0,000247	1,712718
250	0,000048	0,0331443	0,000058	0,427079	0,000044	0,290552
300	0,000005	0,017258	0,000006	0,017259	0,000004	0,001514
Su feritu						
Atstumo tarp ričių pokytis (mm)	k_a	M_a (uH)	k_s	M_s (uH)	$k_š$	$M_š$ (uH)
50	0,085574	1,079671	0,100855	1,448543	0,064084	1,072622

100	0,010105	0,127914	0,013165	0,188224	0,006946	0,126606
150	0,001646	0,021098	0,002218	0,031681	0,001098	0,020618
200	0,000311	0,003908	0,000424	0,006058	0,000212	0,003884
250	0,000058	0,000812	0,000082	0,001157	0,000046	0,000735
300	0,000008	0,000126	0,000013	0,000168	0,000008	0,000104
Su feritu ir aliuminiu						
Atstumo tarp ričių pokytis (mm)	k_a	M_a (uH)	k_s	M_s (uH)	$k_š$	$M_š$ (uH)
50	0,087543	1,152033	0,101213	1,452433	0,086133	1,084908
100	0,010633	0,1480241	0,013245	0,189908	0,010166	0,127641
150	0,001756	0,0240261	0,002228	0,031973	0,001659	0,020778
200	0,000338	0,004081	0,000426	0,006088	0,000313	0,003921
250	0,000069	0,000931	0,000082	0,001158	0,000058	0,000741
300	0,000012	0,000131	0,000014	0,000178	0,000011	0,000111

12 lentelė. Skirtingų topologijų pirminių ir antrinių ričių savaiminio induktyvumo skaičiavimo rezultatai: be pridėtinių nelaidžių magnetinių medžiagų, su feritų ir feritu - aliuminiu.

Atstumo tarp ričių pokytis (mm)	L_{1a} (uH)	L_{2a} (uH)	L_{1s} (uH)	L_{2s} (uH)	$L_{1š}$ (uH)	$L_{2š}$ (uH)
Be pridėtinių medžiagų						
50	0,064084	0,1779671	0,100855	0,144855	0,085574	0,1072622
100	0,006946	0,280241	0,013165	0,188224	0,010105	0,126606
150	0,001098	0,3840261	0,002218	0,031681	0,001646	0,020618
200	0,000212	0,008738	0,000424	0,006058	0,000311	0,003884
250	0,000046	0,003308	0,000082	0,001158	0,000058	0,000735
300	0,000011	0,000219	0,000014	0,000178	0,000008	0,000111
Su feritu						
50	10,781421	10,777931	14,281621	14,402651	12,492291	12,577111
100	10,869161	10,925571	14,209701	14,387981	12,471551	12,590101
150	10,792141	10,799972	14,204851	14,378431	12,469871	12,589891
200	10,903431	10,917851	14,243581	14,402941	12,455441	12,570841
250	10,785931	10,783921	14,226221	14,216721	12,458241	12,445431
300	10,864261	10,687311	14,189001	12,999271	12,458491	11,797061
Su feritu ir aliuminiu						
50	11,947131	12,088331	14,298381	14,444461	12,562351	12,629551
100	11,950401	12,110931	14,266831	14,412461	12,513561	12,600941
150	11,957581	12,091201	14,256901	14,457541	12,474231	12,633201
200	11,926061	12,117881	14,263891	14,429751	12,515171	12,593911
250	11,941691	11,923481	14,226601	14,227061	12,504321	12,497871
300	11,808271	10,570561	14,300311	13,187761	12,510931	11,860981

Taigi, stačiakampės formos ritės turi geriausias parametrus, pademonstravusi geresnius rezultatus nei likusios dvi ričių topologijos. Reikia paminėti, kad medžiagų (ferito ir aliuminio), padedančių geriau nukreipti magnetinį lauką į antrinę ritę, pridėjimas, ženkliai pagerina visų ričių formų rezultatus. Tačiau stačiakampės ritės rezultatai, vis tiek išlieka pirmaujantys. Nepaisant to, stačiakampės formos ritė pademonstravo geriausia atsparumą ričių nesutapimui išilgai tiek x, tiek y ašių atžvilgiu.

Skirtingų trijų topologijų skirtingų devynių kombinacijų tyrimas

Šio tyrimo metu buvo bandomos visos devynios skirtingos ričių kombinacijos, sudarytos iš trijų skirtingų topologijų, nepridedant jokių papildomų nelaidžių magnetinių medžiagų. Tai buvo daroma todėl, nes skirtingos formos galimos tiek mašinos dugne, tiek ričių esančių ant žemės paviršiaus.

