



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Įvairių formų ričių su feritu, įkraunant elektromobilius belaidžiu būdu, tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Paulius Budinas

Projekto autorius

Prof. Robertas Lukočius

Vadovas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Įvairių formų ričių su feritu, įkraunant elektromobilius belaidžiu būdu, tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Paulius Budinas

Projekto autorius

Prof. Robertas Lukočius

Vadovas

Doc. Ramūnas Deltuva

Recenzentas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Paulius Budinas

Įvairių formų ričių su feritu, įkraunant elektromobilius belaidžiu būdu, tyrimas

Akademinių 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.

Paulius Budinas

Patvirtinta elektroniniu būdu

Budinas, Paulius. Įvairių formų ričių su feritu, įkraunant elektromobilius belaidžiu būdu, 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: belaidis energijos perdavimas, feritas, ryšio koeficientas, ričių formos.

Kaunas, 2025. 48 p.

Santrauka

Šiame baigiamajame magistro darbe tiriamos ričių sistemų, skirtų belaidžiam elektromobilių akumuliatorių krovimui, konstrukcijų ypatybės. Taikant skaitinį modeliavimą analizuojama, kokią įtaką įvairių ričių sistemų ryšio koeficientui turi įvairių formų feritiniai pagrindai. Toks tyrimas yra aktualus siekiant įvertinti įvairių ričių konstrukcijų ryšio koeficientus ir abipusį induktyvumą – parametrus, lemiančius belaidžio ryšio sistemų efektyvumą. Darbe sumodeliuotos ir išanalizuotos kvadratinės, DD ir DDQ tipo ričių sistemos. Ferito įterpimo įtakai abipusio induktyvumo ir ryšio koeficiento įvertinimui buvo atlikti modeliavimai „Comsol Multiphysics“ skaitinio modeliavimo aplinkoje. Taip pat darbe buvo apskaičiuoti analizuotų ričių konstrukcijų svoriai.

Budinas, Paulius. Investigation of Different Shaped Coils with Ferrite Backings for Electrical Vehicle Wireless Charging. 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 science.

Keywords: Wireless power transfer, ferrite, coupling coefficient, coils forms.

Kaunas, 2025. 48 p.

Summary

This master's final project examines the features of coil systems structures intended for the electric vehicles' accumulators' wireless charging. By using numerical modelling, the impact that ferrite bases of different forms have on coupling coefficient of various coil systems was analyzed. This research is relevant in order to evaluate coil structures' coupling coefficients and mutual inductance – parameters that determine the effectiveness of wireless connection systems. In this project, square, DD and DDQ type coil systems were modeled and analyzed. To evaluate impact of ferrite insertion on mutual inductance and coupling coefficient, a numerical modelling environment „Comsol Multiphysics“ was used. In addition, the weights of various coil structures were calculated.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Literatūros apžvalga	13
1.1. Belaidis galios perdavimas	13
1.1.1. Skirtumai tarp įprasto ir belaidžio įkrovimo	15
1.2. Belaidžio įkrovimo principai	16
1.3. Kompensacinės schemos	18
1.4. Ričių formų palyginimas	20
1.5. Ryšio ir naudingumo koeficiento priklausomybės belaidžiam įkrovimui	22
1.6. Statinis ir dinaminis belaidis įkrovimas	24
1.7. Ryšio koeficiento priklausomybė nuo ričių poslinkio.....	26
1.8. Belaidžio galios perdavimo standartai.....	27
1.9. Feromagnetinės medžiagos	28
2. Modeliavimas	30
2.1. Naudojamos priemonės, modeliavimo metodas, medžiagų modeliai	30
2.2. Modelio validacija	30
2.3. Modelio kūrimas.....	31
2.3.1. Kvadratinų ir DD tipo ričių modeliai	33
2.3.2. Kvadratinės ritės su DD tipo rite modeliai vienoje struktūroje	38
2.3.3. DDQ ričių modeliai	40
2.3.4. Kvadratinų ričių modeliai keičiant atstumą tarp ričių	41
2.3.5. Ričių konstrukcijų svoriai.....	41
2.4. Rezultatų apibendrinimas	42
Išvados	44
Literatūros sąrašas	45
Priedai.....	49
1 priedas. Modelio sudarymo eiga.....	49
2 priedas. Pagrindiniai gautų modelių rezultatai	53

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Sukurti elektromobiliai su galimybe juos įkrauti belaidžiu būdu [5]	14
2 lentelė. Naudojami matmenys modelio validacijai atlikti [38]	30
3 lentelė. Validacijos rezultatai	31
4 lentelė. Pagrindiniai modelyje naudojami parametrai ir dydžiai	31
5 lentelė. Kvadratinų ričių gauti rezultatai keičiant atstumą tarp ričių z ašyje	41
6 lentelė. Ričių ir ferito svoriai	42

Paveikslų sąrašas

1 pav. Elektromobilio įkrovimas ir elektros atidavimas į elektros tinklą [6].....	14
2 pav. Taksi elektromobiliai „Volvo XC40 Recharge“ įkraunami belaidžiu būdu, kol laukiami keleiviai [8].....	15
3 pav. Laidu įkraunamo elektromobilio galios perdavimo iš elektros tinklo į bateriją schema [9]..	16
4 pav. Belaidžiu būdu įkraunamo elektromobilio galios perdavimo iš elektros tinklo į bateriją schema [9]	16
5 pav. Indukcinės galios perdavimo sistemos blokų schema [11]	17
6 pav. Pagrindinė indukcinė galios perdavimo sistema su induktyvumo nuotėkiu [12].....	17
7 pav. Keturios pagrindinės kompensavimo topologijos: (a) SS, (b) SP, (c) PS ir (d) PP [12].....	19
8 pav. Belaidžių galios perdavimo sistemų, skirtų elektromobilių baterijų įkrovimui, ričių konstrukcijos, įskaitant ferito galines plokšteles: a) apvali ritė; b) plokščia kvadratinė ritė; c) DD ritė; (d) bipoliarinė ritė (BPP); e) DDQ ritė; f) solenoido ritė [12].	21
9 pav. Tipinės indukcinės galios perdavimo (IPT) sistemos grandinės schema [12]	22
10 pav. Ekvivalentinė IPT sistemos schema [12]	23
11 pav. Belaidžio galios perdavimo kelias ir jo segmentavimas [26].....	25
12 pav. Konceptinis ištiesos ritės takelio išdėstymas [26]	25
13 pav. Konceptinis segmentuotas ritės takelio išdėstymas [26]	26
14 pav. Abipusio induktyvumo priklausomybė nuo poslinkio apskritoje ritėje [26].....	26
15 pav. B kitimas kintant H. a) tarpai iliustruoja domeno struktūrą įvairiuose histerezės kreivės taškuose; b) minkštamagnečių ir kietamagnečių kilpų dydžio ir formos palyginimas [35].....	29
16 pav. Gauto modelio ričių atvaizdavimas.....	31
17 pav. Kvadratinės ritės struktūra: (a) geometrija abipusiam induktyvumui skaičiuoti; (b) pagrindiniai ritės parametrai.....	32
18 pav. Srovės tekėjimo kryptys: (a) kvadratinėje ritėje; (b) DD ritėje.....	33
19 pav. Magnetinio srauto kryptys: (a) kvadratinės ritės; (b) DD ritės	33
20 pav. Ritės su nesimetrine struktūra naudojant ferito pagrindą: viena ritė su ferito plokštele DD ritės	34
21 pav. Ritės su nesimetrine struktūra naudojant ferito pagrindus: viena ritė su ferito plokštele, kita ritė su ferito strypais (a) kvadratinės ritės; (b) DD ritės	34
22 pav. DD ritės su nesimetrine struktūra naudojant ferito pagrindus: abi ritės su ferito strypais (perdavimo ritėje naudojami 4 cm pločio strypai, priėmimo 2 cm)	34
23 pav. Ritės su simetrine struktūra nenaudojant ferito pagrindų: abi ritės be ferito pagrindo (a) kvadratinės ritės; (b) DD ritės	35
24 pav. Ritės su simetrine struktūra naudojant ferito pagrindus: abi ritės su ferito plokštelėmis (a) kvadratinės ritės; (b) DD ritės	35
25 pav. Ričių sukurti magnetiniai laukai, kai ritės yra tiksliai viena virš kitos: (a) kvadratinė ritė; (b) DD ritės; (c) DDQ ritės	36
26 pav. DD ritės su išilginiu poslinkiu.....	37
27 pav. Kvadratinų ričių koeficiento priklausomybė nuo išilginio poslinkio.....	37
28 pav. DD ričių koeficiento priklausomybė nuo išilginio poslinkio.	38
29 pav. Dviguba DD ritė su kvadratine rite vienoje struktūroje	39
30 pav. Ryšio koeficiento priklausomybė nuo poslinkio DD su kvadratine ritėmis rezultatai.....	39
31 pav. DDQ tipo ritės	40
32 pav. Ryšio koeficiento priklausomybė nuo DDQ ričių poslinkio	40

33 pav. Ryšio koeficiento priklausomybė nuo atstumo tarp ričių.....	41
34 pav. Ryšio koeficiento priklausomybė nuo poslinkio kai ritės be ferito.....	43
35 pav. Ryšio koeficiento priklausomybė nuo poslinkio kai abi ritės su ferito plokštelėmis.....	43

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

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

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

DD – dvi kvadratinės ritės viena šalia kitos;

DDQ – DD ričių konstrukcija su papildoma trečia rite Q;

DWPT – (angl. *dynamic wireless power transfer*) dinaminis belaidis energijos perdavimas;

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

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

ICPT – (angl. *inductively coupled power transfer*) induktyviai susietos galios perdavimas;

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

PFC – (angl. *power factor correction*) galios koeficiento korekcija;

V2G – (angl. *vehicle to grid*) iš elektromobilio elektros atidavimas į elektros tinklą;

V2H – (angl. *vehicle to home*) iš elektromobilio elektros atidavimas į namų tinklą;

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

Terminai:

Abipusis induktyvumas – parametras, apibūdinantis dviejų laidžių kontūrų (elektros grandinių) magnetinį ryšį: vieną kontūrą kertančio surištojo magnetinio srauto, sukulto elektros srovės kitame kontūre, ir tos srovės santykis.

Feritas – medžiaga, kuri yra iš geležies oksido, turinti magnetinių keraminių savybių. Juos traukia magnetiniai laukai arba gali būti įmagnetinti, kad taptų nuolatiniais magnetais.

Ryšio koeficientas – vienoje ritėje tekančios srovės sukurto magnetinio srauto dalis verianti kitą ritę; abipusio induktyvumo santykis su šaknimi iš savitųjų induktyvumų sandaugos.

Ivadas

Kasmet pasaulyje vis svarbesnė tema yra klimato kaitos klausimai. Vienas iš sprendinių kaip sumažinti klimato kaitą yra apriboti iškastinio kuro naudojimą. Todėl mūsų gatvėse vis dažniau galima pamatyti elektra varomus automobilius, tačiau reikia paminėti, jog šis procesas nėra toks spartus ir patrauklus daugumai gyventojų dėl elektromobilių kainos ir vis dar pakankamai neišplėtos infrastruktūros, pavyzdžiui, daugiabučių kiemuose įkrovimo stotelių trūkumas. Yra žinoma, jog iškastiniu kuru varomas automobilis gali nuvažiuoti ilgesnį atstumą negu elektromobilis, todėl automobilio įkrovimas važiuojant būtų vienas iš sprendinių, kaip pailginti nuvažiuojamą atstumą ir be sustojimo įkrauti elektromobilio bateriją. Belaidis dinaminis krovimas taip pat galėtų atpiginti elektromobilius, nes nebūtų svarbu turėti didelės talpos akumuliatorius. Sprendžiant elektromobilių integravimo į kasdienį gyvenimą problemas, vis dažniau akcentuojama belaidžio krovimo galimybė elektromobiliams dėl patogumo, saugumo bei patikimumo. Pavyzdžiui, toks krovimas sumažina galimas problemas, kaip kabelių vagystė, nutūkimo rizika, jungties kontaktų nusidėvėjimas, netyčinis stotelės pažeidimas. Tai ypač patogu viešose vietose, pavyzdžiui, prie prekybos centrų. Taip pat patogu naudoti sunkiai prieinamose ar drėgnose vietose, pavojingose ar sprogioje aplinkoje.

Stambūs elektromobilių gamintojai skiria daug pastangų ir finansų belaidžio galios perdavimo (WPT) technologijos vystymui. Yra nemažai mokslinių straipsnių, kuriuose aptariami elektromobilių belaidžio krovimo privalumai ir trūkumai ir yra tikimasi, kad per ateinantį dešimtmetį ši technologija sparčiai plėsis, nes pastaraisiais metais stipriai išaugo santykinai mažos galios belaidžio krovimo taikymo sričių, tokių kaip jutikliai, medicinoje naudojami prietaisai, smulki buitinė technika, kuri supaprastina kasdieninius veiksmus. Tačiau jie nėra tokie efektyvūs, nes esamas naudingumas siekia apie 70 %, todėl ieškoma būdų padidinti didelės galios belaidžio krovimo sistemų efektyvumą [1]. Pagrindinis parametras norint padidinti belaidžio krovimo efektyvumą yra didinti ryšio koeficientą, nes turi būti perduodama didelė galia dideliame oro tarpe [2]. Mokslinėje literatūroje rašoma, kad elektromobilio krovimo perduodamos energijos efektyvumas gali siekti daugiau kaip 90 %, kas yra geras rezultatas, todėl ši tema yra aktuali ir prasminga tobulinant šį krovimo būdą [1]. Taip pat belaidis krovimas galėtų padėti subalansuoti elektros energijos sistemos galią, kadangi šios ritės gali būti bipoliaros ir iš elektromobilio baterijos atiduoti sukauptą energiją į tinklą, ką rečiau būtų galima padaryti laidu kraunant elektromobilį, nes dažniausiai pilnai pakrautas akumuliatorius atjungiamas nuo tinklo [3]. Nors ši tema aktuali ir plačiai aptariama, tačiau mažai yra palyginamos ričių formos bei ferito įterpimas, kuris daro įtaką abipusiam induktyvumui. Šiame darbe tiriamos įvairių formų ritės su feritu, siekiant geriausių rezultatų, kadangi elektromobilyje montuojamose ritėse turi būti atsižvelgiama į jų konstrukciją, efektyvumą, svorį.

Darbo tikslas – ištirti ferito konstrukcijų naudojamų ričių sistemose, skirtose belaidžiam elektromobilių krovimui, įtaką ričių abipusiam induktyvumui ir ryšio koeficientui.

Darbo uždaviniai:

1. apžvelgti esminius belaidžio krovimo sistemų ypatumus;
2. išanalizuoti belaidžiam elektromobilių baterijų krovimui naudojamų ričių sistemų sandarą, struktūras, formas, svarbiausius parametrus, belaidžio energijos perdavimo sistemos veikimo principus, kompensavimo schemas, taikymo ypatybes;

3. „Comsol Multiphysics“ skaitinio modeliavimo aplinkoje sukurti belaidžiam krovimui skirtų ričių sistemų parametrinius modelius, įgalinančius lengvai pakeisti ričių konstrukcijų geometrinius parametrus;
4. taikant sukurtus skaitinius modelius ištirti įvairių ferito konstrukcijų įtaką pagrindiniams ričių sistemos parametrams – abipusiam induktyvumui ir ryšio koeficientui;
5. išanalizuoti ir apibendrinti gautus modeliavimo rezultatus, suformuluoti gautus rezultatus apibendrinančias išvadas.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Belaidis galios perdavimas

Belaidis galios perdavimas (angl. *WPT*) – tai bekontaktis energijos perdavimas iš siųstuvo į imtuvą be mechaninio sujungimo kintamuoju elektromagnetiniu lauku. Energija perduodama elektromagnetinių ričių pagalba, veikimas panašus į transformatoriaus, bet nėra šerdies (magnetolaidžio), todėl magnetinės bangos sklinda oru. Ši technologija naudojama įvairiuose taikymuose: nuo mažų jutiklių iki didelės galios elektromobilių. Svarbus parametras belaidžiam galios perdavime yra perduodamos galios naudingumo koeficientas, todėl šio darbo tiriamojoje dalyje pagrindinis tiriamas parametras yra ryšio koeficientas.

Belaidžio galios perdavimo technologijos privalumas, tai kabelių kiekio sumažinimas, mobilumas, paprastas ir sklandus energijos perdavimas net ankštoje stovėjimo aikštelėje ar laidu sunkiai prieinamoje vietoje. Nicola Tesla pirmą kartą belaidžio energijos perdavimo bandymus buvo atlikęs XIX a. pabaigoje. Pademonstruoti belaidžio galios perdavimo technologiją jis bandymui kaip elektros imtuvą naudojo apšvietimo lempuotę. Nicola Tesla eksperimente naudojo dvi metalines plokšteles esant mažam atstumui. Perduoti energiją buvo naudoti aukšto dažnio kintamos srovės potencialai. Šiuo bandymu pastebėtas technologijos trūkumas, kadangi belaidžiu būdu perduodamas mažas galios kiekis, o didėjant atstumui tarp imtuvo ir siųstuvo stipriai mažėja efektyvumas. Prie šios technologijos aktyvaus tobulinimo buvo grįžta XXI a., kai stipriai pradėjo tobulėti elektronikos prietaisai ir galima pakankamai efektyviai panaudoti belaidį galios perdavimą įkraunant įrenginių akumulatorius.

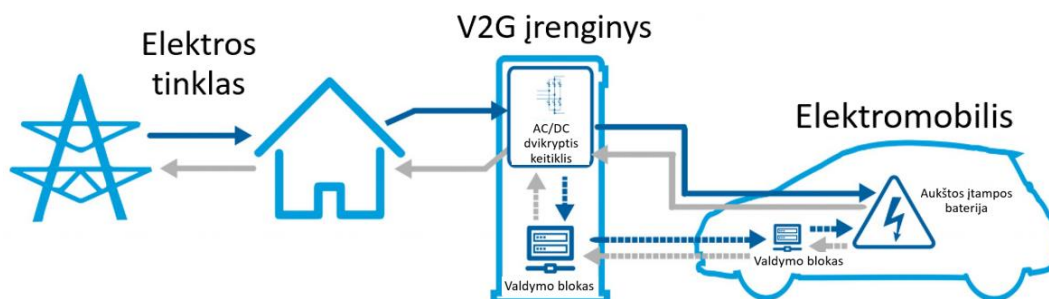
Šioje technologijoje pagrindiniai iššūkiai yra saugumas, perduodamos galios dydis, perduodamos energijos efektyvumas, kuris stipriai priklauso nuo ričių išilginio poslinkio ir oro tarpo tarp jų. Neskaitant energijos praradimo lygintuve ir inverteryje, pagrindinės problemos yra išsklaidytas magnetinis laukas, varža ritėse bei ričių nesulygiavimas viena virš kitos. Būtent ričių nesulygiavimas viena kitos atžvilgiu yra kritiškai svarbus, kadangi net kelis centimetrus prasikeičiant ritėms efektyvumas gali sumažėti iki 10 %. Šioms problemoms spręsti kuriami autonominiai asistentai padedantys tiksliai priparkuoti elektromobilį, tobulinamos ričių struktūros bei formos.

Per paskutinius penkerius metus elektromobilių skaičius sparčiai didėjo. Pasaulyje pilnai elektrinių ir įkraunamų hibridinių elektromobilių 2018 metais buvo apie 5,2 mln., o 2023 metais šis kiekis užaugo iki 40 mln., iš kurių daugiau negu pusė buvo Kinijoje [4]. 2023 metų duomenimis iš naujų parduotų automobilių Norvegijoje 93 % sudarė elektromobiliai (iš kurių 91,4 % pilnai varomi elektra), antroje vietoje buvo Švedija su 60 % parduotų naujų elektromobilių. Pasaulio mastu 2023 metais kas penktas naujai parduodamas automobilis buvo elektromobilis [4]. Iš pateiktų duomenų matoma, kad kasmet didėja poreikis plėsti elektromobilių įkrovimo tinklo infrastruktūrą, kad būtų paprasta ir greitai įkrauti elektromobilio bateriją eisme arba stovėjimo aikštelėje. Belaidžio galios perdavimo technologija padėtų išspręsti elektros tinklų infrastruktūros vystymą elektromobiliams, kadangi ne kiekvienoje vietoje yra galimybė pastatyti elektromobilio įkrovimo stotelę dėl papildomų įrenginių užimamos erdvės. Automobilių gamintojai bando kurti elektromobilius, galinčius krauti belaidžio galios perdavimo įkrovimo stotelėse, tačiau didžiausi iššūkiai lieka įkrovos greitis ir efektyvumas. Pateikiami keli automobilių gamintojų pavyzdžiai, kurie mėgina integruoti belaidžio įkrovimo technologiją ir yra sukūrę bandomuosius elektromobilius (žr. 1 lentelė).

1 lentelė. Sukurti elektromobiliai su galimybe juos įkrauti belaidžiu būdu [5]

Elektromobilis	Aprašymas
Volvo XC40 Recharge	Statinio belaidžio įkrovimo greitis virš 40 kW galios. 360 laipsnių kameros užtikrina tikslų įkrovimo pado sutapimą su imtuvu.
Nissan ir LEVC	Šie elektromobiliai naudojami kaip taksi. Keleivių laukimo zonoje gali įkrauti, o įsėdus ar išlipus klientams nereikia jungti įkrovimo laido.
Įkraunamas hibridas BMW 530e	Belaidžiu būdu gali įsikrauti 3,2 kW galia ir pilnai įkrauti bateriją per 3,5 valandos. Pilnai elektros pagalba automobilis gali nuvažiuoti iki 34 kilometrų.
Kinų sportinis sedanas Zhiji L7	Belaidžiu būdu gali įsikrauti 11 kW galia ir po valandos įkrovimo nuvažiuoja iki 80 kilometrų.
Iconiq 5	Belaidžiu būdu įkraunamas 11 kW galia.
Ford Mustang Mach-E	Bendradarbiaujant su “WiTricity” Detroito automobilių parodoje pademonstruota belaidžio įkrovimo sistema.
Audi e-tron	Belaidžio įkrovimo sistemą integruoja bendradarbiaujant su “WiTricity”.
Kenworth K270E ir K370E Class 6	Elektriniai sunkvežimiai su integruotu belaidžiu įkrovimu.

Taip pat populiarėja technologijos vystymas, kai elektromobilio elektros energiją grąžinama į elektros skirstomąjį tinklą (angl. – *vehicle to grid (V2G)*), taip skatinant naudoti belaidžio įkrovimo stoteles dėl patogesnio eksploatavimo. Šiuo būdu esant pigiai elektros energijai elektromobilis yra įkraunamas iš tinklo, o vėliau kainai padidėjus elektra atiduodama. Šiam procesui reikalingas dvikryptis keitiklis ir tam pritaikytas elektromobilis (žr. 1 pav.).



1 pav. Elektromobilio įkrovimas ir elektros atidavimas į elektros tinklą [6]

Naudotis V2G technologiją skatina svyruojanti elektros kaina, priklausomai nuo oro sąlygų, paros laiko ir kitų veiksnių. Taip pat, yra analogiška technologija, bet elektra iš elektromobilio perduodama ne atgal į elektros tinklą, o į namų tinklą (angl. – *vehicle to home (V2H)*). Toks V2H būdas supaprastina vartotojui naudotis šia technologija, kadangi nereikia pardavinėti elektros ir turėti elektros pardavimo sutarčių. Šiuo atveju bet kuriuo metu vartotojas gali naudoti pigiai nupirktą elektrą, kuri sukaupta elektromobilyje. Pavyzdžiui, Australijos tikslas sumažinti anglies dioksido kiekį siekiant „grynojo nulio“ rezultato turi viziją naudoti V2G technologiją. „Amber“ duomenimis iki 2030 m. valstybė siekia turėti 18 GW akumuliatorių pajėgumą įtraukiant elektromobilius [7]. Vidutiniškai skaičiuojama, kad vienas elektromobilis galėtų namą aprūpinti iki penkių dienų. Taip pat vertinama, kad iki 2030 m. Australijoje penki milijonai gyvenamųjų namų turės kaupiklius, tuomet bendroje sumoje su elektromobilių akumuliatorių galia siektų iki 30 GW. „Amber“ teigia, kad yra atvejų kai naudojant „Nissan Leaf“ elektromobilį kaip energijos kaupiklį buvo pardavinėjama

elektros energija kai kaina už ją siekė aukščiausios vertės ir per naktį uždirbo virš šimto eurų. Australija deda daug pastangų į šią besivystančią V2G sistemą, kuriai belaidis energijos perdavimas įkraunant elektromobilius prisidės prie greitesnio ir patogesnio V2G automatizavimo [7].

