



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Bevielių energijos perdavimo sistemų perduodamos galios matavimo metodų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Viktoras Girdenis

Projekto autorius

Prof. dr. Žilvinas Nakutis

Vadovas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Bevielių energijos perdavimo sistemų perduodamos galios matavimo metodų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektronikos inžinerija (6211EX012)

Viktoras Girdenis

Projekto autorius

Prof. dr. Žilvinas Nakutis

Vadovas

Doc. Mindaugas Knyva

Recenzentas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Viktoras Girdenis

Bevielių energijos perdavimo sistemų perduodamos galios matavimo metodų tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdamas kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasis 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;
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalintas iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Viktoras Girdenis

Patvirtinta elektroniniu būdu

Girdenis, Viktoras. Bevielių energijos perdavimo sistemų perduodamos galios matavimo metodų tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Žilvinas Nakutis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: Bevielės energijos perdavimas, galia, matavimas.

Kaunas, 2021. 56 p.

Santrauka

Šio projekto tikslas yra pasiūlyti bevielės energijos perdavimo sistemų perduodamos galios matavimo metodus, kai matavimai atliekami tik siųstuvo grandinėse. Tokie metodai aktualūs, nes turint galimybę įvertinti perduodamą energiją tik siųstuvo pusėje galima ženkliai sumažinti kaštus, kadangi matavimo įrangos nereikia montuoti imtuvo pusėje. Atliekant perduodamos galios matavimus siųstuvo pusėje galima atlikti galios perdavimo į imtuvą efektyvumo vertinimą, taip pat vesti apskaitą, kiek galios yra perduodama. Projekte pasiūlyti trys metodai, kuriais atliekant matavimus tik siųstuvo pusėje galima nustatyti, kokia galia perduodama į imtuvą. Atliekant matavimus pirmuoju metodu nereikia žinoti jokių sistemos parametrų. Antruoju metodu būtina žinoti tikslias rezonansinio kontūro komponentų parametrų reikšmes: ričių induktyvumą, varžas, kondensatorių talpumą. Šiame metode yra keičiamas ir siųstuvo žadinimo dažnis. Trečiuoju metodu reikia žinoti tuos pačius komponentų parametrus, kaip ir antruoju būdu. Taip pat keičiamas žadinimo dažnis ir yra prijungiamas kitas kondensatorius, kad siųstuvo pusė būtų suderinta rezonansui su nauju žadinimo dažniu. Pirmiausia atlikti modeliavimai *MATLAB/SIMULINK* aplinkoje ir gauti santykinės ir absoliutinės paklaidų įvertinimai kiekvienam metodui atskirai. Modeliavimai atlikti kai apkrova imtuve yra tiesinė (rezistorius) ir netiesinė (diodų tiltelis, kondensatorius, rezistorius). Modeliavimai atlikti kai kinta apkrova, tarpusavio induktyvumas yra fiksuotas ir kai kinta tarpusavio induktyvumas ir apkrova yra fiksuota. Modeliavimu nustatyta, kad nustatyti galią imtuve galima visais trimis metodais. Rezultatai pateikiami grafikuose ir lentelėse. Atlikti eksperimentiniai bandymai. Pirmiausia buvo suprojektuota elektrinė siųstuvo schema pagal kurią suprojektuota spausdintinio montažo plokštė. Pagamintos siųstuvo ir imtuvo ritės ir surinkti rezonansiniai kontūrai, kurie buvo ištestuoti. Surinkus visą realią sistemą ir parašius programinius kodus *MATLAB* aplinkoje, buvo atlikti eksperimentiniai bandymai, kurie sutampa su bandymais atliktais modeliavimo būdu. Rezultatai pateikiami grafikuose ir lentelėse. Pateiktos išvados. Rezultatai eksperimentiniu būdu gaunami ne tokie tikslūs lyginant su modeliavimu. Tai galėjo nutikti dėl to, nes antruoju ir trečiuoju metodais reikia žinoti tikslias induktyvumų, talpumų ir varžų reikšmes. Visi parazitiniai induktyvumai ir talpumai galėjo turėti įtakos gautų rezultatų tikslumui. Taip pat rezultatų tikslumas galėjo nukentėti dėl to, nes matavimams buvo naudojamas osciloskopas, kuris turėjo tik 8 bitų *analogas – kodas* keitiklį. Galimai, naudojant didesnio bitų skaičiaus *analogas – kodas* keitiklį, būtų galima gauti tikslesnius rezultatus.

Girdenis, Viktoras. Investigation of Transmitted Power Measurement Methods in Wireless Power Transmission Systems. Master's Final Degree Project / Supervisor Prof. Dr. Žilvinas Nakutis; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electronics Engineering, Engineering Sciences

Keywords: Wireless power transfer, power, measurement.

Kaunas, 2021. 56 p.

Summary

The aim of this project is to propose methods to measure transmitted power to receiver when measurements are performed only in the transmitter circuit in wireless power transfer systems. It is relevant because having the ability to estimate the transmitted energy only in the transmitter side can significantly costs because the metering equipment does not need to be installed on the receiver side. Measurements of the transmitted power on the transmitter side can be used to assess the efficiency of the transmitted power to the receiver, as well as to keep records of how much power is transmitted. The project proposes three methods that can be used to determine the power transmitted to the receiver by performing measurements only on the transmitter side. The first method does not require to know any system parameters. For the second method it is necessary to know the exact values of the parameters of the components in the resonant circuit: inductances of the coils, resistances, capacitances of the capacitors. This method requires to change the frequency of the transmitter. The third method requires to know the same component parameters as the second method. The frequency is changed, and another capacitor is connected to match the transmitter side to the new resonant frequency. First, simulations were performed in *MATLAB / SIMULINK* environment and relative and absolute errors were obtained for each method. Simulations were performed when the load on the receiver is linear (resistor) and nonlinear (diode bridge, capacitor, resistor). Simulations were performed when the load was changing, the mutual inductance was fixed, and when the mutual inductance was changing, the load was fixed. During the simulation, it was found that all three methods can determine the power in the receiver. The results are presented in graphs and tables. The simulation found that all three methods can determine the power of the receiver. The results are presented in graphs and tables. First, the electrical circuit diagram of the transmitter was designed. Then the printed circuit board was designed. Transmitter and receiver coils were fabricated, and resonant circuits were assembled and tested. After assembling the real system and writing the software code in *MATLAB* environment, experimental tests were performed, which were the same like in simulations. Experimental tests have shown that all three methods can determine the power in the receiver. The results are presented in graphs and tables. Conclusions and recommendations are presented. The experimental results are worse than the modeling. This may have happened because the second and third methods need to know the exact values of inductances, capacitances, and resistances. All parasitic inductances and capacitances could affect the accuracy of the obtained results. Also, the accuracy of the results could be compromised because an oscilloscope that had only an 8-bit analog code converter been used for the measurements. Possibly using a higher number of bits in the analog digital converter would give more accurate results.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Įvadas.....	10
1. Literatūros analizė.....	11
1.1. Bevielis energijos perdavimas	11
1.1.1. Energijos perdavimas mikrobangomis	11
1.1.2. Energijos perdavimas talpuminiu ryšiu	12
1.1.3. Energijos perdavimas induktyviuoju ryšiu	12
1.1.4. Energijos perdavimas rezonansiniu induktyviuoju ryšiu	13
1.2. Bevielis energijos perdavimas elektriniams automobiliams	14
1.3. Elektrinių automobilių krovimo principas.....	14
1.4. Elektrinių automobilių standartai	18
1.5. Kompensacinės grandinės	19
1.6. Skyriaus apibendrinimas	21
2. Bevielės energijos perdavimo sistemos modeliai	23
3. Beveilių energijos perdavimo sistemų perduodamos galios matavimo metodai	27
3.1. 1 metodas: matavimas esant nežinomiems sistemos komponentų parametrams	27
3.2. 2 metodas: matavimas panaudojant perduodančio signalo dažnio keitimą.....	28
3.3. 3 metodas: matavimas panaudojant perdavimo dažnio ir kompensacinės grandinės talpumo keitimą	30
3.4. Skyriaus apibendrinimas	31
4. Modeliavimo rezultatai	32
4.1. Pirmojo metodo modeliavimo rezultatai, esant tiesinei apkrovai	32
4.2. Antrojo metodo modeliavimo rezultatai, esant tiesinei apkrovai	33
4.3. Trečiojo metodo modeliavimo rezultatai, esant tiesinei apkrovai.....	34
4.4. Pirmojo metodo modeliavimo rezultatai, esant netiesinei apkrovai.....	35
4.5. Antrojo metodo modeliavimo rezultatai, esant netiesinei apkrovai	36
4.6. Trečiojo metodo modeliavimo rezultatai, esant netiesinei apkrovai	37
4.7. Gautų rezultatų palyginimas ir apibendrinimas.....	38
5. Eksperimentinis tyrimas	40
5.1. Eksperimentinės sistemos kūrimas.....	40
5.2. Pirmojo metodo eksperimentiniai rezultatai su tiesine apkrova.....	44
5.3. Antrojo metodo eksperimentų rezultatai su tiesine apkrova	45
5.4. Trečiojo metodo eksperimentų rezultatai su tiesine apkrova	46
5.5. Pirmojo metodo eksperimentiniai rezultatai su netiesine apkrova	47
5.6. Antrojo metodo eksperimentų rezultatai su netiesine apkrova.....	48
5.7. Trečiojo metodo eksperimentų rezultatai su netiesine apkrova	49
5.8. Gautų eksperimentinių rezultatų palyginimas ir apibendrinimas	50
Išvados	52
Literatūros sąrašas	53
Priedai.....	57
1 priedas. Suprojektuota siųstuvo elektrinė schema.....	57
2 priedas. Komponentų sąrašas	58

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Belaidžio energijos perdavimo artimiems atstumams metodų palyginimas.....	13
2 lentelė. Gautų eksperimentinių rezultatų palyginimas, kai kinta apkrova imtuve.....	39
3 lentelė. Gautų eksperimentinių rezultatų palyginimas, kai kinta tarpusavio induktyvumas	39
4 lentelė. Ričių parametrai.....	41
5 lentelė. Gautų eksperimentinių rezultatų palyginimas, kai kinta apkrova imtuve.....	51
6 lentelė. Gautų eksperimentinių rezultatų palyginimas, kai kinta tarpusavio induktyvumas	51

Paveikslų sąrašas

1 pav. Bevielio energijos perdavimo talpuminiu ryšiu elektrinė schema [7]	12
2 pav. Bevielio energijos perdavimo induktyviuoju ryšiu elektrinė schema [7]	12
3 pav. Bevielio energijos perdavimo induktyviuoju ryšiu elektrinė schema [7]	13
4 pav. Energijos perdavimo apskaitos schema [2]	14
5 pav. Elektrinio automobilio krovimo schema [1]	15
6 pav. Bevielio galios perdavimo principinė schema [39]	15
7 pav. Bevielio galios perdavimo supaprastinta principinė schema [39]	16
8 pav. Bevielio galios perdavimo supaprastinta principinė schema [39]	17
9 pav. Kompensacinės grandinės topologijos: (a) nuoseklus - nuoseklus (b) nuoseklus - lygiagretus (c) lygiagretus - nuoseklus (d) lygiagretus – lygiagretus [37].....	19
10 pav. C_p kondensatoriaus parinkimo lentelė su formulėmis [12].....	20
11 pav. C_{pn} priklausomybė nuo sąsajos koeficiento esant skirtingoms kokybės faktoriaus vertėms [12]	21
12 pav. Blokinė modeliuojamo bevielio energijos perdavimo schema (pirmasis variantas)	23
13 pav. Sistemos modelis <i>MATLAB/SIMULINK</i> aplinkoje.....	23
14 pav. Blokinė modeliuojamo bevielio energijos perdavimo schema (antrasis variantas).....	23
15 pav. Sistemos modelis <i>MATLAB/SIMULINK</i> aplinkoje.....	24
16 pav. Sistemos modelis su įtampos ir srovės matavimo taškais.....	24
17 pav. Įtampos (mėlynas) ir srovės (geltonas) signalai modelyje.....	25
18 pav. Įtampos (mėlynas) ir srovės (geltonas) signalai modelyje su tiesine apkrova.....	25
19 pav. Įtampos (mėlynas) ir srovės (geltonas) signalai modelyje su netiesine apkrova.....	26
20 pav. Pirmojo metodo algoritmas.....	28
21 pav. Funkcijos U_{XH} ir I_{XH} vertinimas algoritmas.....	28
22 pav. Antrojo metodo algoritmas	30
23 pav. Trečiojo metodo algoritmas	31
24 pav. Perduodamos galios į imtuvą matavimo paklaidos, kai kinta R_L	33
25 pav. Santykinė galios matavimo paklaida, kai kinta tarpusavio induktyvumas	33
26 pav. Perduodamos galios į imtuvą matavimo paklaidos, kai kinta R_L	34
27 pav. Santykinė galios matavimo paklaida, kai kinta tarpusavio induktyvumas	34
28 pav. Perduodamos galios į imtuvą matavimo paklaidos, kai kinta R_L	35
29 pav. Santykinė galios matavimo paklaida, kai kinta tarpusavio induktyvumas	35
30 pav. Perduodamos galios į imtuvą matavimo paklaidos, kai kinta R_L	36
31 pav. Santykinė galios matavimo paklaida, kai kinta tarpusavio induktyvumas	36
32 pav. Perduodamos galios į imtuvą matavimo paklaidos, kai kinta R_L	37
33 pav. Santykinė galios matavimo paklaida, kai kinta tarpusavio induktyvumas	37
34 pav. Perduodamos galios į imtuvą matavimo paklaidos, kai kinta R_L	38
35 pav. Santykinė galios matavimo paklaida, kai kinta tarpusavio induktyvumas	38
36 pav. Pagaminta ir surinkta bevielio energijos perdavimo siųstuvo sistema	40
37 pav. Pagamintos imtuvo (kairėje) ir siųstuvo (dešinėje) induktyviosios ritės.....	40
38 pav. Siųstuvo rezonanso grandinės pilnutinės varžos priklausomybė nuo dažnio	41
39 pav. Imtuvo rezonanso grandinės pilnutinės varžos priklausomybė nuo dažnio	42
40 pav. Testams naudojama bevielio energijos perdavimo sistema.....	42
41 pav. Generuojami žadinimo signalai	43
42 pav. Žadinimo įtampos signalas (mėlynas) ir srovės signalas siųstuve (žalias).....	43

43 pav. Srovės (violetinis) ir įtampos (raudonas) signalai imtuve, kai turima tiesinė apkrova.....	43
44 pav. Srovės (violetinis) ir įtampos (raudonas) signalai imtuve, kai turima netiesinė apkrova.....	44
45 pav. Tarpusavio induktyvumo matavimo schema	44
46 pav. Perduodamos galios į imtuvą matavimo paklaidos, kai kinta R_L	45
47 pav. Santykinė galios matavimo paklaida, kai kinta tarpusavio induktyvumas	45
48 pav. Perduodamos galios į imtuvą matavimo paklaidos, kai kinta R_L	46
49 pav. Santykinė galios matavimo paklaida, kai kinta tarpusavio induktyvumas	46
50 pav. Perduodamos galios į imtuvą matavimo paklaidos, kai kinta R_L	47
51 pav. Santykinė galios matavimo paklaida, kintant tarpusavio induktyvumui	47
52 pav. Perduodamos galios į imtuvą matavimo paklaidos, kai kinta R_L	48
53 pav. Santykinė galios matavimo paklaida, kai kinta tarpusavio induktyvumas	48
54 pav. Perduodamos galios į imtuvą matavimo paklaidos, kai kinta R_L	49
55 pav. Santykinė galios matavimo paklaida, kai kinta tarpusavio induktyvumas	49
56 pav. Perduodamos galios į imtuvą matavimo paklaidos, kai kinta R_L	50
57 pav. Santykinė galios matavimo paklaida, kai kinta tarpusavio induktyvumas	50

Įvadas

Šiais laikais elektra yra vienas pagrindinių žmonijos poreikių, o elektros energijos perdavimui yra naudojami laidai. Kartais energijos perdavimas laidais nėra pats geriausias pasirinkimas dėl laidų kainų, energijos nuostolių laiduose, dėl kištukų ir kitų mechaninių detalių dėvėjimosi. Būdas išspręsti šia problemą – panaudoti bevielės energijos perdavimo technologijas (angl. *wireless power transmission (WPT)*). Energijos perdavimo efektyvumas, naudojant šią technologiją, tiesiogiai susijęs su atstumu tarp siųstuvo ir imtuvo, nuo sistemų topologijų, komponentų, apkrovos dydžio. Atliekant sistemų derinimą geresniam efektyvumui pasiekti svarbu turėti galimybę išmatuoti galią siųstuve ir imtuve. Taip pat toks galios matavimas reikalingas norint atlikti perduodamos energijos apskaitą – žinoti kiek energijos yra perduodama iš siųstuvo į imtuvą. Tai leistų užtikrinti sąžiningą apskaitą – klientas mokėtų tik už tai, kas yra perduodama į imtuvą ir nemokėtų už nuostolius siųstuve, kurie nuo jo nepriklauso. Tokiu atveju matavimus reikalinga atlikti abiejuose įrenginiuose: siųstuve ir imtuve. Realiose aplikacijose tai padaryti yra pakankamai sudėtinga, kadangi ne visada yra galimybė prisijungti prie imtuvo, nes tokios sistemos gali būti sandarios ir prisijungti matavimo aparatūrą nebūtų galimybių. Taip pat matavimai imtuve, pavyzdžiui, automobilyje, sąlygotų didelius kaštus, kadangi reikėtų į kiekvieną automobilį sumontuoti matavimo įrangą. Dėl šių priežasčių svarbu sukurti tokius matavimo metodus, kuriais neprisijungiant prie imtuvo ir atliekant matavimus tik siųstuvo pusėje galima išmatuoti, kokia galia yra perduodama į imtuvą.

Darbo tikslas:

Pasiūlyti bevielės energijos perdavimo sistemų perduodamos galios matavimo metodus bei nustatyti jų paklaidas, kai matavimai atliekami tik siųstuvo grandinėse.

Uždaviniai:

- apžvelgti bevielės energijos perdavimo sistemas, jų topologijas;
- pasiūlyti bevielės energijos perdavimo sistemos perduodamos galios matavimo metodus, kai matavimai atliekami tik siųstuvo grandinėse;
- ištirti pasiūlytų galios matavimo metodų pasiekiamą tikslumą, modeliuojant *MATLAB/SIMULINK* terpėje;
- sukurti bevielės energijos perdavimo sistemos prototipą ir ištirti pasiūlytų metodų pasiekiamą tikslumą, atliekant eksperimentinius bandymus.

1. Literatūros analizė

1.1. Bevielis energijos perdavimas

Bevielė energijos perdavimo technologija – tai bekontaktis energijos perdavimas iš siųstuvo į imtuvą be tiesioginio elektromechaninio jungimo. Ši technologija naudojama prietaisuose, kurie varijuoja nuo mažos galios jutiklių iki didelės galios elektrinių automobilių [1, 8].

Belaidis energijos perdavimas gali būti labai plačiai naudojamas tiekti energiją prietaisams, kuriuos prijungti prie kabelių yra sudėtinga, nepatogu, pavojinga ar neįmanoma. Belaidis energijos perdavimas gali pailginti prietaiso veikimo trukmę, kadangi nėra mechaninių jungtuku, kištukų ir lizdų, kurie susidėvi ir juos reikia remontuoti. Dėl šių priežasčių prietaisas tampa labiau patikimas. Belaidis energijos perdavimas yra panaudojamas šiose pramonės srityse [3,8, 34]:

- pramoninėje elektronikoje (dirbant pavojingomis sąlygomis, pavyzdžiui, atliekant kasinėjimus netoli sprogiųjų dujų);
- namų apyvokos elektronikoje (telefonų, kompiuterių baterijų krovimas);
- automobilių elektronikoje (elektriniai automobiliai ir jų baterijų krovimas);
- aviacijos elektronikoje (perduodant energiją judantiems prietaisams, dronams);
- biomedicinoje (energijos perdavimas implantams).

Energijos perdavimas bevieliu ryšiu yra skirstomas į šias rūšis:

- energijos perdavimas mikrobangomis;
- energijos perdavimas talpuminiu ryšiu;
- energijos perdavimas induktyviuoju ryšiu;
- energijos perdavimas rezonansiniu induktyviuoju ryšiu.