Visų derinių skaičiavimo rezultatai pateikti lentelėse (žr. 13 ir 14 lentelę). Toliau pateiktose lentelėse naudojami parametrai yra apibrėžti taip:

- k_{aa} , k_{as} ir $k_{aš}$ yra ričių ryšio koeficientai;
- M_{aa} , M_{as} ir $M_{aš}$ yra ričių abipusiai induktyvumai;
- k_{sa} , k_{ss} ir $k_{sš}$ yra ričių ryšio koeficientai;
- M_{sa} , M_{ss} ir $M_{sš}$ yra ričių abipusiai induktyvumai;
- $k_{ša}$, $k_{šs}$ ir $k_{šš}$ yra ričių ryšio koeficientai;
- $M_{ša}$, $M_{ša}$ ir $M_{šš}$ yra ričių abipusiai induktyvumai;
- L_{1aa} , L_{1as} ir $L_{1aš}$ yra ričių savaiminiai induktyvumai;
- L_{2aa} , L_{2as} ir $L_{2aš}$ yra ričių savaiminiai induktyvumai;
- L_{1sa} , L_{1ss} ir $L_{1sš}$ yra ričių savaiminiai induktyvumai;
- L_{2sa} , L_{2ss} ir $L_{2sš}$ yra ričių savaiminiai induktyvumai;
- $L_{1ša}$, $L_{1šs}$ ir $L_{1šš}$ yra ričių savaiminiai induktyvumai;
- $L_{2ša}$, $L_{2šs}$ ir $L_{2šš}$ yra ričių savaiminiai induktyvumai.

Skaitiniai žymėjimai atitinkamai reiškia derinio pirminę ir antrinę puses, o raidiniai žymėjimai yra skirtingų ričių kombinacijų trumpiniai.

Taigi, pirmaujančių ričių kombinacija vis tiek išlieka stačiakampė. Jei kalbame apie skirtingų topologijų derinius, šioje vietoje rezultatais labiausiai išsiskyrė stačiakampės ir apvalios ritės kombinacijos.

13 lentelė. Skirtingų kombinacijų skaičiavimo rezultatai.

Atstumo tarp ričių pokytis (mm)	k_{aa}	M_{aa} (pH)	k_{as}	M_{as} (pH)	$k_{aš}$	$M_{aš}$ (pH)
50	0,063452	445,95401	0,065328	495,42491	0,060108	419,31341
100	0,008413	59,199181	0,008937	68,025211	0,007897	55,203931
150	0,001442	10,143701	0,001543	11,754991	0,001349	9,431741
200	0,000281	1,969709	0,000302	2,284552	0,000262	1,825224
250	0,000048	0,331443	0,000053	0,383237	0,000047	0,307664
300	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Atstumo tarp ričių pokytis (mm)	k_{sa}	M_{sa} (pH)	k_{ss}	M_{ss} (pH)	$k_{sš}$	$M_{sš}$ (pH)
50	0,065506	495,41301	0,068108	556,24341	0,061978	466,09331
100	0,008968	67,930471	0,009553	78,193681	0,008408	63,302461
150	0,001548	11,742201	0,001665	13,567361	0,001437	10,815341
200	0,000301	2,273187	0,000318	2,609367	0,000275	2,056994
250	0,000053	0,383193	0,000055	0,427078	0,000047	0,336437

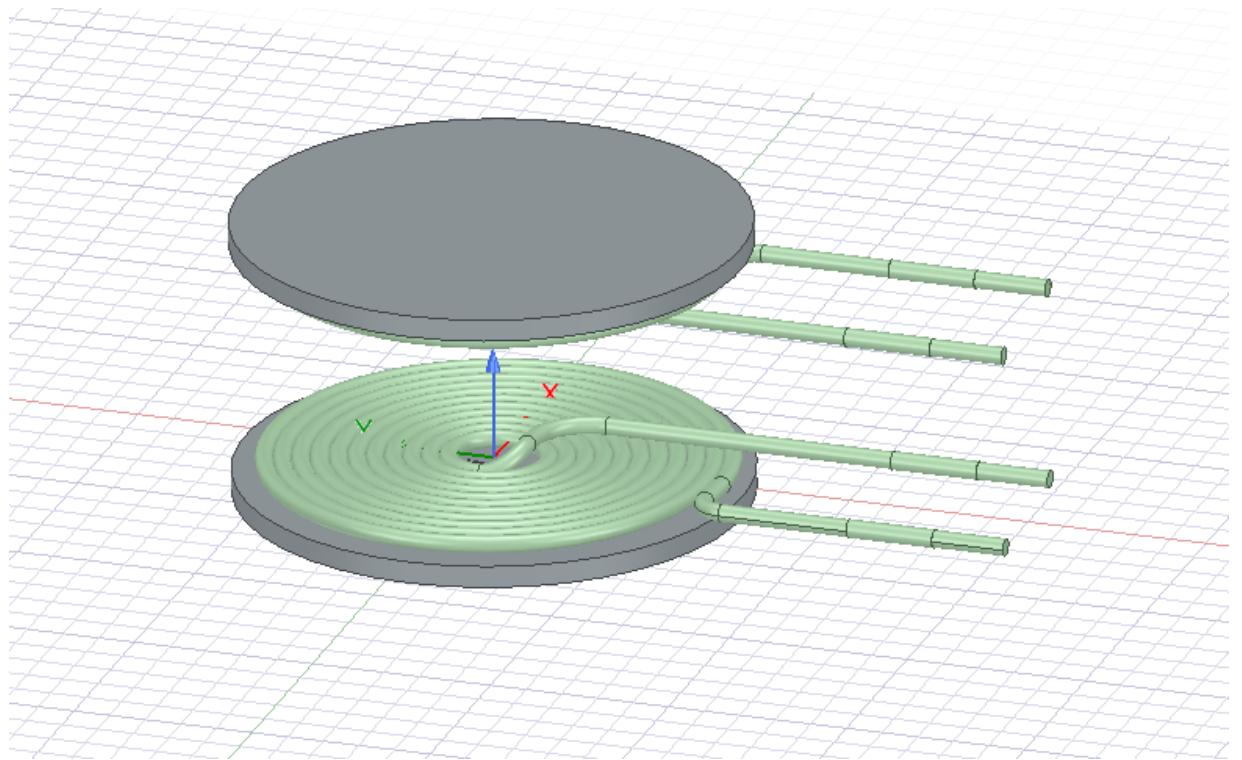
300	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Atstumo tarp ričių pokytis (mm)	k_{sa}	M_{sa} (pH)	k_{ss}	M_{ss} (pH)	k_{ss}	M_{ss} (pH)
50	0,059891	419,45511	0,061692	466,33141	0,057183	397,82521
100	0,007874	55,215221	0,008419	63,560161	0,007408	51,661351
150	0,001343	9,433948	0,001448	10,999021	0,001266	8,812502
200	0,0002462	1,829158	0,000284	2,135192	0,000247	1,712718
250	0,000046	0,306499	0,000051	0,361494	0,000044	0,290552
300	0,000002	0,000208	0,000003	0,001337	0,000004	0,001514