Kitas pavyzdys, Švedijoje gerai žinomame dėl savo inovacijų regione yra pasirašytas Geteborgo žaliosios miesto zonos tvarios plėtros projektas, kurio tikslas iki 2030 m. mieste pasiekti, kad transporto priemonės visiškai neišmestų teršalų. Geteborgo mieste yra veikianti taksi įmonė, kuri naudoja elektromobilius su belaidžio įkrovimo sistema. „Volvo“ kompanija yra sukūrusi elektromobilį „XC40 Recharge“, kuris turi galimybę būti įkrautas belaidžiu būdu [8].



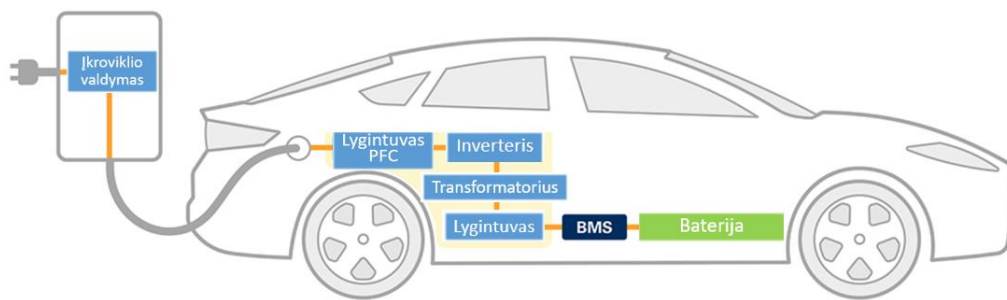
2 pav. Taksi elektromobiliai „Volvo XC40 Recharge“ įkraunami belaidžiu būdu, kol laukiami keleiviai [8]

Tinkamą ričių padėtį sulygiuoti padeda nustatyti „Volvo“ 360 laipsnių kamerų sistema. Taksi vairuotojams tai labai patogus būdas įkrauti elektromobilius neišlipant iš transporto priemonės, įsėdus keleiviams nereikia atjungti įkrovimo kabelio, todėl gali iš karto važiuoti. Šio elektromobilio maksimali įkrovimo galia yra 40 kW, kas yra nepilnai keturis kartus greitesnis įkrovimas negu įprastas 11 kW kintamos srovės laidinis įkrovimas. Pagal straipsnio duomenis, šis taksi naudojamas „Volvo XC40 Recharge“ per metus nuvažiuoja daugiau kaip 100 tūkst. kilometrų ir yra naudojamas virš 12 valandų per parą [8].

1.1.1. Skirtumai tarp įprasto ir belaidžio įkrovimo

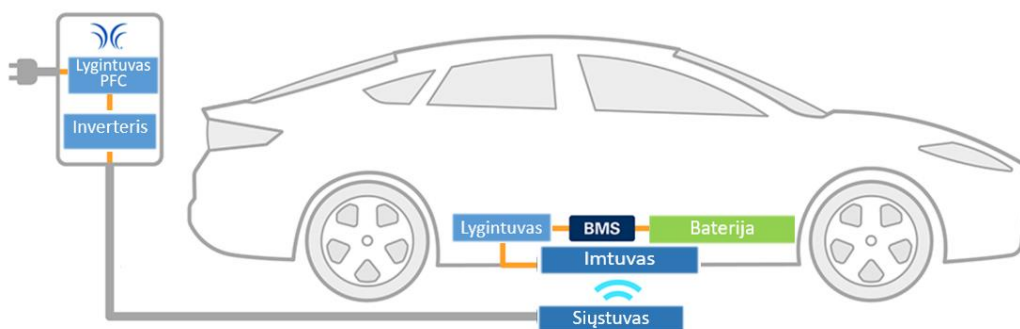
Belaidžio įkrovimo idėja kilo siekiant supaprastinti vairuotojams elektromobilių eksploatavimą bei įkrovimo stotelių priežiūrą. Vairuotojui nereikia prijungti kabelio ar jo vežiotis nesant kabelio įkrovimo stotelėje, nekyla problemų su nupjaunamais stotelių kabeliais. Taip pat šis būdas pravartus autonominiams elektromobiliams, kadangi jie galėtų patys įsikrauti be žmogaus pagalbos. Pavyzdžiui, vairuotojui išlipus iš elektromobilio jis pats galėtų prisiparkuoti laisvoje įkrovimo stotelėje ir įsikrauti reikalingą elektros energijos kiekį. Vartotojui grįžus elektromobilis jau būtų įkrautas iki nustatytos ribos, o žmogus net nepastebėtų, kad vyko įkrovimo procesas.

Apžvelkime skirtumus tarp įprasto ir belaidžio įkrovimo būdų. Abu įkrovimo būdai nėra 100 % efektyvūs, kadangi energijos praradimas išsiskiria šilumos pavidalu, nuostoliai keičiant srovę iš kintamosios į nuolatinę. Įkraunant elektromobilį kabeliu, lėto krovimo stotelės valdiklis reguliuoja srautą ir perduoda per kabelį kintamą elektros energiją. Tuomet lygintuvas su galios koeficiento korekcija (angl. *power factor correction (PFC)*), kuri padeda efektyviau panaudoti energiją, keičia į nuolatinę srovę, o inverteris sukuria aukšto dažnio kintamą srovę. Toliau transformatorius užtikrina elektrinę izoliaciją, o lygintuvas paverčia aukšto dažnio kintamą srovę į nuolatinę ir per baterijos valdymo sistemą (angl. *battery management system*) įkraunamas elektromobilio akumuliatorius [9] (žr. 3 pav.).



3 pav. Laidu įkraunamo elektromobilio galios perdavimo iš elektros tinklo į bateriją schema [9]

Tačiau belaidžio įkrovimo stotelėje prieš kintamai elektros energijai patenkant į elektromobilį srovė lygintuve su PFC keičiama į nuolatinę. Tuomet inverteris sukuria aukšto dažnio kintamą srovę, kuri per siųstuvo ritę perduodama oru į elektromobilio priėmimo ritę. Toliau srovė lygintuvu pakeičiama į nuolatinę ir per baterijos valdymo sistemą įkraunamas akumuliatorius [9] (žr. 4 pav.). Taip pat, laidu įkraunant elektromobilį informacijos ryšio kabelis įmontuotas į patį kabelį ir informacija perduodama per tą pačią jungtį. Belaidžio galios perdavimo technologijoje informacija turi būti perduodama oru, todėl reikalinga ir ryšio perdavimo įranga.



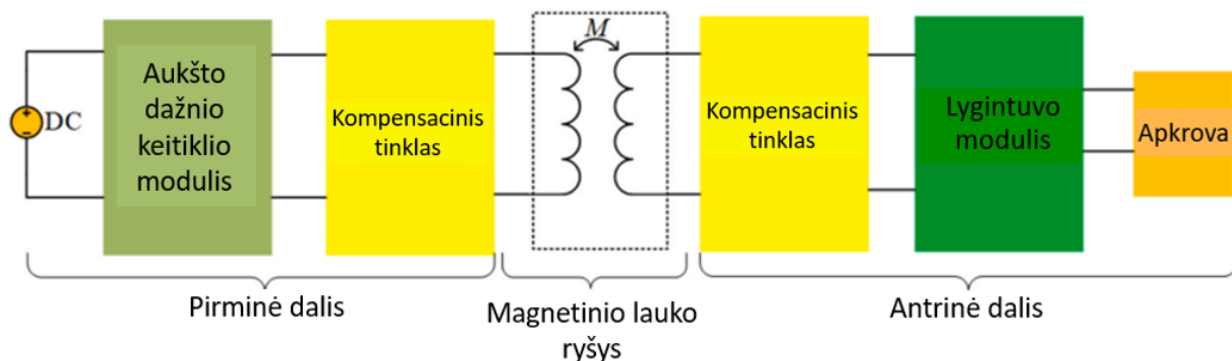
4 pav. Belaidžiu būdu įkraunamo elektromobilio galios perdavimo iš elektros tinklo į bateriją schema [9]

Belaidžio įkrovimo stotelėse perduodamos energijos efektyvumas mažėja iki 12 % [9]. Tačiau yra įžvalgų, kad panaudojus saulės energijos pagamintą nuolatinės elektros energiją nekeisti į kintamą 50 Hz dažnio įtampą, o iš karto keisti į aukštesnio dažnio įtampą, kuri tinka belaidžiam galios perdavimui, taip būtų dar padidintas efektyvumas per 1-2 %. Taip pat, įkraunant laidu esamas kabelis iki elektromobilio gali stipriai įkaisti nuo saulės spindulių, kas padidina varžą, todėl įkrovimo efektyvumas mažėja. Belaidžio įkrovimo stotelės užima mažiau vietos stovėjimo aikštelėje, kadangi siųstuvo ritės įrengiamos dangoje ir nereikia prie kiekvieno elektromobilio įrengti po įkrovimo stotelę. Tai ypač svarbu vis didėjant automobilių skaičiui, nes dažna problema dėl laisvų parkavimo vietų trūkumo.

1.2. Belaidžio įkrovimo principai

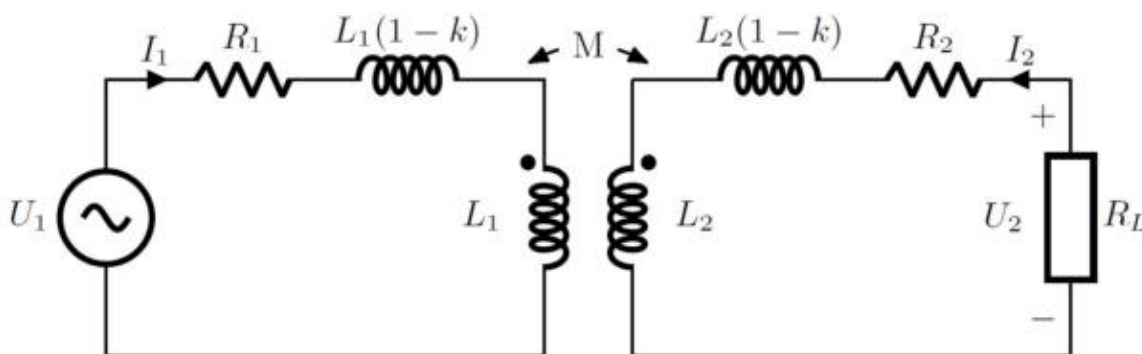
Indukcinis galios perdavimas (IPT) ir talpinis galios perdavimas (CPT) daugiausia naudojami trumpojo ir vidutinio nuotolio belaidžiui elektros energijai perduoti, o jų perdavimo efektyvumas gali siekti daugiau nei 90 % [10]. Esant dideliui perdavimo atstumui, IPT ir CPT energijos perdavimo efektyvumas žymiai sumažėja [11]. Siekiant užtikrinti energijos perdavimą, energijai perduoti yra siūloma ilgojo nuotolio radijo dažnio signalai. Nepaisant neefektyvaus tolimojo lauko belaidžio energijos perdavimo, pagrįsto elektromagnetinėmis bangomis, dažniausiai naudojami mažos galios

mobilieji įrenginiai, pavyzdžiui, klausos aparatų įkrovimui. Sparti radijo dažnių energijos surinkimo technologijos plėtra suteikė naujų galimybių maitinti mažos galios įrenginius [11]. Kai jie įkraunami naudojant radijo dažnio energiją, mažos galios įrenginiai gali veikti be baterijų arba su mažos talpos baterijomis. Ši energijos surinkimo technologija suteikia geresnę naudą aplinkai ir leidžia mažos galios įrenginiams turėti ilgesnį tarnavimo laiką ir patikimą maitinimo šaltinį [11].



5 pav. Indukcinės galios perdavimo sistemos blokų schema [11]

Okasili'is ir kt. (2022) straipsnyje [12] pagrindinį dėmesį skiria belaidėms energijos perdavimo (WPT) sistemoms, kuriose naudojamas indukcinis ryšio metodas. Induktyviai susietos galios perdavimo (ICPT) sistemose belaidžiam energijos perdavimui panaudojamas induktoriumi tekančios kintamosios srovės sukuriamas kintamasis magnetinis laukas [12]. Tipiška belaidės galios perdavimo sistema susideda iš pirminės ir antrinės induktyvinių ričių. Pradžioje sistema apima buitinio tinklo įtampos išlyginimą, o DC-DC konvertavimas vyksta su galios koeficiento korekcija (PFC), kad į sistemą būtų tiekiamas tinkama įtampa ir dažnis. Pirminėje sistemos pusėje yra keitiklis, skirtas sukurti reikiamą kintamosios srovės bangos formą, kad būtų galima valdyti susietą indukcinį tinklą. Kompensavimo schemas naudojamos abiejose induktorių pusėse. Inverterio aukšto dažnio išėjimas yra naudojamas magnetiniam laukui generuoti iš pirminės apvijos, kuri indukuoja kintamąją srovę antrinėje apvijoje. Naudojamą dažnį galima pasirinkti taip, kad jis rezonuotų su antrine dalimi, kad būtų žymiai pagerintas galios perdavimas ir efektyvumas. Tuomet kintama srovė pakeičiama į nuolatinę, kad būtų įkrauta baterija [12].



6 pav. Pagrindinė indukcinė galios perdavimo sistema su induktyvumo nuotėkiu [12]

Nors ICPT veikimo principas yra dalinai panašus į transformatoriaus veikimo principą, tačiau reikšmingas skirtumas, kad visiškai nėra feromagnetinės šerdies. Taip pat, tarp pirminės ir antrinės apvijų yra didelis oro tarpas. Taigi veikimo principai skiriasi, nes ryšio koeficientas yra daug mažesnis nei 1. Sistemos veikimas labai priklauso nuo abipusio induktyvumo M . Nuo abipusio

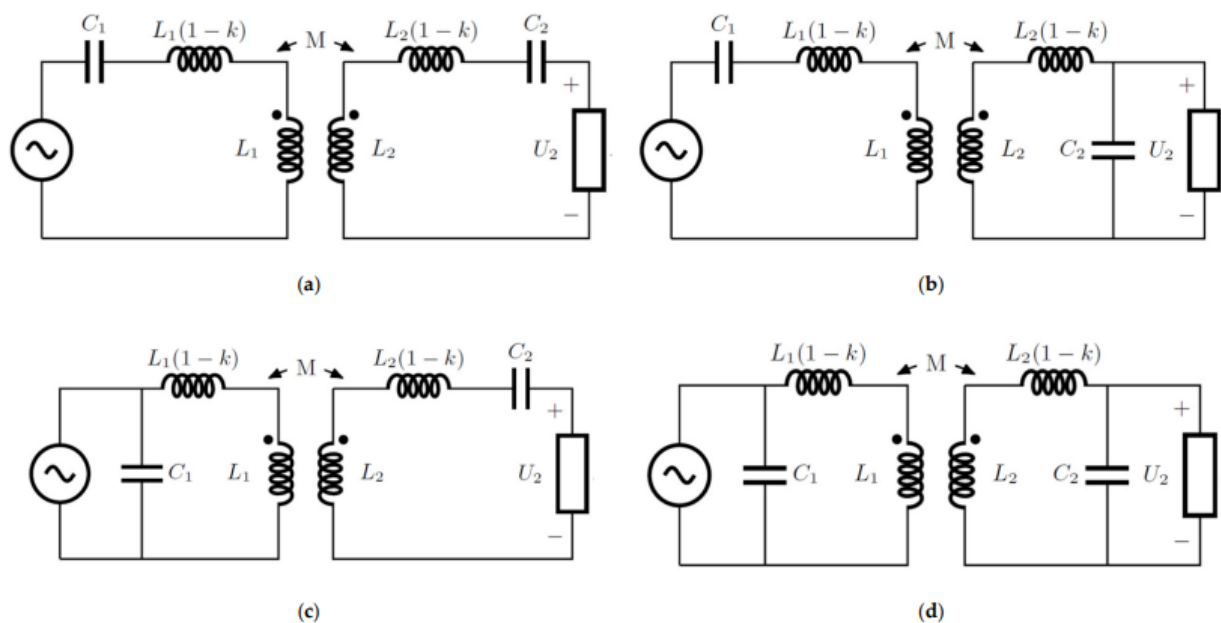
induktyvumo ir savojo induktyvumo priklauso ryšio koeficientas, kuris žymimas k [12]. Ryšio koeficiento formulė:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}; \quad (1)$$

čia – k gali būti bet kokia reikšmė nuo 0 iki 1, $0 \leq k \leq 1$. Ryšio koeficientas apibūdina vienoje ritėje tekančios srovės sukurto magnetinio srauto dalis verianti kitą ritę. 6 paveiksle pavaizduota pagrindinė indukcinė galios perdavimo sistema (žr. 6 pav.).

1.3. Kompensacinės schemas

Belaidis galios perdavimas priklauso nuo indukcinų ričių kaip galios perdavimo priemonės, todėl svarbu tinkamai parinkti kompensacinę grandinę. Belaidžiam galios perdavimui būtina papildomai panaudoti kompensuojančius kondensatorius, kad būtų sudaromos rezonansinės grandinės siūstuvo ir imtuvo pusėse. Dėl oro šerdies gali atsirasti srauto nuostoliai, parodytuose 6 ir 7 paveiksluose kaip $L_x(1 - k)$, todėl sistema neveikia efektyviai [12]. Efektyvumo didinimui reikia suderinti grandinės rezonanso dažniui, tuomet talpumo ir induktyvumo pilnutinės varžos kompensuoja viena kitą. Tam būtina parinkti tinkamą talpumą ir induktyvumą pasirinktam žadinimo dažniui. Kompensacija naudojama siekiant kompensuoti savitąjį induktyvumą ir pagerinti sistemos veikimą. Sistemose, kuriose ryšio koeficientas $k > 0,5$, kaip tradiciniame transformatoriuje su ferito šerdimi, kompensacinė talpa turėtų rezonuoti su nuotėkio induktyvumu. Tačiau su oro šerdimi sistemoje, kai $k < 0,5$, kompensacinė talpa turėtų rezonuoti su savaiminiu induktyvumu, kad būtų pasiektas nulinės fazės kampas ir būtų sumažinta atspindėtos varžos reaktyvioji dalis. Mokslininkai taip pat nustatė, kad kompensacijos priėmimas leido kontroliuoti ir kitus parametrus. Pirminėje pusėje kompensacija gali būti naudojama siekiant sumažinti varžos reaktyviąją dalį ir pasiekti nulinės fazės kampą, kad aktyvioji galia atitiktų reaktyviąją galią [13]. Antrinėje pusėje yra sukurta rezonanso kompensacija, siekiant maksimaliai padidinti galios perdavimą. Kompensacija taip pat naudojama minkštajam perjungimui naudojant nulinės įtampos perjungimą arba nulinės srovės perjungimą, siekiant sumažinti keitiklio galios praradimą. Pastovią srovę ir nuolatinę įtampą taip pat galima realizuoti kompensuojant [13]. Tai gali būti naudojama norint žymiai pagerinti įkrovimą, todėl nuo apkrovos nepriklausomas veikimas yra labai pageidautina elektromobilio akumulatoriaus įkrovimo savybė [12].



7 pav. Keturios pagrindinės kompensavimo topologijos: (a) SS, (b) SP, (c) PS ir (d) PP [12]

Taip pat kompensavimo grandinės pagalba galima sumažinti iki minimalios vertės reikiamo maitinimo šaltinio galią, be to siūstuvu grandinėje didinamas sistemos efektyvumas. Priklausomai nuo parinktų kompensuojančiųjų kondensatorių prijungimo būdo galima išskirti keturias pagrindines kompensavimo schemas, kurios pavaizduotos 7 paveiksle. Tai yra SS, SP, PS ir PP, kur „S“ (angl. *serial*) reiškia nuoseklų, o „P“ (angl. *parallel*) lygiagrečių jungimą. „S“ arba „P“ išdėstymo tvarka reiškia, kad jie gali būti abiejose sistemos pusėse. Schemų skirtumai yra kompensavimo komponentų išdėstyme ir sujungimo eigoje. Song'o ir kt. (2018) ir Zhang'o ir kt. (2014) šios kompensavimo schemas buvo plačiai ištirtos ir nustatyta, kad SS ir SP yra palankesnės belaidžiam galios perdavimui iš pagrindinių schemų, su tam tikromis išlygomis [14, 15].

SS topologija gera tuo, kad rezonansinio kontūro dažnis ir kondensatorių vertės yra nepriklausomos nuo apkrovimo kaitos ir abipusio induktyvumo, tačiau priklauso nuo ričių induktyvumų. Šis būdas yra labai tinkamas dinaminiam elektromobilių krovime, kadangi šiuo atveju ryšio koeficientas dažnai kinta, nes keičiasi ričių padėtis ir stipriai kinta priklausomai nuo akumuliatoriaus įkrovimo lygio. PS ir PP atveju, kai ritės nėra sulygiuotos arba nėra imtuvo, perduodama maža galia, todėl siūstuvo ritė veikia ne pilna galia. Taip pat, siūstuvo pusė stipriai priklauso nuo ryšio koeficiento ir apkrovos dydžio. Taigi, PS ir PP topologijos negali efektyviai perduoti energijos, kai abi ritės yra nesulygiuotos. SP topologijos grandinėje siūstuvo pusės kondensatorius yra nepriklausomas nuo apkrovos, todėl galima gauti geresnį energijos perdavimo koeficientą, tačiau šiuo atveju reikia atsižvelgti į ryšio koeficientą [16].

SS ir SP kompensavimo topologijos yra tinkamos norint sumažinti reikiamą maitinimo šaltinio pajėgumą. SP kompensacija elektromobilių įkrovimui yra palankesnė, nes Okasali'o ir kt. (2022) buvo nustatyta, kad įtampa tiekama SP schemai turi nuo apkrovos nepriklausomą išėjimo įtampos charakteristiką [12]. Tačiau kai SS ir SP veikia su įtampos šaltiniu ir nesant ryšio koeficientui atveju ($k = 0$), kurią sukelia netinkamai suderintos ritės arba dideli oro tarpai, gali būti nesaugu maitinimo šaltiniui [17]. Pagrindinis schemų tikslas yra pasirinkti kompensacinę talpą, kad būtų pašalintas sklaidos induktyvumas ir būtų galima perduoti didžiausią galią. Kadangi apkrovai reikalinga pastovi

įtampa, ji gali būti modeliuojama kaip pastovi varža. Atspindėta reaktyvioji varža paprastai yra induktyvioji, todėl į tai turėtų būti atsižvelgta atliekant bet kokią kompensavimo schemą [12].

1.4. Ričių formų palyginimas

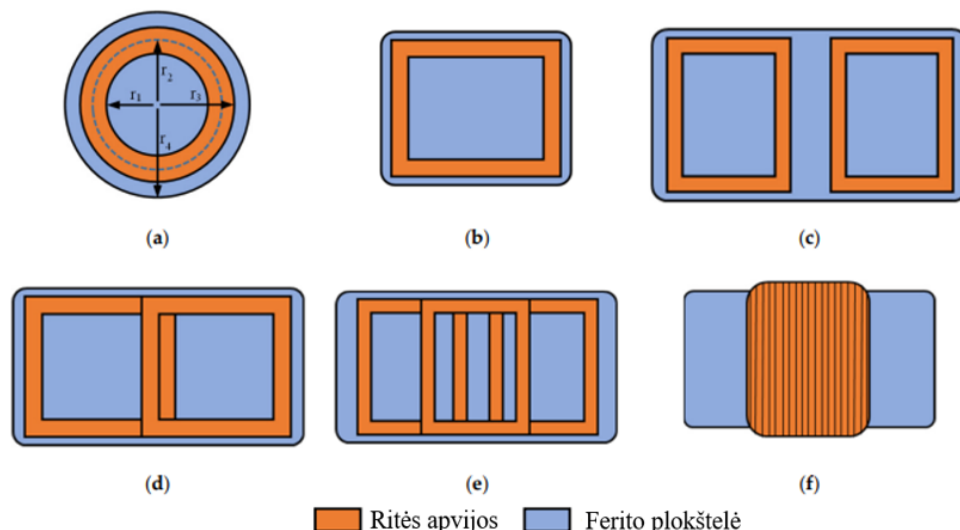
Norint užtikrinti efektyvią indukcinę galios perdavimo sistemą, būtina išlaikyti tinkamą pirminės ir antrinės ritės lygiavimą. Poslinkis gali atsirasti tarp įkrovimo ričių horizontalioje, vertikalioje ir kampinėje formoje [18]. Ritės poslinkio problemos kyla įvairiose situacijose, todėl veikimo metu pasikeičia abipusis induktyvumas, efektyvumas ir išėjimo galia. Didžiausios nesutapimo problemos atsiranda netinkamai pastatant elektromobilį ir nesuderinus pirminę ir antrinę rites. Šis ričių nesutapimas padidina magnetinio srauto sklaidą, impedanso verčių neatitikimus ir abipusio induktyvumo mažėjimą. Tačiau maksimalų galios perdavimo efektyvumą galima pasiekti pagerinus kokybės koeficientą Q ir ryšio koeficientą k [18].