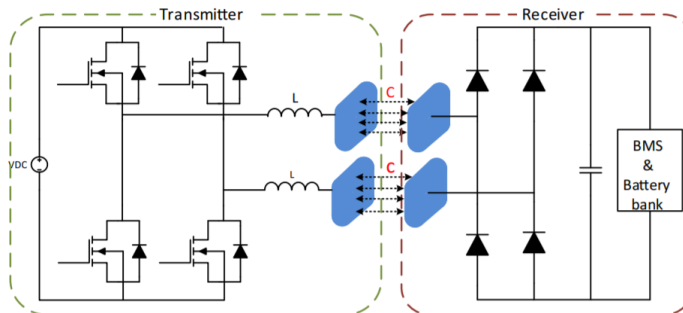
1.1.1. Energijos perdavimas mikrobangomis

Bevielio energijos perdavimo mikrobangomis sistema yra sukurta perduoti energiją laisvojoje erdvėje nenaudojant laidų, bet naudojant mikrobangas. Bevielis perdavimas mikrobangomis plačiai naudojamas energijai perduoti iš vieno taško į kitą nutolusiems objektams ant žemės paviršiaus, komunikacijai su palydovais, radaruose, navigacijos sistemose. Planuojama, kad ateityje bus galima mikrobangų energijos perdavimą panaudoti elektrinių lėktuvų maitinimui, kol jie yra ore, aplink žemę skriejančių palydovų sukauptai saulės energijai perduoti į žemę [5, 38].

Bevielio energijos perdavimo mikrobangomis trūkumas yra tai, kad norint perduoti energiją iš vienos antenos į kitą, jų kelyje negali būti jokių objektų, pavyzdžiui, pastatų, kalnų, medžių, kadangi mikrobangų signalai keliauja tiesia linija iš siųstuvo į imtuvą. Taip pat dalis signalo absorbuojasi į atmosferą, susilpnėja dėl orų sąlygų, pavyzdžiui, audra gali visiškai sustabdyti mikrobangų sklaidimą. Tolimam perdavimui reikalingos didelės antenos signalų siuntimui ir priėmimui padaro sistemą labai didelę ir sunkiai panaudojamą mažiems prietaisams krauti [5, 38].

1.1.2. Energijos perdavimas talpuminiu ryšiu

Tai paprastas ir nebrangus bevielio energijos perdavimo metodas, kuriame naudojami pažangios geometrijos ir struktūros jungiamieji kondensatoriai. Metodas gali būti naudojamas mažos galios prietaisams, pavyzdžiui, nešiojamiems kompiuteriams, telefonų įkrovikliams. Bevielio energijos perdavimo talpuminiu ryšiu elektrinė schema pavaizduota 1 paveiksle.

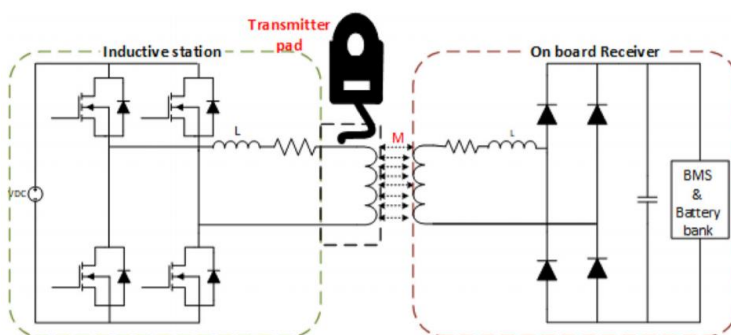


1 pav. Bevielio energijos perdavimo talpuminiu ryšiu elektrinė schema [7]

Šiame metode energija yra perduodama iš siųstuvo į imtuvą naudojant jungiamuosius kondensatorius. Įtampos šuoliai (žadinimo signalai) yra paduodami į tranzistorių tiltelį, kuris dar kitaip vadinamas H tilteliu (angl. *H – bridge*). Tranzistorių suformuota aukšto dažnio kintama įtampa yra perduodama iš siųstuvo į imtuvą per jungiamuosius kondensatorius. Energijos perdavimo efektyvumo padidinimui yra sudaromos rezonanso grandinės, nuosekliai prie kondensatorių prijungiant induktyvias rites. Kintama įtampa imtuve yra pakeičiama į nuolatinę, išlyginama ir perduodama apkrovai. Energijos perdavimo efektyvumas tiesiogiai priklauso nuo kondensatorių dydžio ir tarpo tarp jų. Jei tarpas labai mažas ir plokštelės didelės – galima gauti labai didelio efektyvumo energijos perdavimą [7].

1.1.3. Energijos perdavimas induktyviuoju ryšiu

Bevielio energijos perdavimo induktyviuoju ryšiu elektrinė schema pavaizduota 2 paveiksle.



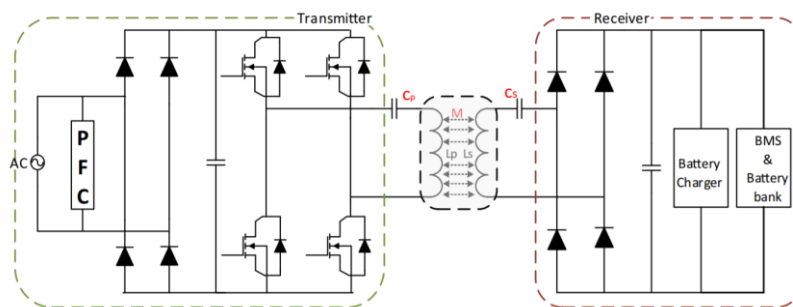
2 pav. Bevielio energijos perdavimo induktyviuoju ryšiu elektrinė schema [7]

Šis metodas taip pat dar yra vadinamas ir tradiciniu bevielio energijos perdavimo būdu. Schema sudaryta iš nuolatinės įtampos šaltinio, H – tiltelio, kuris yra kontroliuojamas paduodant žadinimo signalus. Tiltelis suformuoja aukšto dažnio kintamą srovę, kuri tekėdama per induktyviąją ritę (siųstuvo), formuoja magnetinį lauką, kuris kirsdamas imtuvo ritės vijas indukuoja įtampą imtuve. Kintama įtampa imtuve yra keičiama į nuolatinę įtampą, kuri paduodama į apkrovą. Naudojant šį

metodą galima perduoti ir dideles, ir mažas galias. Tipinis dažnių ruožas šiam perdavimo metodui yra 10 – 50 kHz [7].

1.1.4. Energijos perdavimas rezonansiniu induktyviuoju ryšiu

Bevielis energijos perdavimas rezonansiniu induktyviuoju ryšiu yra pats populiariausias ir labiausiai naudojamas kuriant bevielio energijos perdavimo sistemas ir prietaisus. Tipinė metodo elektrinė schema pavaizduota 3 paveiksle.



3 pav. Bevielio energijos perdavimo induktyviuoju ryšiu elektrinė schema [7]

Šis metodas veikia tokiu pat principu kaip ir bevielis energijos perdavimas induktyviuoju ryšiu. Skirtumas – rezonansinių grandinių gavimui prie siųstuvo ir imtuvo ričių yra pridedamos tam tikros nuoseklios arba/ir lygiagrečios kompensacinės grandinės, kurių esmė induktyvumui ir talpumui kompensuoti vienam kito pilnutinę varžą (angl. *impedance*), taip padidinant sistemos efektyvumą [7, 18, 22]. Rezonansinio dažnio formulė (1) pateikta:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{p,s} \cdot C_{p,s}}}; \quad (1)$$

čia $L_{p,s}$ – siųstuvo ir imtuvo ričių induktyvumas;

$C_{p,s}$ – siųstuvo ir imtuvo kondensatorių talpumas.

Atveju, kai sutampa siųstuvo ir imtuvo rezonanso dažniai – galimas efektyvesnis energijos perdavimas nei induktyviojo ryšio perdavimo atveju. Operacinis dažnis taikomas šiam metodui yra nuo 10 kHz iki 150 kHz [7, 22].

Pirmoje lentelėje (žr. 1 lentelę) pateiktas visų trijų belaidžio energijos perdavimo artimiems atstumams metodų palyginimas.

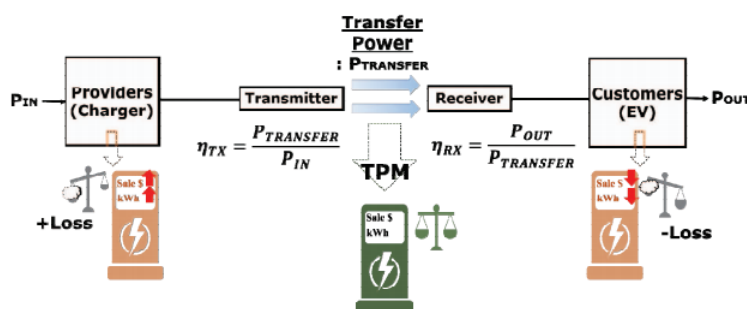
1 lentelė. Belaidžio energijos perdavimo artimiems atstumams metodų palyginimas

	Efektyvumas	Dažnių ribos (kHz)	Kaina	Dydis	Dizaino sudėtingumas	Galios lygis
Induktyvusis	Vidutinis	10 - 50	Vidutinis	Vidutinis	Vidutinis	Vidutinis/ aukštas
Talpuminis	Žemas/ vidutinis	100 - 600	Žemas	Žemas	Vidutinis	Žemas
Rezonansinis induktyvusis	Aukštas	10 - 150	Aukštas	Vidutinis	Vidutinis	Vidutinis/ aukštas

1.2. Bevielis energijos perdavimas elektriniams automobiliams

Elektrinių automobilių krovimui yra naudojamas energijos perdavimas rezonansiniu induktyviuoju ryšiu, nes energijos perdavimo atstumas yra artimas ir yra reikalinga perduoti didelę galią [4,3]. Už automobilių krovimą tam skirtose vietose yra reikalinga apmokestinti klientą pagal tai, kiek energijos šis suvartojo kraudamas savo automobilį. Norint užtikrinti ekonomiškai teisingą elektrinių automobilių krovimą tam skirtose stotyse yra būtina įvertinti nuostolius siųstuvo pusėje. Klientas turi būti apmokestinamas už visą galios suvartojimą, išskyrus galią, kuri yra suvartojama siųstuve [2]. Šis galios matavimas turėtų būti naudojamas ne tik dėl sąžiningo apmokestinimo, tačiau ir galios perdavimo efektyvumui vertinti. Pagal gaunamus rezultatus galima ieškoti patobulinimų, kaip dar būtų įmanoma pagerinti galios perdavimo efektyvumą. Taip pat galima apskaičiuoti, kokia dalis energijos yra iššvaistoma perdavimo metu ir kokio dydžio nuostoliai yra patiriami [2,3].

4 paveiksle pavaizduota situacija kaip galios matavimas iš siųstuvo ir imtuvo pusių keičia kainą tiekėjo arba vartotojo naudai. Jei galia matuojama tiekėjo terminale – tada matavimai įtraukia ir galią, sunaudojamą siųstuve, už kurią klientas neturėtų būti apmokestinamas ir kuri turėtų būti atimta iš galutinės kainos. Kitu atveju, galios matavimas kliento pusėje, taip pat negali teisingai įvertinti visos suvartojamos galios, nes nėra įskaičiuojami imtuvo galios nuostoliai. Šie trūkumai gali būti sprendžiami matuojant galią tarp siųstuvo ir imtuvo. Tai ne tik užtikrintų sąžiningą klientų apmokestinimą, bet taip pat leistų apskaičiuoti siųstuvo ir imtuvo efektyvumus, kurie gali lemti tolimesnį tiekėjo ir kliento bendradarbiavimą ir įrangos tobulinimą [2].



4 pav. Energijos perdavimo apskaitos schema [2]

Kuriant matavimo įrangą labai svarbu atsižvelgti į tokius matavimo aspektus kaip matavimo režiai, stabilumas ir patikimumas [1]. Didelės galios perdavimas nuo kelių milivatų iki keliasdešimt kilovatų. Naudojamas dažnis elektrinių automobilių krovimui yra apibrėžtas 85 kHz (81,39 – 90 kHz), remiantis SAE J2954 standartu. Sukurta sistema turi patikimai ir stabiliai veikti įvairiomis nepalankiomis elektromagnetinėmis sąlygomis [2,3,8].

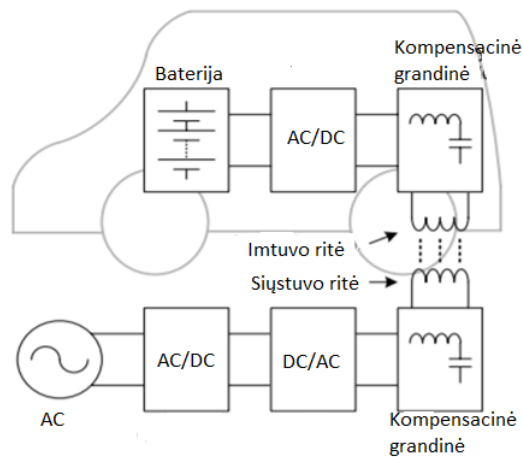
1.3. Elektrinių automobilių krovimo principas

Tipinė elektrinio automobilio krovimo schema pavaizduota 5 paveiksle. Bevielė elektromobilių krovimo įranga susideda iš šių kelių pagrindinių detalių [1]:

- siųstuvo ir imtuvo ričių, kurios yra atskirtos viena nuo kitos;
- galios elektronikos keitiklių.
- energijos šaltinio;

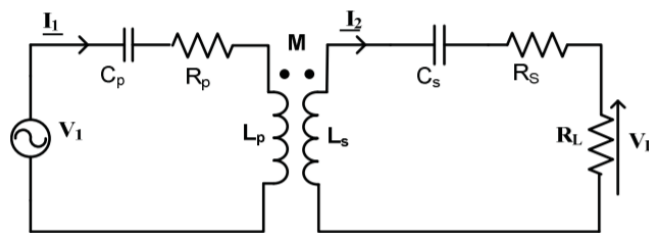
- kompensacinių grandinių.

Sistema susideda iš kelių lygių, kurie leidžia krauti automobilį nuotoliniu būdu. Pirmiausia kintama įtampa yra pakeičiama į nuolatinę naudojant AC/DC keitiklį su galios faktoriaus korekcija. Tada nuolatinė įtampa yra paverčiama į aukšto dažnio kintamą įtampą, kuri yra perduodama į siūstuvo ritę naudojant kompensacinę grandinę. Aukšto dažnio srovė, tekanti pirminėje siūstuvo ritėje, generuoja magnetinį lauką, kuris persiduoda kaip kintama įtampa imtuvo ritėje. Naudojant kompensacines grandines gaunamas rezonansas, dėl kurio perdavimo galia ir efektyvumas padidėja. Imtuvo pusėje kintama įtampa, naudojant AC/DC keitiklį, yra pakeičiama į nuolatinę, kuri yra tinkama krauti bateriją. Pagrindinis skirtumas tarp krovimo laidu ir bevielio krovimo yra transformatorius, kuris antruoju atveju yra pakeičiamas į dvi rites, kurios yra atskirtos viena nuo kitos [1, 9, 22].



5 pav. Elektrinio automobilio krovimo schema [1]

Bevielio energijos perdavimo principinė schema, kai jungimas *nuoseklus – nuoseklus*, yra pavaizduota 6 paveiksle.



6 pav. Bevielio galios perdavimo principinė schema [39]

Pateiktoje schemoje L_p parodo pirmosios ritės (siūstuvo) induktyvumą, L_s – antrosios ritės (imtuvo) induktyvumą. V_1 – tai įtampos šaltinis, kuris generuoja kintamą įtampą. R_p – tai pirminės (siūstuvo) ritės varža, R_s – antrinės (imtuvo) ritės varža. R_L – apkrova imtuvo pusėje, C_p – talpumas siūstuve, C_s – talpumas imtuve.

Siūstuvo ir imtuvo ritės yra susijusios tarpusavyje induktyviuoju ryšiu, kuris yra apibūdinamas kaip tarpusavio induktyvumas ir yra žymimas raide M , matuojamas henriais (H). Jis yra išreiškiamas (2) formule:

$$M = k\sqrt{L_p \cdot L_s}; \quad (2)$$

čia k – sieties koeficientas.

Siųstuvo rite L_p tekanti srovė sukuria magnetinį lauką, kuris kirsdamas imtuvo ritę L_s sugeneruoja įtampą U_{12} imtuvo pusėje, kuri išreiškiama formule (3):

$$U_{12} = j\omega MI_1; \quad (3)$$

čia I_1 – srovė tekanti siųstuvo pusėje;

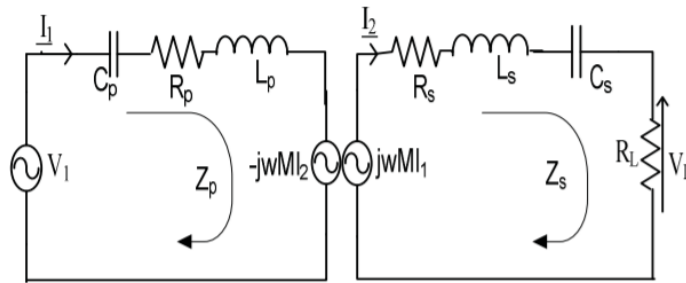
$$\omega = 2\pi f - \text{žadinimo dažnis.}$$

Srovė tekėdama imtuvo ritėje sugeneruoja įtampą U_{21} siųstuvo pusėje, kuri aprašoma (4) formule:

$$U_{21} = -j\omega MI_2; \quad (4)$$

čia I_2 - srovė tekanti imtuvo pusėje.

Grandinė su sugeneruotomis įtampomis atrodo taip, kaip pavaizduota 7 paveiksle.



7 pav. Bevielio galios perdavimo supaprastinta principinė schema [39]

Imtuve tekanti srovė I_2 yra išreiškiama formule (5):

$$I_2 = \frac{j\omega MI_1}{Z_s}; \quad (5)$$

čia Z_s – bendra imtuvo pusės pilnutinė varža (angl. *impedance*).

Imtuvo pusėje bendra pilnutinė varža Z_s yra apskaičiuojamas pagal (6):

$$Z_s = R_L + R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s}. \quad (6)$$

U_{21} Kitaip dar vadinama įneštąja įtampa. Šią įtampą galima interpretuoti kaip apkrovą, ant kurios krinta dalis šaltinio įtampos. Ši apkrova kitaip dar vadinama įneštine pilnutine varža (angl. *reflected impedance*) Z_{ref} . Jis gali būti išreikštas (7) formule:

$$Z_{ref} = \frac{U_{21}}{I_1} = \frac{j\omega MI_2}{I_1}. \quad (7)$$

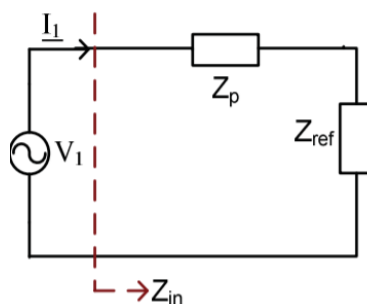
Apjungus (5) formulę su (7) gauname, kad įneštinė pilnutinė varža yra išreiškiama (8) formule:

$$Z_{ref} = \frac{(\omega M)^2}{Z_s}. \quad (8)$$

Iš gautos schemos (žr. 7 pav.) galima išreikšti bendrą siųstuvo pusės pilnutinės varžos formulę (9) :

$$Z_{in} = \frac{U_{in}}{I_1} = R_p + j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p} + Z_{ref} = R_p + j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p} + \frac{(\omega M)^2}{R_L + R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s}}. \quad (9)$$

Turimą schemą galima dar labiau supaprastinti išreiškus įneštinę pilnutinę varžą. Gaunama supaprastinta schema pateikta 8 paveiksle.



8 pav. Bevielio galios perdavimo supaprastinta principinė schema [39]

Turint tokią grandinę yra paprasčiau atlikti įvairius skaičiavimus. Matome, kad gaunamas atsakas iš imtuvo pusės yra tik įneštinė pilnutinė varža. Todėl reikia atrasti būdą, kaip matuojant įneštinę pilnutinę varžą ir atliekant skaičiavimus būtų galima nustatyti kokia galia perduodama į imtuvą. Naudojant įneštinę pilnutinę varžą taip pat galima apskaičiuoti ir atstumą tarp siųstuvo ir imtuvo ričių, tarpusavio induktyvumą ir apkrovą imtuve [6, 15, 16].