14 lentelė. Skirtingų kombinacijų savaiminių induktyvumų skaičiavimo rezultatai.

Atstumo tarp ričių pokytis (mm)	L_{1aa} (μH)	L_{2aa} (μH)	L_{1as} (μH)	L_{2as} (μH)	L_{1aš} (μH)	L_{2aš} (μH)
50	6,781648	7,284004	6,784101	8,477066	6,785678	7,171435
100	6,785521	7,298442	6,808042	8,512146	6,801474	7,186743
150	6,785849	7,303123	6,812743	8,525415	6,804331	7,192458
200	6,785001	7,293398	6,801985	8,493261	6,789217	7,182278
250	6,781006	6,781654	6,794039	7,847549	6,786112	6,732638
300	6,773378	2,663994	6,768823	0,000011	6,769275	0,054359
Atstumo tarp ričių pokytis (mm)	L_{1sa} (μH)	L_{2sa} (μH)	L_{1ss} (μH)	L_{2ss} (μH)	L_{1sš} (μH)	L_{2sš} (μH)
50	7,840693	7,295154	7,859935	8,485936	7,861152	7,194427
100	7,844393	7,312896	7,852932	8,533823	7,871328	7,203292
150	7,857681	7,312505	7,833187	8,488915	7,867517	7,205844
200	7,859006	7,295326	7,866309	8,498959	7,859831	7,179875
250	7,853461	6,789842	7,866582	7,867195	7,859915	6,735968
300	7,833506	0,015038	7,844217	0,000009	7,843802	0,052947
Atstumo tarp ričių pokytis (mm)	L_{1ša} (μH)	L_{2ša} (μH)	L_{1šs} (μH)	L_{2šs} (μH)	L_{1šš} (μH)	L_{2šš} (μH)
50	6,720313	7,299206	6,733409	8,486043	6,739216	7,182132
100	6,727378	7,311489	6,714746	8,489665	6,753154	7,200413
150	6,728283	7,317938	6,751841	8,532691	6,738837	7,202594
200	6,730502	7,319608	6,717074	8,472699	6,734781	7,186358
250	6,718817	6,790787	6,761879	7,865599	6,749548	6,735352
300	6,709979	0,015513	6,707615	0,050625	6,705436	0,052991

2.7. „Ansys Maxwell“ programinio paketo gautų rezultatų palyginimas su realiu pavyzdžiu

Atlikus visus testus su „Ansys Electronics Desktop“ programiniu paketu, buvo išsikeltas tikslas atkartoti realias turimas rites, kurios yra skirtos belaidžiam energijos perdavimui. Suprojektuotas rites galite pamatyti žemiau esančiame paveiksle (žr. 34 pav.). Paveiksle (žr. 35 pav.) pavaizduotos ritės, pagal kurias buvo sudarinėjamas modelis.



34 pav. „Ansys Electronics Desktop“ aplinkoje sumodeliuotos dvi ritės su ferito plokštelėmis.



35 pav. Realių turimų ričių pavyzdys.

15 lentelė. Programinės įrangos „Ansys Electronics Desktop“ gautų ir realios turimos ritės tyrimo rezultatų palyginimas.

Atstumas tarp ričių (cm)	„Ansys Maxwell“ abipusio induktyvumo rezultatai	Paklaida	Turimų realių ričių abipusio induktyvumo rezultatai
2	1,717 μH	1,1 %	1,70 μH
3	0,92 μH	1,84 %	0,903 μH
4	0,5315 μH	4,27 %	0,508802 μH
5	0,322 μH	4,38 %	0,307898 μH