Belaidžiam galios perdavimo sistemoje svarbiausias energijos perdavimo proceso aspektas yra ritės. Be ričių sukuriama magnetinio lauko nepavyktų saugiai perduoti elektros energijos oru, todėl šis principas priverčia perduoti galią oru ir ričių konstrukcija yra neatsiejama sistemos veikimo dalis. Ritės kokybės faktorius yra pagrindinis bendros sistemos efektyvumo projektavimo veiksnys [12]. Šiuolaikinės sistemos veikia apie 85 kHz diapazone, todėl apvijoms naudojami aukštam dažniui pritaikyti Litz laidai, nes jų nuostoliai yra mažesni, palyginti su tradiciniu variniu laidu [12]. Sistemos ryšio koeficientas daro didelę įtaką našumui, taip pat stacionariame ir dinamiame įkrovime šis aspektas yra labai svarbus [12].

Pirma, turi būti tinkamai suderintos siųstuvo ir imtuvo ritės. Ši būseną reikalauja tikslios padėties iš vairuotojo arba mechaninio išlyginimo sistemos su pirmine ir antrine apvijomis. Tai yra pagrindinis IPT sistemos trūkumas – toleruoti išilginio poslinkio problemas ir išlaikyti įvairių ryšio faktorių efektyvumą. Antra, naudojant įvairių formų įkrovimo padų ir ričių konstrukcijas siekiama sumažinti nesutapimo problemas, pavyzdžiui, kūgio, bendraašio, lanko, žiedo formos ritės [18]. Apsaugos nuo nesutapimo metodai gali būti pasiekti naudojant fazinio kampo optimizavimą, subalansuotų dalelių masės optimizavimo metodą ir elektromagnetinės indukcijos padėties jutiklius. Fazinio kampo optimizavimo metodas toleruoja nesutapimus nuo -200 mm iki $+200$ mm. Remiantis elektromagnetinės indukcijos padėties jutiklių išvestimi, varikliai gali išlygiuoti siųstuvo ir imtuvo rites. Galiausiai, dėl didelio oro tarpo tarp pirminės ir antrinės ritės naudojami tinkami elektriniai manipuliavimo būdai, pavyzdžiui, kompensavimo topologijos [18].

Naudojant baigtinių elementų analizės metodą, lengviau nustatyti konkrečios konstrukcijos ritės išskirtą magnetinio lauko kiekį ir ritės temperatūrą. Siekiant pašalinti pagrindinių šerdies formų trūkumus, naudojamos įvairios šerdies arba rezonatoriaus formos. Struktūra yra sudaryta iš dviejų tipų plokščių ritinių: poliarizuotų padų (PP) ir nepoliarizuotų padų. PP gali būti DDQ, DDQP, bipoliarinės (BP). Ritės sukuria lygiagretų ir statmeną magnetinį srautą [18]. Nepoliarizuoti padai yra vieno sluoksnio, tokios kaip apskritos ir stačiakampės. Jie gali leisti magnetiniam srautui sklisti vertikalia kryptimi. Rayan'o ir kt. (2023) buvo aptarti įvairūs ričių dizainai, struktūros ir formos, taip pat jų efektyvumas ir modeliavimas [18]. Tyrime buvo įdiegta 2 kW galios belaidžio galios perdavimo sistema su 700 mm oro tarpu tarp ričių. Pridėjus papildomų pirminių apvijų, galima paprastai pagerinti pirminės ir antrinės ričių sąsają. Plastikinės medžiagos gali būti naudojamos belaidžiam galios perdavime išorinei apsaugai ritės konstrukcijose. Aliuminio ekranavimas sulaiko ritės magnetinį srautą ir apsaugo aplinką nuo elektromagnetinio lauko, spinduliuojamo iš ritės.

Lyginant srauto ryšį tarp apskritos ir stačiakampės ritės teigiama, kad esant nedideliam oro tarpui apskritos ritės turi didesnę perdavimo efektyvumą [18]. Tačiau apvalios ritės turi tam tikrų trūkumų didinant oro tarpą tarp ričių, t.y. nesunkiai galima pasiekti didesnę efektyvumą esant mažam oro tarpui, kuris nėra tinkamas elektromobilių krovimui. Tačiau jei oro tarpas padidinamas du kartus, skersmuo turi būti padidintas keturis kartus. DD, DDQ, DDQP ir BP analizuojami siekiant pašalinti apskritų ričių trūkumus. Statiniam ir dinaminiam įkrovimui gali būti naudojamos visų tipų ritės. Sistemos efektyvumas priklausys nuo generuojančio magnetinio srauto krypties ir intensyvumo bei jo išlyginimo. Rayan'as ir kt. (2023) teigia, kad apvalios ritės netinka dinaminiam įkrovimui, kadangi horizontalus ritės poslinkis sudaro 38 % [18].



8 pav. Belaidžių galios perdavimo sistemų, skirtų elektromobilių baterijų įkrovimui, ričių konstrukcijos, įskaitant ferito galines plokšteles: a) apvali ritė; b) plokščia kvadratinė ritė; c) DD ritė; (d) bipoliarinė ritė (BPP); e) DDQ ritė; f) solenoido ritė [12].

Pagrindinės belaidžio galios perdavimo sistemų ričių formos yra apskritimas ir stačiakampis. Tradicinė ir dažniausiai minima yra apvali ritė (žr. 8(a) pav.) [12]. Apvalių ričių konstrukcijai didelę įtaką daro šerdis, vietoje kurios belaidžiam galios perdavimo sistemoje naudojamas oro tarpas. Tai ne visada gali būti visiškai tinkama, nes dažniausiai sistemos yra pritaikytos naudoti feritą ritės struktūroje magnetiniam srautui nukreipti [12]. Kaip matyti 8 paveiksle, feritas yra už ritės. Be to, dažniausiai prie jo pridedama papildoma aliuminio galinė plokštelė, apsauganti nuo elektromagnetinio lauko spinduliuotės. Ferito naudojimas taip pat turi reikšmę ritės induktyvumui, keičiant kokybės koeficientą [12]. Knaisch K. ir kt. (2016) [19] nustatė, kad su apvaliomis ritėmis padas, naudojant feritą, kaip parodyta 8(a) paveiksle, tenkina šią sąlygą:

$$x = \frac{r_2}{r_4}; r_2 = \frac{r_1 + r_3}{2}; \quad (2)$$

čia – r_1 yra atstumas nuo pado centro iki vidinės apvijos perimetro, r_2 yra atstumas nuo pado centro iki apvijos vidurio, r_3 yra atstumas nuo pado centro iki išorinės perimetro apvijos, o r_4 yra ferito pado spindulys. x reikšmė naudojama kitoje lygtyje, norint rasti magnetinį srautą, susidarantį iš perdavimo ritės į priėmimo ritę. Lygtyje ji rodoma kaip $x^2(1-x^2)$, kur šis koeficientas turėtų būti maksimizuotas [12].

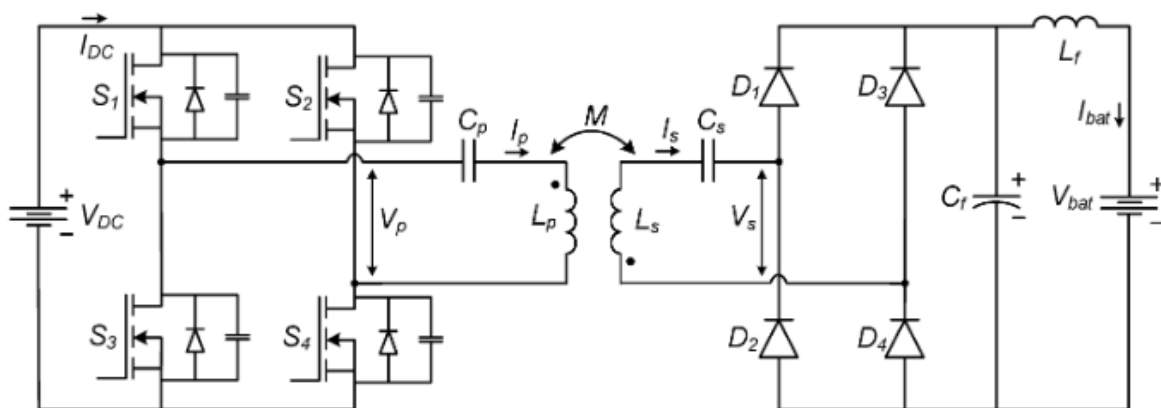
Budhia ir kt. (2010) buvo apžvelgę plokščiosios solenoidinės ritės struktūrą, pavaizduotą 8(f) paveiksle [20]. Ši konstrukcija parodė patobulintą ryšio koeficientą, šoninio poslinkio toleranciją ir

trumpą apviją, kurie sumažina esamus nuostolius. Nors ši struktūra turi pranašumų, tačiau joje yra per didelė elektromagnetinio lauko spinduliuotė. Sistema generuoja srautą abiejose ričių pusėse, todėl galimas sujungimas su kitais laidininkais, kuris mažina efektyvumą ir didina indukcinį automobilio važiuoklės šilumą, todėl sistemai reikės didesnio ekranavimo. Įvertinus tai, šiuo būdu daugeliu elektromobilių įkrovimo atvejų trūkumai nusvėrė privalumus, todėl šiame darbe solenoido ritės nebus tyrinėjamos.

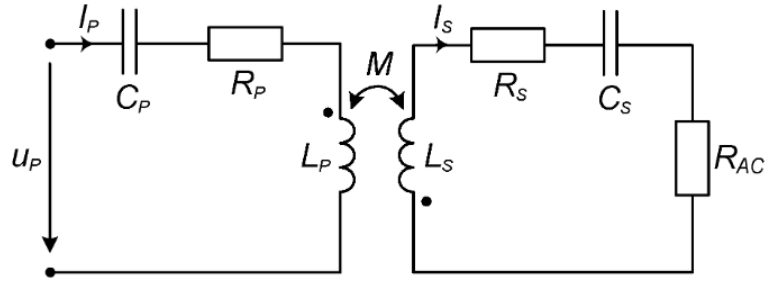
DD formos ritės aptaria Budhia ir kt. (2013), tai dvi sujungtos kvadratinės ritės, kurios išdėstytos viena šalia kitos (žr. 8(c) pav.) [21]. DD padas turi didesnę įkrovimo plotą nei apvalus padas su panašiomis medžiagų savybėmis, geresne išilginio poslinkio paklaida ir galimybe perduoti energiją 200 mm atstumu. Siekiant dar labiau padidinti DD ričių poveikį horizontaliam nesutapimui, topologijoje naudojama papildoma kvadratinė ritė, pavadinta Q rite, taip gaunamas DDQ padas, kuris parodytas 8(e) paveiksle. Atliktame Zaheer'o ir kt. (2012) tyrime buvo išbandytas dvipolis imtuvo blokas su DDQ imtuvu, kai buvo veikiamas DD ir apskrito pado siūstuvais [22]. Buvo nustatyta, kad DDQ imtuvas per DD padą suteikia didesnę įkrovimo zoną nei DDQ imtuvas per apskritą siūstuvą. Taip pat buvo siūlytas DD padas, žinomas kaip bipolinis padas (BPP), kuris vaizduojamas 8(d) paveiksle. BPP padas savo dizainu skiriasi nuo DD pado, nes turi didesnes D apvijas, kurios persidengia viena su kita. BPP pasižymi panašiomis savybėmis kaip ir DDQ, tačiau papildoma nauda – sunaudojama maždaug 25 % mažiau vario [22]. Dar buvo nagrinėjamas DD ir bipolinio pado atsparumas horizontaliam poslinkiui ± 300 mm diapazone, kur nustatyta, kad sistemos ryšio koeficientas buvo nuo 0,18 iki 0,31. Taip pat parodyta galimybė perduoti 8 kW galią esant 200 mm oro tarpui, kurio efektyvumas buvo 95 % [23].

1.5. Ryšio ir naudingumo koeficiento priklausomybės belaidžiam įkrovimui

Belaidės galios perdavimo sistema paprastai projektuojama ir optimizuojama atsižvelgiant į jos efektyvumą, galios perdavimo galimybes ir ričių jautrumą poslinkiui viena kitos atžvilgiu [12]. Efektyvumas yra vienas iš svarbiausių didelės galios belaidžio įkrovimo sistemos parametrų ir gali būti analizuojamas analitiškai pagal ekvivalentinę belaidžio galios perdavimo sistemos schemą, pavaizduotą 9 paveiksle. Ekvivalentinė schema pateikiama 10 paveiksle.



9 pav. Tipinės indukcinės galios perdavimo (IPT) sistemos grandinės schema [12]



10 pav. Ekvivalentinė IPT sistemos schema [12]

Grandinės veikimas aprašomas lygčių sistema pagal antrąjį Kirchhofo (įtampos) dėsnį:

$$\begin{cases} V_p = I_p \left(j\omega L_p - \frac{1}{j\omega C_p} + R_p \right) + I_s j\omega M; \\ V_m = I_s \left(j\omega L_s - \frac{1}{j\omega C_s} + R_s \right) + I_s R_{AC}; \end{cases} \quad (3)$$

čia V_p yra pirminė (šaltinio) įtampa, o V_m yra antrinėje ritėje indukuota įtampa. I_p ir I_s yra pirminės ir antrinės ričių srovės, R_p , R_s , L_p , L_s yra pirminės ir antrinės ričių varžos ir induktyvumas, C_p , C_s yra atitinkamai pirminio ir antrinio kompensacinių kondensatorių talpos, M yra abipusis induktyvumas, ω kampinis dažnis. Antrinėje ritėje indukuota įtampa $V_m = j\omega M I_p$, o R_{AC} yra apkrovos varža, atitinkanti elektromobilio akumuliatorių, matoma antrinės ritės kintamosios srovės pusėje [24].

$$R_{AC} = \frac{8}{\pi^2} R_{bat} = \frac{8}{\pi^2} \times \frac{V_{bat}}{V_{bat}}. \quad (4)$$

Naudingumo koeficientas tarp ričių, neįskaitant keitiklio ir lygintuvo nuostolių, išreiškiamas pagal (3) lygtį:

$$\eta = \frac{P_L}{P_1} = \frac{\omega^2 M^2 R_{AC}}{R_p \left((R_s + R_{AC})^2 + \left(\omega L_s - \frac{1}{\omega C_s} \right)^2 \right) + \omega^2 M^2 (R_2 + R_{AC})}. \quad (5)$$

Kaip matyti iš šios lygties, ritės efektyvumas yra ričių varžų, antrinės pusės reaktanso (jei jis nėra visiškai kompensuotas), kampinio dažnio, apkrovos varžos ir abipusio induktyvumo funkcija. Atsižvelgiant į abipusio induktyvumo M ir ryšio koeficiento k (1) santykį efektyvumas gali būti išreikštas kaip ryšio koeficiento funkcija:

$$\eta = \frac{P_L}{P_1} = \frac{\omega^2 k^2 L_p L_s R_{AC}}{R_p \left((R_s + R_{AC})^2 + \left(\omega L_s - \frac{1}{\omega C_s} \right)^2 \right) + \omega^2 k^2 L_p L_s (R_2 + R_{AC})}. \quad (6)$$

Optimali apkrova randama diferencijuojant (6) išraišką R_{AC} atžvilgiu, kai antrinės pusės induktyvumas visiškai kompensuojamas $\omega L_s - \frac{1}{\omega C_s} = 0$. Optimalios apkrovos varžos išraiška yra [24]:

$$R_{AC,opt} = R_s \sqrt{1 + k^2 Q_p Q_s}; \quad (7)$$

čia Q_p ir Q_s yra atitinkamai pirminės ir antrinės ričių kokybės koeficientai.

$$Q = \frac{w * L}{R}. \quad (8)$$

Didžiausias pasiekiamas ritės ir ritės tarpusavio efektyvumas yra [25]:

$$\eta_{max} = \frac{k^2 Q_p Q_s}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_p Q_s})^2}. \quad (9)$$

Akumulatoriai yra dinaminės apkrovos, todėl varža R_{AC} priklauso nuo įkrovimo grandinės darbo taško. DC/DC keitikliai kartu su valdymo grandinėmis taikomi siekiant suderinti optimalų rezultatą. Jie užtikrina didžiausią efektyvumą konkrečios būsenos apkrovos atžvilgiu. Didžiausias pasiekiamas ričių tarpusavio efektyvumas, atitinkantis optimalią apkrovą, priklauso nuo ryšio koeficiento ir ričių kokybės koeficientų (9). Norint pasiekti didžiausią efektyvumą, šie parametrai turi būti kuo didesni.

1.6. Statinis ir dinaminis belaidis įkrovimas

Indukcinio galios perdavimo ričių sistema susideda iš pirminės arba perdavimo ritės ir yra antrinės arba priėmimo ritės. Perdavimo ritė yra fiksuota ir prijungta prie tinklo per reikiamus galios keitiklius, o imtuvas priima energiją indukciniu būdu ir perduoda į akumulatoriaus apkrovą. Pagrindinis maitinimo šaltinio reikalavimas pirminei ritei, tai yra perduoti aukšto dažnio energiją (kHz), kad būtų užtikrintas aukštas energijos perdavimo efektyvumas. Šioje sistemoje perduodamą energiją priima priėmimo ritė, kuri yra pritvirtinta transporto priemonės apačioje. Galios perdavimo metu belaidžiu būdu ir perdavimo, ir paėmimo ritės yra magnetiškai sujungtos viena su kita. Antrinė ritė yra susieta su transporto priemonės akumulatoriaus įkrovimo sistema. Tokioje sistemoje tarp pirminės ir antrinės ritės yra didelis oro tarpas, todėl ryšio koeficientas sumažėja [26].

Atsižvelgiant į akumulatoriaus krovimą, gali būti dviejų tipų belaidžio įkrovimo būdai: vienas yra stacionarus, kuris vadinamas statiniu galios perdavimu, o kitas yra elektromobilio įkrovimas važiuojant, tai yra dinaminis belaidis galios perdavimas (DWPT).

Statinis belaidis galios perdavimas reiškia energijos perdavimą stacionariai, kai abi sujungtos ritės yra fiksuotos ir tiksliai sulygiuotos viena su kita. Pavyzdžiui, šis būdas taikomas mobiliųjų telefonų, biomedicinos prietaisų, elektrinių transporto priemonių įkrovimui. Transporto priemonių atveju belaidžio įkrovimo stotelės sąranka gali būti įrengta automobilių stovėjimo aikštelėse, kur elektromobilis ilgai stovi ir gali būti įkraunamas. Perdavimo ritė kartu su maitinimo bloku yra sumontuota ant pagrindo ar įmontuota grindinyje, sujungta su elektros tinklu. Priėmimo ritė yra sumontuota elektromobilio dugne, kad galėtų priimti galią, perduodamą indukciniu būdu perdavimo ritės. Ši ritė tiekia gautą energiją į transporto priemonėje sumontuotą akumuliatorių. Minėtas belaidžio įkrovimo patogumas skatina elektromobilių naudojimą rinkoje, tačiau dėl mažesnės perduodamos galios efektyvumo ir greičio statinis belaidis įkrovimas užtrunka ilgiau negu įprastas laidinis įkrovimas.

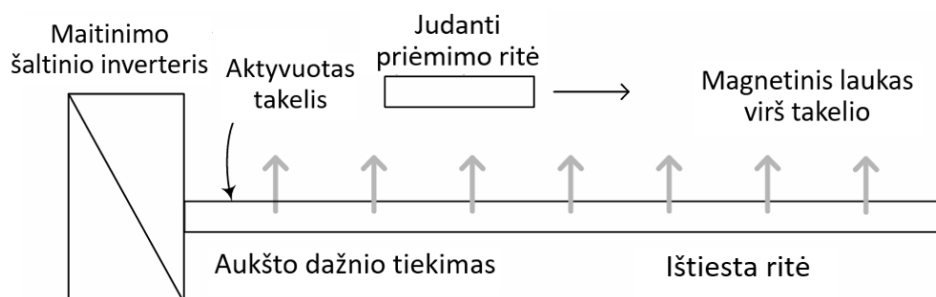
Belaidis įkrovimas suteikia daugiau komforto ir lankstumo, tačiau net ir po statinio įkrovimo technologijos elektromobiliams vis dar kyla didelių sunkumų plėstis rinkoje. Be įkrovimo problemų, svarbus veiksnys yra elektromobilio akumulatorius dėl savo dydžio, svorio ir kainos. Akumuliatorių technologijos pažanga padėjo sumažinti baterijos dydį ir padidinti energijos tankį, tačiau vis tiek tai nedaro didelės įtakos elektromobilių pardavimams. Norint, kad vidaus degimo transporto priemonės būtų mažiau paklausios negu elektromobiliai, vienas iš būdų yra sutrumpinti elektromobilių įkrovimo laiką, kuris būtų toks pats patogus, kaip ir automobilio papildymas iškastiniu kuru.

Visas minėtas kliūtis galima išspręsti, jei būtų įmanoma įkrauti elektromobilio akumuliatorių dalyvaujant eisme. Ši priemonė gali pašalinti nepakankamai nuvažiuojamo nuotolio riziką, susijusią su mažu akumulatoriaus dydžiu. Indukcinis galios perdavimas su specialiu bėginiu keliu, kuriame daug magnetinių ričių dedama po kelio dangą gali generuoti srautą energijos perdavimui. Toje pačioje trasoje judantis elektromobilis gali indukciniu būdu užfiksuoti perduodamą galią, naudodamas po transporto priemonės važiuokle pritvirtintą priėmimo ritę. Belaidžio galios perdavimo trasoje susietos ritės maitinamos iš elektros tinklo, kur energija pakeičiama į aukšto dažnio maitinimą, kuris dažniausiai yra 85 kHz. Kad galia būtų perduodama dideliu naudingumo koeficientu, srauto tankis taip pat turėtų būti didelis. Šis stiprus elektromagnetinis laukas nepriimtinas toje kelio dalyje, kurioje tuo momentu nėra transporto priemonės, nes kenkia gyvūnams ir keliu vaikstantiems žmonėms. Todėl tik ta kelio dalis turi perduoti didelį srautą, kurioje yra transporto priemonė priimanti srautą, likusios dalies srautas turi būti mažesnis už apibrėžtą saugią ribą. Ši technologija vadinama segmentavimu, siekiant įjungti ir išjungti tam tikrą perdavimo takelio dalį [26].