Bevielio energijos perdavimo metu svarbu užtikrinti kuo didesnę energijos perdavimo efektyvumą. Maksimalus sistemos efektyvumas η_{max} gali būti apskaičiuotas remiantis (10) formule [1]:

$$\eta_{max} = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2})^2}; \quad (10)$$

čia Q_1 – siųstuvo ritės kokybės faktorius;

Q_2 – imtuvo ritės kokybės faktorius.

Iš (10) formulės matoma, kad norint pasiekti didesnę efektyvumą, reikia didesnio sietis koeficiento k , ir kuo didesnio kokybės faktoriaus Q . Kokybės faktorius gali būti apskaičiuojamas pagal formulę (11):

$$Q = \frac{\omega L}{R}; \quad (11)$$

čia L – ritės induktyvumas;

R – ritės varža.

Iš (11) formulės matome, kad kuo mažesnės varžos yra ritės laidai ir kuo didesnis ritės induktyvumas – tuo didesni Q turime, todėl norėdami padidinti efektyvumą turime didinti sistemos ir medžiagų matmenis. Toks sprendimas padidintų ne tik matmenis, bet ir kainą, o tai nėra geriausias sprendimas, nes visada yra siekiama šiuos du parametrus sumažinti. Vienas iš būdų tai pasiekti – padidinti dažnį, tai padidintų kokybės faktorių ir būtų galima pasiekti didesnę efektyvumą. Efektyvumo gerinimui galima naudoti *Litzo* laidą – tai laidas, supintas iš kelių laidų, kuris turi savybių sumažinti paviršinį efektą. Jis dažniausiai naudojamas perduoti aukšto dažnio signalus. Efektyvumą lemia ir ričių konstrukcija. Keičiant konstrukciją galima pagerinti efektyvumą [1]. Geresniam magnetinio lauko koncentravimui į siųstuvo ar imtuvo pusę taip pat yra naudojamos feromagnetinės medžiagos [13, 18].

Šiuo metu didelės galios bevielio energijos perdavimo sistemoms dažnis yra ribojamas iki 100kHz, nes prie didelių dažnių labai padidėja nuostoliai, kurie atsiranda veikiant perjungimo grandinėms. Dažniausiai bevielio energijos perdavimo sistemų kūrimas būna paremtas eksperimentais, kadangi apskaičiuoti visus įmanomus veiksnius yra pakankamai sudėtinga [13].

Elektrinių automobilių baterijos bevieliu energijos perdavimu gali būti kraunamos, kai automobilis stovi vienoje vietoje ir nejuda imtuvo atžvilgiu – tai vadinamasis statinis krovimo režimas. Jei imtuvas (elektrinis automobilis) juda siųstuvų (kroviklių) atžvilgiu, kurie yra sumontuoti kelyje – tai dinaminis krovimo režimas [31, 35, 36].

Taip pat būtina apibrėžti ir kitas svarbias sąvokas, kurios egzistuoja bevieliame energijos perdavime: aktyvinė galia P [W], pilnoji galia S [VA], reaktyvinė galia Q [VAR], galios faktorius. Aktyvinė galia – tai naudingoji galia, kuri yra naudojama apkrovoje, kuri dažniausiai yra keičiama į šiluminę arba mechaninę energiją. Ši galia matuojama vatais [W] ir dažniausiai žymima P . Reaktyvinė galia – tai galia, kuri atsiranda įvairiose grandinėse, kuriose yra talpų arba induktyvumų, kitaip sakant, reaktyvinių elementų. Ši galia vieno periodo metu kaupiasi numatytoje apkrovoje, o kito periodo metu grįžta atgal į elektros šaltinį ir apkrauna jį. Reaktyvinė galia pasižymi tuo, kad nevirsta į jokią mechaninę ar šiluminę energiją, o pereina į kitas grandines elektromagnetinių bangų pavidalu arba lieka pirminėje grandinėje. Šios galios matavimo vienetas yra reaktyvinis *voltamperas* [VAR], dažniausiai žymima Q . Pilnąją galia yra vadinama vektorinė abiejų prieš tai minėtų galių, aktyvinės ir reaktyviosios, galių suma. Šios galios matavimo vienetas yra *voltamperas* [VA]. Galios faktorius (angl. *Power factor*) – tai aktyvinės ir pilnosios galios santykis. Jei sistemoje yra naudojama tik aktyvinė galia, tada koeficientas lygus 1. Kitais atvejais, kai sistemoje yra naudojama ir reaktyvioji galia, tokiu atveju koeficientas būna žemesnis nei 1. Koeficientas būna žymimas $\cos\varphi$ arba PF [32, 33].

1.4. Elektrinių automobilių standartai

Paleidžiant bevielės energijos sistemas automobiliams yra labai svarbu užtikrinti pilną suderinamumą tarp skirtingų gamintojų elektrinių automobilių (imtuvų) ir krovimo stotelių (siųstuvų), naudojant induktyvųjų rezonansinį energijos perdavimą. Kad sistemos būtų suderintos ir atitiktų visus reikalavimus – bevelis energijos perdavimas elektriniams automobiliams turi būti standartizuotas. Yra išskiriami trys pagrindiniai standartai: SAE J2954, IEC 61980 ir ISO/PAS 19363. Šie standartai yra sudaryti taip pat iš nuorodų į kitus standartus. Standartai dar nėra iki galo baigti, vis dar yra dirbama ties jų tobulinimu, kadangi dar ne visos su bevieliu energijos perdavimu susijusios problemos yra išspręstos [8, 27, 28].

Standarte ISO/PAS 19363 rašoma apie bevielio energijos perdavimo kroviklių naudojimą, funkcijas, komunikacijas, elektromagnetinio suderinamumo reikalavimus, apsaugos sistemų reikalavimus, kurie persipina su SAE J2954 standartu. Standarte IEC 61980 daugiausia kalbama apie saugumo reikalavimus, tokius kaip apsaugos nuo grandinės trumpų jungimų, nuotėkio srovės, apsaugos nuo perkaitimo, užsidegimo. Standarte SAE J2954 yra apibrėžta, kad bevielės energijos perdavimo sistemos efektyvumas, kai siųstuvo ir imtuvo ritės yra sulygiuotos, privalo būti ne mažesnis nei 85 % ir ne mažesnis kaip 80 %, kai siųstuvo ir imtuvo ritės nėra sulygiuotos. Standartuose yra apibrėžta, kad operacinis sistemos veikimo dažnis privalo būti tarp 81,38 kHz ir 90 kHz. Rekomenduojamas dažnis yra 85 kHz. Visuose šiuose standartuose taip pat yra rašoma apie saugumą, kadangi saugumas yra vienas svarbiausių aspektų kalbant apie bevielę energijos perdavimą elektriniams automobiliams.

Taip pat nurodomi reikalavimai elektromagnetiniam suderinamumui – yra pateiktos nuorodos į kitus standartus, kurie yra orientuoti į elektromagnetinį prietaisų suderinamumą [27, 28, 29].

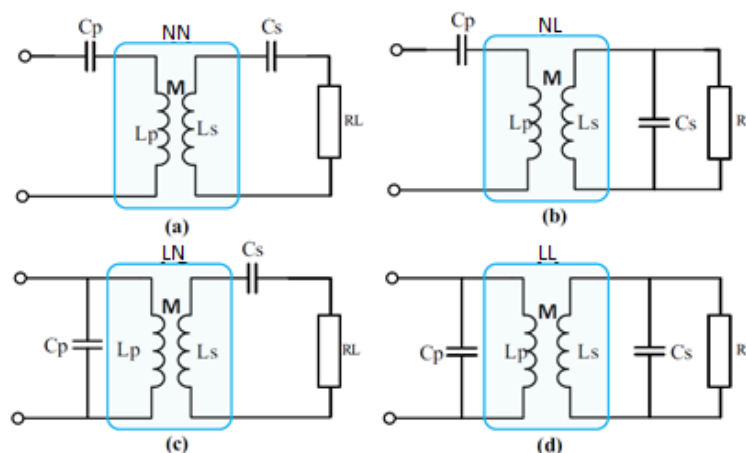
Standartuose bevielės energijos perdavimo sistemos yra klasifikuojamos pagal perduodamą galią ir pagal atstumą tarp siųstuvo ir imtuvo ričių. Pagal galią klasifikuojamos: *WPT1* – iki 3,7 kVA, *WPT2* – iki 7,7 kVA, *WPT3* – iki 11,7 kVA ir *WPT4* – iki 22 kVA. Pagal atstumą klasifikuojamos į Z klases: *Z1* – nuo 100 mm iki 150 mm, *Z2* – nuo 140 mm iki 210 mm, *Z3* – nuo 170 mm iki 250 mm [8, 27].

1.5. Kompensacinės grandinės

Bevielės energijos perdavimo rezonansiniu induktyviuoju ryšiu sistemai labai svarbu tinkamai parinkti kompensacinę grandinę. Bevielės energijos perdavimo sistemose yra būtina panaudoti papildomus kompensuojamuosius kondensatorius tam, kad būtų suformuojamos rezonansinės grandinės siųstuvo ir imtuvo pusėse. Tinkamas kompensacinės grandinės parinkimas yra labai svarbus siekiant kuo didesnio efektyvumo. Suderinus grandinės rezonanso dažniui, talpumo ir induktyvumo pilnutinės varžos kompensuoja viena kitą ir taip gaunamas būdas padidinti efektyvumą. Tam būtina tinkamai pasirinkti induktyvumą ir talpumą pasirinktam žadinimo dažniui. Kompensacinėmis grandinėmis galima suformuoti pastovios įtampos ar pastovios srovės grandines. Priklausomai nuo pasirinktų kompensuojančiųjų kondensatorių pajungimo būdų yra išskirtos keturios pagrindinės topologijos. Joms yra suteikiami pavadinimai remiantis tuo, kaip kondensatoriai yra prijungiami prie pirminės (siųstuvo) ir antrinės (imtuvo) ričių. Galimi variantai [10, 17, 14, 25]:

- *nuoseklus – nuoseklus (NN, angl. SS)*;
- *nuoseklus – lygiagretus (NL, angl. SP)*;
- *lygiagretus – nuoseklus (LN, angl. PS)*;
- *lygiagretus – lygiagretus (LL, angl. PP)*.

Jų elektrinės jungimo schemas pavaizduotos 9 paveiksle.



9 pav. Kompensacinės grandinės topologijos: (a) nuoseklus - nuoseklus (b) nuoseklus - lygiagretus (c) lygiagretus - nuoseklus (d) lygiagretus – lygiagretus [37]

Pirmiausia remiantis (1) formule yra apskaičiuojamas kondensatoriaus talpumas imtuve. Toliau, priklausomai nuo topologijos yra apskaičiuojamas ir siųstuvo talpumas. Skaičiavimo formulės, priklausomai nuo topologijos, pateiktos 10 paveiksle.

Kompensacinės grandinės pasirinkimas priklauso nuo to, kur norima šią sistemą naudoti. Sistemose, kuriose reikalinga turėti aukščiausią efektyvumą naudojamos *NL* arba *NN* grandinės. Grandinės su lygiagrečiu kondensatoriaus jungimu siūstovo grandinėje dėl didelės įėjimo pilnutinės varžos, sudėtingų skaičiavimų, priklausomybių su apkrova ir *k* sieties koeficientu yra naudojamos labai retai. Dažniausiai automobilių krovimo schemose naudojama *NN* topologija.

Nuoseklus – *nuoseklus* topologija pasižymi tuo, kad rezonansinio kontūro dažnis ir kondensatorių reikšmės nėra priklausomos nuo abipusio induktyvumo ir apkrovos kitimų, jų reikšmės priklauso nuo ričių induktyvumų. Tai yra esminis ir svarbiausias bruožas bevielio energijos perdavimo taikyme elektriniams automobiliams, ypač kaip yra kalbama apie dinaminį krovimą (kai automobilis juda), kadangi tokiu atveju sieties koeficientas greitai kinta, nes keičiasi atstumas tarp siūstovo ir imtuvo ričių, taip pat apkrova stipriai kinta priklausomai nuo to, kiek ji yra įkrauta ir kiek laiko kraunama [7, 11, 12, 13].

Lygiagretus – *nuoseklus* ir *lygiagretus* – *lygiagretus* kompensacinių grandinių atveju, jei nėra imtuvo ritės, didelė galia nėra perduodama ir siūstovo ritė neveikia visu pajėgumu. Tačiau siūstovo pusės grandinė yra labai priklausoma nuo apkrovos dydžio ir sieties koeficiento. Ši sistema negali efektyviai perduoti energijos, jei ritės nėra sulygiuotos. Topologijos *nuoseklus* - *lygiagretus* atveju siūstovo pusės kondensatorius nėra priklausomas nuo apkrovos, šiuo būdu taip pat galima gauti didelį energijos perdavimo efektyvumą. Tačiau yra priklausoma nuo sieties koeficiento [7, 17].

Remiantis šiais požymiais, geriausia ir tiksliausia yra naudoti *nuoseklus* – *nuoseklus* topologiją, kadangi šiuo atveju siūstovo pusės talpumas nėra priklausomas. Kitais visais atvejais atsiranda priklausomybės, dėl kurių reikia atlikti derinimus, kurie padaro bevielio energijos perdavimo sistemą sudėtingesne [12, 11]. Pirminės grandinės kondensatoriaus parametrų parinkimo lentelė pateikta 10 paveiksle.

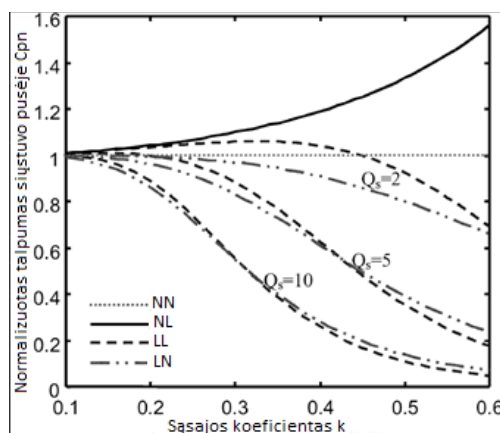
Topologija	Talpumas siūstovo pusėje C_p	Normalizuotas talpumas siūstovo pusėje C_{pn}	Pavyzdžiai C_{pn}		
			$Q_s=10$		
			$k=0.1$	$k=0.2$	$k=0.3$
NN	$\frac{C_s L_s}{L_p}$	1	1	1	1
NL	$\frac{C_s L_s^2}{L_p L_s - M^2}$	$\frac{1}{1-k^2}$	1.01	1.04	1.10
LL	$\frac{(L_p L_s - M^2) C_s L_s^2}{\frac{M^4 C_s R}{L_s} + (L_p L_s - M^2)^2}$	$\frac{1-k^2}{Q_s^2 k^4 + (1-k^2)^2}$	1.00	0.89	0.56
LN	$\frac{C_s L_s}{\frac{M^4}{L_p C_s L_s R} + L_p}$	$\frac{1}{Q_s^2 k^4 + 1}$	0.99	0.86	0.55

10 pav. C_p kondensatoriaus parinkimo lentelė su formulėmis [12]

Iš lentelės matome, kad *NN* atveju pirminės grandinės (siūstovo) kondensatoriaus parenkamas talpumas priklauso tik nuo pasirinktų ričių ir antrinės grandinės (imtuvo) parametrų. *NL* atveju matome, kad atsiranda priklausomybė nuo tarpusavio induktyvumo, o kitais dviem *LN* ir *LL* atvejais gaunama priklausomybė ir nuo imtuvo ritės kokybės koeficiento, ir nuo tarpusavio induktyvumo. Taip pat lentelėje pateiktos normalizuotos ir supaprastintos C_p vertės radimo formulės remiantis formule:

$$C_{pn} = \frac{C_p}{\frac{C_s L_s}{L_p}}. \quad (14)$$

Taip pat 10 paveiksle pateikti pavyzdžiai, kaip keičiasi C_{pn} vertė kai kinta sąsajos koeficientas (angl. *coupling coefficient*) kiekvienos topologijos atveju. Iš šios dalies taip pat matome, kad NN topologijos atveju šio koeficiento kitimas kondensatoriaus parinkimui neturi. Geresniam supratimui, detalesnė informacija apie C_{pn} priklausomybę nuo šio koeficiento pateikta 11 paveiksle.



11 pav. C_{pn} priklausomybė nuo sąsajos koeficiento esant skirtingoms kokybės faktoriaus vėrtėms [12]

Iš grafiko matoma, kaip kinta C_{pn} vertė keičiant sąsajos koeficientą. Jam didėjant, LL ir LN topologijų atveju, kondensatorius turi būti keičiamas į mažesnio talpumo, NL atveju keičiamas į didesnio talpumo, o NN atveju jis visada gali išlikti toks pats, jokių pakeitimų atlikti nereikia.

Dažniausiai naudojama ir labiausiai rekomenduojama topologija bevielio energijos perdavimui elektromobiliams yra *nuoseklus – nuoseklus*. Tačiau naudojant šią topologiją taip pat reikia labai atsakingai atlikti derinimą, kad sistema veiktų bei būtų išvengiama nepageidautino efekto - dažnių pasidalijimo [19, 20]. Šis efektas pasireiškia tada, kai nėra suderinti komponentai R_L – apkrovos varža, Q_P , Q_S – kokybės faktoriai, L_P , L_S – ričių induktyvumai, k – sieties koeficientas. Žinant šiuos parametrus remiantis (15) ir (16) formulėmis galima nustatyti, ar bus gaunamas dažnių pasidalijimo efektas. (15) formulėje jis gaunamas, kai yra tenkinama sąlyga ir k yra didesnis nei lygtis.

$$k \geq \frac{1}{\sqrt{Q_P \cdot Q_S}} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{Q_P}{Q_S} + \frac{Q_S}{Q_P} \right)}. \quad (15)$$

Jei formulėje (16) R_L yra mažesnis nei lygtis, tokio atveju taip pat gaunamas dažnių pasidalijimo efektas.

$$R_L \leq \sqrt{\left(2 \cdot \omega^2 \cdot k^2 - \frac{R_P^2}{L_P^2} \right) \cdot L_S^2}. \quad (16)$$

Šis efektas trukdo pasiekti geriausią energijos perdavimo rezultata, todėl sistemą, jos komponentus yra būtina paderinti, kad būtų išvengta šio efekto [19, 20].

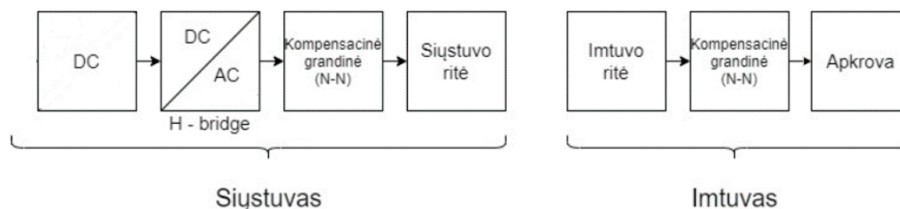
1.6. Skyriaus apibendrinimas

Atlikta detali literatūros analizė, kurios metu pateiktos bevielio energijos perdavimo technologijos, pritaikymas, atliktas detalus paaiškinimas, kaip vyksta energijos perdavimas ir pateiktos supaprastintos elektrinės schemos. Pateikta informacija apie standartus bevielio energijos perdavimo sistemoms elektrinių automobilių krovimui. Aptartos pagrindinės esamos bevielio energijos perdavimo topologijos išskiriant kiekvienos panaudojimo sritį ir teigiamus bei neigiamus aspektus.

Pagrįstas pasirinkimas modeliavimui ir eksperimentams naudoti *NN* topologiją. Kitame skyriuje (antrajame) bus sudaromi bevielės energijos perdavimo sistemos modeliai, pagal kuriuos bus atliekami modeliavimai *MATLAB/SIMULINK* terpėje, kad būtų nustatytos pasiūlytų bevielio energijos perdavimo sistemų perduodamos galios matavimo metodų paklaidos, kai matavimai atliekami tik siųstuvo grandinėse.