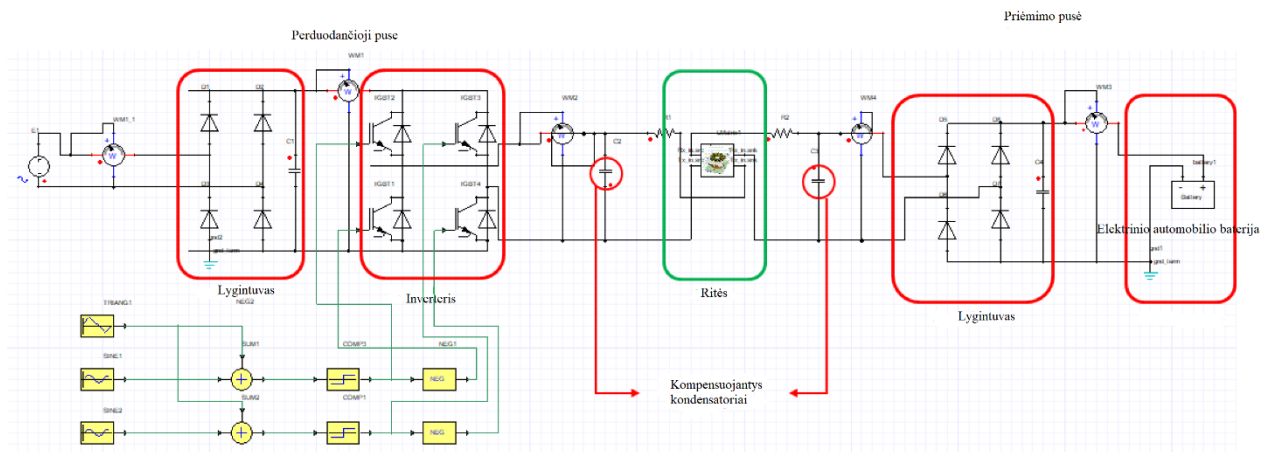
Abipusis induktyvumas buvo gautas išmatavus ričių induktyvumą sujungus jas nuosekliai suderintu ir priešpriešiniu jungimu. Iš gautų rezultatų pagal (21) formulę buvo apskaičiuotas abipusis induktyvumas:

$$L_m = (L' - L'')/4, \quad (21)$$

Kur L' yra suminis induktyvumas suderinto jungimo atveju, o L'' priešpriešinio jungimo atveju. Iš gautų rezultatų matoma, kad „Ansys Electronics Desktop“ programinio paketo pateikti rezultatai yra ganėtinai tikslūs, su procentine paklaida vyraujančia nuo 1,1 % iki 4,38 %, kai tarpas tarp ričių keičiasi nuo 2 cm iki 5 cm.

3. Belaidės energijos perdavimo sistemos analizė

Šiame skyriuje bus tiriama belaidės energijos perdavimo sistemos veikimas ir joje panaudotos paties sukurtos ritės. Tam atlikti buvo naudojamas „Ansys Electronics Desktop“ esantis „Simplorer“ įskiepis. Paveiksle (žr. 36 pav.) galima pastebėti, kad sistema yra maitinama iš tinklo, ją sudaro: du lygintuvai, inverteris, du kompensaciniai kontūrai ir baterija. Kompensacinis kontūras yra naudojamas tam, kad būtų užtikrintas rezonansinis dažnis, besikeičiant atstumui tarp ričių.



36 pav. Blokinė schema

3.1. Schemos blokų paaiškinimas

Lygintuvai esantys tiek pirminėje, tiek antrinėje pusėse yra skirti tam, kad kintamosios srovės dažnis būtų padidintas. Kad ši sąlyga būtų pasiekta, būtina kintamą srovę keisti į nuolatinę, pakelti jos dažnį, ir tada atkeisti atgal į kintamą. Šiam tyrimui atlikti buvo pasirinktas 85 kHz dažnis. Analizei atlikti buvo naudojamas H tilto keitiklis, kurį sudarė IGBT tranzistoriai. Be to, šioje schemoje yra naudojamas ir smulkintuvai, kuris yra labai naudingas, bandant keisti įtampą ir ją valdyti.

3.2. Rezonansinis kontūras

Dėl kintančio atstumo tarp ričių smarkiai didėja ir nuotėkio induktyvumas. Šis reiškinys daro itin didelę įtaką sistemos rezonansiniam dažniui. Todėl sudarytoje schemoje iš abiejų pusių yra įterpiami rezonansiniai kontūrai, kurių vertės galima surasti pagal lygtis(22)[27]:

$$C_1 = \frac{1}{\omega_0^2 L_1} \text{ arba } C_2 = \frac{1}{\omega_0^2 L_2}, [25] \quad (22)$$

Kur, $\omega_0 = 2\pi f$.