11 pav. Belaidžio galios perdavimo kelias ir jo segmentavimas [26]

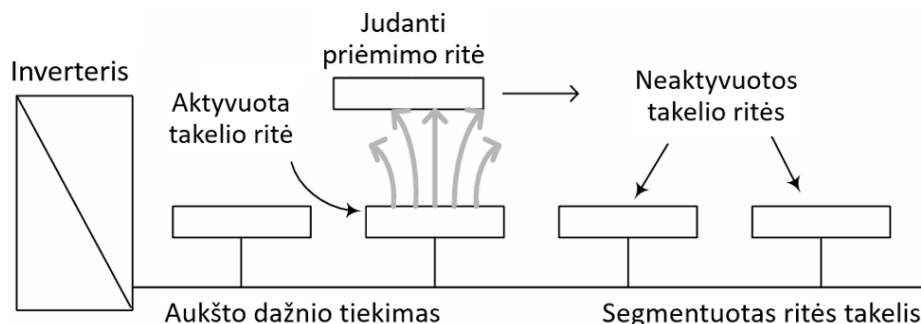
Norint įgyvendinti dinaminį belaidį galios perdavimą, kai kurie mokslininkai visame pasaulyje siūlo įvairių dizaino sprendimų, tačiau retai yra realizuojami dėl ypač didelės kainos infrastruktūrai įrengti. Viena iš problemų, kad sudėtinga suderinti perduodamą energiją eisme, kita priežastis, kad nuosavų elektromobilių vairuotojai turi skirtingus maršrutus dėl vairavimo ypatumų, eismo sąlygų, kintančio oro. Priešinga situacija su reguliariai važiuojančiais elektriniais miesto autobusais su pastoviu greičiu ir maršrutu, todėl dažniausiai bandymai vyksta su elektriniais autobusais miesto teritorijoje [27]. Tokie elektros energijos svyravimai įjungiant vis skirtingas rites virš elektromobilio sudaro sistemos projektavimo iššūkius, kaip greitai subalansuoti energijos poreikį bei per trumpą laiką suteikti didelę įkrovimo galią.



12 pav. Konceptinis ištiestos ritės takelio išdėstymas [26]

Šiuos sprendimus iš esmės galima suskirstyti į dvi kategorijas pagal bėgių kelio dizainą. Viena iš jų yra takelis, kuris yra pastatytas su viena rite dideliu atstumu, todėl toks bėgių tipas vadinamas ištiestu ritės takeliu (žr. 12 pav.). Dashora H. K. teigia, kad Korėjos pažangus mokslo ir technologijų institutas

sukūrė DWPT sistemą naudodamas tokią trasą ir padarė didelę pažangą technologijų evoliucijos link [26]. Ši sistema yra tvirtos ir paprastos konstrukcijos, tačiau nuolat maitinama ritė kelyje yra nepalanki dėl efektyvumo ir saugumo priežasčių.

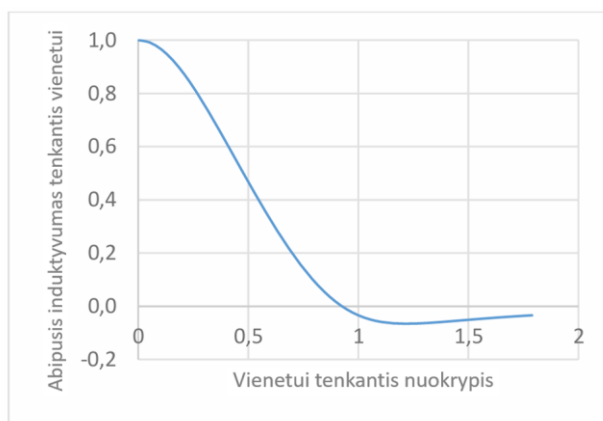


13 pav. Konceptinis segmentuotas ritės takelio išdėstymas [26]

Kitoje DWPT kategorijoje yra takelis su keliomis ritėmis, sujungtomis nuosekliai / lygiagrečiai arba sumontuojamomis atskirai. Visa bėgių ritė gali būti įjungta nepriklausomai, atsižvelgiant į ryšio koeficientą naudojant priėmimo ritę. Šis takelių tipas vadinamas segmentuotu ritės takeliu (žr. 13 pav.). Kai kurie tyrėjai iš JAV ir Naujosios Zelandijos siūlo DWPT sistemas, kuriose naudojamas sujungtas ritės takelis [26]. Šio tipo sistema yra sudėtingesnė ir brangesnė, tačiau iš dalies suteikia lankstumo eksploataavimo kelio saugumui nuo elektromagnetinio lauko.

1.7. Ryšio koeficiento priklausomybė nuo ričių poslinkio

Ryšio koeficientas dėl abipusio induktyvumo yra labai svarbus dinaminio belaidžio galios perdavimo aspektas, nes dažniausiai važiuojant keliu imtuvas lieka nesuderintas su perdavimo ritėmis. Ryšys tarp dviejų ričių yra geriausias, kai abi ryšio ritės yra vienodo dydžio ir idealiai suderintos viena su kita. Išlygiavimas gali būti suskirstytas į du tipus: kampinį lygiavimą ir poslinkio lygiavimą, kai pirmoji ritė yra tiksliai lygiagreti kitai. Transporto priemonės įkrovimo metu didžiausia problema yra poslinkio lygiavimas, nes sunku tiksliai sukontroliuoti transporto priemonės padėtį perduodančioje belaidžio galios perdavimo traseje. Iš perdavimo ritės pasislinkusi arba netinkamai išlygiuota paėmimo ritė turi kompensuoti sumažėjusį ryšio koeficientą. Esant tam tikram oro tarpui tarp dviejų sujungtų ričių, jų tarpusavio induktyvumas yra didžiausias, kai jie yra tiksliai išlyginti visomis x,y,z ašių kryptimis [26].



14 pav. Abipusio induktyvumo priklausomybė nuo poslinkio apskritoje ritėje [26].

Ritės formos asimetrija sukelia magnetinio lauko asimetriją kryptių atžvilgiu, todėl abipusio induktyvumo profilis poslinkyje skirtingomis kryptimis yra skirtingas. Apskrita belaidžio galios perdavimo ritė turi simetriją bet kokia radialine kryptimi, todėl abipusis induktyvumas neturi įtakos nesutapimo kryptimi. Apvalios ritės abipusio induktyvumo profilis parodytas vienetinėje skalėje 14 paveiksle; kur x ašis reiškia ritės centro poslinkį nuo kitos ritės centro. Bazinė vertė, kurią reikia pateikti atstumo vienetui, yra ritės spindulys, o abipusio induktyvumo bazinė vertė yra maksimali jos vertė, kai ji visiškai suderinta. Abipusis induktyvumas yra didžiausias, kai dvi ritės yra tiksliai išlygintos ir poslinkis nuo centrinio taško sumažėja iki nulio [26].

1.8. Belaidžio galios perdavimo standartai

Šiai dienai laidinių įkrovimo stotelių jungtys būna skirtingos, kurios kartais sudaro nepatogumą įkraunant elektromobilius, kadangi egzistuoja apie 8 skirtingos jungtys. Vartotojai būna priversti įsigyti perėjimus ar keisti elektromobilio įkrovimo lizdą pagal išvystytą infrastruktūrą. Belaidžio įkrovimo tolygiam sistemos vystymuisi padeda išleisti standartai, kad visi gamintojai turėtų jų laikytis ir suvienodinti įrenginių leistinus parametrus. Kadangi belaidį elektromobilių įkrovimą kuria įvairių automobilių gamintojai, standartai padeda užtikrinti vientisumą, kad visų elektromobilių imtuvai būtų suderinta su kitų įmonių energijos perdavimo įrenginiais. Taip pat standartai apsaugo vartotojus ir privaloma atsižvelgti į tokius kriterijus kaip įrenginių patikimumas, saugumas, sklandus veikimas [28]. Standartai yra dalis to, kas padeda siekti sklandaus ir saugaus belaidžio galios perdavimo vystymą. Pavyzdžiui, esant metaliniam daiktui virš ritės jis gali įkaisti ir uždegti aplinkoje esančias medžiagas, analogiškai kaip indukcinė viryklė. Tačiau sistema turi atpažinti, kad virš ritės yra „trukdys“ ir sistema neveikti. Įkraunant elektromobilio bateriją elektromagnetinis laukas taip pat turi būti ne kenksmingos aplinkai, kadangi leistinas naudoti dažnis yra iki 90 kHz, kuris atitinka radijo ar televizijos bangas, todėl yra saugu naudoti.

SAE J2954 standartas skirtas lengvosios transporto priemonėms. Pirmasis rekomendacinis leidimas išleistas 2016 m. gegužės mėn., tačiau galutinis standartas išleistas po ketverių metų – 2020 metais. Standarto paskutinis atnaujinimas įvyko 2024 m. rugpjūtį. Jame aprašoma tiek stacionaraus, tiek dinaminio belaidžio galios perdavimo įkrovimo gairės. Standarte nustatyti minimalūs kriterijai belaidžiam įkrovime, tokie kaip elektromagnetinis suderinamumas, minimalus veikimas, saugumas ir kiti kriterijai [28]. Nurodoma, kad esant sulygiuotoms ritėms belaidžio įkrovimo sistemos efektyvumas turi būti daugiau kaip 85 % ir daugiau kaip 80 %, jeigu ritės nesulygiuotos [29]. Standartuose yra apibrėžta, kad veikimo dažnio reikšmė turi būti tarp 81,38 kHz ir 90 kHz, todėl dažniausiai naudojama vertė yra 85 kHz [30]. Belaidžio galios perdavimo sistemos yra klasifikuojamos pagal perduodamą galią: WPT1 – iki 3,7 kVA, WPT2 – iki 7,7 kVA, WPT3 – iki 11,7 kVA, WPT4 – iki 22 kVA, WPT5 – iki 50 kVA. Į standartą SAE J2954 yra įtraukti dvikrypčio įkrovimo reikalavimai, kurie manoma ateityje bus labai svarbūs ir leis energiją gauti iš elektros tinklo ir grąžinti elektrą atgal į tinklą ar aprūpinti reikiamą suvartojimą į namus. Dar viena iš pagrindinių aspektų yra ričių padėties nustatymas. Tai įtraukia xyz ašių toleranciją, pakrypimą, tarpą, pasisukimą tarp siūstuvo ir imtuvo [29]. Pagal standartą belaidžiu būdu įsikraunančių elektromobilių gamintojai turi atsižvelgti ir vadovautis, kad jų sistema galėtų naudoti dauguma elektromobilių.

Šiai dienai daug belaidžio įkrovimo kompanijų naudojami SAE J2954 standartu, pavyzdžiui, „WiTricity“ stipriai vysto šią sritį. Tai pat yra išleistas rekomendacinis standartas SAE J2954/2 TIR, kuris skirtas didesnių gabaritų transportui iki 500 kW įkrovimo galios, tokiame kaip vilkikai, autobusai, traktoriai [31]. Šiuo metu autobusams kuriama belaidžio galios perdavimo sistema yra demonstracinio pobūdžio, todėl svarbu, kad atsirado standartas ir sunkiasvorėms transporto

priemonėms, kur gamintojas žinos, kad įsigyta priemonė bus suderinta su įkrovimo ritėmis. Yra pateiktos rekomenduojamos elektromagnetinio spinduliavimo ribos, tačiau išlieka tokie patys reikalavimai žmogaus saugumui, kaip ir SAE J2954, nes tai yra didžiausias prioritetas.

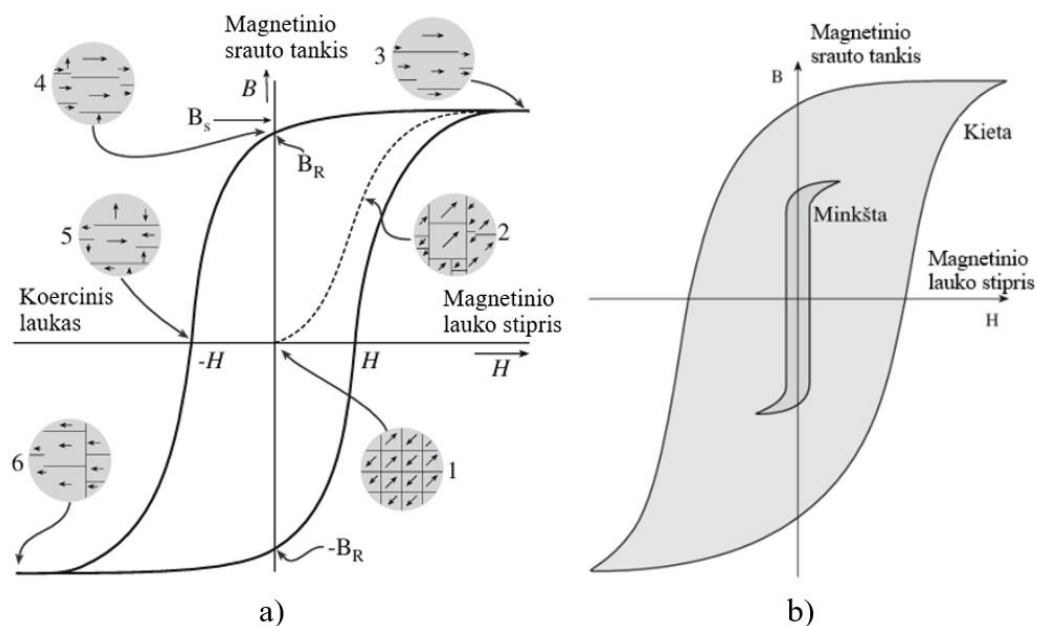
Pavyzdžiui, šių metų sausį „WAVE Charging“ paskelbė apie sėkmingus bandymus, kurie parodė, kad įkrovimo sistema gali visiškai įkrauti 8 klasės elektrinį sunkvežimį per mažiau nei 15 minučių, o tai pranašauja įspūdingą ateitį, kai automobilių parkų operatoriai galės užtikrinti beveik nepertraukiamą elektrinių transporto priemonių veikimo laiką [32]. Projektas su „Venture Logistics“ yra pavyzdys, kaip didelės galios belaidis įkrovimas užtikrina nulinės emisijos galimybes sudėtingoje transporto aplinkoje, nes nebereikia tvarkyti sunkių didelės galios įkrovimo kabelių žemoje temperatūroje. Belaidis 500 kW įkroviklis „WAVE Wireless“, remiamas 8,4 mln. dolerių JAV energetikos departamento dotacijos, diegiamas kaip konsorciumo projekto dalis [32]. Naujoviškos didelės galios belaidžio įkrovimo sistemos padės operatoriams lengviau pasiekti nulinės taršos tikslus, darant minimalų poveikį veiklai ir taip padedant gerinti oro kokybę uostuose, sandėliuose ir paskirstymo centruose bei jų apylinkėse [32].

IEC 61980 standartas paskelbtas Tarptautinės elektrotechnikos komisijos (IEC) 2015 m. Daugiausia rašoma apie saugumo reikalavimus tokius kaip apsaugos nuo perkaitimo, užsidegimo, nuo grandinės trumpųjų jungimų, nuotėkio srovės. Taip pat apibrėžia efektyvumą, elektromagnetinį suderinamumą, apsaugą nuo elektromagnetinio lauko. Atnaujinta versija apima ryšį tarp transporto priemonių ir belaidžio galios perdavimo sistemos, specifinius elektromobilio magnetinio lauko reikalavimus įkraunant belaidžiu būdu [33].

A4WP (angl. *Alliance for Wireless Power*) standartas: belaidžio krovimo aljansas (A4WP) yra nepriklausoma pramonės institucija, kuri kuria ir plėtoja belaidžio galios perdavimo technologiją, kuri naudoja energijos perdavimą magnetiniu rezonansu. Standarte naudojamas aukštas 6,78 MHz dažnis, kad išvengtų indukcinio šilimo problemų. Kontrolei ir valdymui naudojamas 2,4 GHz ISM diapazonas [34]. Tačiau šis standartas plačiau pritaikomas smulkiajai elektronikai.

1.9. Feromagnetinės medžiagos

Feromagnetinė medžiaga – tai medžiaga, kurią patalpinus į magnetinį lauką ji įgauna magnetinių savybių. Įsimagnetinusi medžiaga turi labai mažą magnetinę varžą magnetiniam laukui arba gali būti gamtoje savaime įsimagnetinusi. Feromagnetikams priklauso geležis, nikelis, kobaltas ir jų lydiniai. Feritas gaminamas iš geležies (III) oksido (Fe_2O_3) su nedidelėmis dalimis įterpiamais papildomais metalo elementais, tokie kaip cinkas, baris, stroncis, nikelis, manganas [35].



15 pav. B kitimas kintant H . a) tarpai iliustruoja domeno struktūrą įvairiuose histerezės kreivės taškuose; b) minkštamagnečių ir kietamagnečių kilpų dydžio ir formos palyginimas [35]

Feromagnetinės medžiagos gali būti įmagnetinamos arba pačios pritraukiamos prie magneto. Iš 15 paveikslo galima matyti, kad feritai yra skirstomi pagal magnetines savybes į minkštamagnetes ir kietamagnetes, nuo to priklauso koercyvumas. Koercinė jėga yra feromagnetinės medžiagos savybė priešintis išmagnetinimui veikiant poliarizuojančiam arba įmagnetinančiam elektros laukui, dėl kurio feromagnetikas išsimagnetina, o feroelektrikas išsipoliarizuoja.

Magnetiškai minkštos medžiagos pasižymi mažu koercyvumu, jos nesunkiai įsimagnetina ir išsimagnetina, jų magnetinio lauko stipris $<10^3$ A/m. Taip pat žinomos kaip didelio magnetinio pralaidumo medžiagos, kurios naudojamos transformatorių ir induktorių šerdyse (pvz. mangano-cinko feritas, nikelio-cinko feritas). Magnetiškai kietos medžiagos turi didelį koercyvumą, jos sunkiai įsimagnetina ir išsimagnetina, jų magnetinio lauko stipris $\gg 10^3$ A/m. Naudojamos tokios medžiagos kaip baris garsiakalbių magnetams, stroncis elektros varikliuose (pvz. bario feritas, stroncio feritas) [35].

Minkštamagnetės medžiagos pasižymi mažu koercyvumu, vadinasi medžiagos įmagnetinimas gali nesudėtingai keisti kryptį sunaudojus nedaug energijos, o didelė ferito savitoji varža apsaugo nuo šerdyje atsirandančių sūkurinių srovių. Šios rūšies medžiaga turi didelį soties magnetinio srauto tankį, didelį magnetinį pralaidumą, ilgą ir siaurą magnetinę histerezės kilpą su nedideliu plotu. Minkštieji feritai naudojami radijo imtuvuose, kadangi esant dideliems dažniams nesusidaro daug nuostolių. MnZn feritai dažniausiai naudojami iki 5 MHz dažnio, kurie turi didesnę pralaidumą ir prisotinimo indukciją, o virš 5 MHz naudojami MiZn feritai dėl didesnės varžos [36].

2. Modeliavimas

2.1. Naudojamos priemonės, modeliavimo metodas, medžiagų modeliai

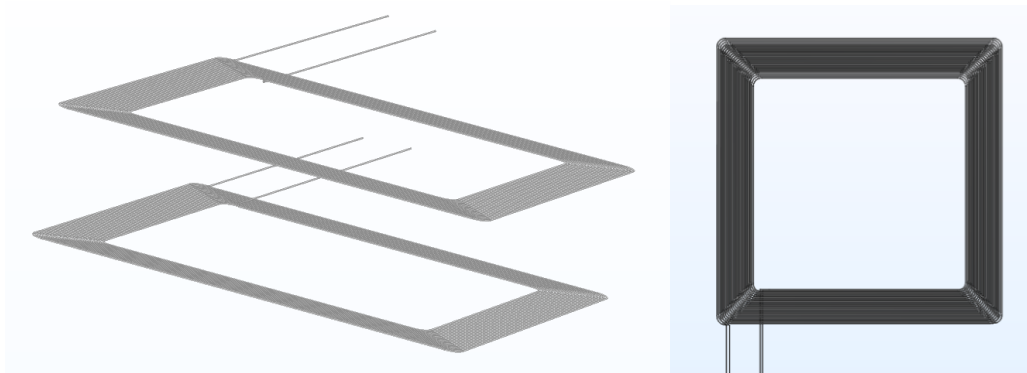
Šiame projekte modeliavimas atliekamas „COMSOL Multiphysics version 6.1“ programine įranga. Modeliams sukurti buvo naudojamas baigtinių elementų metodas. Atliekant modeliavimo darbus buvo remtasi magnetinio lauko srautais. Sąsaja yra pagrįsta Maxwell'o lygtimis, kuri remiasi magnetinio vektoriaus potencialu [37]. Visa ričių geometrija buvo sudaryta naudojant elementarius geometrinius elementus bei funkcijas „COMSOL“ programinėje įrangoje. Šiame darbe tiriamos kvadratinės, DD ir DDQ tipo ritės. Apvalios ritės nebuvo įtrauktos į tyrimą, kadangi daugelyje šaltinių įrodyta, kad kvadratinės ritės yra efektyvesnės perduodant energiją didesniu atstumu. Iš pradžių buvo užsiduoti pagrindiniai parametrai, tokie kaip vidinis spindulys, laidininko spindulys, tarpas tarp apvijų. Šiuos parametrus galima keisti eigoje ir stebėti rezultatų pokyčius, nes sukurtas modelis yra parametrinis. Sumodeliuotos ritės yra uždaroje kubo erdvėje, kuriame paviršius turi būti kaip magnetinė izoliacija. Iš „COMSOL“ medžiagų bibliotekos buvo naudojamos trys medžiagos: oras (angl. *air*) atitiko kubo viduje esamą erdvę, varis (angl. *cooper*) naudojamas ričių apvijoms, papildomas feritas MnZn (M33) panaudotas feromagnetinėms plokštelėms bei strypams. Modeliavime naudojamas dažnis yra 85 kHz. Tai dažniausiai pasirenkama reikšmė kituose literatūros šaltiniuose, kuri pagal J2954 standartą turi būti tarp 81,38 ir 90 kHz [30].

2.2. Modelio validacija

Pradiniai modeliai buvo tikrinimai su kitų šaltinių modelių rezultatais, kad būtų kuo tikslesni pradiniai duomenys, pagal kuriuos galima eksperimentuoti keičiant pasirinktus parametrus. Tikslumas baigtinių elementų metode yra paremtas daugybe faktorių įskaitant modelio tinklėlį, ričių geometriją ir modelio ribas, pasirinktas medžiagas. Kad atliekamas modeliavimas būtų teisingas, reikalinga patikrinti gautus rezultatus naudojant tuos pačius parametrus su pasirinkto mokslinio tyrimo rezultatais. Pagal Yang'o ir kt. (2020) tyrimo duomenis atliekamas sukurto modelio tikrinimas ar rezultatai sutampa [38]. Nagrinėjamo tyrimo validacija buvo atliekama su kvadratinėmis ritėmis lyginant analitinio ir baigtinių elementų metodo (FEM) modelius. Šiame darbe sukurtas FEM modelis, kuriame apskaičiuotas savitasis ir abipusis induktyvumas bei ryšio koeficientas. Pagrindiniai tiriamo modelio parametrai pateikiami lentelėje Nr. 2:

2 lentelė. Naudojami matmenys modelio validacijai atlikti [38]

Matmuo	Vertė
Išorinis skersmuo	330 mm ²
Vidinis skersmuo	250 mm ²
Pirmos ritės apvijų skaičius	22
Antros ritės apvijų skaičius	22
Apvijos spindulys	0,6 mm
Tarpas tarp apvijų	0,65 mm
Atstumas tarp ričių	100 mm



16 pav. Gauto modelio ričių atvaizdavimas

Lentelėje 3 pateikiami lyginami duomenys bei apskaičiuota paklaida, kuri neviršijo procento vertės.

3 lentelė. Validacijos rezultatai

Simbolis	Šaltinio rezultatas	Gautas rezultatas	Paklaida (%)
L (μH)	295,91	298,14	0,75
M (μH)	69,02	69,42	0,58
k	0,2332	0,2329	0,13

Nedidelis nuokrypis galėjo būti dėl pasirinkto skirtingo tinklėlio tankio ar „solverio“ „COMSOL“ programoje. Toliau bus modeliuojama pakeitus parametrus.

2.3. Modelio kūrimas

Atsižvelgiant į nagrinėtą mokslinę literatūrą parenkami naudojami dydžiai. Ritė sumodeliuota iš 15 apvijų, išorinis kvadratinės ritės spindulys sudaro 25 cm, daugumoje bandymų oro tarpas tarp ričių 17 cm. Sąrašas, kuriame parašyti pagrindiniai naudojami parametrai, vaizduojamas 4 lentelėje.

4 lentelė. Pagrindiniai modelyje naudojami parametrai ir dydžiai

Parametrai, dydis	Reikšmė	Dydis
R_{in} (cm)	Vidinis ritės spindulys	11
R_{out} (cm)	Išorinis ritės spindulys	25
N (1)	Apvijų skaičius	15
R_{cond} (mm)	Apvijos laidininko spindulys	2,7
l_{gap} (mm)	Atstumas tarp apvijų	4
h_{air} (cm)	Atstumas tarp ričių (oro tarpas)	17*
f (kHz)	Dažnis	85
w_{fe} (cm)	Feromagnetiko strypo plotis	2*
h_{fe} (mm)	Feromagnetiko storis	8
l_{disp} (cm)	Išilginis ričių poslinkis	0*

* keičiamas dydis modelyje.