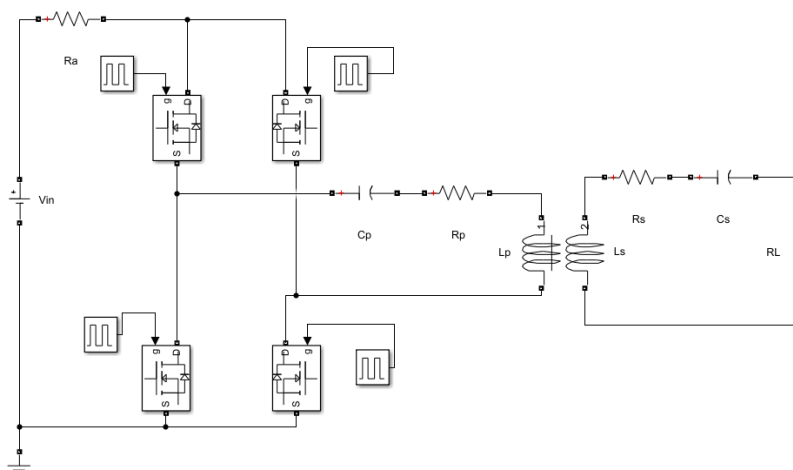
2. Bevielės energijos perdavimo sistemos modeliai

Bevielio perdavimo sistemos modeliavimas bus atliekamas esant dviem apkrovų variantams: 1) tiesinei (rezistorius) ir 2) netiesinei (diodų tiltelis, kondensatorius, rezistorius). Pirmuoju atveju imtuvas bus sudarytas tik iš rezonansinės grandinės ir aktyvinės apkrovos (rezistoriaus). Blokinė modeliuojamo bevielio energijos perdavimo schema pavaizduota 12 paveiksle.



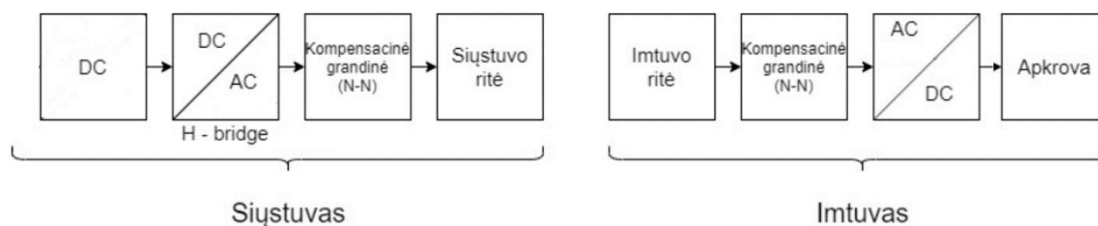
12 pav. Blokinė modeliuojamo bevielio energijos perdavimo schema (pirmasis variantas)

Modeliavimas bus atliekamas *MATLAB/SIMULINK* aplinkoje. Sudarytas modelis pirmam atvejui pavaizduotas 13 paveiksle.

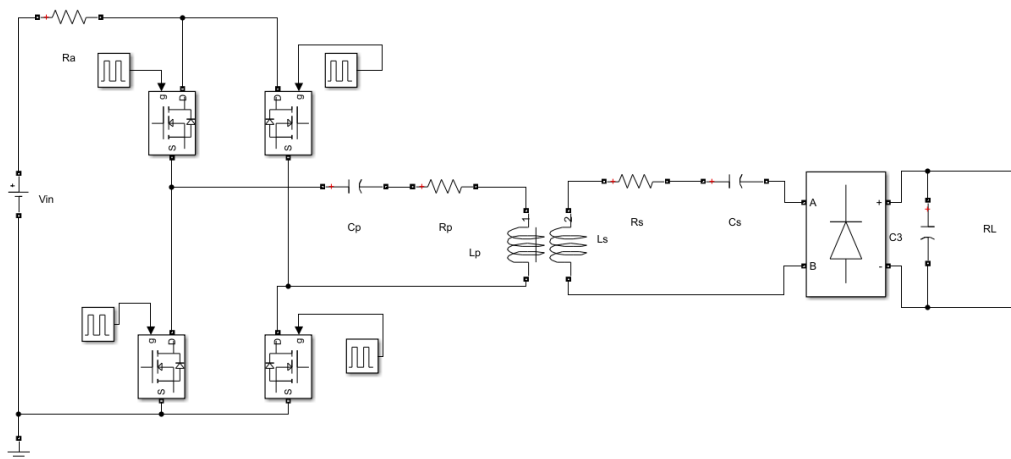


13 pav. Sistemos modelis *MATLAB/SIMULINK* aplinkoje

Antruoju atveju imtuvas bus sudarytas iš rezonansinės grandinės, diodų tiltelio, talpumo (netiesinės apkrovos) ir rezistoriaus. Blokinė modeliuojamo bevielio energijos perdavimo schema pavaizduota 14 paveiksle. Sudarytas modelis yra pavaizduotas 15 paveiksle.



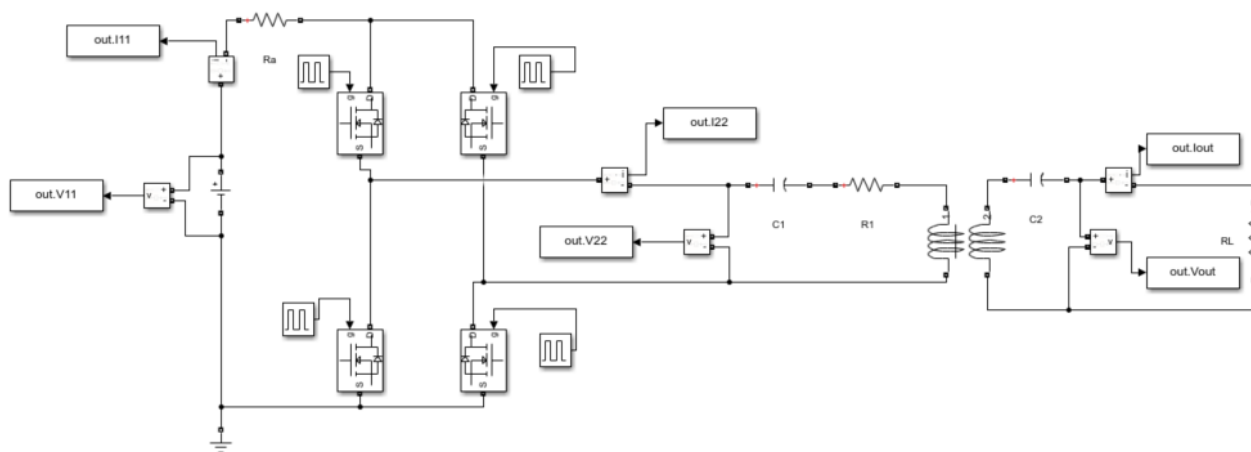
14 pav. Blokinė modeliuojamo bevielio energijos perdavimo schema (antrasis variantas)



15 pav. Sistemos modelis *MATLAB/SIMULINK* aplinkoje

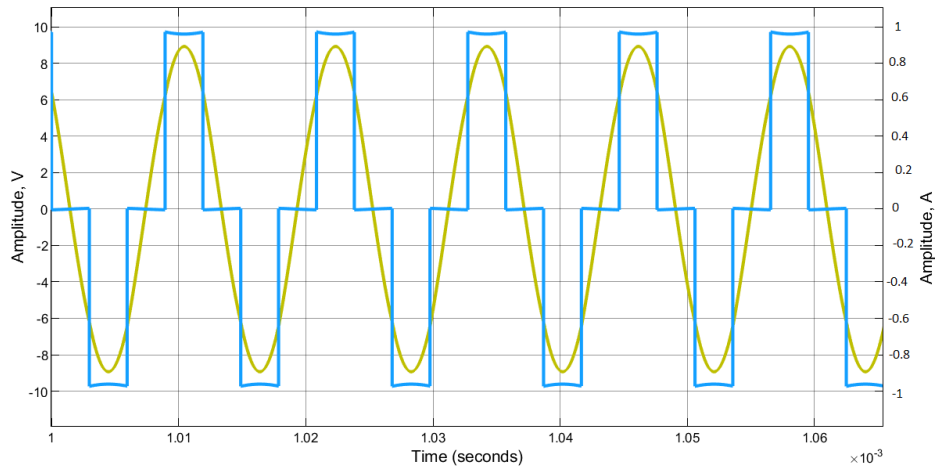
Abiem atvejais naudojamas vienodas siūstuvu dalies modelis. Pagal blokinę schemą matoma, kad pirmiausia bus projektuojamas *DC/AC* keitiklis, kurio vietoje bus naudojamas tranzistorių tiltelis, kuris nuolatinę įtampą pakeis į aukšto dažnio kintamą įtampą. Toliau aukšto dažnio įtampa keliauja per kompensacinę grandinę, kuriai pasirinkta *nuoseklus – nuoseklus* topologija. Sekanti – siūstuvo ritė, kuria tekėdama srovė kuria magnetinį lauką, taip indukuodama įtampą į imtuvo ritę. Pasirinkti grandinių komponentų parametrai yra šie: $f_0 = 84 \text{ kHz}$; $C_P, C_S = 17,94 \text{ nF}$; $L_P, L_S = 200 \text{ } \mu\text{H}$; $V_{in} = 10 \text{ V}$; $R_P, R_S = 0,8 \text{ } \Omega$.

Sistemos modelis su įtampos ir srovės matavimo taškais pavaizduotas 16 paveiksle.



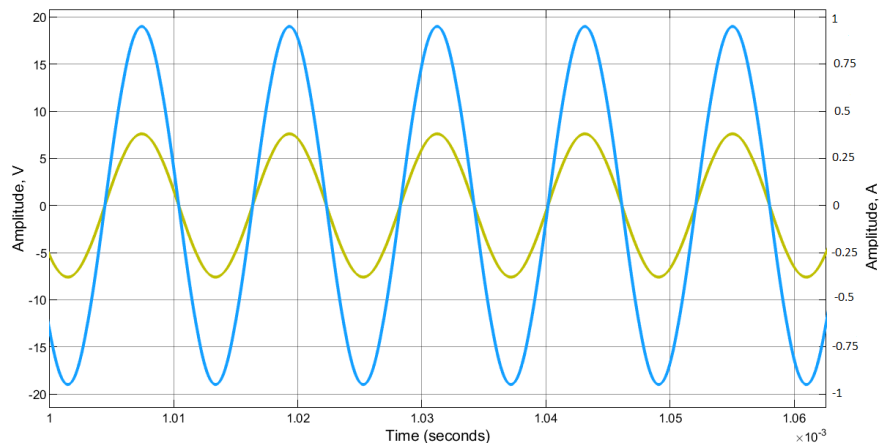
16 pav. Sistemos modelis su įtampos ir srovės matavimo taškais

Įtampos ir srovės signalų formos taškuose *out.V22* ir *out.I22* pavaizduoti 17 paveiksle. Mėlynas signalas vaizduoja įtampą, o geltonas signalas vaizduoja srovės signalą. Matome, kad srovės signalas yra sinuso formos, o įtampos laiptuotos formos, kokią mes formuojame žadinimo signalais.



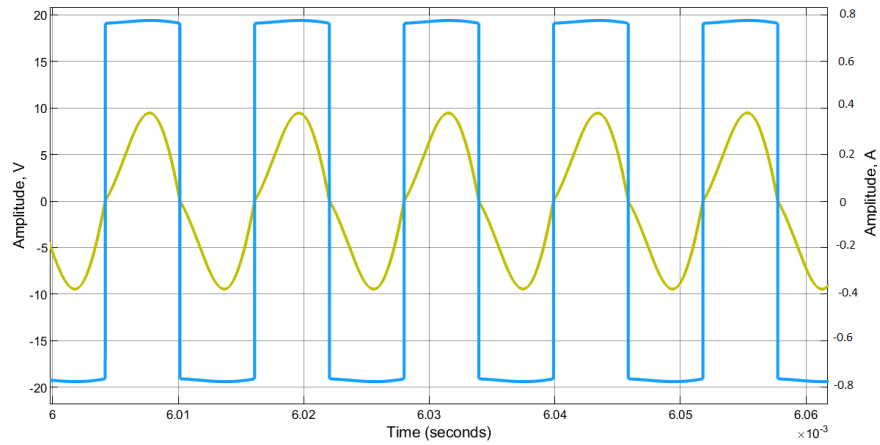
17 pav. Įtampos (mėlynas) ir srovės (geltonas) signalai modelyje

Įtampos ir srovės signalai $out.Vout$ ir $out.Iout$ pavaizduoti 18 paveiksle. Mėlynas signalas vaizduoja įtampą, o geltonas signalas vaizduoja srovės signalą. Matome, kad srovės ir įtampos signalai imtuve yra sinuso formos.



18 pav. Įtampos (mėlynas) ir srovės (geltonas) signalai modelyje su tiesine apkrova

Pakeitus rezistorių R_L 16 paveiksle esančioje schemoje į diodų tiltelį, kondensatorių ir rezistorių gaunama netiesinė apkrova imtuve. Atlikus matavimus prieš tiltelį, gaunami įtampos $out.Vout$ (mėlynas) ir srovės $out.Iout$ (geltonas) signalai pavaizduoti 19 paveiksle. Iš signalų formų matome, kad jie yra iškraipyti ir skiriasi nuo tiesinės apkrovos signalų. Šiuo atveju įtampa yra stačiakampės formos signalas, o srovė – artimos į sinuso formą signalas.



19 pav. Įtampos (mėlynas) ir srovės (geltonas) signalai modelyje su netiesine apkrova

Atlikus modeliavimus *MATLAB/SIMULINK* aplinkoje su suprojektuotomis bevielio energijos perdavimo sistemomis su tiesine (rezistorius) ir netiesine (diodų tiltelis, kondensatorius) apkrovomis, gauti modeliavimo rezultatai eksportuojami į *MATLAB* darbalaukį, kuriame parašytas kodas atliko skaičiavimus, kad būtų išvesti gaunami modeliavimo rezultatai: įtampos, srovės, galios, paklaidos.

3. Bevielių energijos perdavimo sistemų perduodamos galios matavimo metodai

Darbe pasiūlyti 3 žemiau pateikti skirtingi metodai, kuriais galima išmatuoti perduodamą galią iš siųstuvo į imtuvą, matavimus atliekant tik siųstuvo pusėje.

3.1. 1 metodas: matavimas esant nežinomiems sistemos komponentų parametrams

Pirmiausia atliekamas tyrimas, kai yra nežinomi grandinės parametrai C_P (talpumas siųstuvo pusėje), L_S (induktyvumas siųstuvo pusėje), R_P (ritės varža), C_S (talpumas imtuvo pusėje), L_S (induktyvumas imtuvo pusėje), R_S (imtuvo ritės varža), R_L (apkrova). Galios matavimui naudojamas matavimas prie siųstuvo rezonansinio kontūro (ritės L_P ir kondensatoriaus C_P): matuojama įtampa (*out.V22*) ir srovė (*out.I22*) (žr. 16 pav.). Taip pat gautų rezultatų patikrinimui įtampos (*out.Vout*) ir srovės (*out.Iout*) (žr. 16 pav.) matavimai bus atliekami ir imtuvo pusėje.

Galios nustatymo pirmuoju metodu, nežinant grandinės parametru, žingsniai:

1. Pirmiausia apskaičiuojama rezonanso kontūro pradinė pilnutinė varža, kai veikia tik siųstuvas, tačiau nėra imtuvo, $k = 0$. Ji bus žymima Z_{0H} . Diskretizuojami įtampos *out.V22* ir srovės *out.I22* signalai.
2. Greitąja Furjė transformacija įvertinamos pirmosios įtampos ir srovės dedamųjų vertės, kurios sutampa su kontūro žadinimo dažniu. Gaunamos skaitinės vertės U_{0H} ir I_{0H} .
3. Z_{0H} apskaičiuojamas pagal (15) pateiktą formulę:

$$Z_{0H} = \frac{U_{0H}}{I_{0H}} \quad (15)$$

4. Toliau atliekami matavimai, kai sistemoje yra imtuvas, $k \neq 0$. Diskretizuojami įtampos *out.V22* ir srovės *out.I22* signalai.
5. Greitąja Furjė transformacija įvertinamos pirmosios įtampos ir srovės dedamųjų vertės, kurios sutampa su kontūro žadinimo dažniu. Gaunamos skaitinės vertės U_{1H} ir I_{1H} .
6. Gauti rezultatai statomi į (16) formulę, pagal kurią galime suskaičiuoti įneštinę pilnutinę varžą Z_r siųstuvo pusėje:

$$Z_r = \frac{U_{1H} - I_{1H} \cdot Z_{0H}}{I_{1H}} \quad (16)$$

7. Įneštinė pilnutinė varža yra lyg nuosekli apkrova siųstuvo grandinėje, todėl per ją teka tokia pat srovė, kaip ir visoje grandinėje. Į (17) formulę įstačius (5) ir (8) formules, gauname (18) formulę, pagal kurią galime išskaičiuoti, kokia galia yra priimama imtuvo grandinėje.

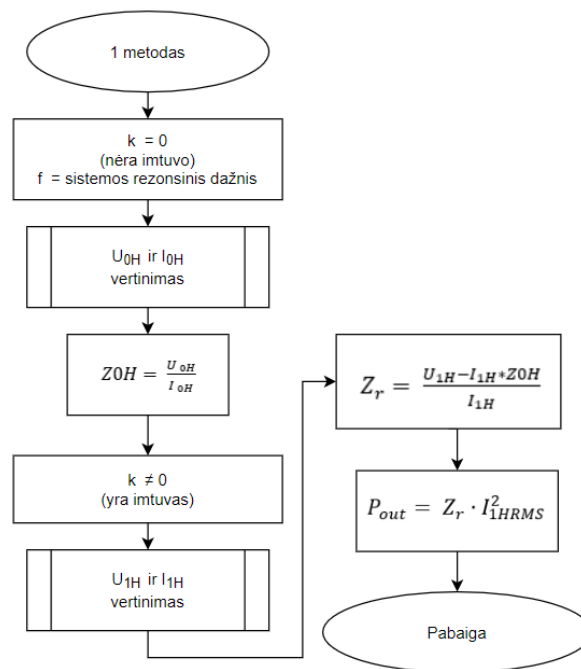
$$P_{out} = I_2^2 \cdot Z_s \quad (17)$$

čia I_2 – srovė imtuve,

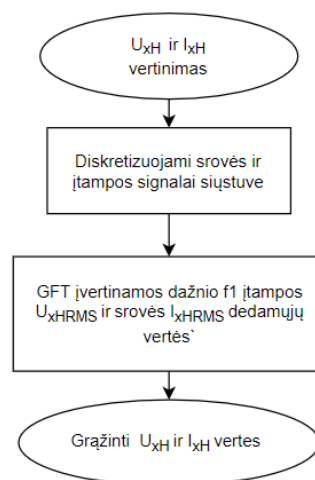
Z_s – imtuvo pilnutinė varža.

$$P_{out} = Z_r \cdot I_{1HRMS}^2 \quad (18)$$

Pirmojo metodo algoritmas pateikiamas 20 paveiksle. Funkcijos U_{XH} ir I_{XH} vertinimas algoritmas pavaizduotas 21 paveiksle.



20 pav. Pirmojo metodo algoritmas



21 pav. Funkcijos U_{XH} ir I_{XH} vertinimas algoritmas

3.2. 2 metodas: matavimas panaudojant perduodančio signalo dažnio keitimą

Atliekant skaičiavimus šiuo metodu būtina žinoti C_P , C_S , L_P , L_S , R_P parametrus. Galios matavimui, kaip ir pirmuoju metodu, naudojamas matavimas prie siūstuvo rezonansinio kontūro: matuojama įtampa ($out.V22$) ir srovė ($out.I22$) (žr. 16 pav.). Taip pat gautų rezultatų patikrinimui įtampos ($out.Vout$) ir srovės ($out.Iout$) (žr. 16 pav.) matavimai bus atliekami ir imtuvo pusėje. Šis skaičiavimo būdas paremtas tuo, kad keičiant rezonansinį žadinimo dažnį ir išsprendus lygčių sistemą yra galima apskaičiuoti galią imtuve. Panašus matavimo metodas keičiant žadinimo dažnį yra nagrinėjamas straipsniuose [21, 24, 25], tačiau juose yra sudaromos kitokios galutinės lygtys.