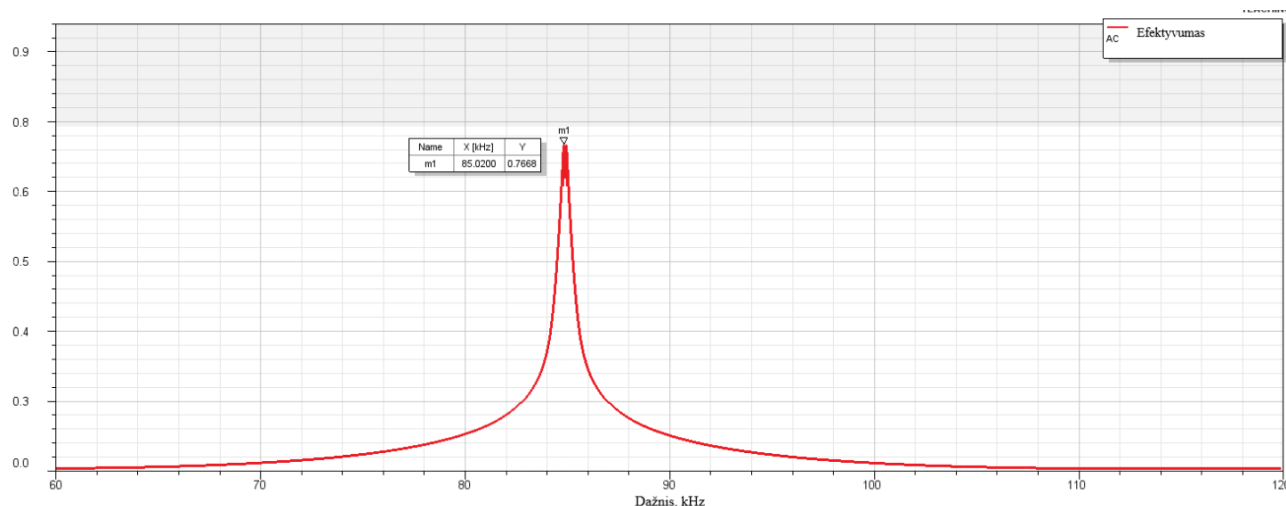
Keičiantis atstumui tarp, pirminės ir antrinės pusės, ričių, keičiasi ir ričių induktyvumas. Dėl to pasikeičia ir sistemos darbas. Tam, kad to išvengti reikia užtikrinti, kad atstumas tarp ričių kardinaliai nesikeistų, o jei to užtikrinti nepavyksta, reikia pasirūpinti, kad atstumas kistų minimaliai. Kitaip sistema patirs labai daug nuostolių.

3.3. Analizuotos sistemos galia ir efektyvumas

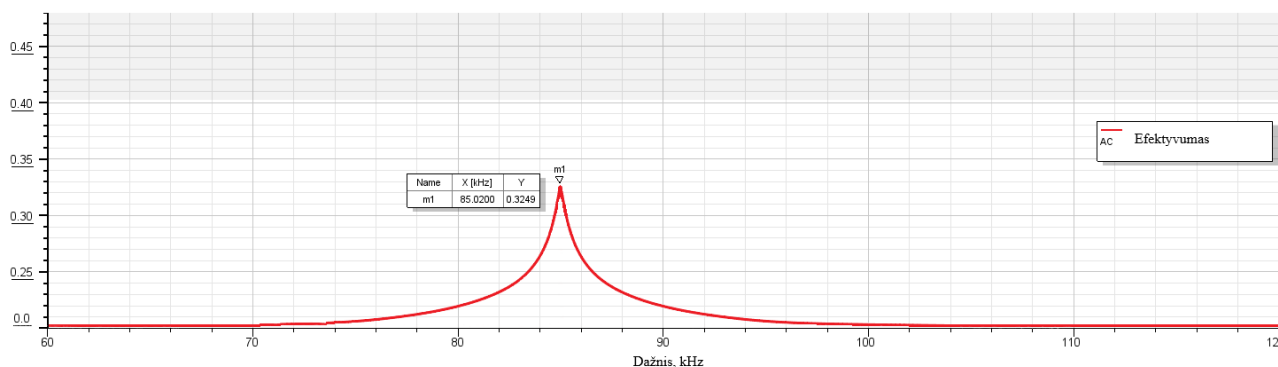
Atlikti sistemos našumo analizę buvo pasirinktas 230 V kintamos srovės šaltinis, ir buvo keičiamas atstumas tarp ričių nuo 100 mm iki 300 mm. Visiems atstumams buvo perskaičiuojamos rezonansinio kontūro vertės. Pirminėje pusėje gaunama galia gali būti išreikšta taip (23):

$$P_{out} = I_R^2 R_L = \frac{\omega_0^2 M^2 V_T^2 R_L}{[R_T(R_R + R_L) + \omega_0^2 M^2]} \quad (23)$$

Žemiau esančiame paveiksle (žr. 37 pav.) yra matomas 76 % naudingumo koeficientas, energiją perduodant belaidžiu būdu, esant 100 mm atstumui tarp ričių, iš pirminės į antrinę pusę. Šie rezultatai buvo gauti, esant 85 kHz rezonansiniam dažniui, o antrinėje pusėje buvo gauta 2,72 kW galia.



37 pav. Naudingumo koeficiento kreivė prie 100 mm atstumo



38 pav. Naudingumo koeficiento kreivė prie 200 mm atstumo

Kaip jau buvo aptarta ankščiau, dėl kintančio atstumo tarp ričių keičiasi jų induktyvumas, ryšio koeficientas ir kiti parametrai. Todėl antrinėje pusėje gaunamos galios vertės mažėja. Esant 200 mm atstumui, tarp ričių buvo užfiksuotas 32 % efektyvumas, tai reiškia, kad kintant atstumui, tarp ričių galia, perduodama iš pirminės į antrinę pusę, svyravo nuo 2,72 kW iki 1,5 kW. Atstumą didinant, dar labiau krito efektyvumas ir buvo patiriami didžiuliai nuostoliai, todėl šios reikšmės buvo neužfiksuotos. Kaip buvo apskaičiuojamas naudingumo koeficientas galima pamatyti lygtyje (24).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \text{ arba } \eta = \frac{I_{out}^2 Z_{out}}{I_{in}^2 Z_{eq}}. \quad (24)$$