Kvadratinės ritės savasis ir abipusis induktyvumas buvo apskaičiuotas naudojant išraišką iš Yang'o ir kt. (2020) straipsnio [38]. Savasis ritės induktyvumas apskaičiuotas naudojant Wheeler'io formulę, skirtą kvadratinėms ritėms:

$$L = 2,34\mu_0 \frac{N^2 d_{avg}}{1 + 2,75\rho'}; \quad (10)$$

čia d_{avg} yra vidutinis ritės skersmuo:

$$d_{avg} = R_{in} + R_{out}; \quad (11)$$

čia ρ' yra užpildymo santykis:

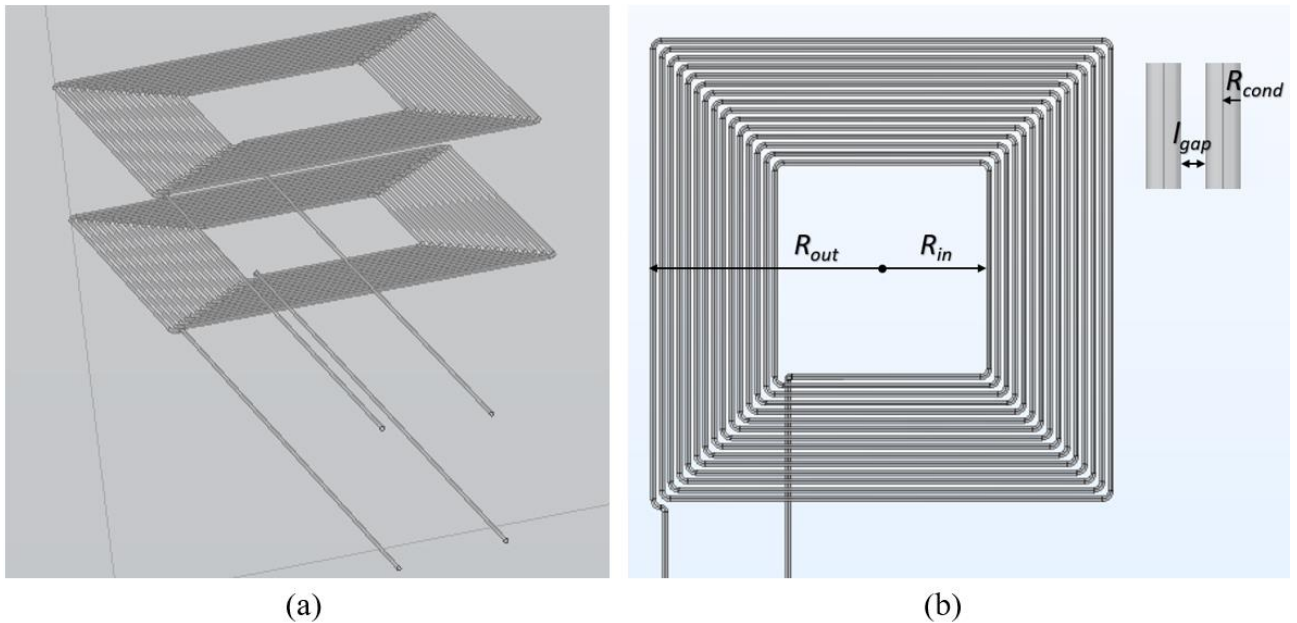
$$\rho' = \frac{R_{in} - R_{out}}{R_{in} + R_{out}}. \quad (12)$$

Abipusis induktyvumas tarp bendroje ašyje esančių ričių, kurių matmenys vienodi, apskaičiuojama šia formule [38]:

$$M = \frac{2N^2\mu_0}{1 + 0,75\rho'} \left(d_{avg} \ln \left(\frac{d_{avg} + b}{d_{avg} + x} \times \frac{b}{h} \right) + (x - 2b + h) \right); \quad (13)$$

čia $b = (d_{avg}^2 + h^2)^{1/2}$, ir $x = (2d_{avg}^2 + h^2)^{1/2}$.

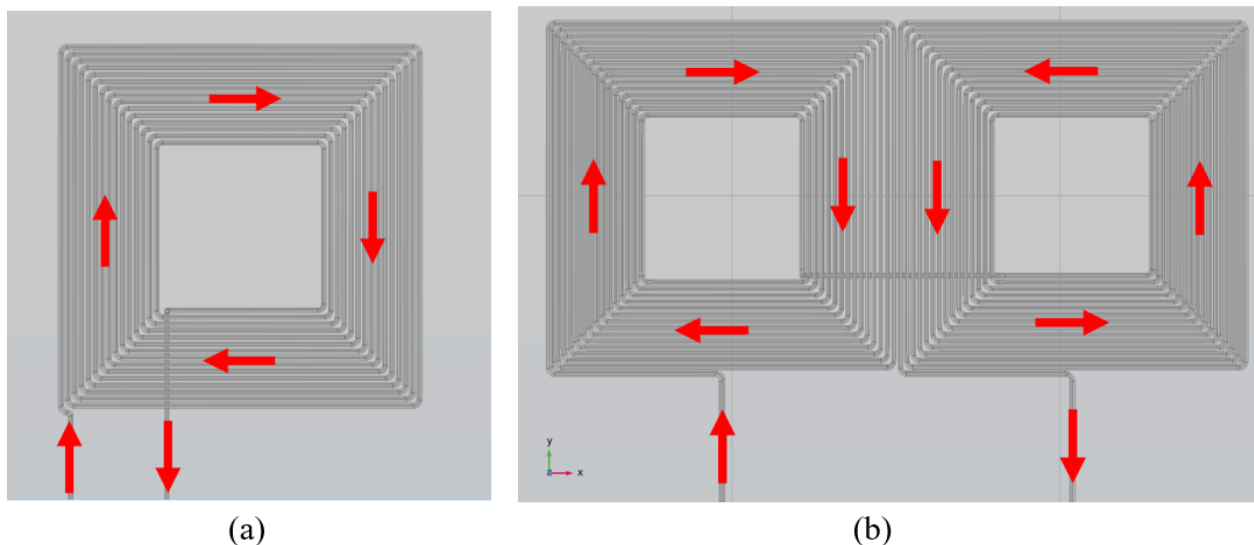
17 paveiksle pavaizduotas kvadratinų ričių modelis, nurodomi pagrindiniai naudojami parametrai kaip išorinis (R_{out}) ir vidinis (R_{in}) ritės spindulys, apvijos spindulys (R_{cond}) ir oro tarpas tarp apvijų (l_{gap}).



17 pav. Kvadratinės ritės struktūra: (a) geometrija abipusiam induktyvumui skaičiuoti; (b) pagrindiniai ritės parametrai

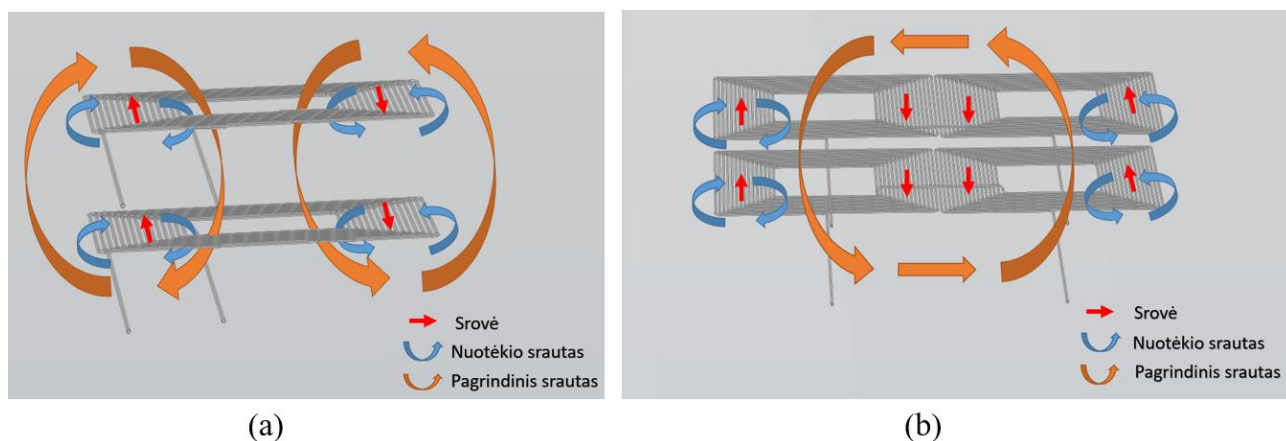
Kad padidinti ryšio koeficientą tarp ričių dažnai naudojami feromagnetinės medžiagos, kurios daro įtaką abipusiam induktyvumui. Belaidžiame krovime taip pat galima naudoti papildomai ferito ir padidinti ryšio koeficientą, todėl modelyje įtraukiami bandymai su įvairiomis ferito formomis. Darbe tiriami atvejai, kai sistema simetrinė be ferito įterpimo, su ferito plokštelėmis, su ferito strypais, bei analogiškai nesimetrinei sistemai. Visos šios variacijos yra svarbios elektromobilių gamintojams

keliams reikavimams, nes nuo to priklauso perduodamos energijos efektyvumas bei transporto priemonės svoris. Šiuo atveju elektromobilyje montuojamoms ritėms svoris ir matmenys yra labai svarbus faktorius, atvirkščiai negu stacionariai montuojamoms ant kelio ritėms. 18 paveiksle vaizduojama srovės tekėjimo kryptys ritėse.



18 pav. Srovės tekėjimo kryptys: (a) kvadratinėje ritėje; (b) DD ritėje

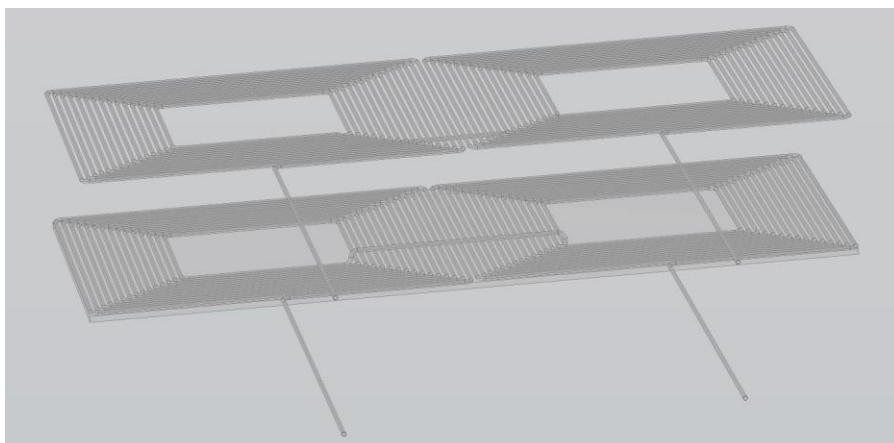
19 paveiksle vaizduojama srovės kryptis, pagrindinis magnetinis srautas bei magnetinio srauto nuotėkis [39].



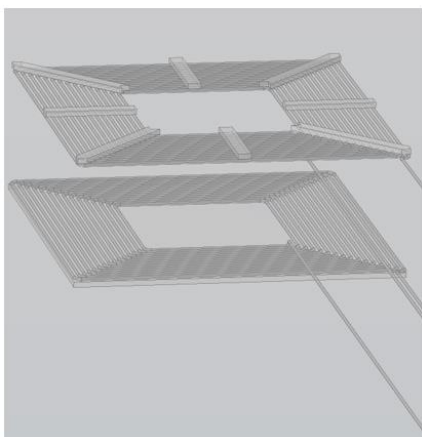
19 pav. Magnetinio srauto kryptys: (a) kvadratinės ritės; (b) DD ritės

2.3.1. Kvadratinė ir DD tipo ričių modeliai

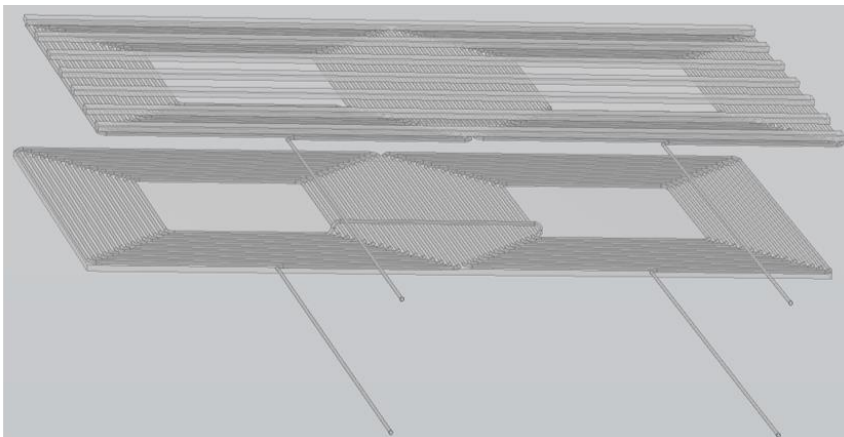
Buvo atliekami keli scenarijai įterpiant feritą modelyje. Nesimetrinėje struktūroje pirmai ritei buvo naudota plokščia ferito plokštelė, o antra ritė be ferito įterpimo (20 pav.) ir kitu variantu pirma ritė su plokščia ferito plokšte, o antros ritės pagrindas sudarytas iš ferito strypų (21 pav.). Simetrinėje struktūroje ritėse buvo naudojamos ferito plokštelės (24 pav.), ferito strypai (22 pav.) ir be jokio ferito įterpimo (23 pav.).



20 pav. Ritės su nesimetrine struktūra naudojant ferito pagrindą: viena ritė su ferito plokšte DD ritės

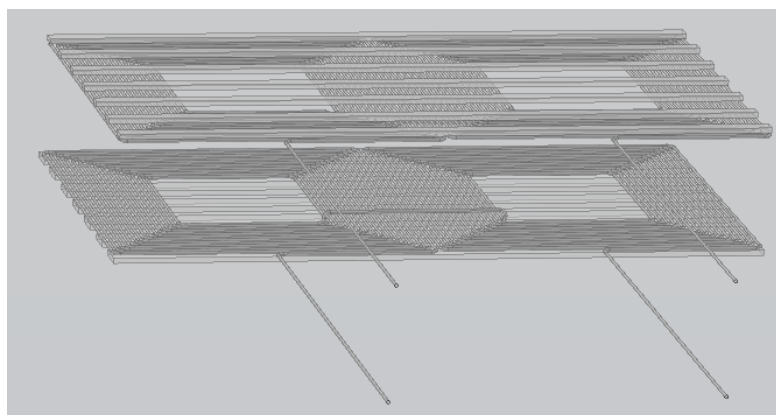


(a)

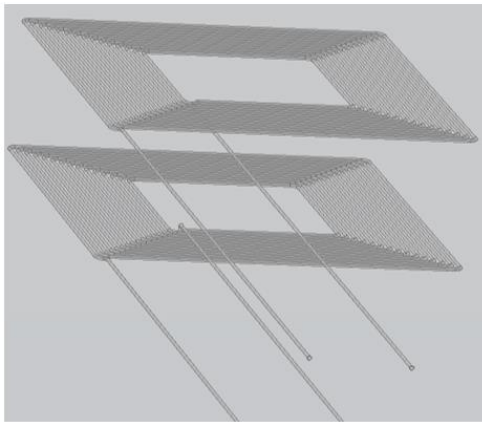


(b)

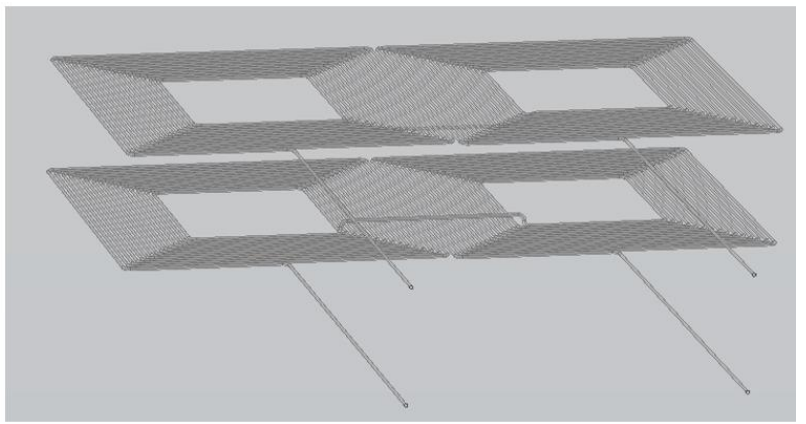
21 pav. Ritės su nesimetrine struktūra naudojant ferito pagrindus: viena ritė su ferito plokšte, kita ritė su ferito strypais (a) kvadratinės ritės; (b) DD ritės



22 pav. DD ritės su nesimetrine struktūra naudojant ferito pagrindus: abi ritės su ferito strypais (perdavimo ritėje naudojami 4 cm pločio strypai, priėmimo 2 cm)

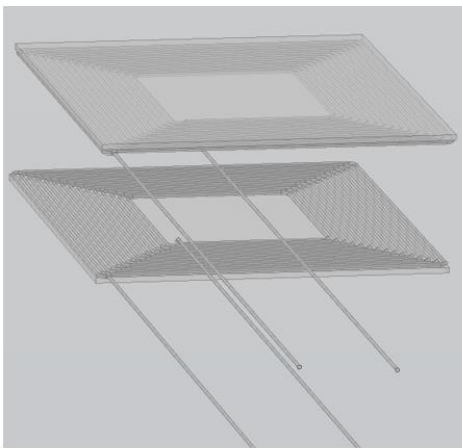


(a)

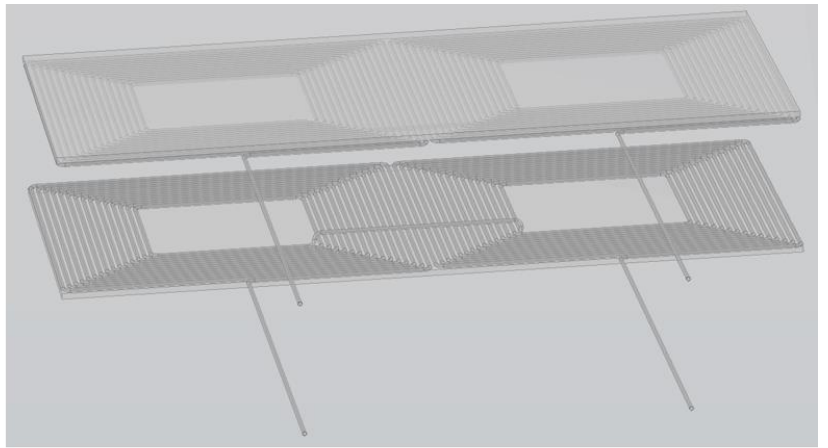


(b)

23 pav. Ritės su simetrine struktūra nenaudojant ferito pagrindo: abi ritės be ferito pagrindo (a) kvadratinės ritės; (b) DD ritės

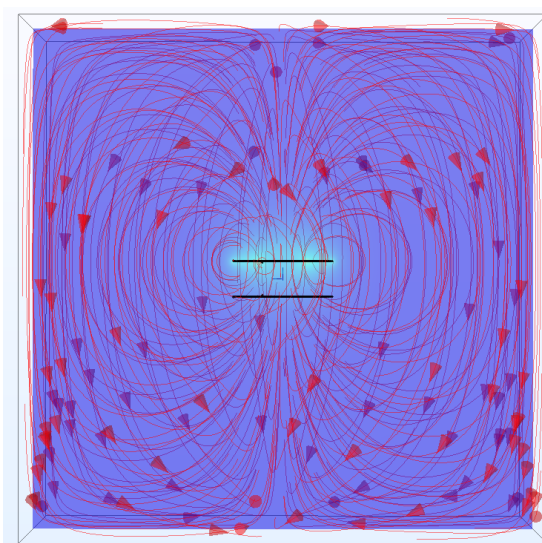


(a)

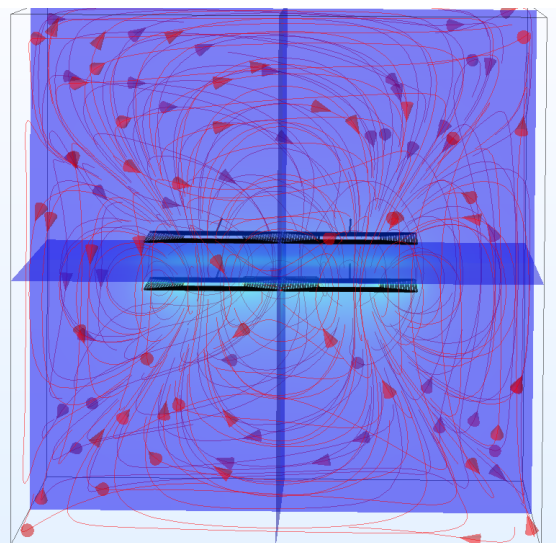


(b)

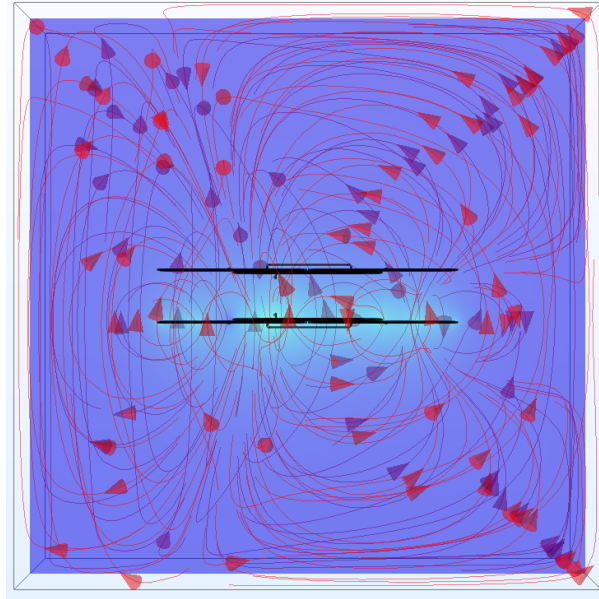
24 pav. Ritės su simetrine struktūra naudojant ferito pagrindus: abi ritės su ferito plokštelėmis (a) kvadratinės ritės; (b) DD ritės



a)



b)



c)

25 pav. Ričių sukurti magnetiniai laukai, kai ritės yra tiksliai viena virš kitos: (a) kvadratinė ritė; (b) DD ritės; (c) DDQ ritės

Pagrindinis modeliavimo tikslas išsiaiškinti kaip kinta ryšio koeficientai, kai viena ritė yra pasislinkusi tam tikru atstumu viena nuo kitos. Taip pat tikrinama ar padidės ryšio koeficientas esant skirtingam ferito kiekiui.

Modeliuojama buvo su kvadratinėmis, DD ir DDQ ritėmis. Teoriškai DD+DD modelyje turėtų būti gauti geresni rezultatai negu su kvadratinėmis ritėmis, kadangi šiuo atveju didesnis užimamas plotas, todėl ričių nesutapimas turėtų būti mažiau jautrus ryšio koeficientui.