Galios apskaičiavimui naudojami šie žingsniai:

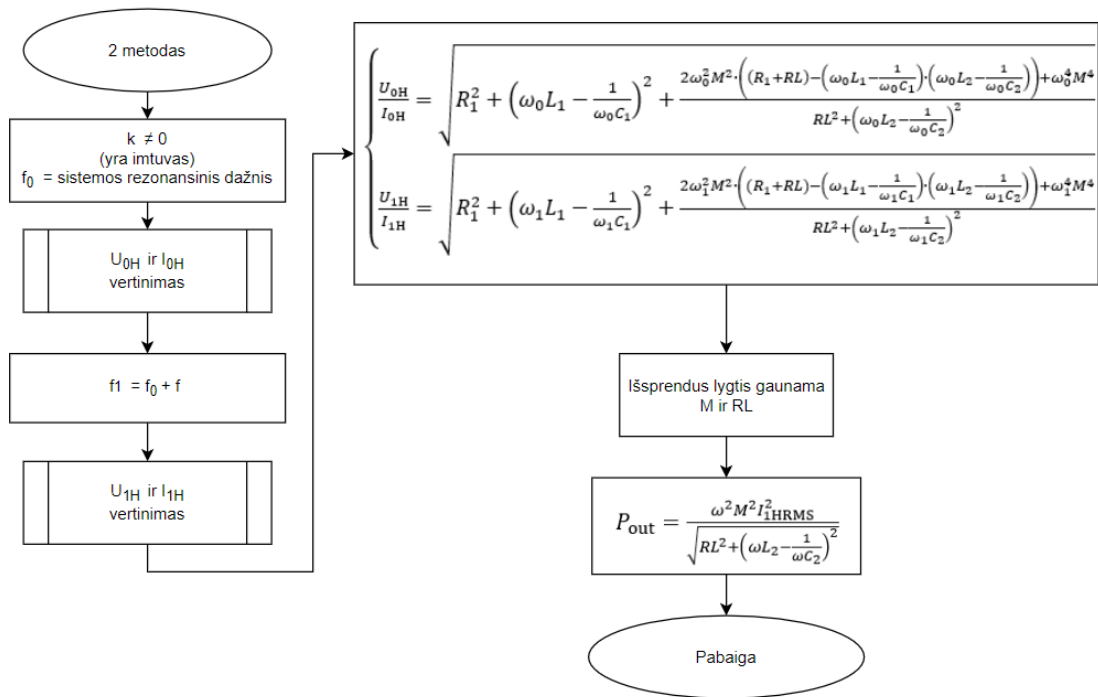
1. Diskretizuojami įtampos *out.V22* ir srovės *out.I22* signalai, kai sistema yra žadinama sistemos rezonanso dažniu f_0 , sistemoje yra siūstuvas ir imtuvas ($k \neq 0$);
2. Greitąja Furjė transformacija įvertinamos pirmosios įtampos ir srovės dedamųjų vertės, kurios sutampa su kontūro žadinimo dažniu. Gaunamos skaitinės vertės U_{0H} ir I_{0H} .
3. Pasirenkamas kitas žadinimo dažnis f_1 , kuris nesutampa su rezonansiniu dažniu. Diskretizuojami srovės ir įtampos signalai *out.V22* ir *out.I22*;
4. Greitąja Furjė transformacija įvertinamos pirmosios įtampos ir srovės dedamųjų vertės, kurios sutampa su žadinimo dažniu. Gaunamos skaitinės vertės U_{1H} ir I_{1H} .
5. Išsprendžiama lygčių sistema (19), įstatant išmatuotus parametrus. Sistema gaunama iš (9) formulės. Naudojama formulė taip pat naudojama ir šaltinyje [24].

$$\begin{cases} \frac{U_{0H}}{I_{0H}} = \sqrt{R_1^2 + \left(\omega_0 L_1 - \frac{1}{\omega_0 C_1}\right)^2 + \frac{2\omega_0^2 M^2 \cdot \left((R_1 + RL) - \left(\omega_0 L_1 - \frac{1}{\omega_0 C_1}\right) \cdot \left(\omega_0 L_2 - \frac{1}{\omega_0 C_2}\right)\right) + \omega_0^4 M^4}{RL^2 + \left(\omega_0 L_2 - \frac{1}{\omega_0 C_2}\right)^2}} \\ \frac{U_{1H}}{I_{1H}} = \sqrt{R_1^2 + \left(\omega_1 L_1 - \frac{1}{\omega_1 C_1}\right)^2 + \frac{2\omega_1^2 M^2 \cdot \left((R_1 + RL) - \left(\omega_1 L_1 - \frac{1}{\omega_1 C_1}\right) \cdot \left(\omega_1 L_2 - \frac{1}{\omega_1 C_2}\right)\right) + \omega_1^4 M^4}{RL^2 + \left(\omega_1 L_2 - \frac{1}{\omega_1 C_2}\right)^2}} \end{cases} \quad (19)$$

6. Gaunami M ir R_L , kurie naudojami (20) formulėje, kuria apskaičiuojama galia imtuve, yra išvedama naudojant (5), (6), (17) formules.

$$P_{out} = \frac{\omega^2 M^2 I_{1HRMS}^2}{\sqrt{RL^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)^2}} \quad (20)$$

Antrojo metodo algoritmas pateiktas 22 paveiksle.



22 pav. Antrojo metodo algoritmas

3.3. 3 metodas: matavimas panaudojant perdavimo dažnio ir kompensacinės grandinės talpumo keitimą

Šis metodas labai panašus į 2 metodą, tik šiuo atveju bandoma gauti tikslesnius matavimo rezultatus, kai keičiant žadinimo dažnį f_1 tuo pačiu yra pakeičiamas ir siūstuvo kondensatorius C_P , priderinant kontūrą prie žadinimo dažnio. Reikia žinoti C_{P1} , C_{P2} , C_S , L_P , L_S , R_P . Taip pat reikia numatyti galimybę derinti rezonanso kontūro dažnį, keičiant siūstuvo talpumą. Tokia idėja buvo pateikta šaltinyje [23]. Galios matavimas prie siūstuvo rezonansinio kontūro atliekamas matuojant įtampą (*out.V22*) ir srovę (*out.I22*) (žr. 16 pav.). Taip pat gautų rezultatų patikrinimui įtampos (*out.Vout*) ir srovės (*out.Vout*) (žr. 16 pav.) matavimai bus atliekami ir imtuvo pusėje. Tačiau pati skaičiavimo logika pasirinkta kitokia nei pateikta straipsnyje.

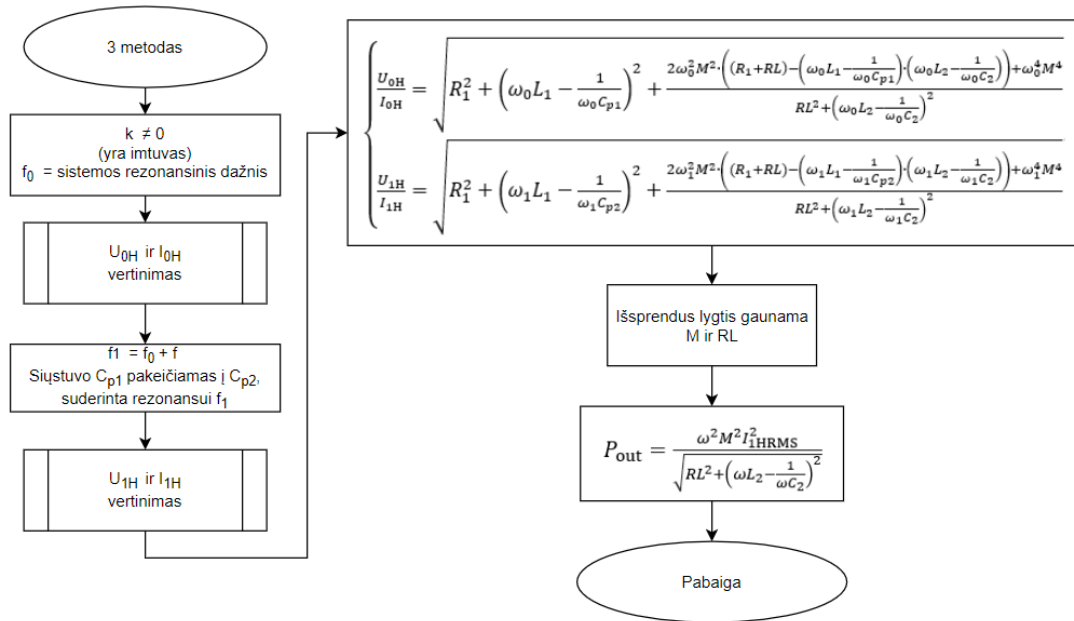
Galios apskaičiavimui naudojami šie žingsniai:

1. Diskretizuojami įtampos *out.V22* ir srovės *out.I22* signalai, kai sistema yra žadinama sistemos rezonanso dažniu f_0 , kai prijungtas C_{P1} , su kuriuos tenkinama rezonanso sąlyga.
2. Greitąja Furjė transformacija įvertinamos pirmosios įtampos ir srovės dedamųjų vertės, kurios sutampa su žadinimo dažniu. Gaunamos skaitinės vertės U_{0H} ir I_{0H} .
3. Pasirenkamas kitas žadinimo dažnis f_1 , taip pat siūstuvo pusė suderinama rezonansui, parenkant atitinkamą talpumą C_{P2} . Diskretizuojami įtampos *out.V22* ir srovės *out.I22* signalai.
4. Greitąja Furjė transformacija įvertinamos pirmosios įtampos ir srovės dedamųjų vertės, kurios sutampa su žadinimo dažniu. Gaunamos skaitinės vertės U_{1H} ir I_{1H} .
5. Išsprendžiama lygčių sistema (21):

$$\begin{cases} \frac{U_{0H}}{I_{0H}} = \sqrt{R_1^2 + \left(\omega_0 L_1 - \frac{1}{\omega_0 C_{p1}}\right)^2 + \frac{2\omega_0^2 M^2 \cdot \left((R_1+RL) - \left(\omega_0 L_1 - \frac{1}{\omega_0 C_{p1}}\right)\right) \cdot \left(\omega_0 L_2 - \frac{1}{\omega_0 C_2}\right) + \omega_0^4 M^4}{RL^2 + \left(\omega_0 L_2 - \frac{1}{\omega_0 C_2}\right)^2}} \\ \frac{U_{1H}}{I_{1H}} = \sqrt{R_1^2 + \left(\omega_1 L_1 - \frac{1}{\omega_1 C_{p2}}\right)^2 + \frac{2\omega_1^2 M^2 \cdot \left((R_1+RL) - \left(\omega_1 L_1 - \frac{1}{\omega_1 C_{p2}}\right)\right) \cdot \left(\omega_1 L_2 - \frac{1}{\omega_1 C_2}\right) + \omega_1^4 M^4}{RL^2 + \left(\omega_1 L_2 - \frac{1}{\omega_1 C_2}\right)^2}} \end{cases} \quad (21)$$

6. Gaunami M ir R_L , kurie naudojami (20) formulėje, kuria yra apskaičiuojama galia imtuve.

Trečiojo metodo algoritmas pavaizduotas 23 paveiksle.



23 pav. Trečiojo metodo algoritmas

3.4. Skyriaus apibendrinimas

Pasiūlyti trys bevielio energijos perdavimo sistemų perduodamos galios matavimo metodai, kai matavimai atliekami tik siųstuvo grandinėse. Atliekant matavimus pirmuoju pasiūlytu metodu nebūtina žinoti kontūro komponentų parametrų, priešingai nei antruoju ir trečiuoju metodais. Šiems taip pat yra keičiamas ir žadinimo dažnis. Trečiajam metodui papildomai siųstuvo pusėje keičiant žadinimo dažnį yra pakeičiamas kondensatorius, kad siųstuvo pusės kontūro rezonansinis dažnis sutaptų su naujuoju žadinimo dažniu. Kitame skyriuje bus pateikiami gautų matavimo metodų paklaidų rezultatai, gauti atliekant modeliavimus *MATLAB/SIMULINK* aplinkoje su tiesine ir netiesine apkrovomis.

4. Modeliavimo rezultatai

Atlikti įvertinimai naudojant *MATLAB/SIMULINK* pagal 13 paveiksle ir 15 paveiksle pateiktus modelius. Skaičiavimams ir gautų duomenų palyginimui su tikraisiais bus naudojama santykinė paklaida. Santykinė paklaida skaičiuojama naudojant pateiktą paklaidos skaičiavimo formulę (22):

$$\varepsilon = \frac{(P_r - P_{est})}{P_r} \cdot 100\%; \quad (22)$$

čia P_r – aktyvioji galia imtuve;

P_{est} – apskaičiuota galia vienu iš pasiūlytų metodų.

Aktyvioji galia imtuve yra apskaičiuojama naudojant formulę (23):

$$P_r = P_{ap} + P_{L2}; \quad (23)$$

čia P_{ap} – galia apkrovoje, apskaičiuojama pagal (24) formulę [30];

P_{L2} – galia išskaidoma dėl imtuvo ritės varžos, apskaičiuojama pagal formulę (25).

$$P_{ap} = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T (out.Vout(t) \cdot out.Iout(t)) dt. \quad (24)$$

$$P_{L2} = out.IoutRMS^2 \cdot R_{L2}; \quad (25)$$

Čia $out.IoutRMS$ – $out.Iout$ signalo RMS vertė;

R_{L2} – imtuvo ritės varža.

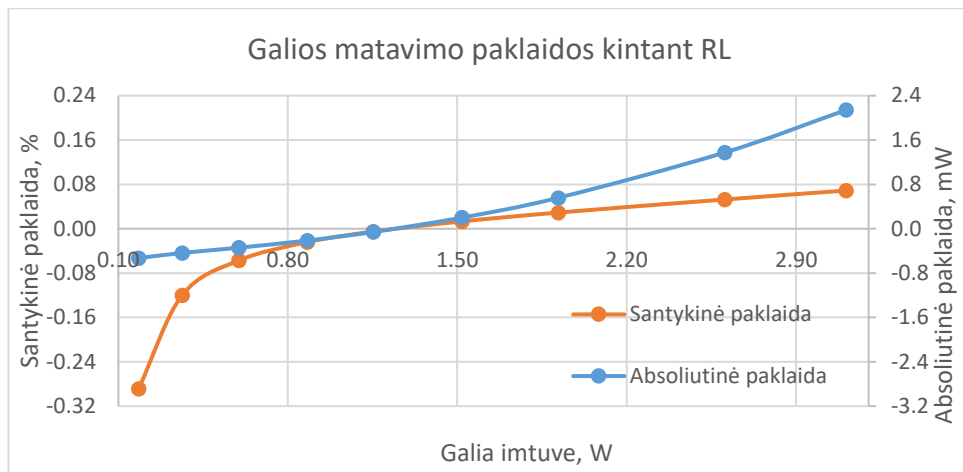
Absoliutinė paklaida skaičiuojama naudojant pateiktą skaičiavimo formulę (26):

$$\Delta = P_r - P_{est}. \quad (26)$$

Tarpusavio induktyvumo tyrimui pasirinkta naudoti reikšmes, kai k kinta nuo 0,05 iki 0,4. Remiantis (4) formule gauname, kad tarpusavio induktyvumo kitimo ribos k is nuo 10,5 μH iki 78,6 μH . Kai $k = 0,05$ – siūstovo ir imtuvo ritės yra nutolusios viena nuo kitos didžiausiu atstumu, kai $k = 0,4$ – ritės yra arti viena kitos. Realiose elektromobilių krovimo aplikacijose, krovimo metu k koeficientas būna nuo 0,2 iki 0,3 [7]. Todėl matavimai, esant pastoviam tarpusavio induktyvumui, bus atliekami kai k yra nurodytuose režimuose, šiuo atveju $k = 0,24$. Naudojant (4) formulę gauname, kad tarpusavio induktyvumas bus lygus 48 μH .

4.1. Pirmojo metodo modeliavimo rezultatai, esant tiesinei apkrovai

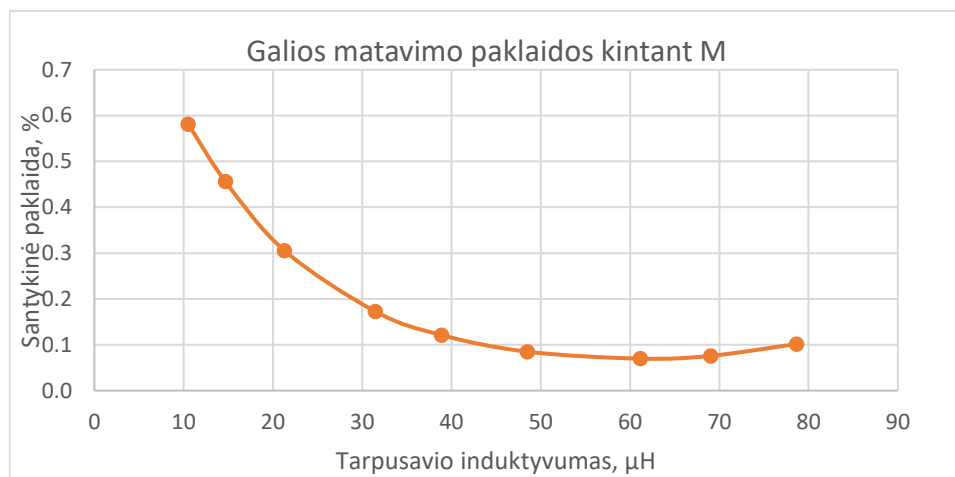
Modeliavimo būdu gautas absoliutinės ir santykinės paklaidų įvertinimas, kai $M = 48 \mu\text{H}$. Tokia sąlyga yra galima, kai imtuvas stovi fiksuotoje padėtyje siūstovo atžvilgiu. Kinta tik apkrova R_L . Rezultatai pateikti 24 paveiksle.



24 pav. perduodamos galios į imtuvą matavimo paklaidos, kai kinta R_L

Gauta, kad santykinės paklaidos modulio kitimo diapazonas yra intervale nuo 0,005 % iki 0,288 %. Didžiausia absoliutinė paklaida moduliui lygi 2,14 mW, mažiausia lygi 0,05 mW.

Atliktas įvertinimas, kai R_L yra pastovi ir lygi 75Ω ir kinta tik tarpusavio induktyvumas. Rezultatai pateikti 25 paveiksle.

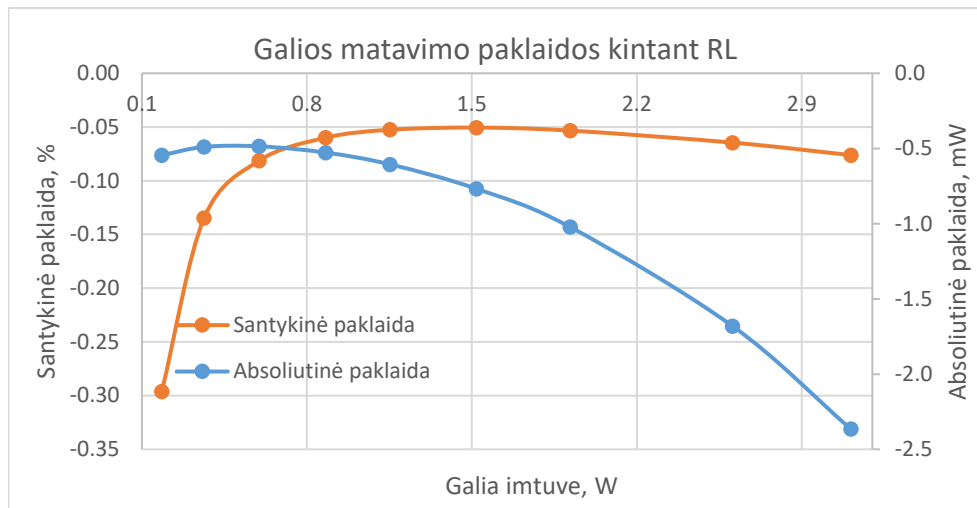


25 pav. Santykinė galios matavimo paklaida, kai kinta tarpusavio induktyvumas

Gauta, kad santykinės paklaidos modulio kitimo diapazonas yra intervale nuo 0,07 % iki 0,58 %.