Išvados

1. Buvo iširta atstumo tarp ričių daromą įtaką ryšio koeficientui ir pastebėta, kad didėjantis atstumas, nuo 50 mm iki 300 mm tarp pirminės ir antrinės ričių, neigiamai veikia ryšio koeficiento, abipusio induktyvumo ir savaiminio induktyvumo reikšmes. Ryšio koeficientas, ričių sistemoje su feritu ir aliuminiu, atstumui tarp ričių didėjant, nukrito nuo $k = 0,515132$ iki $k = 0,018652$. Be to, atlikus papildomus tyrimus su ferito ir ferito – aliuminio plokštelėmis, buvo pastebėta, kad šių medžiagų pridėjimas ženkliai pagerino visus gautus rodiklius. Esant 50 mm atstumui tarp ričių, be ferito ir aliuminio, ryšio koeficientas buvo gautas $k = 0,066159$, o sistemoje su feritu ir aliuminiu $k = 0,515132$. Taigi, norint užtikrinti efektyvų belaidės sistemos darbą, feritas ir aliuminis yra neatsiejami nuo belaidės energijos perdavimo sistemos.
2. Buvo išanalizuota aliuminio ir ferito įvedimo į sistemą daromą įtaką ryšio koeficientui. Taigi, didėjantis ritės spindulys kartu didina ryšio koeficiento vertes ir abipusį induktyvumą.
3. Buvo iširta ritės diametro pokyčio daromą įtaką ryšio koeficientui. Ritės spinduliui pasikeitus nuo 10 mm iki 40 mm ryšio koeficientas padidėja nuo $k = 0,005711$ iki $k = 0,011990$. Dažniausiai antrinės ritės vieta automobilio dugne yra ribota, todėl ričių diametras taip pat yra apibrėžtas. Jei vieta yra didesnė, vidinis spindulys, turi būti didinamas, siekiant išnaudoti visą galimą erdvę. Tačiau, reikia atkreipti dėmesį į kainą, kuri, didėjant ritėms, taip pat didėja ir kitus, apribojimus galinčius kelti, reikalavimus
4. Buvo analizuojama, apvijų skaičiaus pasikeitimo ričių sistemoje įtaka, ryšio koeficientui. Apvijų skaičiaus padidėjimas pagerina ryšio koeficiento reikšmes kaip ir abipusį, ir savaiminį induktyvumą. Ritės apvijų padidėjimas nuo 5 iki 16 apvijų, kai kitos ritės apvijų skaičius išlaikomas pastovus $N = 10$, padidina ryšio koeficientą nuo $k = 0,005873$ iki $k = 0,010916$. Todėl norint pagerinti naudingumo koeficientą, reiktų atkreipti dėmesį į apvijų skaičių ritėse.
5. Buvo tiriamos trys ritės formos ir nustatyta, kuri iš trijų ritės formų, turi geriausią ryšio koeficientą. Stačiakampės formos ritė turi geriausius parametrus, ši forma buvo pranašesnė už likusias dvi ričių topologijas. Nelaidžių magnetinių medžiagų, padedančių geriau suvaldyti magnetinį lauką, ferito ir aliuminio, pridėjimas, ženkliai pagerina visų ričių formų gautus rezultatus. Tačiau stačiakampės ritės rezultatai, vis tiek išlieka pirmaujantys.
6. Atlikus devynių skirtingų kombinacijų iš trijų skirtingų topologijų tyrimą, rezultatai rodo, kad pirmaujančių ričių kombinacija, tiek pirminės, tiek antrinės, vis tiek išlieka stačiakampė. Skirtingų topologijų derinių rezultatai labiausiai išsiskyrė stačiakampės ir apvalios ritės kombinacijos.
7. „Ansys Electronics Desktop“ programinės įrangos paketo modeliuotų rezultatų palyginimas su faktiniais esamų ričių matavimais rodo aukštą tikslumo lygį, o nuokrypiai paprastai svyruoja nuo 1,1 % iki 4,38 %. Programinė įranga yra patikima numatant abipusį induktyvumą belaidėse energijos perdavimo sistemose, galinti suteikti vertingų įžvalgų projektavimo ir optimizavimo procesuose.
8. Tiriant sistemą atstumo tarp ričių, kitimas turi įtakos ričių galiai, gaunamai antrinėje pusėje, dėl to išėjimo galia svyravo nuo 2,72 kW iki 1,5 kW esant 100mm - 200mm atstumams. Didžiausia išėjimo galia, užfiksuota 100 mm atstumu, buvo 2,72 kW, o efektyvumas 76 %, esant rezonansiniam dažniui.