Perdavimo DD ritė gali būti padalinta į du induktyvumus L_{t1} ir L_{t2} . Analogiškai priimančioji DD ritė irgi padalinama į du induktyvumus L_{r1} ir L_{r2} . Apskaičiuoti bendrą induktyvumą L' , kurį galima išmatuoti, reikia sudėti savuosius induktyvumus ir du kartus abipusį induktyvumą [40]:

$$L' = L_{t1} + L_{t2} + 2M_{t12}; \quad (13)$$

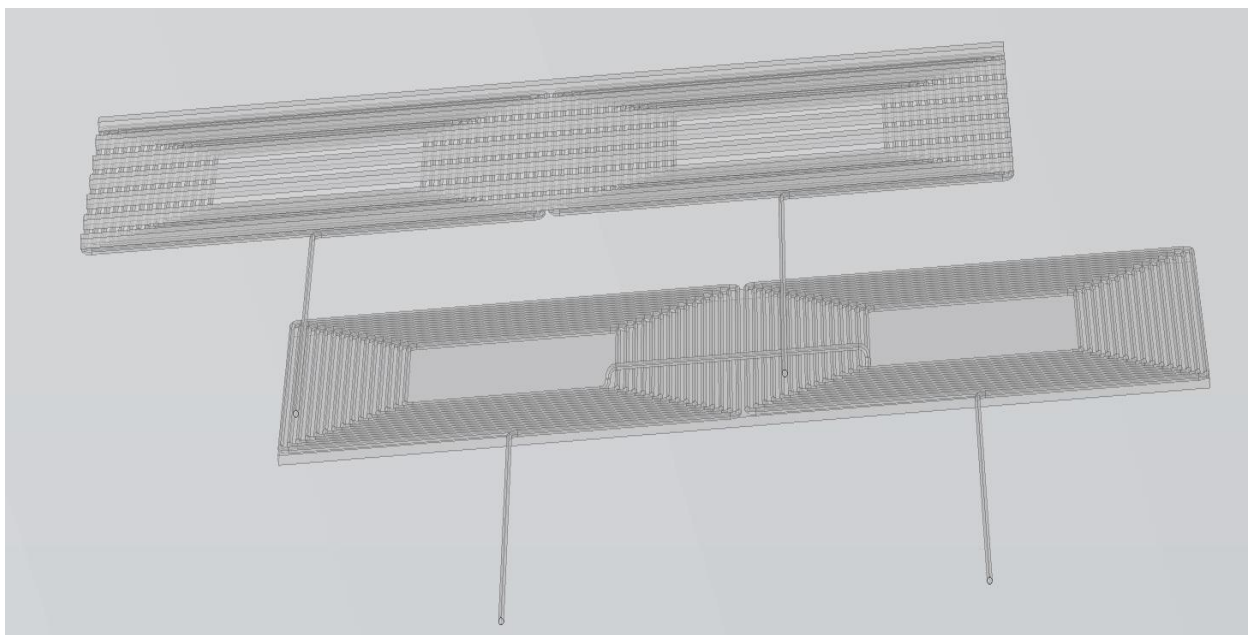
Priešingu atveju paskaičiuojamas L'' :

$$L'' = L_{t1} + L_{t2} - 2M_{t12}; \quad (14)$$

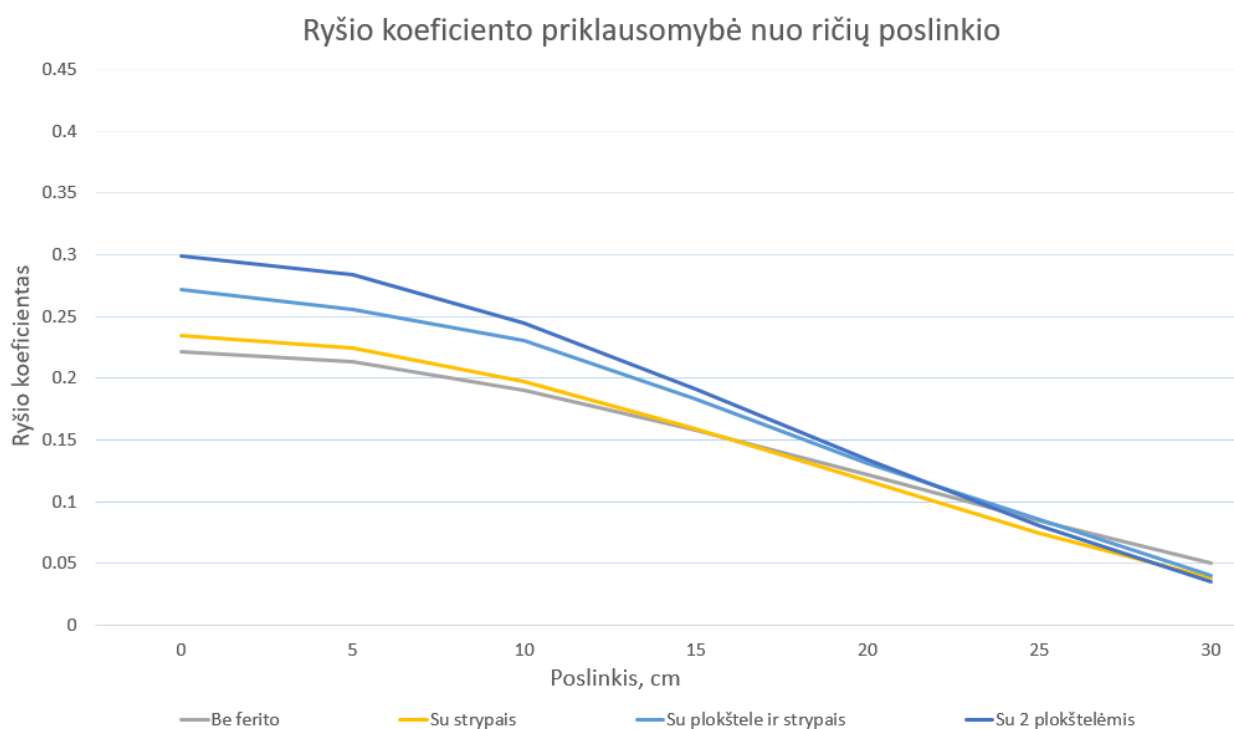
Perdavimo DD ritės abipusis induktyvumas panaudojus (13) ir (14) rezultatus apskaičiuojamas:

$$M_{t12} = M_{r12} = \frac{L' - L''}{4}. \quad (15)$$

Modeliavimas buvo atliekamas naudojant 17 cm oro tarpą tarp ričių, kadangi vidutinė sedanų, universalų, hečbekų prošvaisa siekia apie 17 cm. Visi duomenys šiam modeliavimui paimti iš 4 lentelė. Poslinkis modelyje vykdomas kas 5 cm, nuo 0 cm iki 30 cm prasikeitimas. Gauti rezultatai pavaizduoti 27 ir 28 paveiksluose.

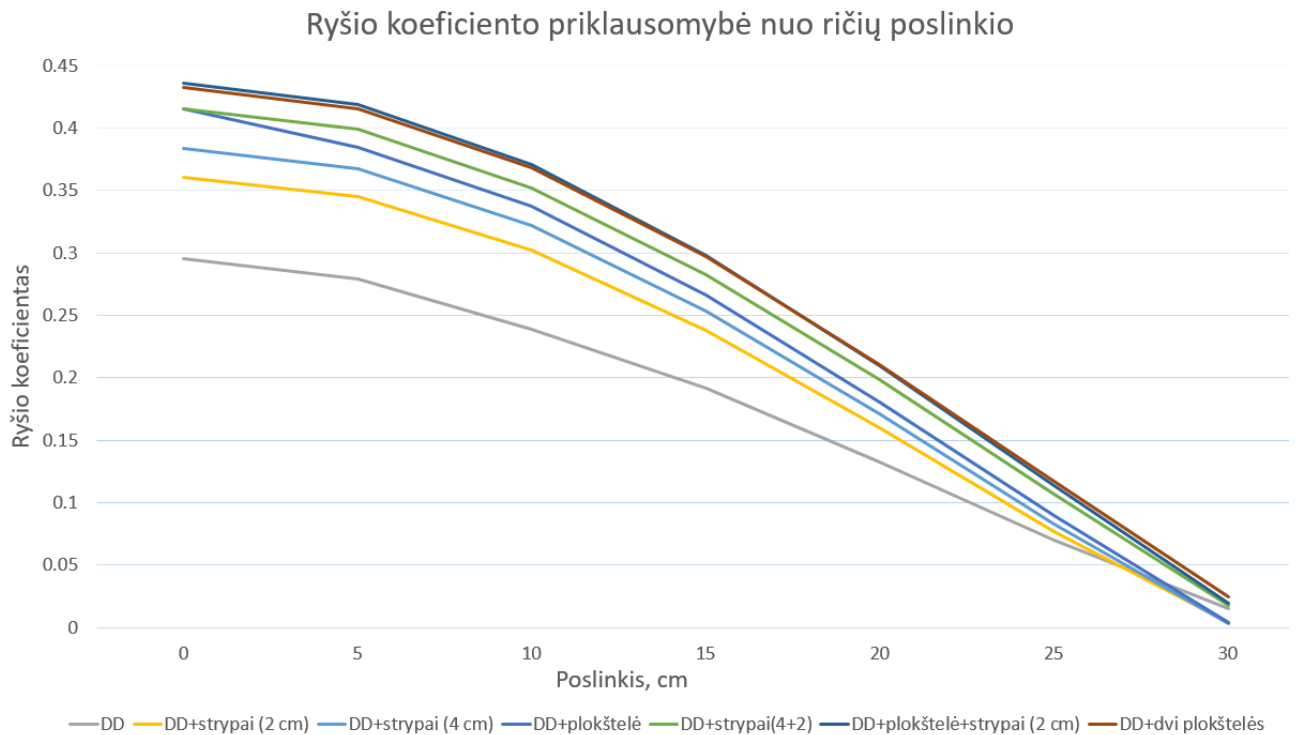


26 pav. DD ritės su išilginiu poslinkiu



27 pav. Kvadratinių ričių koeficiento priklausomybė nuo išilginio poslinkio

Didžiausias ryšio koeficientas yra 0,298, kai abi kvadratinės ritės yra sulygiuotos ir abi yra su ferito plokštelėmis. Kai siūstovo ritė yra su ferito plokšte ir priėmimo ritė su strypais, maksimalus ryšio koeficientas 0,272. Esant siūstuvui su 2 cm pločio ferito strypais, ryšio koeficientas yra 0,235, o konstrukcijoje visiškai be feritų 0,221. Didėjant x ašies viena kitos poslinkiui ryšio koeficientas mažėja, kreivės artėja viena kitos, o pasiekus ribą virš 20 cm poslinkio rezultatai tampa labai panašūs.



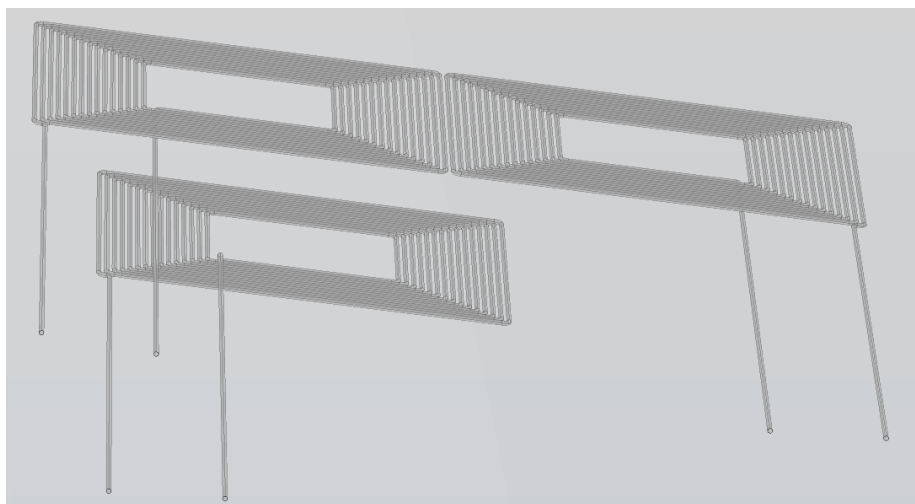
28 pav. DD ričių koeficiento priklausomybė nuo išilginio poslinkio.

Didžiausias ryšio koeficientas yra 0,437, kai abi kvadratinės ritės yra sulygiuotos ir siūstuvu ritė su ferito plokšte, o priėmimo ritė su 2 cm pločio strypais. Esant siūstuvui su 2 cm pločio ferito strypais, ryšio koeficientas yra 0,361, o konstrukcijoje visiškai be feritų 0,298. Didėjant x ašies viena kitos poslinkiui ryšio koeficientas mažėja, kreivės artėja viena kitos, o pasiekus ribą virš 25 cm poslinkio rezultatai tampa labai panašūs.

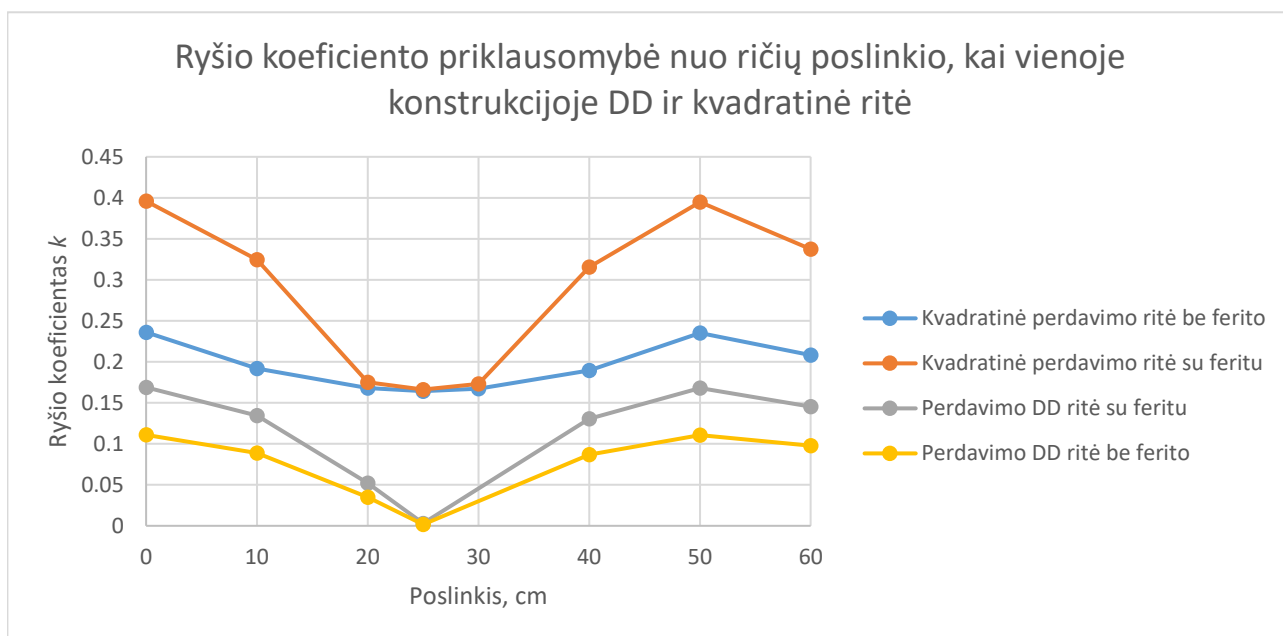
Iš 27 ir 28 paveikslų rezultatų galima matyti, kad abiejų ričių atvejais kreivių pobūdis yra panašus, tačiau su DD ritėmis gautas geresnis rezultatas, nes maksimalus ryšio koeficientas su kvadratinėmis ritėmis gautas 0,298, o su DD ritėmis 0,437. Taip pat galima pastebėti, kad ferito įterpimas turi didelę įtaką gautiems rezultatams. Kadangi perdavimo ritė yra stacionariai sumontuota į kelio dangą ir nėra labai svarbus jos svoris, todėl efektyviau naudoti DD ritę su ferito plokšte ar platesniais ferito strypais. Norint gauti dar geresnį rezultatą naudinga įterpti ferito strypus priėmimo ritę, kad ryšio koeficientas būtų dar didesnis.

2.3.2. Kvadratinės ritės su DD tipo rite modeliai vienoje struktūroje

Šiame skyrelyje yra tyrinėjami atvejai, kai viena ritė kvadratinė, o kita DD tipo ritė. Šis modeliavimas aktualus sužinoti kaip kinta ryšio koeficientas, jei automobilis turi vieno tipo ritę, o perdavimo ritė kito tipo.



29 pav. Dviguba DD ritė su kvadratine rite vienoje struktūroje

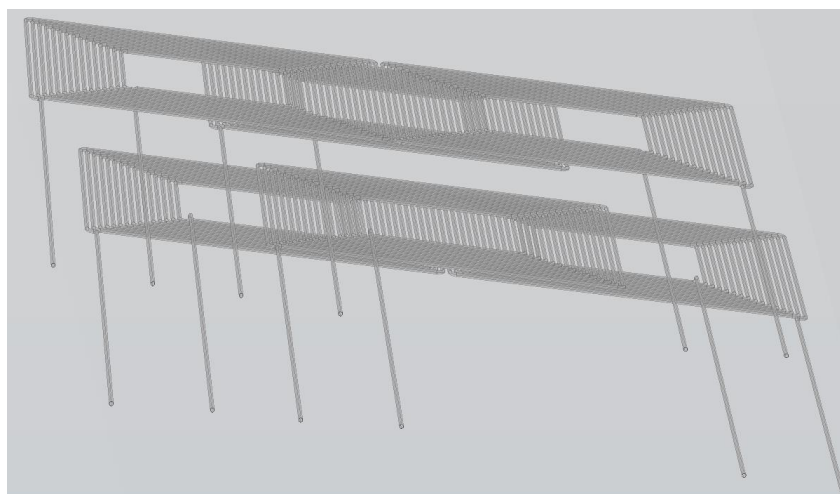


30 pav. Ryšio koeficiento priklausomybė nuo poslinkio DD su kvadratine ritėmis rezultatai

Pagal 30 paveikslo grafiką kai siųstuvo ritė yra kvadratinė, tuomet priimančioji DD ritė turi dvigubai didesnę plotą priimti energiją, todėl ryšio koeficientas yra didelis, kuris siekia apie 0,396. Tokiu atveju ritė automobilyje turėtų būti dvigubai didesnė, tačiau elektros energijos priimtų per pus mažiau negu maksimaliai galėtų, bet su didesniu ryšio koeficientu priimtų perduodamą energiją iš siųstuvo. Priešingu atveju, kai siųstuvo ritė yra DD tipo, kvadratinė ritė negali priimti visos perduodamos energijos, todėl didžiausias ryšio koeficientas buvo apie 0,169. Vadinasi kvadratinė ritė negali priimti visos perduodamos energijos iš DD ritės, nes jos plotas dvigubai didesnis už kvadratinę ritę, todėl dalis energijos išsklaidoma į aplinką kaip nuostoliai. Šiuo modeliu išsiaiškinta jeigu kelyje įmontuota ritė skiriasi nuo elektromobilyje sumontuotos ritės, kad esant kvadratinei siųstuvo ritei energija perduodama efektyviai, tačiau neišnaudojamas pilnas elektromobilio ritės potencialas, o esant DD siųstuvo ritei dalis energijos pavirsta į nuostolius ir krovimas yra neefektyvus.

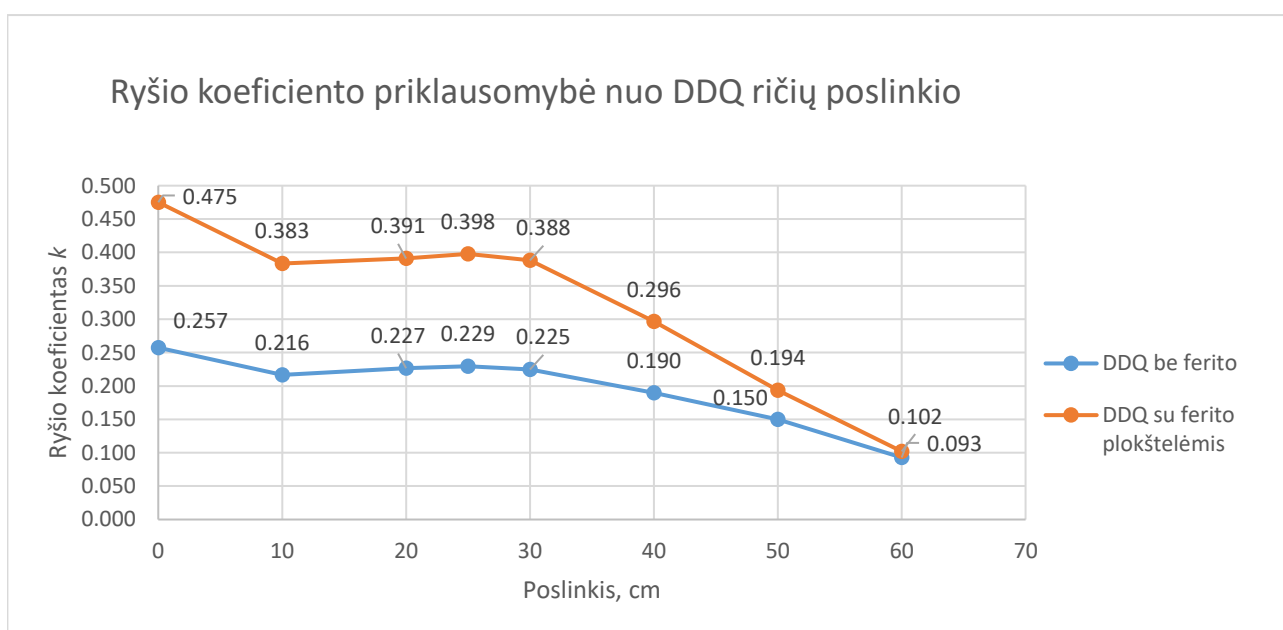
2.3.3. DDQ ričių modeliai

Prie DD ričių konstrukcijos pridėjus papildomą ritę (šiam modelyje tokių pačių matmenų kvadratinę ritę per vidurį) gaunama DDQ ritės konstrukcija (žr. 31 pav.).



31 pav. DDQ tipo ritės

Atliekami skaičiavimai, 32 paveiksle pateikiamas ryšio koeficiento grafikas.



32 pav. Ryšio koeficiento priklausomybė nuo DDQ ričių poslinkio

Iš gauto grafiko matyti kreivės netolygumą, ties ritės poslinkiu x ašyje ties 10 cm kreivė pradeda kilti ir ties 25 cm kreivė vėl pradeda leisti, nes vienos kvadratinės ritės spindulys yra 25 cm. Šis krovimo būdas efektyvus dinaminiam belaidžio galios perdavimui, kadangi transporto priemonei važiuojant keliu yra paliekamas rezervas į abi puses po 30 cm, kad įkrovimas būtų pakankamai efektyvus.

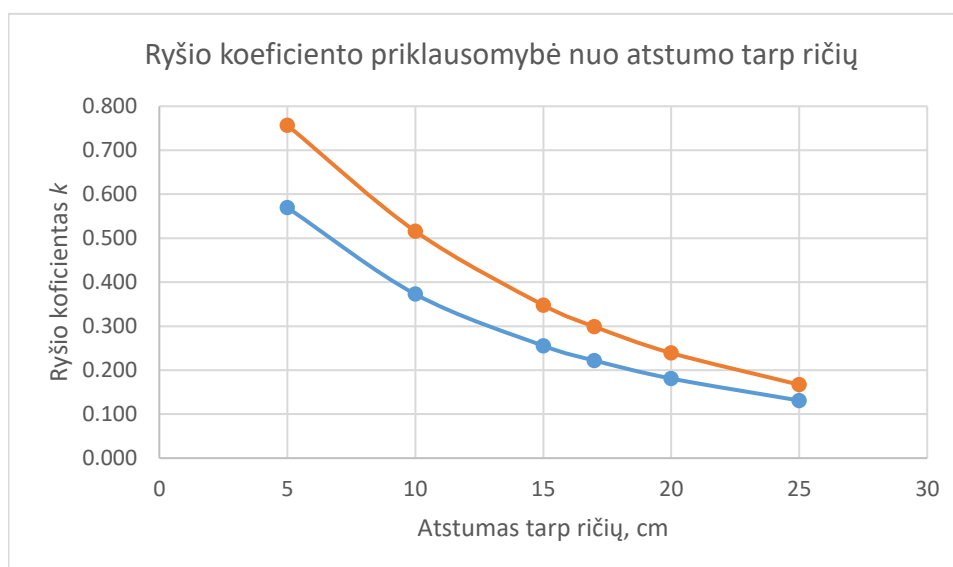
2.3.4. Kvadratinių ričių modeliai keičiant atstumą tarp ričių

Šiame skyrelyje tikrinamas ryšio koeficiento kitimas keičiant oro tarpą tarp ričių z koordinačių ašyje. Modeliavimas atliekamas naudojant kvadratinę ritę. Atstumas didinamas nuo 5 cm iki 25 cm. Rezultatai pateikiami 5 lentelėje ir 33 pav.