4.2. Antrojo metodo modeliavimo rezultatai, esant tiesinei apkrovai

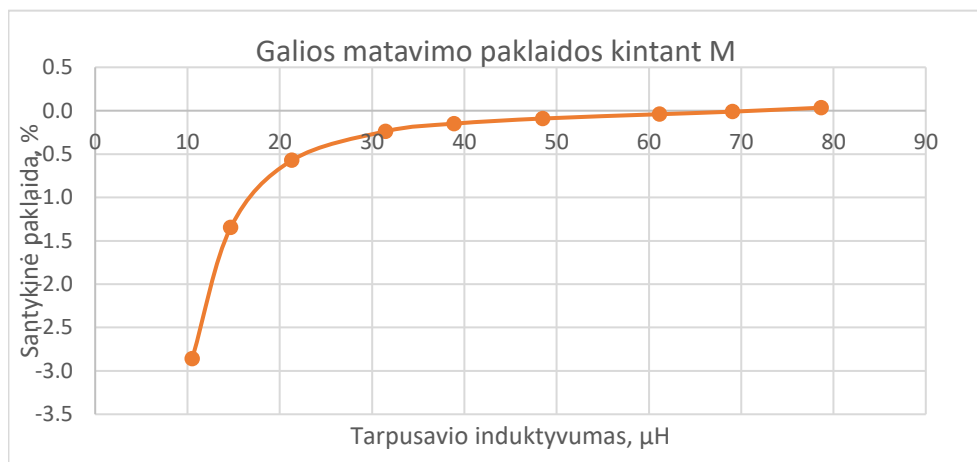
Modeliavimai atliekami, kai kinta apkrova, o tarpusavio induktyvumas išlieka pastovus $48 \mu H$. Rezultatai pateikti 26 paveiksle.



26 pav. perduodamos galios į imtuvą matavimo paklaidos, kai kinta R_L

Gauta, kad santykinės paklaidos modulio kitimo diapazonas yra intervale nuo 0,05 % iki 0,29 %. Didžiausia absoliutinė paklaida moduliui lygi 2,36 mW, mažiausia lygi 0,48 mW.

Modeliavimai atliekami, kai kinta M , o R_L išlieka pastovus. Rezultatai pateikti 27 paveiksle.

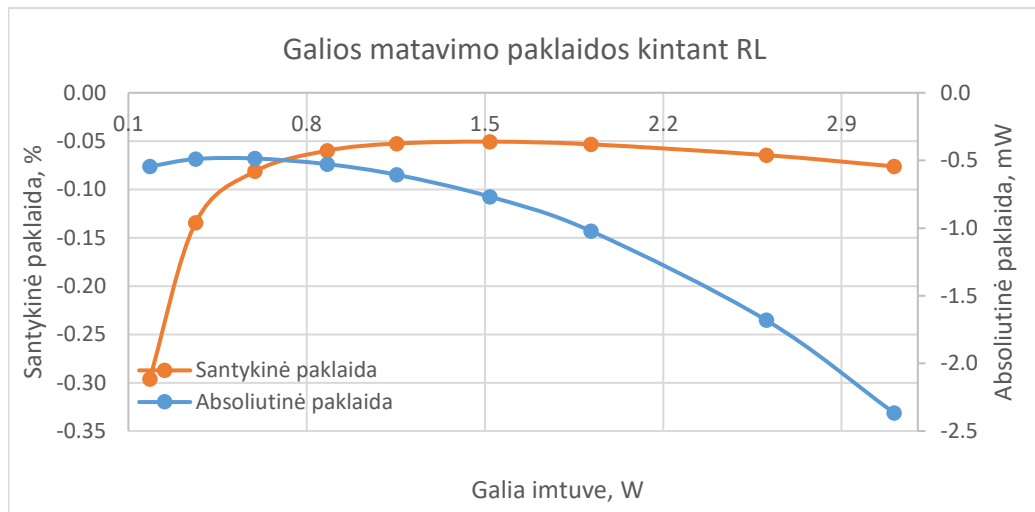


27 pav. Santykinė galios matavimo paklaida, kai kinta tarpusavio induktyvumas

Gauta, kad santykinės paklaidos modulio kitimo diapazonas yra intervale nuo 0,01 % iki 2,85 %.

4.3. Trečiojo metodo modeliavimo rezultatai, esant tiesinei apkrovai

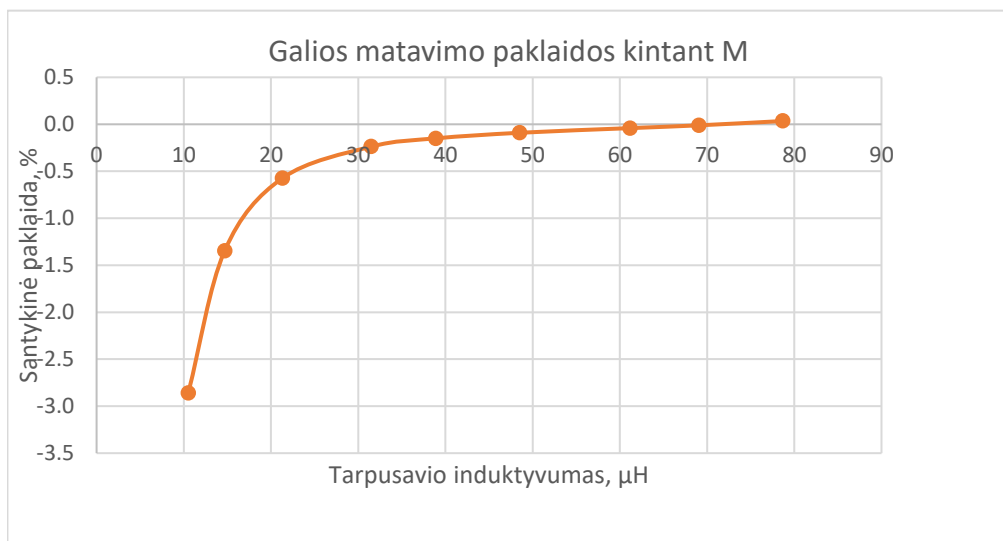
Modeliavimai atliekami, kai kinta R_L , o M išlieka pastovus. Rezultatai pateikti 28 paveiksle.



28 pav. Perduodamos galios į imtuvą matavimo paklaidos, kai kinta R_L

Gauta, kad santykinės paklaidos modulio kitimo diapazonas yra intervale nuo 0,05 % iki 0,29 %. Didžiausia absoliutinė paklaida moduliui lygi 2,36 mW, mažiausia lygi 0,48 mW.

Modeliavimai atliekami, kai kinta M , o $R_L = 75 \Omega$ išlieka pastovus. Rezultatai pateikti 29 paveiksle.

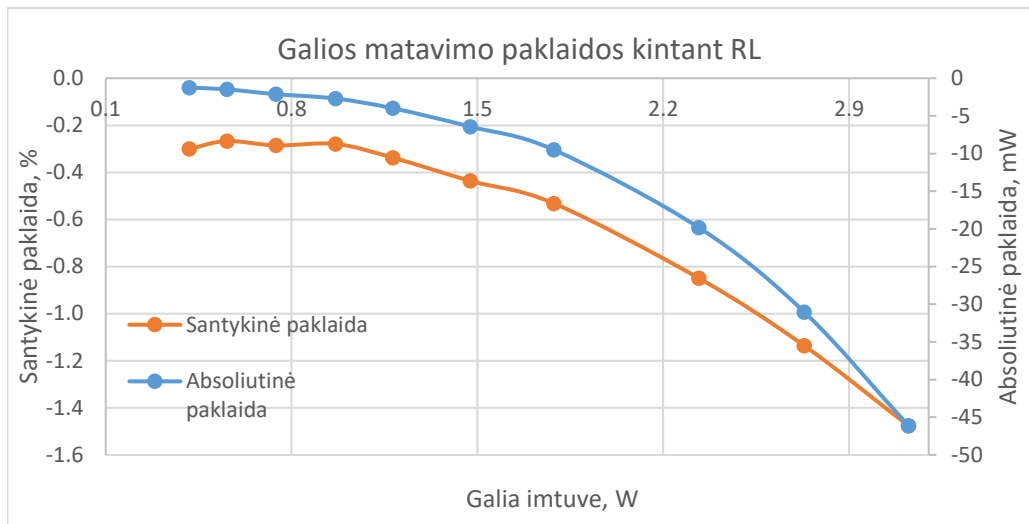


29 pav. Santykinė galios matavimo paklaida, kai kinta tarpusavio induktyvumas

Gauta, kad santykinės paklaidos modulio kitimo diapazonas yra intervale nuo 0,01 % iki 2,85 %.

4.4. Pirmojo metodo modeliavimo rezultatai, esant netiesinei apkrovai

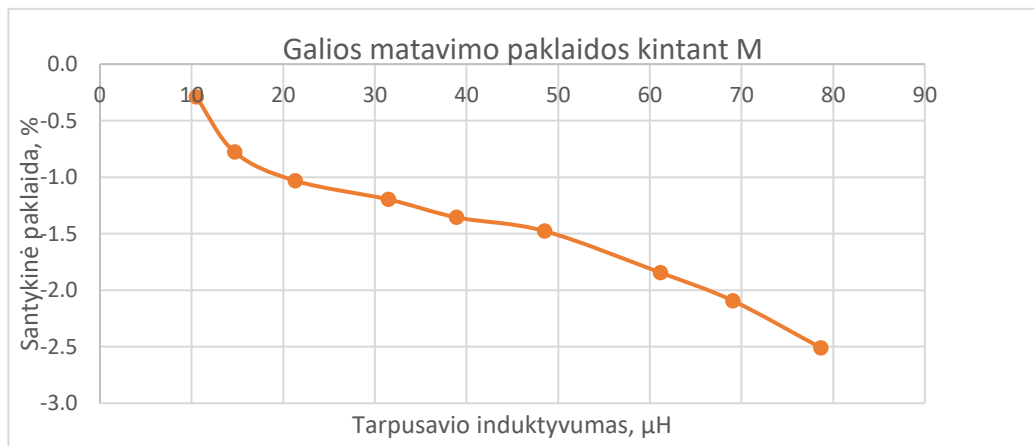
Atliktas modeliavimas, kai $M = 48 \mu H$. Kinta tik apkrova R_L . Rezultatai pateikti 30 paveiksle.



30 pav. Perduodamos galios į imtuvą matavimo paklaidos, kai kinta R_L

Gauta, kad santykinės paklaidos modulio kitimo diapazonas yra intervale nuo 0,26 % iki 1,47 %. Didžiausia absoliutinė paklaida moduliui lygi 46,13 mW, mažiausia lygi 1,24 mW.

Atliktas modeliavimas, kai R_L yra pastovus ir lygus ir kinta tik tarpusavio induktyvumas tarp siūstuvo ir imtuvo ričių M . Rezultatai pateikti 31 paveiksle.

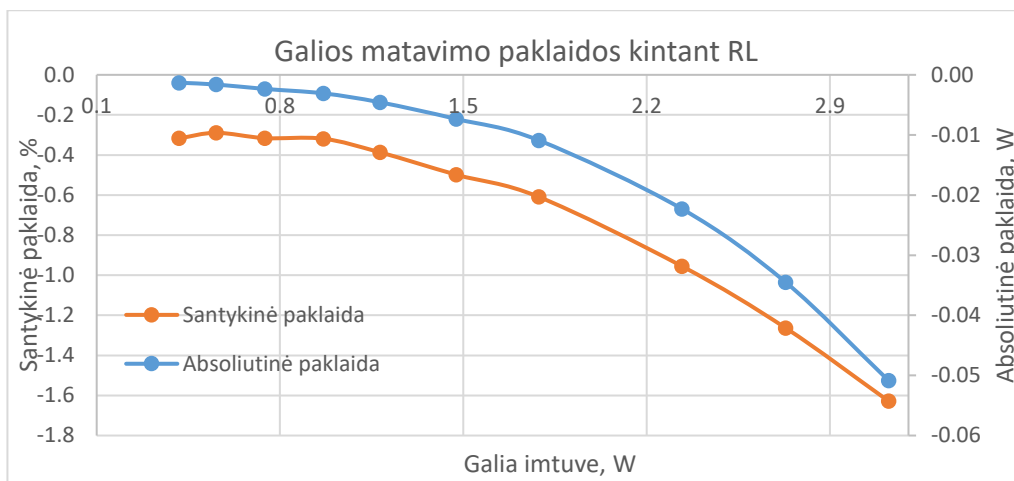


31 pav. Santykinė galios matavimo paklaida, kai kinta tarpusavio induktyvumas

Gauta, kad santykinės paklaidos modulio kitimo diapazonas yra intervale nuo 0,29 % iki 2,5 %.

4.5. Antrojo metodo modeliavimo rezultatai, esant netiesinei apkrovai

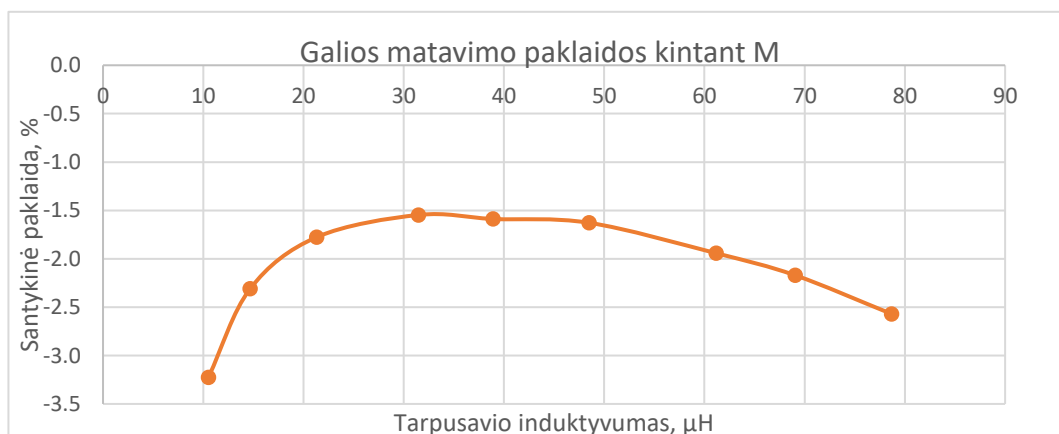
Modeliavimai atliekami, kai kinta apkrova imtuve, o tarpusavio induktyvumas tarp siūstuvo ir imtuvo ričių išlieka pastovus 48 μH . Rezultatai pateikti 32 paveiksle.



32 pav. perduodamos galios į imtuvą matavimo paklaidos, kai kinta R_L

Gauta, kad santykinės paklaidos modulio kitimo diapazonas yra intervale nuo 0,28 %, iki 1,62 %. Didžiausia absoliutinė paklaida modulių lygi 50,85 mW, mažiausia lygi 1,31 mW.

Modeliavimai atliekami, kai kinta tarpusavio induktyvumas, o apkrova išlieka pastovi. Rezultatai pateikti 33 paveiksle.

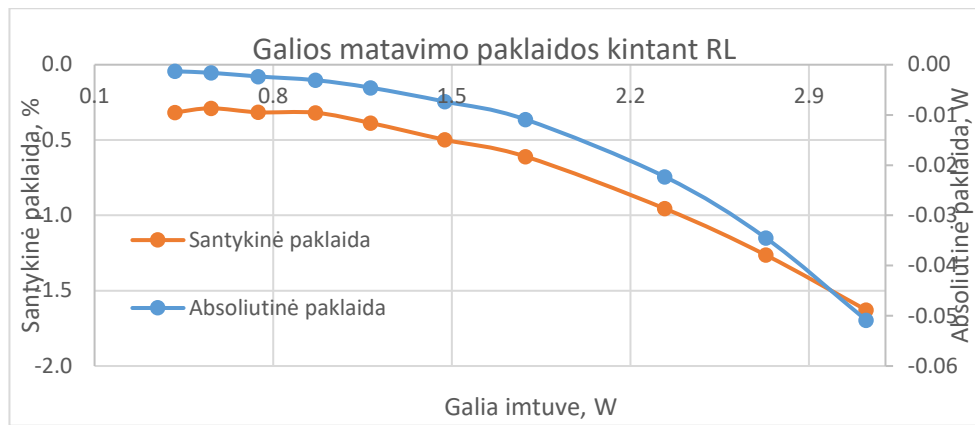


33 pav. Santykinė galios matavimo paklaida, kai kinta tarpusavio induktyvumas

Gauta, kad santykinės paklaidos modulio kitimo diapazonas yra intervale nuo 1,54 % iki 3,22 %.

4.6. Trečiojo metodo modeliavimo rezultatai, esant netiesinei apkrovai

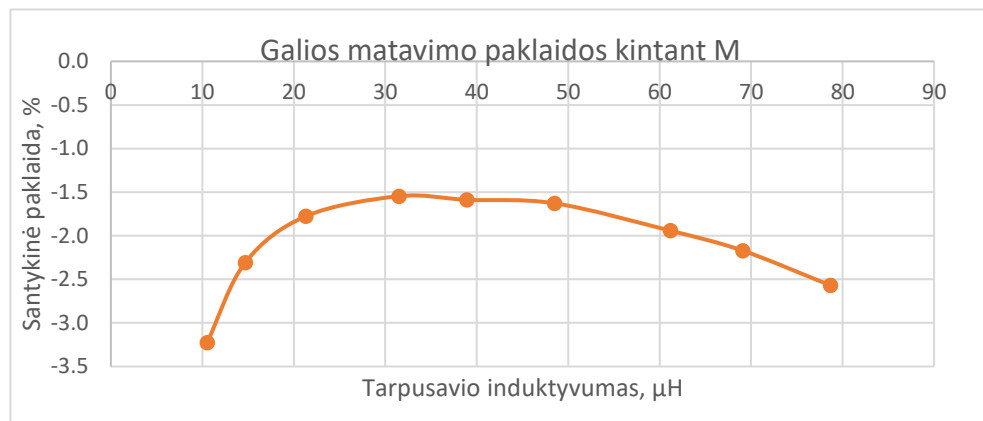
Atliktas modeliavimas, kai M išlieka pastovus. Kinta tik apkrova R_L . Rezultatai pateikti 34 paveiksle.



34 pav. Perduodamos galios į imtuvą matavimo paklaidos, kai kinta R_L

Gauta, kad santykinės paklaidos modulio kitimo diapazonas yra intervale nuo 0,28 %, iki 1,62 %. Didžiausia absoliutinė paklaida moduliui lygi 50,85 mW, mažiausia lygi 1,31 mW. Gautos matavimo paklaidos beveik sutampa su gautomis atliekant matavimus antruoju metodu, skirtumai gaunami tik procento dalimis.

Skaičiavimai atliekami, kai kinta tarpusavio induktyvumas tarp siūstuvo ir imtuvo ričių, o apkrova imtuve išlieka pastovi už diodų tiltelio ir kondensatoriaus. Rezultatai pateikti 35 paveiksle.



35 pav. Santykinė galios matavimo paklaida, kai kinta tarpusavio induktyvumas

Gauta, kad santykinės paklaidos modulio kitimo diapazonas yra intervale nuo 1,54 % iki 3,22 %. Gautos matavimo paklaidos beveik sutampa su gautomis atliekant matavimus antruoju metodu, skirtumai gaunami tik procento dalimis.

4.7. Gautų rezultatų palyginimas ir apibendrinimas

Modeliavimų apibendrinti rezultatai su netiesinėmis ir tiesinėmis apkrovomis pateikti 2 lentelėje. Joje pateiktos kiekvienu metodu gautų didžiausių ir mažiausių santykinųjų paklaidų, vidutinės santykinės paklaidos, didžiausios ir mažiausios absoliutinių paklaidų, vidutinės absoliutinės paklaidos modulių reikšmės matuojant kiekvienu metodu.

2 lentelė. Gautų eksperimentinių rezultatų palyginimas, kai kinta apkrova imtuve

Tiesinė apkrova						
Metodo Nr.	Didžiausia santykinė paklaida, %	Mažiausia santykinė paklaida, %	Vidutinė santykinė paklaida, %	Didžiausia absoliutinė paklaida, mW	Mažiausia absoliutinė paklaida, mW	Vidutinė absoliutinė paklaida, mW
1	0,28	0,005	0,073	2,14	0,05	0,65
2	0,30	0,051	0,096	2,36	0,48	0,94
3	0,30	0,051	0,096	2,36	0,48	0,94
Netiesinė apkrova						
1	1,47	0,26	0,59	46,13	1,24	12,44
2	1,62	0,28	0,65	50,85	1,31	13,88
3	1,62	0,28	0,65	50,85	1,31	13,88

Iš gautų rezultatų, pateiktų 2 lentelėje, matome, kad atlikus modeliavimą MATLAB/SIMULINK aplinkoje, kai kinta apkrova imtuve, pačią mažiausią santykinę ir absoliutinę paklaidas turi pirmasis metodas. Modeliavimų apibendrinti rezultatai su netiesinėmis ir tiesinėmis apkrovomis, kai kinta tarpusavio induktyvumas, pateikti 3 lentelėje. Joje pateikti kiekvienu metodu gautų didžiausių ir mažiausių santykinų paklaidų, vidutinės santykinės paklaidos modulių reikšmės, matuojant kiekvienu metodu.