Literatūros sąrašas

1. Ali Abdolkhani „Fundamentals of Inductively Coupled Wireless Power Transfer Systems“ [interaktyvus]. We are IntechOpen, the world’s leading publisher of Open Access books Built by scientists, for scientists [žiūrėta 2022-04-16], Prieiga per internetą:
https://books.google.se/books?hl=lt&lr=&id=dG-QDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA3&dq=Fundamentals+of+Inductively+Coupled+Wireless+Power+Transfer+Systems+Ali+Abdolkhani&ots=c7n5mEiAk6&sig=oiOosws_kyNHacacBFQXcsa_f48&redir_esc=y#v=onepage&q=Fundamentals%20of%20Inductively%20Coupled%20Wireless%20Power%20Transfer%20Systems%20Ali%20Abdolkhani&f=false
2. Nassim Iqteit, Khalid Yahya and Sajjad Ahmad Khan „Wireless Power Charging in Electrical Vehicles“ [interaktyvus]. We are IntechOpen, the world’s leading publisher of Open Access books Built by scientists, for scientists [žiūrėta 2022-04-16], Prieiga per internetą:
https://www.researchgate.net/publication/349379303_Wireless_Power_Charging_in_Electrical_Vehicles
3. Takehiro Imura „Wireless Power Transfer Using Magnetic and Electric Resonance Coupling Techniques“ [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-05-25]. Prieiga per internetą:
https://books.google.se/books?hl=lt&lr=&id=Yu_rDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR6&dq=Wireless+Power+Transfer+Using+Magnetic+and+Electric+Resonance+Coupling+Techniques&ots=jlt_hvr4xZ9&sig=xWG8jR6uM-qwm067ixV5z7mGSD0&redir_esc=y#v=onepage&q=Wireless%20Power%20Transfer%20Using%20Magnetic%20and%20Electric%20Resonance%20Coupling%20Techniques&f=false
4. Andrew Foote1 , Omer C. Onar „A Review of High-Power Wireless Power Transfer“ [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-04-16]. Prieiga per internetą:
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7993277>
5. Alanson P. Sample, Student Member, IEEE, David A. Meyer, Student Member, IEEE, and Joshua R. Smith, Member, IEEE „Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer“ [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-04-16]. Prieiga per internetą:
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5437250>
6. Marilena Stanculescu , Lavinia Iordache (Bobaru), Mihai Iordache, Drago Niculae, Victor Bucata University Politehnica of Bucharest „Using S Parameters in Wireless Power Transfer Analysis“ [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-04-16]. Prieiga per internetą:
https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7905186?casa_token=hE6Crbah5mIAAAAA:n_zyG_u7i6k51HI2INpQ_ouP-E8g8cvDVZ02v-UBKUz9yZZKiliWoBiFS4VX9GAXXp0nTa7bKLk
7. Tark Aaltahr Ahmed Farnana „Analysis and comparison of classical compensation topologies for inductive power transfer for electrical vehicles“ [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-04-16]. Prieiga per internetą:
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8815754>
8. Fariborz Musavi1, Wilson Eberle „Overview of wireless power transfer technologies for electric vehicle battery charging“ [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-04-16]. Prieiga per internetą:
<https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/iet-pel.2013.0047>
9. Belaidė energija [interaktyvus], [žiūrėta 2022-04-16]. Prieiga per internetą:

<193.219.81.80/~s0925032/temos/wirelesspower.doc>.

10. Nameer Ahmed Khan „Wireless charger for electrical vehicles with electromagnetic coil based position correction“ [interaktyvus], [žiūrėta 2022-04-16]
https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/98114/2/Khan_Nameer_A_201911_MAS_thesis.pdf
11. Chigira, M; Nagatsuka, Y; Kaneko, Y; Abe, S; Yasuda, T; Suzuki, A. 2011. Small-Size LightWeight Transformer with New Core Structure for Contactless Electric Vehicle Power Transfer System [interaktyvus], [žiūrėta 2022-04-16]. Prieiga per internetą:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6063778>
12. Fisher, T. M; Farley, K. B; Gao, Y; Bai, H; Tse, Z. T. H. 2014. Electric vehicle wireless charging technology: a state-of-the-art review of magnetic coupling systems [interaktyvus], [žiūrėta 2022-04-16]. Prieiga per internetą:
<https://www.cambridge.org/core/journals/wireless-power-transfer/article/electric-vehicle-wireless-charging-technology-a-stateofheart-review-of-magnetic-coupling-systems/FA955A930533CFABCA307C972DC94317>
13. Jiuyu, D; Xinying, M; Yalun, L; Qun, Z; Jianqiu, L; Xiaogang, W; Languang, L; Minggao, O. 2019. Boundaries of high-power charging for long-range battery electric car from the heat generation perspective [interaktyvus], [žiūrėta 2022-04-16]. Prieiga per internetą:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544219311144>
14. Lebkowski, A. Management System for Electric Vehicle Battery Pack [interaktyvus], [žiūrėta 2022-04-16]. Prieiga per internetą:
https://www.researchgate.net/profile/Andrzej_Lebkowski/publication/319454731_Management_System_for_Electric_Vehicle_Battery_Pack/links/59abca1faca272f8a1585801/Management-Systemfor-Electric-Vehicle-Battery-Pack.pdf
15. Ming-Hung, L; Ming, U. J. 2012. Safety Design of Electric Vehicle Charging Equipment [interaktyvus], [žiūrėta 2022-04-16]. Prieiga per internetą:
https://www.researchgate.net/publication/286113664_Safety_Design_of_Electric_Vehicle_Charging_Equipment
16. International Council on Clean Transportation Europe. *Energy consumption* [interaktyvus], [žiūrėta 2022-04-16]. Prieiga per internetą:
https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Pocketbook_2016.pdf
17. Nissan. *Nissan Leaf* [interaktyvus], [žiūrėta 2022-04-16]. Prieiga per internetą
<https://autocitynissan.co.za/wp-content/uploads/2016/10/LEAF.pdf>
18. Renault. *Renault ZOE* [interaktyvus], [žiūrėta 2022-04-16]. Prieiga per internetą:
<http://www.corporate-sales.renault.com/wp-content/uploads/2017/03/zoe-brochure.pdf>
19. Fayzez Aldawi „Novel validated numerical analysis of flat coil tube with spring inserts“ [interaktyvus], [žiūrėta 2022-06-14]. Prieiga per internetą:
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2214157X22004439?token=F8BFF46CA128005210D03106608DC33DC4669792E9B90F99319A38A2961F23282D868F640D15D52289E56B11D390D405&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220616054132>
20. „A review on foreign object detection for magnetic coupling-based electric vehicle wireless charging“ [interaktyvus], [žiūrėta 2022-06-14]. Prieiga per internetą:

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S277315372200007X?token=F2E345CFC90EB24C3155A92438DF2B198C2D9A990BDF5B31293ECA238ACF415F7F452C93C9653F633AF70B069C5D5615&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220616053018>

21. Feng WenDashang ZhangChen HanGuoqi ZhangGuofeng LiXiang ZhangJianxing MaZhijun YaoKaiming Yu „Anti-offset performance optimization of coupling coils in wireless power transfer system based on genetic algorithm“ [interaktyvus], [žiūrėta 2022-06-14]. Prieiga per internetą:

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2352484722009520?token=DC2AC185CFEF33D7E32B12054328ED9A31FECC01CD05F9229065486BF7F4733AEAF79D2E0FB80AC6ABA8EA7869332CDB&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220616052448>

22. Tasnime Bouanou, Hassan El Fadil, Abdellah Lassioui „Analysis and Design of Circular Coil Transformer in a Wireless Power Transfer System for Electric Vehicle Charging Application?“ [interaktyvus], [žiūrėta 2022-10-11]. Prieiga per internetą:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9113190>

23. Yang Yang, Jinlong Cui and Xin Cui „Design and Analysis of Magnetic Coils for Optimizing the Coupling Coefficient in an Electric Vehicle Wireless Power Transfer System“ [interaktyvus],[žiūrėta 2022-10-13]. Prieiga per internetą:

<https://www.mdpi.com/1996-1073/13/16/4143>

24. Issam Bentalhik, Abdellah Lassioui, Hassan EL Fadil, Tasnime Bouanou, Aziz Rachid, Zakariae EL Idrissi and Ahmed Mohamed Hamed „Analysis, Design and Realization of a Wireless Power Transfer Charger for Electric Vehicles: Theoretical Approach and Experimental Results“ [interaktyvus],[žiūrėta 2022-10-17]. Prieiga per internetą:

<https://www.mdpi.com/2032-6653/13/7/121>

25. Aqueel Ahmad, Mohammad Saad Alam and Ahmed A. S. Mohamed „Design and Interoperability Analysis of Quadruple Pad Structure for Electric Vehicle Wireless Charging Application“ [interaktyvus],[žiūrėta 2022-10-20]. Prieiga per internetą:

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8765404>

26. Naoui Mohamed, Flah Aymen, Zaafour Issam, Mohit Bajaj, Sherif S. M. Ghoneim and Mahrous Ahmed „The Impact of Coil Position and Number on Wireless System Performance for Electric Vehicle Recharging“ [interaktyvus],[žiūrėta 2022-10-22]. Prieiga per internetą:

<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/13/4343>

27. Eiman ElGhanam, Mohamed Hassan, Ahmed Osman and Hanin Kabalan „Design and Performance Analysis of Misalignment Tolerant Charging Coils for Wireless Electric Vehicle Charging Systems“ [interaktyvus],[žiūrėta 2022-10-28]. Prieiga per internetą:

<https://www.mdpi.com/2032-6653/12/3/89>

28. Minhazur Rahman; Fariha Rahman; A.H.M Rasheduzzaman; Md. Fahim Shahriyar; M Tanseer Ali „Magnetic Resonance Coupled Wireless Power Transfer Analysis For Electric Vehicle“ [interaktyvus],[žiūrėta 2022-11-05]. Prieiga per internetą:

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9587543>

29. Issam Bentalhik, Abdellah Lassioui, Hassan EL Fadil, Tasnime Bouanou „Analysis, Design and Realization of a Wireless Power Transfer Charger for Electric Vehicles: Theoretical Approach and Experimental Results“ [interaktyvus],[žiūrėta 2022-11-10]. Prieiga per internetą:

<https://www.mdpi.com/2032-6653/13/7/121>

30. Zhichao Luo; Xuezhe Wei „Analysis of Square and Circular Planar Spiral Coils in Wireless Power Transfer System for Electric Vehicles“ [interaktyvus],[žiūrėta 2022-11-11]. Prieiga per internetą:

https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7968494?casa_token=SBd_UCjyLCQAAAAA:FirKMGZm3hzu8g8w53o4gshDBwMCSudjD6bIYlcpginANEjHkYxHNxbBKRM7KU6XVIVIXXzt_tPl

31. Naoui Mohameda Flah Aymena Mohammed Alqarnib Rania A.Turkyc Basem Alamrid Ziad M.Alief Shady H.E.Abdel Aleem „A new wireless charging system for electric vehicles using two receiver coils“ [interaktyvus],[žiūrėta 2022-11-13]. Prieiga per internetą:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447921003208>