5 lentelė. Kvadratinių ričių gauti rezultatai keičiant atstumą tarp ričių z ašyje

Oro tarpas	Be ferito			Su feritu		
	L, mH	M, μ H	Ryšio koeficientas	L, mH	M, μ H	Ryšio koeficientas
5	0,115	65,33	0,570	0,264	200,3	0,757
10	0,115	42,28	0,373	0,213	109,7	0,516
15	0,115	29,31	0,256	0,198	68,93	0,348
17	0,115	25,44	0,222	0,195	58,33	0,299
20	0,115	20,73	0,181	0,193	46,01	0,239
25	0,115	15,04	0,131	0,191	31,86	0,167

Iš gautų rezultatų matoma, kad keičiantis atstumui tarp ričių, kurios yra su feritu pastebimai kinta ritės savasis induktyvumas, atvirkščiai negu konstrukcijoje ritėse be ferito, kuris išlieka vienodas. Esant mažiausiam oro tarpui ritės savasis induktyvumas skiriasi per 0,149 μ H, kas yra daugiau negu du kartus. Abipusis induktyvumas tuo pačiu oro tarpu skiriasi apie 3 kartus, padidėjus atstumui iki 25 cm skiriasi apie 2 kartus. Dėl didesnio abipusio induktyvumo ryšio koeficientas su feritu.



33 pav. Ryšio koeficiento priklausomybė nuo atstumo tarp ričių

Iš grafiko matyti, kad didėjant atstumui kreivė nėra visiškai tiesinė. Kuo mažesnis oro tarpas, tuo greičiau didėja ryšio koeficientas. Tai aktualu automobiliams, kurie turi reguliuojamo aukščio orinę pakabą ir galėtų sumažinti atstumą tarp ričių, tokiu atveju pagerėtų perduodamos galios efektyvumas.

2.3.5. Ričių konstrukcijų svoriai

Kadangi elektromobilio svoris turi reikšmę nuvažiuojamam atstumui, ekonomiškumui, pagaminimo kaštams, svarbu atžvelgti į ričių konstrukcijų svorius. Naudojant „COMSOL Multiphysics version

6.1“ integravimo funkciją gaunamas figūros tūris kurį padauginus iš medžiagos tankio apskaičiuojamas konstrukcijos svoris. Skaičiavimuose naudojamas ritės apvijų vario tankis 8960 kg/m^3 , ferito (MnZn) 4600 kg/m^3 .

Tūris buvo apskaičiuojamas dviem būdais: naudojant funkciją „Volume measurement“ ir integruojant turimą figūrą. Atsakymas pateikiamas kubiniais metrais.

$$V = \iiint dx dy dz$$

Apskaičiuojamas svoris:

$$m = V * \rho$$

Gauti rezultatai pateikiami 6 lentelėje:

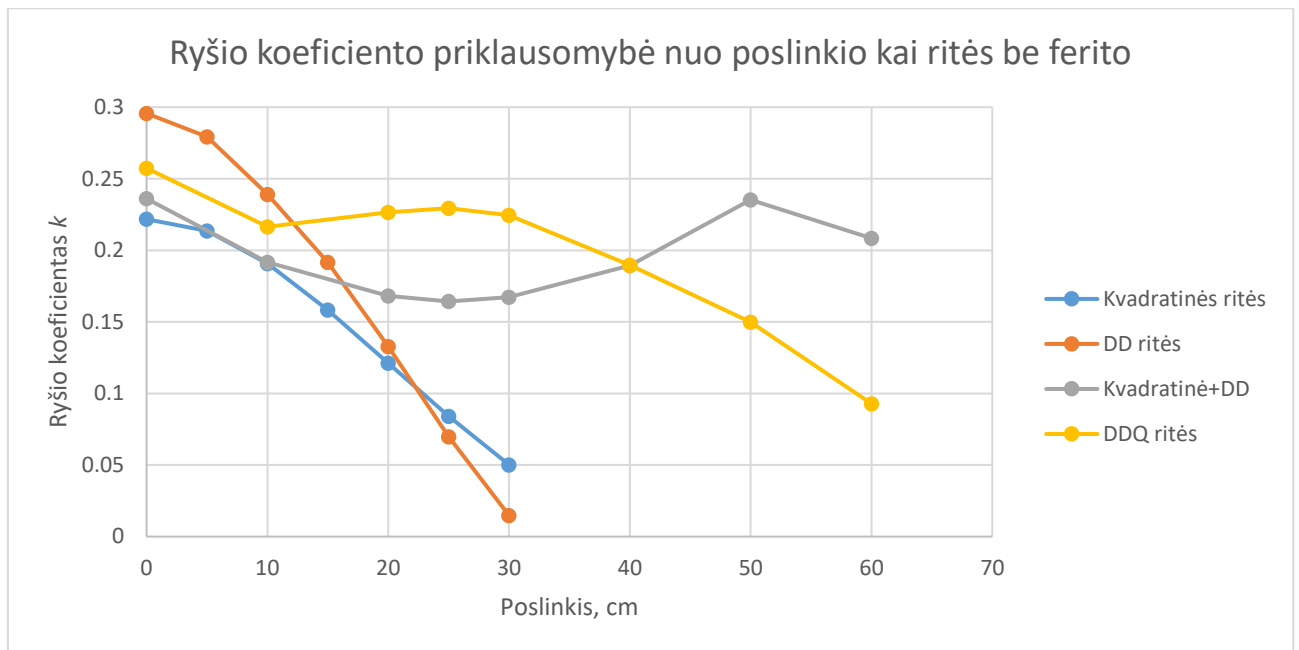
6 lentelė. Ričių ir ferito svoriai

Ritės konstrukcija	Ritės svoris, kg	Ferito svoris, kg	Bendras svoris, kg
Kvadratinė	4,798	-	4,798
Kvadratinė + strypai 2 cm	4,798	0,974	5,772
Kvadratinė + strypai 4 cm	4,798	1,947	6,746
Kvadratinė + plokštelė	4,798	9,200	13,998
DD tipas	9,064	-	9,064
DD + strypai 2 cm	9,064	5,173	14,237
DD + strypai 4 cm	9,064	10,345	19,409
DD + plokštelė	9,064	18,474	27,538
DDQ tipas	14,390	-	14,390
DDQ + plokštelė	14,390	18,474	32,863

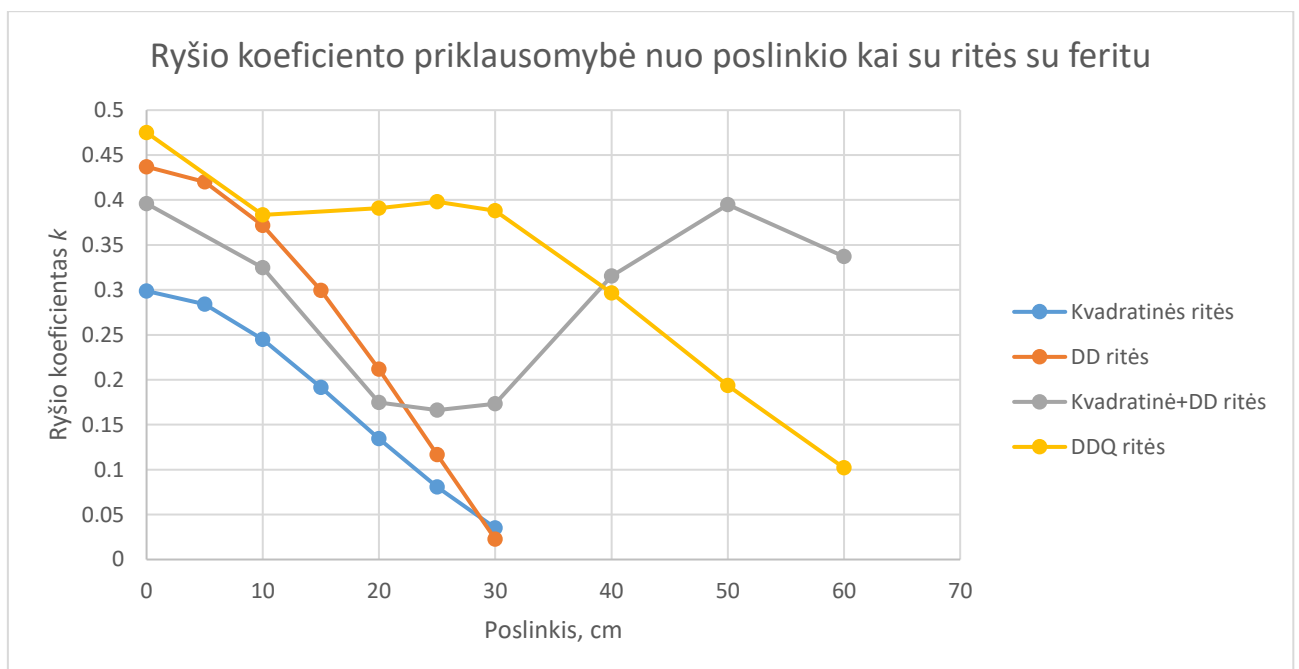
Pagal gautus rezultatus galima daryti išvadą, kad naudojant plokštelės formos feritą didesnį svorį sudaro feritas negu pati elektromagnetinė ritė. Dėl kitokio ferito juostelių išdėstymo ferito svoris skiriasi ne 2 kartus tarp kvadratinės ir DD ričių, o beveik 5 kartus. Galima daryti išvadą, kad svorio atžvilgiu naudingiau naudoti feritą tik po apvijomis, tuomet ferito svoris konstrukcijoje sudarys mažesnę dalį negu varis. Pavyzdžiui, kvadratinės ritės su plokštele svoris panašus į DD tipo ritę su 2 cm juostelėmis, tačiau ryšio koeficientas didesnis DD tipo ritę. Nors ir DDQ ritės konstrukcija yra sunkiausia dėl trijų kvadratinų ričių, tačiau jeigu elektromobilį numatoma įkrauti dinaminio belaidžiu būdu, įkrovimo efektyvumas bus su geresniu ryšio koeficientu, nors ir elektromobilio priėmimo ritė nebus visiškai tiksliai virš siųstuvo ritės. Tokiu atveju elektromobilio svoris būtų beveik 5 kg sunkesnis ir tai gali turėti įtakos mažesniai nuvažiuojamam atstumui, tačiau elektromobilį važiuojant bus galima įkrauti greičiau ir efektyviau.

2.4. Rezultatų apibendrinimas

Iš turimų rezultatų 34 paveiksle pateikiamos kreivės be ferito, o 35 paveiksle kreivės su feritu.



34 pav. Ryšio koeficiento priklausomybė nuo poslinkio kai ritės be ferito



35 pav. Ryšio koeficiento priklausomybė nuo poslinkio kai abi ritės su ferito plokštelėmis

Tarp ričių be ferito, esant tiksliai sulygiuotoms ritėms, geriausias rezultatas gautas su DD tipo ritėmis. Toks įkrovimas būtų efektyviausias, kai elektromobilį padėtų pastatyti išmanūs asistentai arba transporto priemonė autonomiškai galėtų prisiparkuoti. Kitu atveju, ypač jei elektromobilis įkraunamas dinamiu belaidžiu būdu, geriau naudoti DDQ rities, nes turi didelį ryšio koeficientą iki 30 cm išilginio poslinkio. Ritės su feritu didžiausią ryšio koeficientą iki 10 cm poslinkio turi DD ir DDQ ritės, toliau didėjant ričių prasikeitimui iki 30 cm DDQ ritė turėjo geriausius rezultatus. Abejais atvejais su kvadratinėmis ritėmis ryšio koeficientas buvo mažiausias.

Išvados

1. Dėl savo pranašumo, tokių kaip patogumas, saugumas ir patikimumas, belaidis įkrovimas pastaruoju metu yra vertinamas kaip pagrįstai inovatyvus ir perspektyvus elektromobilių pramonėje. Belaidžiam galios perdavimui reikalingos bent dvi elektromagnetinės ritės, kad energija oru būtų perduodama aukšto dažnio elektromagnetiniu lauku. Perduodamos elektros energijos efektyvumas susijęs su ryšio koeficientu, kuris priklauso nuo abipusio induktyvumo ir ričių savitojo induktyvumo. Statinis belaidis elektromobilio įkrovimas vyksta elektromobiliui stovint vietoje, o dinaminis važiuojant eisme.
2. Belaidžiam galios perdavimui naudojamos apvalios, kvadratinės, DD, DDQ ritės. Geriausiai naudoti IPT sistemą dėl aukšto efektyvumo, o su SS topologija rezonansinio kontūro dažnis ir kompensavimo kondensatorių vertės yra nepriklausomos nuo apkrovimo kaitos ir abipusio induktyvumo. Sistemoje dažniausiai naudojamas 85 kHz dažnis.
3. „Comsol Multiphysics“ skaitinio modeliavimo aplinkoje sukurti modeliai su kvadratinėmis, DD ir DDQ ritėmis. Daugiausiai modeliavimas buvo atliekamas su 17 cm oro tarpu tarp ričių keičiant išilginį poslinkį ričių atžvilgiu.
4. Modeliuose didžiausio ryšio koeficiento vertė 0,475 gauta naudojant DDQ rites su ferito plokštelėmis. Maksimalus ryšio koeficientas be ferito įterpimo gautas 0,296.
5. Apibendrinant gautus rezultatus efektyviausiam belaidžiam galios perdavimui geriausia naudoti DDQ arba DD rites su ferito plokštelėmis, dinaminio įkrovimo atveju – DDQ rites. Atsižvelgus į ričių svorius geriausias variantas statiniam belaidžiam įkrovimui naudoti DD rites siūstuve pridedant ferito plokštelę, o imtuve pridedant 2 cm pločio strypus, kur perdavimo ritės svoris apie 27,5 kg, o priėmimo ritės šiek tiek daugiau negu 14 kg.

Literatūros sąrašas

1. Thein, M. E.; Charoensuk, J.; Masomtob, M.; Onreabroy, W.; Kaewpradap, A. Investigation of power transfer efficiency: utilizing different coil designs in wireless. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2021, 1137, 012019. Žiūrėta [2024-06-03]. Prieiga per: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1137/1/012019/pdf>
2. Mohamed, N.; Aymen, F.; Alqarni, M.; Turkey, R. A.; Alamri, B.; Ziad M. Ali, Z. M.; Aleem, A. A new wireless charging system for electric vehicles using two receiver coils. Ain Shams Engineering Journal 2022, 13, 101569. Žiūrėta [2024-06-02]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447921003208>
3. Taghizad-Tavana, K.; Alizadeh, A.; Ghanbari-Ghalehjoughi, M.; Nojavan, S. A Comprehensive Review of Electric Vehicles in Energy Systems: Integration with Renewable Energy Sources, Charging Levels, Different Types, and Standards. Energies 2023, 16, 630. Žiūrėta [2024-06-02]. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/630>
4. Our World in Data. Tracking global data on electric vehicles. 2024. Žiūrėta [2025-03-23]. Prieiga per: <https://ourworldindata.org/electric-car-sales>
5. Bonnet. 10 Cars With a Wireless Charging Function. 2024. Žiūrėta [2025-03-20]. Nuoroda per: <https://www.joinbonnet.com/post/cars-with-wireless-charging>
6. Toka. Bidirectional Charging (V2G): How Necessary and What are their advantages. 2021. Žiūrėta [2025-04-02]. Prieiga per: <https://toka.energy/en/blog/vehicle-to-grid/>
7. Amber. Amber partners with Australian Renewable Energy Agency for EV and Vehicle-to-Grid optimisation. Žiūrėta [2025-03-29]. Prieiga per: <https://www.amber.com.au/blog/amber-partners-with-australian-renewable-energy-agency-for-ev-and-vehicle-to-grid-optimisation>
8. InductEV. Electric Taxis in Sweden Charge With Innovative Wireless EV Charging from InductEV. Žiūrėta [2025-03-30]. Prieiga per: <https://www.inductev.com/blog/electric-taxis-in-sweden-charge-with-innovative-wireless-ev-charging-from-inductev-bkhsf>
9. WiTricity. Comparing efficiency: Wireless EV charging vs. plug-in EV charging. 2024. Žiūrėta [2025-04-02]. Prieiga per: <https://witricity.com/media/blog/why-wireless-ev-charging-is-just-as-efficient-as-plug-in-ev-charging>
10. Behnamfar, M.; Javadi, H.; Afjei, E. A dynamic CPT system LC compensated with a six-plate capacitive coupler for wireless charging of electric vehicle in motion. In: 2020 28th Iranian conference on electrical engineering (ICEE); 2020. p. 1–6. Žiūrėta [2024-06-05]. Prieiga per: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/document/9260922>
11. Li, K.; Chen, J.; Sun, X.; Lei, G.; Cai, Y.; Chen, L. Application of wireless energy transmission technology in electric vehicles. Renewable and Sustainable Energy Reviews 184; 2023, 113569. Žiūrėta [2024-06-03]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123004264>
12. Okasili, I.; Elkhateb, A.; Littler, T. A Review of Wireless Power Transfer Systems for Electric Vehicle Battery Charging with a Focus on Inductive Coupling. Electronics 2022, 11, 1355. Žiūrėta [2024-06-02]. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/9/1355>
13. Bi, Z.; Kan, T.; Mi, C.C.; Zhang, Y.; Zhao, Z.; Keoleian, G.A. A review of wireless power transfer for electric vehicles: Prospects to enhance sustainable mobility. Appl. Energy 2016, 179, 413–425. Žiūrėta [2025-01-05]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916309448>

14. Song, K.; Li, Z.; Jiang, J.; Zhu, C. Constant Current/Voltage Charging Operation for Series-Series and Series-Parallel Compensated Wireless Power Transfer Systems Employing Primary-Side Controller. *IEEE Trans. Power Electron.* 2018, 33, 8065–8080. Žiūrėta [2024-06-03]. Prieiga per: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/document/8086178>
15. Zhang, W.; Wong, S.C.; Tse, C.K.; Chen, Q. Design for efficiency optimization and voltage controllability of series-series compensated inductive power transfer systems. *IEEE Trans. Power Electron.* 2014, 29, 191–200. Žiūrėta [2024-06-04]. Prieiga per: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/document/6471242>
16. Ghazizadeh, S.; Ahmed, K.; Seyedmahmoudian, M.; Mekhilef, S.; Chandran, J.; Stojcevski, A. Critical Analysis of Simulation of Misalignment in Wireless Charging of Electric Vehicles Batteries. *Batteries* 2023, 9, 106. Žiūrėta [2024-06-04]. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2313-0105/9/2/106>
17. Sohn, Y.H.; Choi, B.H.; Lee, E.S.; Lim, G.C.; Cho, G.H.; Rim, C.T. General Unified Analyses of Two-Capacitor Inductive Power Transfer Systems: Equivalence of Current-Source SS and SP Compensations. *IEEE Trans. Power Electron.* 2015, 30, 6030–6045. Žiūrėta [2024-06-05]. Prieiga per: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/document/7055903>
18. Rayan, B. A.; Subramaniam, U.; Balamurugan, S. Wireless Power Transfer in Electric Vehicles: A Review on Compensation Topologies, Coil Structures, and Safety Aspects. *Energies* 2023, 16, 3084. Žiūrėta [2024-06-02]. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/7/3084>
19. Knaisch, K.; Springmann, M.; Gratzfeld, P. Comparison of coil topologies for inductive power transfer under the influence of ferrite and aluminum. In *Proceedings of the 2016 Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte Carlo, Monaco, 6–8 April 2016. Žiūrėta [2025-01-07]. Prieiga per: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/document/7476339>
20. Budhia, M.; Covic, G.; Boys, J. A new IPT magnetic coupler for electric vehicle charging systems. In *Proceedings of the IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, Glendale, AZ, USA, 7–10 November 2010; pp. 2487–2492. Žiūrėta [2025-01-07]. Prieiga per: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/document/5675350>
21. Budhia, M.; Boys, J.T.; Covic, G.A.; Huang, C.Y. Development of a single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2013, 60, 318–328. Žiūrėta [2025-01-07]. Prieiga per: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/document/6099605>
22. Zaheer, A.; Kacprzak, D.; Covic, G.A. A bipolar receiver pad in a lumped IPT system for electric vehicle charging applications. In *Proceedings of the 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2012*, Raleigh, NC, USA, 15–20 September 2012; pp. 283–290. Žiūrėta [2025-01-07]. Prieiga per: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/document/6342811>
23. Nguyen, T.D.; Li, S.; Li, W.; Mi, C.C. Feasibility study on bipolar pads for efficient wireless power chargers. *IEEE Access* 2014; pp. 1676–1682. Žiūrėta [2025-03-30]. Prieiga per: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/document/6803531>
24. Capua, G.; Femia, N. Optimal Coils and Control Matching in Wireless Power Transfer Dynamic Battery Chargers for Electric Vehicles. *IEEE Access* 2021, 9, 166542. Žiūrėta [2025-01-08]. Prieiga per: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/document/9623550>

25. Zhang, Z.; Pang, H.; Georgiadis, A.; Cecati, C. Wireless Power Transfer—An Overview. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2019, 66, 1044–1058. Žiūrėta [2025-01-08]. Prieiga per: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/document/8357386>
26. Dashora, H. K.; Dynamic wireless charging of electric vehicle. University Centre of Studies and Activities for Space „Giuseppe Colombo“-CISAS. 2017, 1086858. [4-10; 26-31; 74-76]. Žiūrėta [2025-01-08]. Prieiga per: https://www.research.unipd.it/retrieve/e14fb26f-b300-3de1-e053-1705fe0ac030/Dashora_Hemant_Kumar_thesis.pdf
27. Xue, Z., Liu, W.; Liu, C.; Chau, K.T. Critical Review of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles. *World Electr. Veh. J.* 2025, 16, 65. Žiūrėta [2025-03-29]. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2032-6653/16/2/65>
28. SAE Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology. 2024. Žiūrėta [2025-03-20]. Prieiga per: https://www.sae.org/standards/content/j2954_202408/
29. Shi, W.; Grazian, F.; Dong, J.; Soeiro, T. B.; Bauer, P. Analysis of Magnetic Field Emissions in Inductive Power Transfer EV Chargers Following Reference Designs in SAE J2954/2019. *IEEE 2020*, 978-1-7281-3320-1. Žiūrėta [2025-03-23]. Prieiga per: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/document/9180787>
30. Issi, F.; Kaplan, O. Design and application of wireless power transfer using Class-E inverter based on Adaptive Impedance-Matching Network. *ISA Transactions* 126, 2022, 415-427. Žiūrėta [2025-05-07]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019057821004183>
31. SAE. SAE TIR J2954/2 Paves the Way for Heavy-Duty EV Charging Without a Plug & Static and Dynamic Wireless Power Transfer. 2022. Žiūrėta [2025-03-24]. Prieiga per: <https://www.sae.org/news/press-room/2022/12/sae-2022-j2954-2>
32. Cummins. WAVE Charging, Venture Logistics, and Cummins Inc participates in demonstration of high-power, ultra-fast 500kW wireless charging system to power electric trucks. 2024 Žiūrėta [2025-04-14]. Prieiga per: <https://www.cummins.com/news/releases/2024/08/08/wave-charging-venture-logistics-and-cummins-inc-participates-demonstration>
33. E-tech. Charging on the go. 2017. Žiūrėta [2025-03-24]. Prieiga per: <https://etech.iec.ch/issue/2017-03/charging-on-the-go>
34. Electronics notes. A4WP Wireless Charging. Žiūrėta [2025-03-24]. Prieiga per: <https://www.electronics-notes.com/articles/equipment-items-gadgets/wireless-battery-charging/a4wp-wireless-charging.php>
35. Carter, C. Barry; Norton, M. Grant. *Ceramic Materials: Science and Engineering*. Springer 2007; p. 598–616. Žiūrėta [2025-04-20]. Prieiga per: <https://link-springer-com.ezproxy.ktu.edu/book/10.1007/978-0-387-46271-4>
36. Spaldin, Nicola A. *Magnetic Materials: Fundamentals and Applications*; 2nd Ed. Cambridge University Press. 2010. p. 120. Žiūrėta [2025-03-29]. Prieiga per: [https://portal.tpu.ru/SHARED/e/EIKUPREKOVA/my_links/Tab/%5BSpaldin_N.A.%5D_Magnetic_Materials\(z-lib.org\).pdf](https://portal.tpu.ru/SHARED/e/EIKUPREKOVA/my_links/Tab/%5BSpaldin_N.A.%5D_Magnetic_Materials(z-lib.org).pdf)
37. The AC/DC Module User's Guide-COMSOL Documentation. 2018, CM020101. [32-36]. Žiūrėta [2024-11-28]. Prieiga per: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.acdc/ACDCModuleUsersGuide.pdf>

38. Yang, Y.; Cui, J.; Cui, X. Design and Analysis of Magnetic Coils for Optimizing the Coupling Coefficient in an Electric Vehicle Wireless Power Transfer System. *Energies* 2020, 13, 4143. Žiūrėta [2025-01-08]. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/16/4143>
39. Sagar, A.; Bertoluzzo, M.; Kumar, A. Analysis and Comprehensive Comparison of Wireless Power Transfer System Using SS and SP topology for Electric Vehicle Charging. *CICTN*. 2023, 979-8-3503-3802-7/23, p. 9-14. Žiūrėta [2025-01-20]. Prieiga per: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/document/10198186>
40. Prosen N.; Domajnko J.; Milanovič M. Wireless power transfer using Double DD coils. *Electronics* 2021, 10, 2528, p. 8-11. Žiūrėta [2025-04-12]. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/20/2528>

Priedai

1 priedas. Modelio sudarymo eiga

Kvadratinių ričių su ferito plokštelėmis geometrijos kūrimo eiga ir parametrai.