3 lentelė. Gautų eksperimentinių rezultatų palyginimas, kai kinta tarpusavio induktyvumas

Tiesinė apkrova			
Metodo Nr.	Didžiausia santykinė paklaida, %	Mažiausia santykinė paklaida, %	Vidutinė santykinė paklaida, %
1	0,58	0,07	0,21
2	2,85	0,01	0,59
3	2,85	0,01	0,59
Netiesinė apkrova			
1	2,5	0,29	1,39
2	3,22	1,54	2,08
3	3,22	1,54	2,08

Iš gautų rezultatų 3 lentelėje matoma, kad mažiausią santykinę paklaidą kintant tarpusavio induktyvumui turi pirmasis metodas. Todėl, remiantis modeliavimų įverčiais, pats tiksliausias matavimo metodas yra pirmasis. Šiuo metodu nereikia žinoti jokių sistemos komponentų parametrų, o yra remiamasi tik matavimo prietaisų parodymais ir skaičiavimais.

Kitame skyriuje bus rašoma apie realios bevielio energijos perdavimo sistemos projektavimą ir gamybą, tarpusavio induktyvumo skaičiavimą, rezonansinių kontūrų testavimą, eksperimentinius pasiūlytų bevielio energijos perdavimo sistemų perduodamos galios matavimo metodų tyrimus ir gaunamas paklaidas.

5. Eksperimentinis tyrimas

5.1. Eksperimentinės sistemos kūrimas

Pirmiausia buvo suprojektuota elektrinė schema, kuri naudojama generuoti stačiakampio formos signalus siūstuvo pusėje. Suprojektuota schema pavaizduota pateikta 1 priede. Programa *Altium Designer* suprojektuota spausdintinio montažo plokštė. Suprojektuotos plokštės gamybos failai buvo išsiųsti į gamyklą užsienyje *JLCPCB*, kad būtų pagamintos realios plokštės. Suprojektuota schema susideda iš komponentų, kurie yra pateikti 2 priede. Veikiančios schemos surinkimui visi šie komponentai buvo užsakyti iš elektronikos prekių parduotuvės *Digikey*. Gavus pagamintą spausdintinio montažo plokštę ir komponentus buvo surinkta bevielio energijos perdavimo siūstuvo sistema. Ji pateikta 36 paveiksle.



36 pav. Pagaminta ir surinkta bevielio energijos perdavimo siūstuvo sistema

Induktyviųjų ričių gamybai buvo pasirinkta naudoti garso kolonėlių kabelį, kurio laidininko storis yra 1 mm. Ritės buvo suvyniotos rankomis ant organinio stiklo, kuris neturėtų paveikti matavimų, kadangi jis neiškraipo ir kitaip nepaveikia ritės kuriamo magnetinio lauko. Gauti pagamintų ričių parametrai pateikti 4 lentelėje. Kadangi ričių izoliacijos sluoksniai skyrėsi, todėl ričių vidinis diametras ir apvijų kiekis abiejose ritėse yra skirtingas. Ritės pateiktos 37 paveiksle. Gauti ričių parametrai pateikti 4 lentelėje.



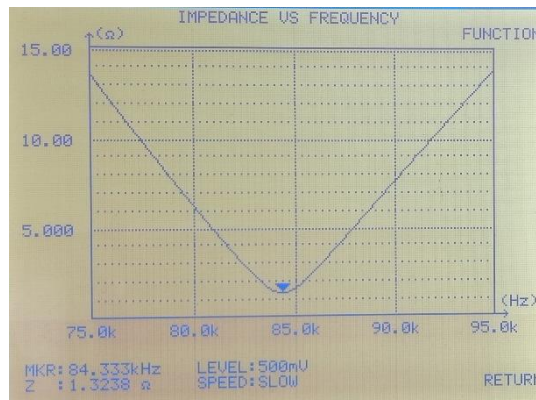
37 pav. Pagamintos imtuvo (kairėje) ir siūstuvo (dešinėje) induktyviosios ritės

4 lentelė. Ričių parametrai

	Induktyvioji ritė Nr. 2 (imtuvas)	Induktyvioji ritė Nr. 1 (siųstuvas)
Induktyvumas, μH	198,1	199,74
Vidinė varža, $\text{m}\Omega$	544	518
Išorinis diametras, cm	25	25
Vidinis diametras, mm	32	75
Vijų skaičius	42	35

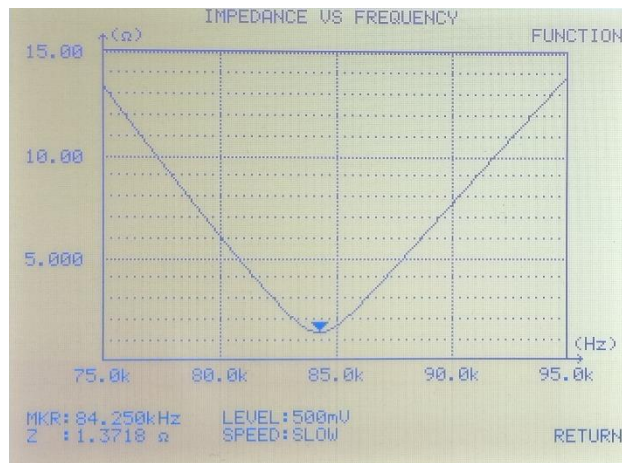
Remiantis (1) formule buvo apskaičiuoti reikalingi kondensatorių talpumas, tam kad būtų gaunamas rezonansas prie pasirinkto 84 kHz dažnio. Induktyviajai ritėi Nr. 1 buvo reikalingas kondensatorius C_P , kurio talpumas lygus 17,972 nF. Induktyviajai ritėi Nr. 2 buvo reikalingas kondensatorius C_S , kurio talpumas lygus 18,121 nF. Pasiękti reikalingam talpumui kondensatoriai buvo sulituoti lygiagrečiai, kol buvo gauti reikalingi parametrai. Gauti talpumas: $C_P = 17,89 \text{ nF}$, $C_S = 18,13 \text{ nF}$.

Ritės ir kondensatoriai buvo sujungti į rezonanso kontūrus, kurie bus naudojamas siųstuvo ir imtuvo pusėse. Naudojantis *GW Instek LCR-8105G* matuokliu buvo išmatuotos abiejų kontūrų pilnutinių varžų priklausomybės nuo dažnio. Šiuo atveju, reikalinga gauti pačią mažiausią pilnutinę varžą esant rezonanso dažniui. Šiuo atveju prie 84 kHz. Gautos priklausomybės siųstuvo pusėje pavaizduotos 38 ir 39 paveiksluose.



38 pav. Siųstuvo rezonanso grandinės pilnutinės varžos priklausomybė nuo dažnio

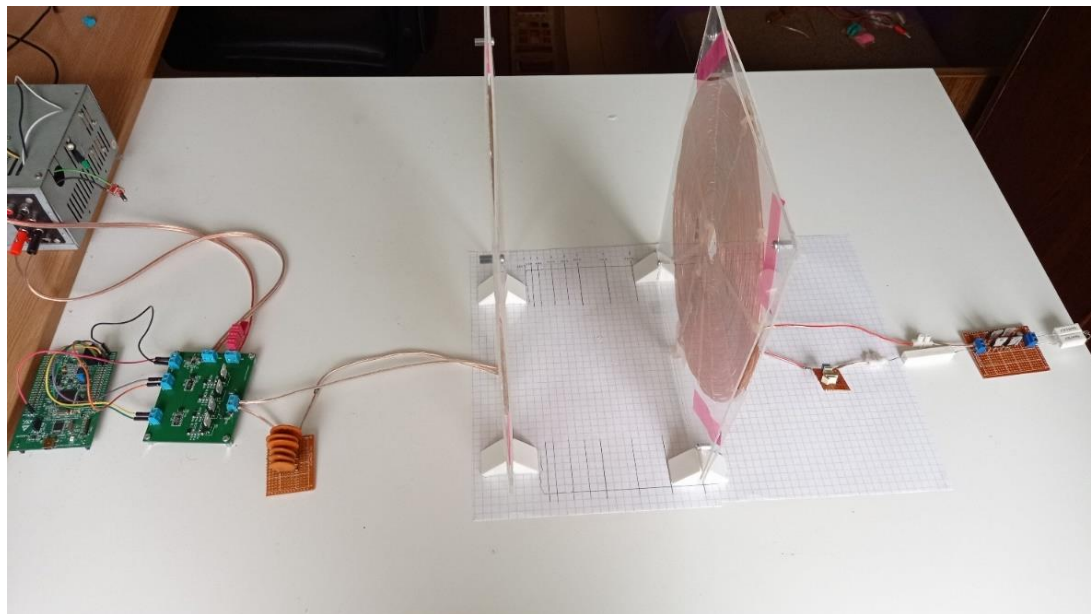
Iš gautos priklausomybės matome, kad siųstuvo kontūro rezonansinis dažnis yra lygus 84,3 kHz. Šis rezonansas yra artimas mums reikalingam 84 kHz dažniui. Dėl papildomų induktyvumų ir talpumų laiduose yra sunku gauti būtent šį rezonanso dažnį, todėl gautas artimas dažnis bus laikomas tinkamu.



39 pav. Imtuvo rezonanso grandinės pilnutinės varžos priklausomybė nuo dažnio

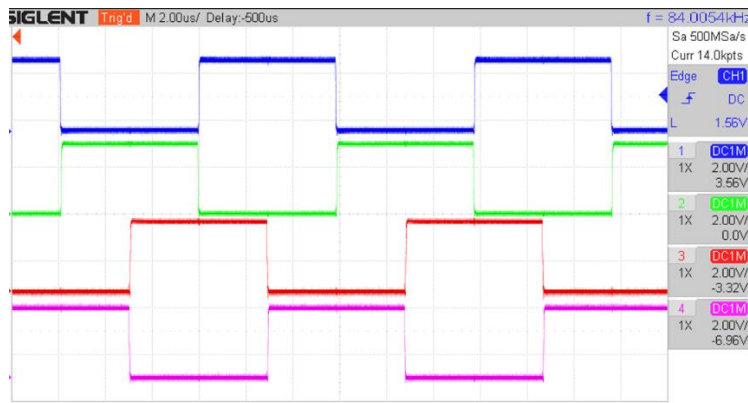
Iš gautos priklausomybės matome, kad siųstuvo kontūro rezonansinis dažnis yra lygus 84,25 kHz. Šis rezonansas yra artimas mums reikalingam 84 kHz dažniui. Kaip ir siųstuvo kontūro atveju priimta, kad gautas artimas dažnis bus laikomas tinkamu.

Surinkta bevielio energijos perdavimo sistema, kurioje panaudoti visi reikalingi komponentai, kad sistema veiktų ir kuri bus testuojama, pateikta 40 paveiksle.

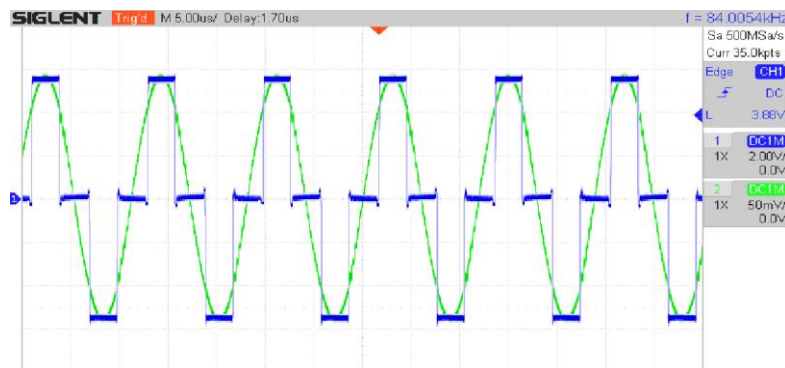


40 pav. Testams naudojama bevielio energijos perdavimo sistema

Žadinimo impulsų generavimui naudojama *STMicroelectronics* kūrimo plokštė *STM32F4 – Discovery*, kuri turi *STM32F407VGT6* mikrovaldiklį. Generuojami keturi signalai į keturis skirtingus sistemos įėjimus pavaizduoti 41 paveiksle. Paduodami į H tiltelį jie formuoja stačiakampio formos signalą, kuris šiuo atveju yra 50 procentų trukmės. Šis signalas yra paduodamas į rezonansinį kontūrą taip jį sužadindamas. Suformuoti žadinimo įtampos ir tekančios srovės siųstuve signalai pavaizduoti 42 paveiksle.



41 pav. Generuojami žadinimo signalai



42 pav. Žadinimo įtampos signalas (mėlynas) ir srovės signalas siūstuve (žalias)

Siūstuve ir imtuve srovės nustatomos naudojant šunto rezistorių, matuojant ant jų krintančią įtampą. Srovės ir įtampos matavimai atliekami naudojant 4 kanalų *Siglent SDS1204X – E* osciloskopą. Nuskaityti signalai perduodami į kompiuterį. Parašyta programa komunikuoja su osciloskopu ir atlieka duomenų mainus, apdorojimą ir skaičiavimus po kurių gaunamos srovių, įtampos, varžos, galių vertės siūstuve ir imtuve.

Imtuve išmatuotos srovės ir įtampos signalai, kai turima tiesinė apkrova (rezistorius), pavaizduoti 43 paveiksle. Jame violetinis signalas yra srovė, o raudonas signalas – įtampa.



43 pav. Srovės (violetinis) ir įtampos (raudonas) signalai imtuve, kai turima tiesinė apkrova

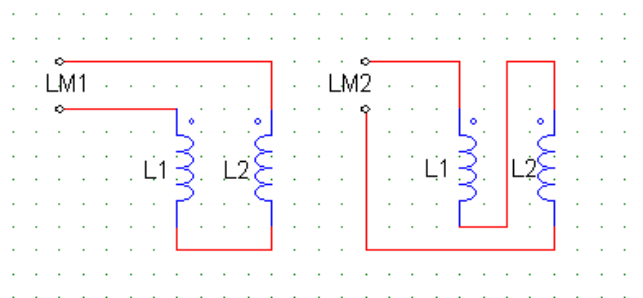
Imtuve išmatuotos srovės ir įtampos signalai, kai naudojama netiesinė apkrova (diodų tiltelis, kondensatorius, rezistorius), pavaizduota 44 paveiksle. Jame violetinis signalas yra srovė, o raudonas signalas – įtampa.



44 pav. Srovės (violetinis) ir įtampos (raudonas) signalai imtuve, kai turima netiesinė apkrova

Iš 43 ir 44 paveikslo matome, kad turint skirtingas apkrovas – skiriasi ir srovės bei įtampos signalų formos. Tiesinės apkrovos atveju gaunami abu signalai yra sinuso formos. Netiesinės apkrovos atveju – įtampa yra kvadrato formos signalas, o srovės signalas panašus į iškraipytą sinuso signalą. Šiuo atveju matome, kad signalai gauti modeliuojant *MATLAB/SIMULINK* terpėse sutampa su signalais gautais matuojant surinktas realias sistemas.

Remiantis straipsniu [26], tarpusavio induktyvumą M realioje aplikacijoje galima išmatuoti naudojant prietaisą, kuris gali išmatuoti induktyvumus. Yra atliekami du skirtingi jungimai, kurie pavaizduoti 45 paveiksle.



45 pav. Tarpusavio induktyvumo matavimo schema

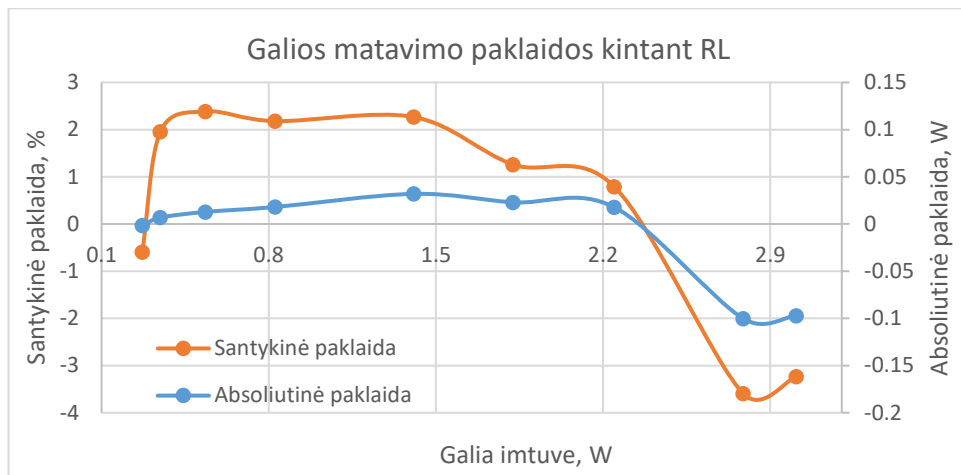
Esant skirtingam jungimui yra išmatuojamos vertės L_{M1} ir L_{M2} . Pritaikant formulę (27) yra išskaičiuojamas tarpusavio induktyvumas M .

$$M = \frac{L_{M2} - L_{M1}}{4}. \quad (27)$$

Darbe tarpusavio induktyvumai buvo išmatuoti ir pažymėti ant popieriaus lapo, kuris bus kaip pagrindas ir gidas nurodantis, kokiai M reikšmei esant yra atliekami matavimai.

5.2. Pirmojo metodo eksperimentiniai rezultatai su tiesine apkrova

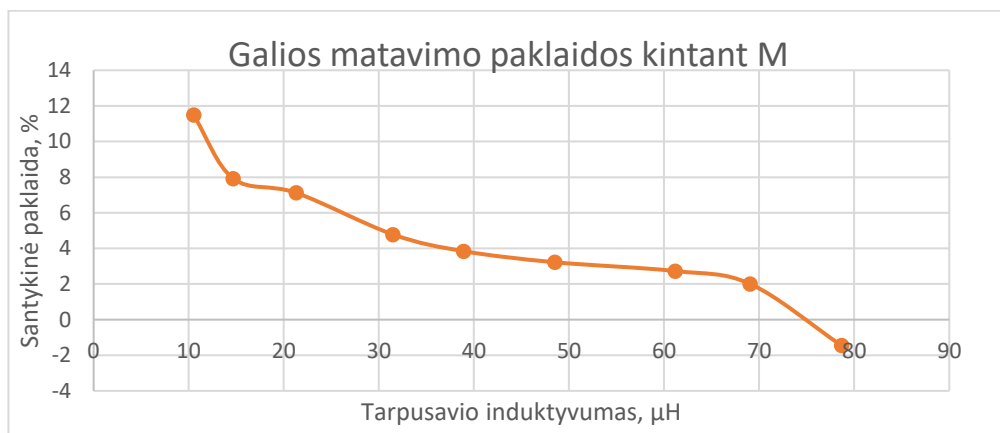
Atliktas eksperimentinis matavimas, kai tarpusavio induktyvumas yra pastovus $48,5 \mu\text{H}$. Kinta tik apkrova R_L . Rezultatai pateikti 46 paveiksle.



46 pav. Perduodamos galios į imtuvą matavimo paklaidos, kai kinta R_L

Gauta, kad santykinės paklaidos modulio kitimo diapazonas yra intervale nuo 0,59 % iki 3,59 %. Didžiausia absoliutinė paklaida moduliui gaunama 100,12 mW, o mažiausia 1,6 mW.

Atliktas matavimas, kai R_L yra pastovus ir kinta tik M . Rezultatai pateikti 47 paveiksle.