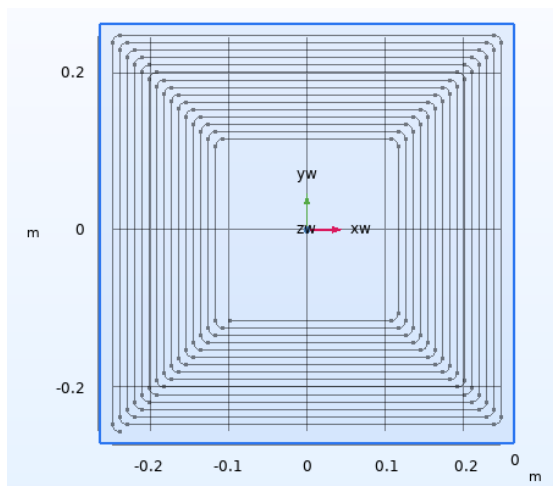
Geometry 1

- Work Plane 1 (wp1)
- Union 1 (uni1)
- Work Plane 2 (wp2)
- Sweep 1 (swe1)
- Work Plane 3 (wp3)
- Sweep 2 (swe2)
- Extrude 1 (ext1)
- Work Plane 4 (wp4)
- Sweep 3 (swe3)
- Work Plane 5 (wp5)
- Sweep 4 (swe4)
- Extrude 2 (ext2)
- Delete Entities 1 (del1)
- Block 1 (blk1)
- Union 2 (uni2)
- Copy 1 (copy1)
- Mirror 1 (mir1)
- Move 1 (mov1)
- Move 4 (mov4)
- Work Plane 6 (wp6)
- Extrude 3 (ext3)
- Move 2 (mov2)
- Mirror 2 (mir2)
- Work Plane 7 (wp7)
- Extrude 4 (ext4)
- Move 3 (mov3)
- Move 5 (mov5)
- Move 6 (mov6)
- Form Union (fin)
- Cumulative Selections

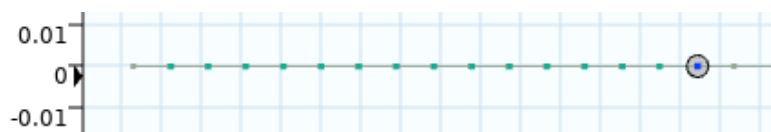
Parameters

Name	Expression	Value
Rout	0.25	0.25
Rin	$Rout - N^2 \cdot Rcond$	0.113 m
Rcond	0.0027[m]	0.0027 m
lgap	0.004[m]	0.004 m
N	15	15
Rang	$0.08 \cdot (Rin)$	0.00904 m
Rang_edges	$Rcond \cdot 1.5$	0.00405 m
Rblock	$5 \cdot Rout$	1.25
f	85000	85000
hair	17 [cm]	0.17 m
Rout_calc	$Rin + N^2 \cdot Rcond$	0.25 m
Rfeout	Rout	0.25
Rfein	Rin	0.113 m
hfe	8 [mm]	0.008 m
wfe	2 [cm]	0.02 m
lfe	0.5 [mm]	5E-4 m
ldispl	10 [cm]	0.1 m

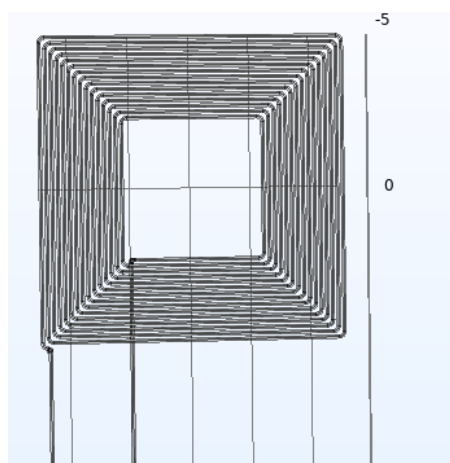
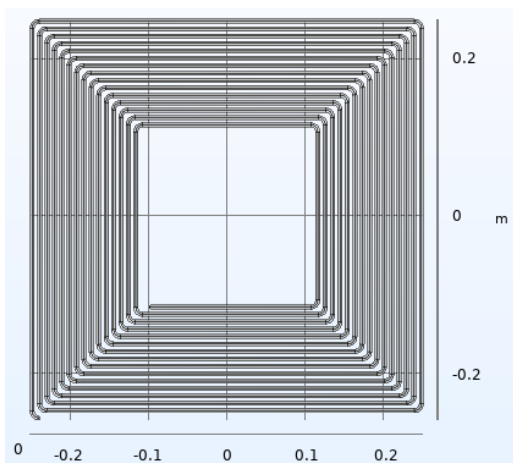
„Work plane 1“ pasirenkama xy ašių plokštuma ir nubraižomi ritės kontūrai pagal apvijų skaičių.



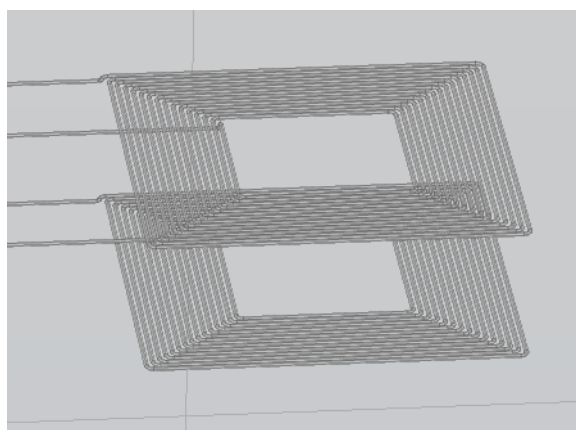
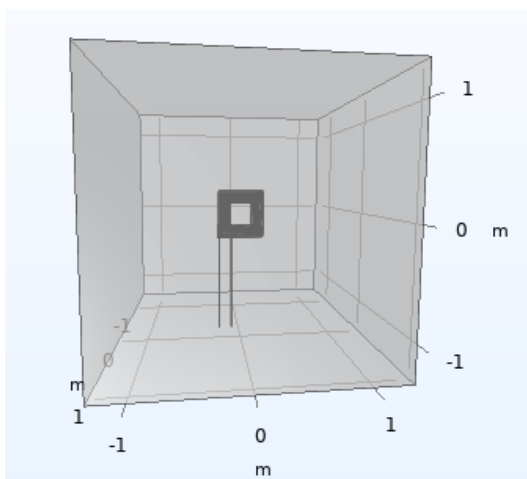
„Work plane 2“ pasirenkama yz ašių plokštuma ir nubrėžiamas apvijos pjūvio apskritimas.



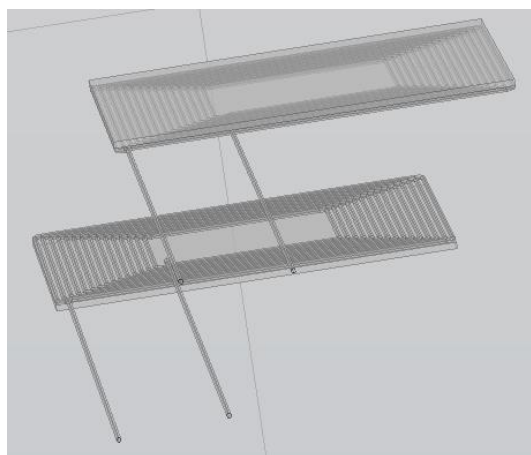
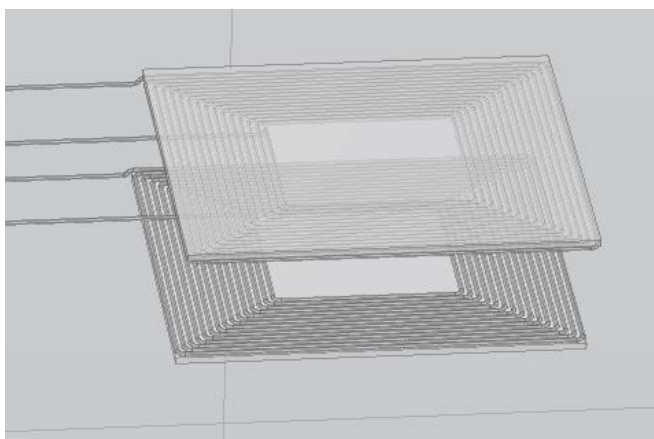
„Sweep 1“ pagalba ritės kontūras pakeičiamas į erdvinę figūrą, o sukuriant naujas plokštumas ir prijungus išvadus gaunama viena sumodeliuota ritė.



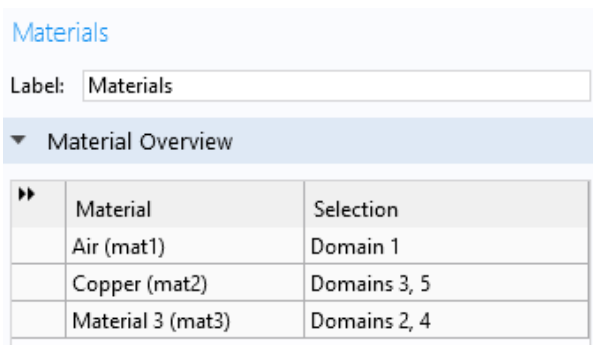
Sukuriamas blokas, kad aplink ritę būtų oras. „Mirror“ ir „Move“ funkcijomis sukurama antra ritė ir paslenkamos viena nuo kitos.



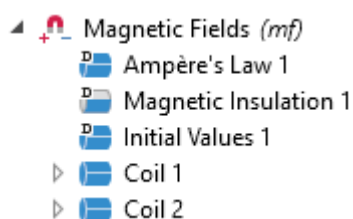
Sukurama „Work plane 6“ plokštuma, nubraižomas kvadratas ir su „Extrude“ funkcija parenkamas figūros storis, kuri tampa erdvine figūra – ferito plokštelė. „Move“ funkcija figūra perkeliama už ritės. „Move“ funkcija pakeičiamos ričių padėtis pagal atliekamą tyrimą.



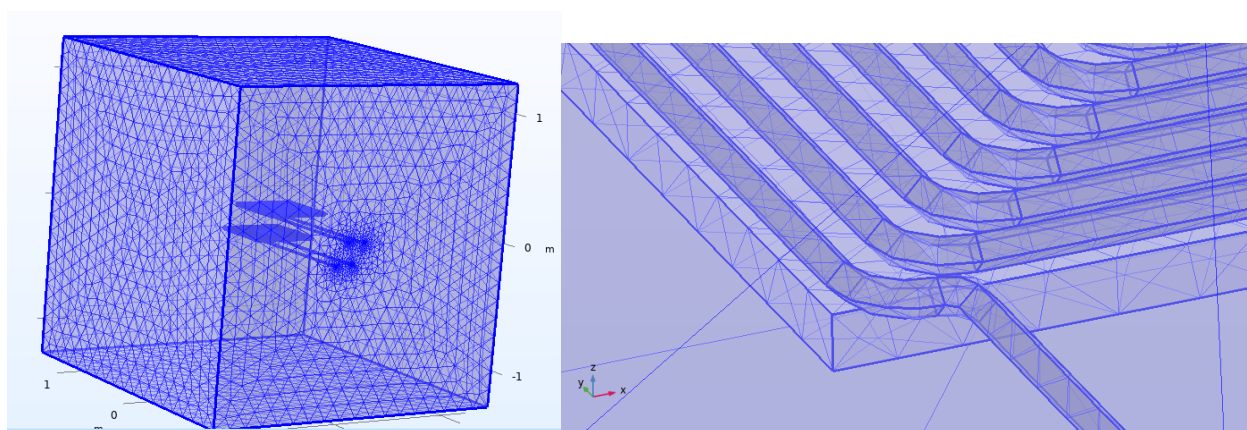
„Materials“ skiltyje parenkami figūrų medžiagos: oras, varis ir feritas.



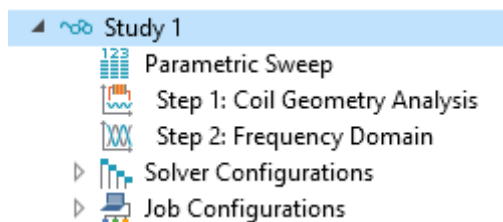
Sistemai parenkami magnetinio lauko skaičiavimai, pasirenkamas ritėse tekantis srovė stipris, pažymimos srovių kryptys.



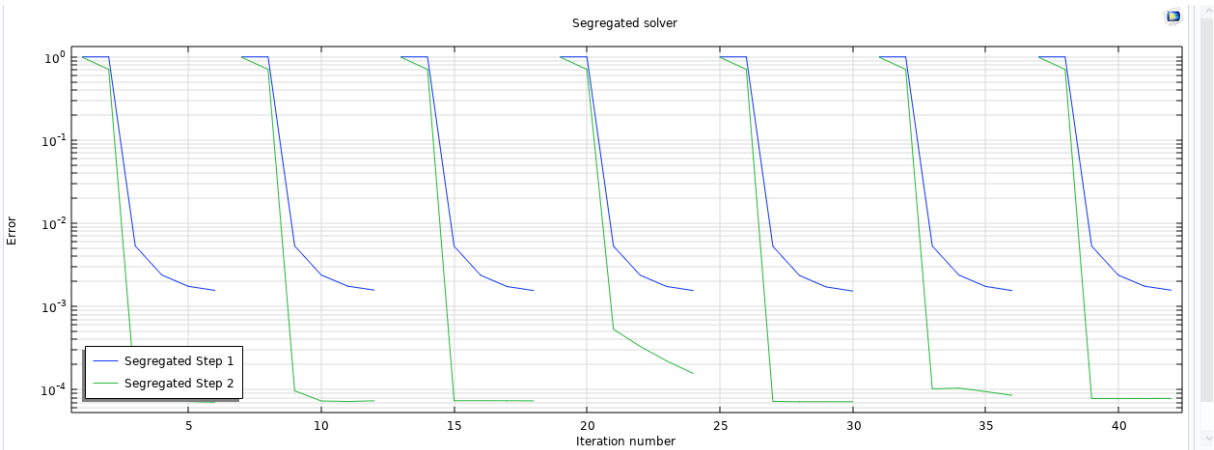
„Mesh 1“ funkcija sukuriamas tinklelis.



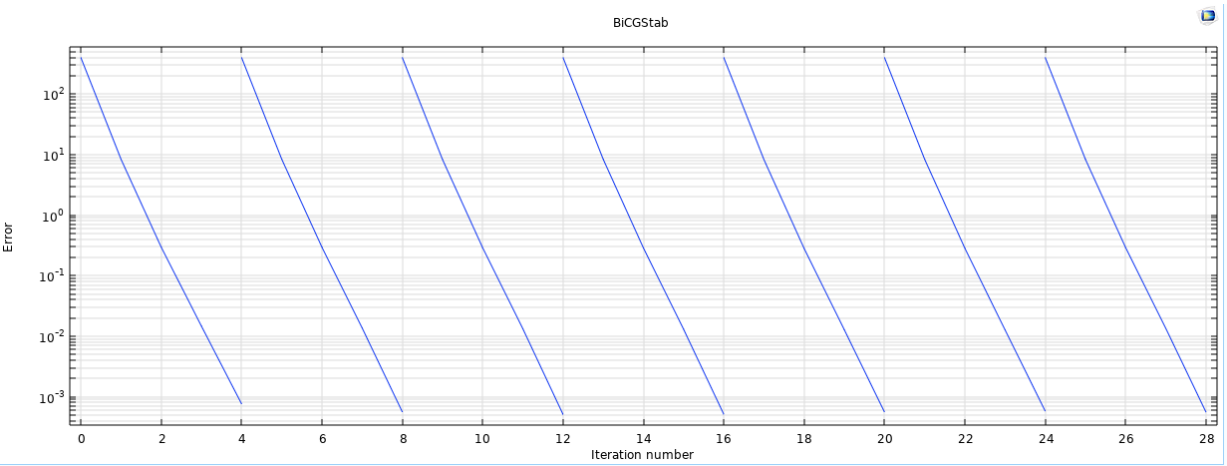
„Study 1“ parenkami parametrai bei tiriami objektai, pagal užduotus kriterijus ieškomi sprendiniai.



Modelio konvergavimo grafiko Nr. 1 rezultatai.



Modelio konvergavimo grafiko Nr. 2 rezultatai.



Pasirenkama kokius parametrus norima pamatyti.

Results		
Results	Datasets	
8.85 e-12	Derived Values	
8.5	Global Evaluation 1	
Volume Integration 1		
8.5	Global Evaluation 2	
8.5	Global Evaluation 3	

Expressions		
Expression	Unit	Description
mf.LCoil_1	H	L1
abs(4*mf.intWm/(mf....	H	L1
abs(mf.VCoil_2/(j*mf....	H	M
abs(mf.VCoil_2/(j*mf....	1	k12
mf.RCoil_1	Ω	R1

2 priedas. Pagrindiniai gautų modelių rezultatai

Kvadratinės ritės be ferito

Idispl (cm)	freq (Hz)	L1 (H)	L1 (H)	M (H)	k12 (1)	R1 (Ω)
0.0000	85000	1.1471E-4	1.1471E-4	2.5436E-5	0.22174	0.017240
5.0000	85000	1.1471E-4	1.1471E-4	2.4487E-5	0.21347	0.017240
10.000	85000	1.1471E-4	1.1471E-4	2.1874E-5	0.19070	0.017240
15.000	85000	1.1471E-4	1.1471E-4	1.8152E-5	0.15824	0.017240
20.000	85000	1.1471E-4	1.1471E-4	1.3914E-5	0.12130	0.017240
25.000	85000	1.1471E-4	1.1471E-4	9.6495E-6	0.084124	0.017240
30.000	85000	1.1470E-4	1.1470E-4	5.7554E-6	0.050178	0.017240

Kvadratinės ritės su ferito plokštelėmis

Idispl (cm)	freq (Hz)	L1 (H)	L1 (H)	M (H)	k12 (1)	R1 (Ω)
0.0000	85000	1.9523E-4	1.9523E-4	5.8324E-5	0.29875	0.021162
5.0000	85000	1.9545E-4	1.9545E-4	5.5522E-5	0.28407	0.021164
10.000	85000	1.9595E-4	1.9595E-4	4.7972E-5	0.24482	0.021164
15.000	85000	1.9646E-4	1.9646E-4	3.7619E-5	0.19148	0.021149
20.000	85000	1.9664E-4	1.9664E-4	2.6410E-5	0.13431	0.021105
25.000	85000	1.9622E-4	1.9622E-4	1.5800E-5	0.080524	0.021027
30.000	85000	1.9518E-4	1.9518E-4	6.8563E-6	0.035127	0.020922

DD ritės be ferito

Idispl (cm)	freq (Hz)	L1 (H)	L1 (H)	M (H)	k12 (1)	R1 (Ω)
0.0000	85000	2.4436E-4	2.4436E-4	7.2905E-5	0.29835	0.032772
5.0000	85000	2.4437E-4	2.4437E-4	6.9549E-5	0.28461	0.032772
10.000	85000	2.4436E-4	2.4436E-4	6.0190E-5	0.24631	0.032772
15.000	85000	2.4437E-4	2.4437E-4	4.6495E-5	0.19027	0.032772
20.000	85000	2.4435E-4	2.4435E-4	3.0273E-5	0.12389	0.032772
25.000	85000	2.4434E-4	2.4434E-4	1.3128E-5	0.053726	0.032772
30.000	85000	2.4432E-4	2.4432E-4	3.4388E-6	0.014075	0.032772

DD ritės su ferito plokštelėmis

Idispl (cm)	freq (Hz)	L1 (H)	L1 (H)	M (H)	k12 (1)	R1 (Ω)
0.0000	85000	5.2649E-4	5.2649E-4	2.2779E-4	0.43265	0.054064
5.0000	85000	5.2617E-4	5.2617E-4	2.1883E-4	0.41590	0.053884
10.000	85000	5.2511E-4	5.2511E-4	1.9346E-4	0.36841	0.053400
15.000	85000	5.2271E-4	5.2271E-4	1.5536E-4	0.29723	0.052604
20.000	85000	5.1851E-4	5.1851E-4	1.0927E-4	0.21074	0.051542
25.000	85000	5.1238E-4	5.1238E-4	5.9967E-5	0.11704	0.050299
30.000	85000	5.0451E-4	5.0451E-4	1.2167E-5	0.024117	0.048984

DD ritės be ferito

Idispl (cm)	freq (Hz)	L1 (H)	L1 (H)	M (H)	k12 (rad)	R1 (Ω)
0.0000	85000	1.4269E-4	9.8032E-4	2.5231E-4	0.25737	0.017240
10.000	85000	1.4270E-4	9.8039E-4	2.1221E-4	0.21646	0.017240
20.000	85000	1.4272E-4	9.8046E-4	2.2217E-4	0.22659	0.017240
25.000	85000	1.4272E-4	9.8049E-4	2.2499E-4	0.22947	0.017240
40.000	85000	1.4274E-4	9.8054E-4	1.8587E-4	0.18956	0.017240
50.000	85000	1.4275E-4	9.8057E-4	1.4686E-4	0.14977	0.017240
60.000	85000	1.4275E-4	9.8059E-4	9.1074E-5	0.092877	0.017240

DD ritė siųstuvas, o kvadratinė ritė imtuvas (be ferito)

Idispl (cm)	freq (Hz)	L1 (H)	L1 (H)	M (H)	k12 (1)	R1 (Ω)
0.0000	85000	1.2208E-4	4.8832E-4	5.4141E-5	0.11087	0.017240
10.000	85000	1.2207E-4	4.8831E-4	4.3415E-5	0.088908	0.017240
20.000	85000	1.2206E-4	4.8831E-4	1.6978E-5	0.034770	0.017240
25.000	85000	1.2204E-4	4.8829E-4	8.0441E-7	0.0016474	0.017240
40.000	85000	1.2202E-4	4.8828E-4	4.2387E-5	0.086810	0.017240
50.000	85000	1.2199E-4	4.8824E-4	5.3990E-5	0.11058	0.017240
60.000	85000	1.2196E-4	4.8823E-4	4.7795E-5	0.097896	0.017240

Kvadratinė ritė siųstuvas, o DD ritė imtuvas (be ferito)

Idispl (cm)	freq (Hz)	L1 (H)	L1 (H)	M (H)	k12 (1)	R1 (Ω)
0.0000	85000	1.1467E-4	1.1467E-4	2.7071E-5	0.23607	0.017240
10.000	85000	1.1469E-4	1.1469E-4	2.1986E-5	0.19170	0.017240
20.000	85000	1.1470E-4	1.1470E-4	1.9284E-5	0.16813	0.017240
25.000	85000	1.1470E-4	1.1470E-4	1.8841E-5	0.16427	0.017240
30.000	85000	1.1470E-4	1.1470E-4	1.9175E-5	0.16717	0.017240
40.000	85000	1.1470E-4	1.1470E-4	2.1720E-5	0.18936	0.017240
50.000	85000	1.1470E-4	1.1470E-4	2.6995E-5	0.23535	0.017240
60.000	85000	1.1470E-4	1.1470E-4	2.3898E-5	0.20834	0.017240

Kvadratinės ritės modelio validacijai

Idispl (cm)	freq (Hz)	L1 (H)	L1 (H)	M (H)	k12 (1)	R1 (Ω)
0.0000	85000	2.9814E-4	2.9814E-4	6.9428E-5	0.23287	0.38085