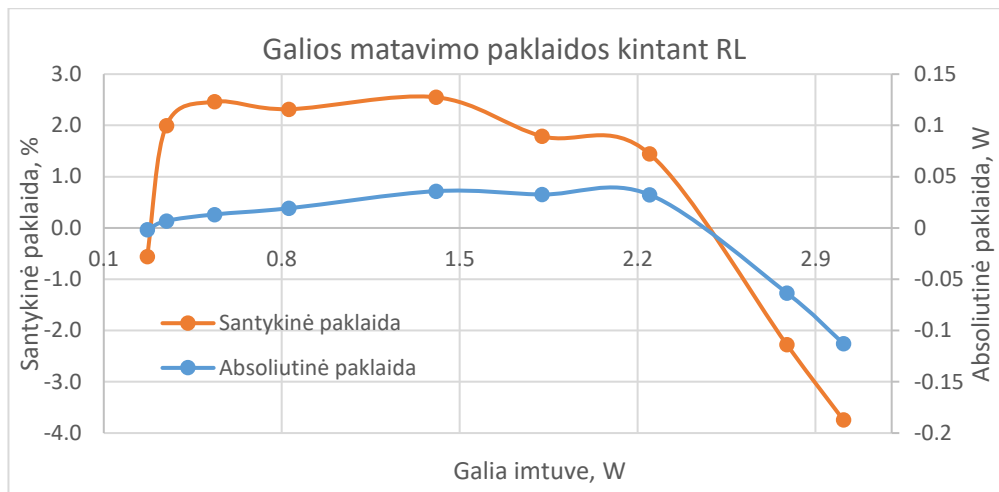


47 pav. Santykinė galios matavimo paklaida, kai kinta tarpusavio induktyvumas

Gauta, kad santykinės paklaidos modulio kitimo diapazonas yra intervale nuo 1,45 % iki 11,48 %.

5.3. Antrojo metodo eksperimentų rezultatai su tiesine apkrova

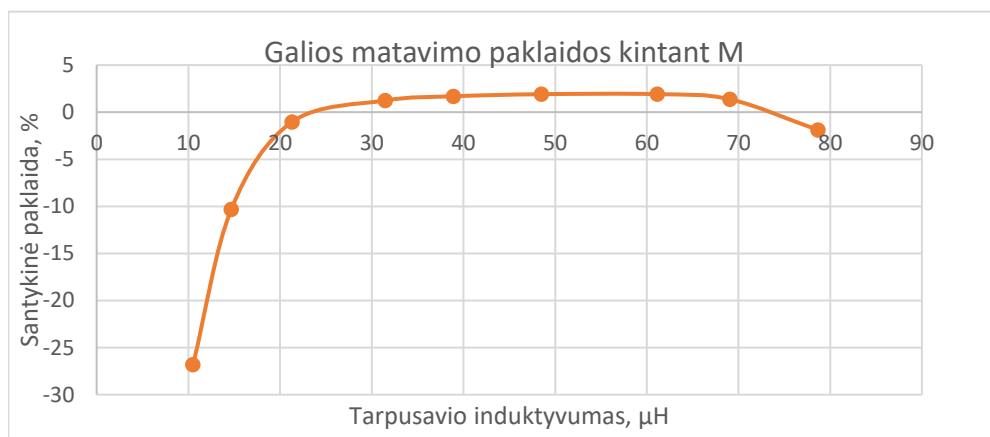
Skaičiavimai atliekami, kai kinta R_L , o M išlieka pastovus. Rezultatai pateikti 48 paveiksle.



48 pav. Perduodamos galios į imtuvą matavimo paklaidos, kai kinta R_L

Gauta, kad santykinės paklaidos modulio kitimo diapazonas yra intervale nuo 0,56 % iki 3,74 %. Didžiausia absoliutinė paklaida moduliui gaunama 112,62 mW, o mažiausia 1,51 mW.

Skaičiavimai atliekami, kai kinta M , o R_L išlieka pastovus. Rezultatai pateikti 49 paveiksle.

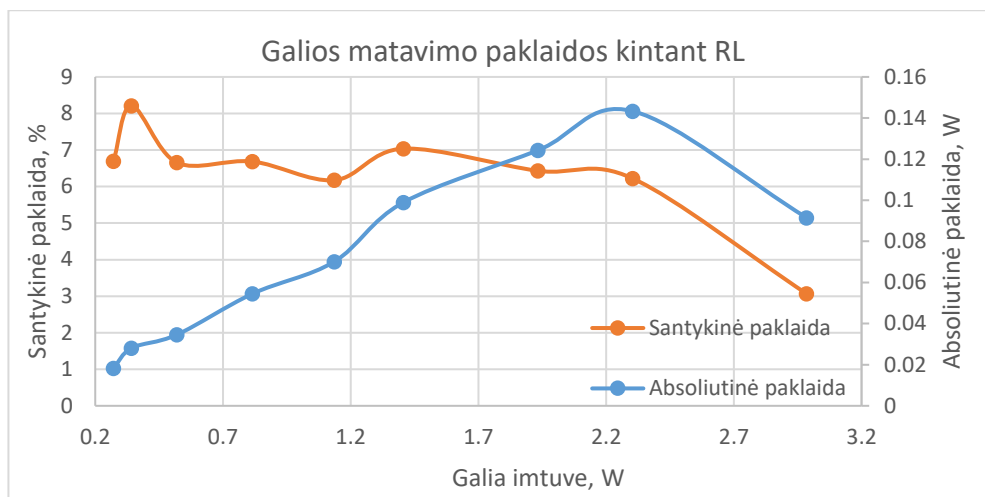


49 pav. Santykinė galios matavimo paklaida, kai kinta tarpusavio induktyvumas

Gauta, kad santykinės paklaidos modulio kitimo diapazonas yra intervale nuo 1,03 % iki 26,79 %.

5.4. Trečiojo metodo eksperimentų rezultatai su tiesine apkrova

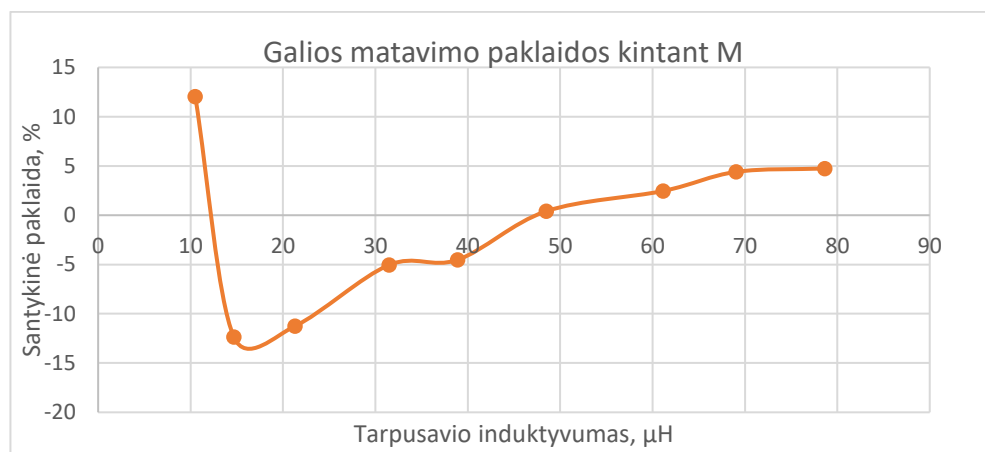
Skaičiavimai atliekami, kai kinta R_L , o M išlieka pastovus. Rezultatai pateikti 50 paveiksle.



50 pav. Perduodamos galios į imtuvą matavimo paklaidos, kai kinta R_L

Gauta, kad santykinės paklaidos modulio kitimo diapazonas yra intervale nuo 3,06 % iki 8,2 %. Didžiausia absoliutinė paklaida moduliui gaunama 143,3 mW, o mažiausia 18,1 mW.

Skaičiavimai atliekami, kai kinta M , o R_L išlieka pastovus. Rezultatai pateikti 51 paveiksle.

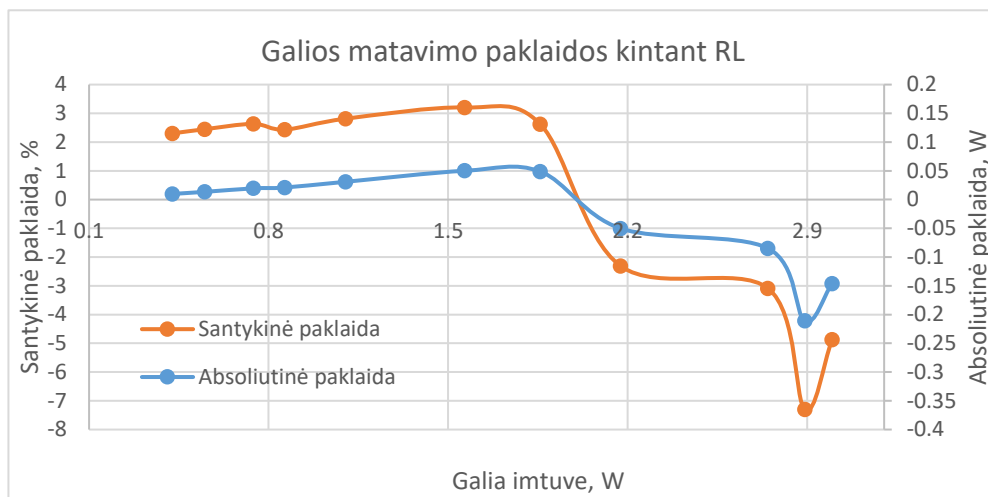


51 pav. Santykinė galios matavimo paklaida, kintant tarpusavio induktyvumui

Gauta, kad santykinės paklaidos modulio kitimo diapazonas yra intervale nuo 0,4% iki 12,35 %.

5.5. Pirmojo metodo eksperimentiniai rezultatai su netiesine apkrova

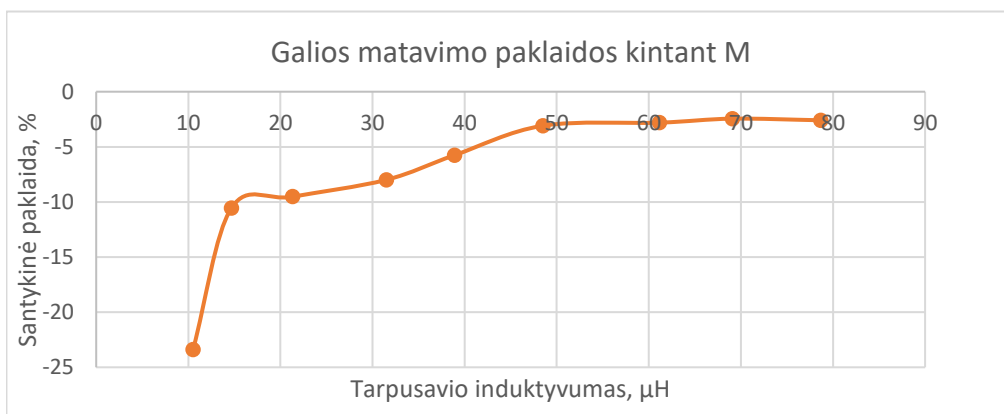
Atliktas eksperimentinis matavimas, kai M yra pastovus. Kinta tik apkrova R_L . Papildomai prieš apkrovą yra naudojamas keitiklis iš kintamos įtampos į nuolatinę – diodų tiltelis su kondensatoriumi. Gauti rezultatai pateikti 52 paveiksle.



52 pav. Perduodamos galios į imtuvą matavimo paklaidos, kai kinta R_L

Gauta, kad santykinės paklaidos modulio kitimo diapazonas yra intervale nuo 2,3 % iki 7,29 %. Didžiausia absoliutinė paklaida moduliui gaunama 210,9 mW, o mažiausia 9,79 mW.

Atliktas matavimas, kai R_L yra pastovus ir kinta tik tarpusavio induktyvumas. Rezultatai pateikti 53 paveiksle.

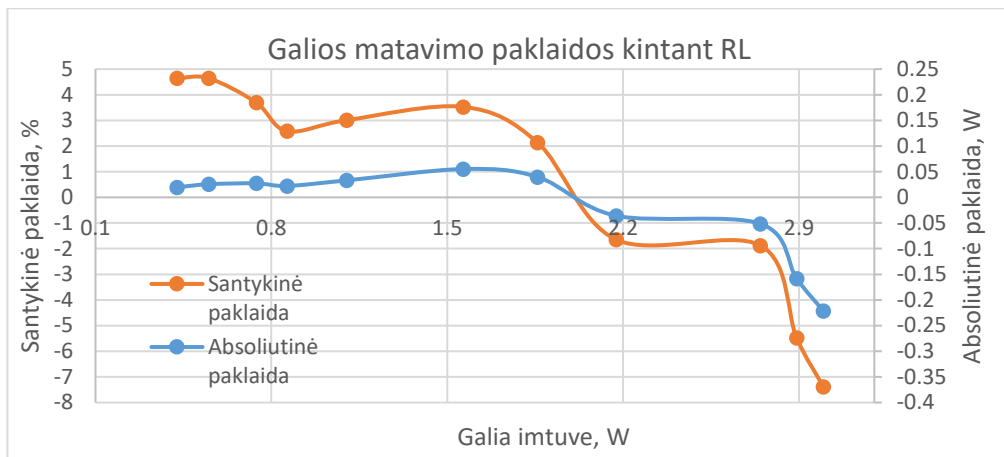


53 pav. Santykinė galios matavimo paklaida, kai kinta tarpusavio induktyvumas

Gauta, kad santykinės paklaidos modulio kitimo diapazonas yra intervale nuo 2,44 % iki 23,4 %.

5.6. Antrojo metodo eksperimentų rezultatai su netiesine apkrova

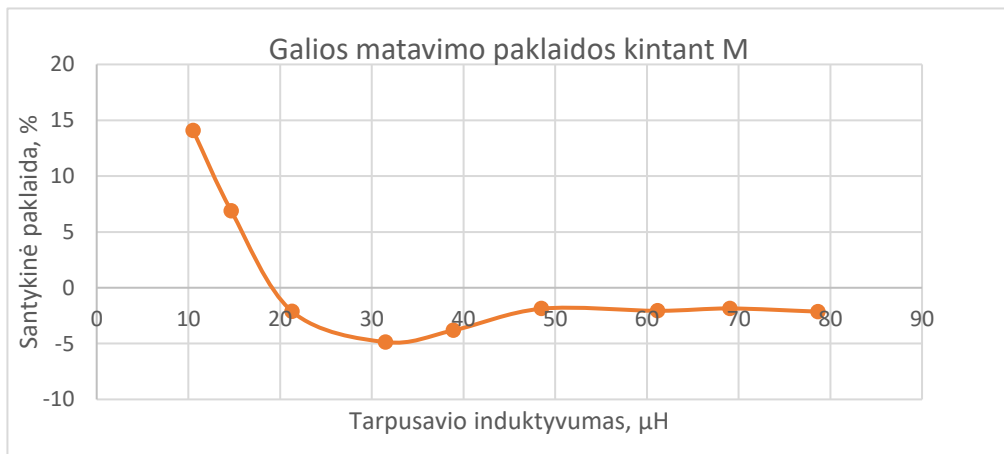
Skaičiavimai atliekami, kai kinta R_L , o M išlieka pastovus. Rezultatai pateikti 54 paveiksle.



54 pav. perduodamos galios į imtuvą matavimo paklaidos, kai kinta R_L

Gauta, kad santykinės paklaidos modulio kitimo diapazonas yra intervale nuo 1,64 % iki 7,38 %. Didžiausia absoliutinė paklaida modulių gaunama 221,42 mW, o mažiausia 19,77 mW.

Skaičiavimai atliekami, kai kinta M , o R_L išlieka pastovus. Rezultatai pateikti 55 paveiksle.

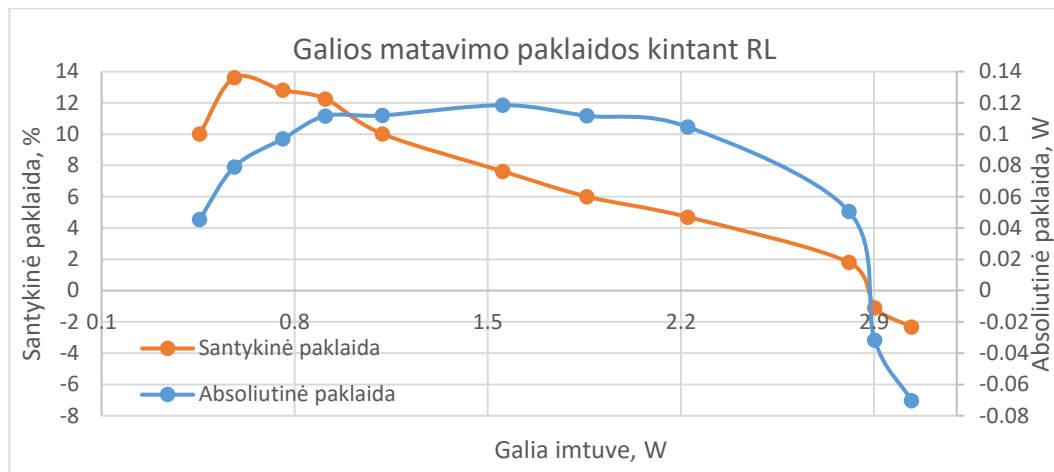


55 pav. Santykinė galios matavimo paklaida, kai kinta tarpusavio induktyvumas

Gauta, kad santykinės paklaidos modulio kitimo diapazonas yra intervale nuo 1,85 % iki 14,07 %.

5.7. Trečiojo metodo eksperimentų rezultatai su netiesine apkrova

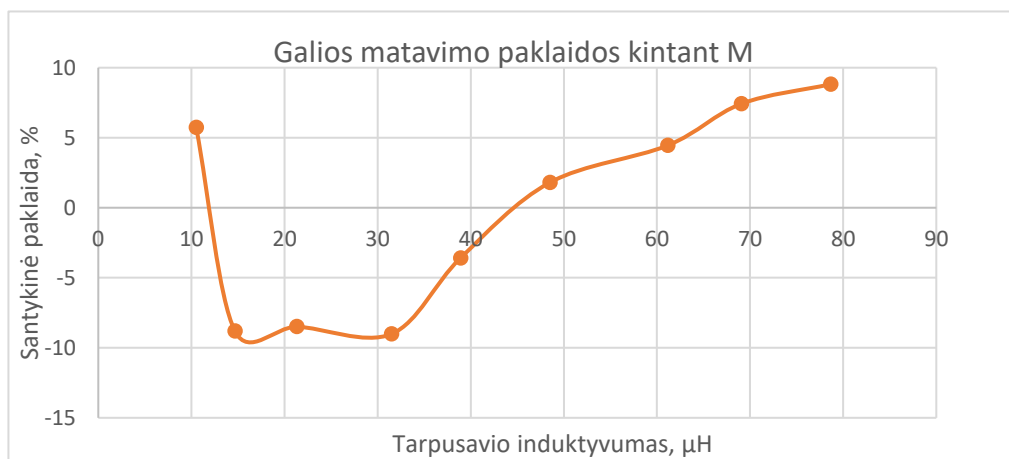
Skaičiavimai atliekami, kai kinta R_L , o M išlieka pastovus. Rezultatai pateikti 56 paveiksle.



56 pav. perduodamos galios į imtuvą matavimo paklaidos, kai kinta R_L

Gauta, kad santykinės paklaidos modulio kitimo diapazonas yra intervale nuo 1,09 % iki 13,61 %. Didžiausia absoliutinė paklaida moduliū gaunama 118,5 mW, o mažiausia 31,7 mW.

Skaičiavimai atliekami, kai kinta M , o R_L išlieka pastovus. Rezultatai pateikti 57 paveiksle.



57 pav. Santykinė galios matavimo paklaida, kai kinta tarpusavio induktyvumas

Gauta, kad santykinės paklaidos modulio kitimo diapazonas yra intervale nuo 1,8 % iki 9,01 %.

5.8. Gautų eksperimentinių rezultatų palyginimas ir apibendrinimas

Eksperimentų apibendrinti rezultatai su netiesinėmis ir tiesinėmis apkrovomis, kai kinta apkrova, pateikti 3 lentelėje. Joje pateikti kiekvienu metodu gautų didžiausių ir mažiausių santykinų paklaidų reikšmės, vidutinės santykinės paklaidos, didžiausios ir mažiausios absoliutinių paklaidų, vidutinės absoliutinės paklaidos moduliū reikšmės matuojant kiekvienu metodu.

5 lentelė. Gautų eksperimentinių rezultatų palyginimas, kai kinta apkrova imtuve

Tiesinė apkrova						
Metodo Nr.	Didžiausia santykinė paklaida, %	Mažiausia santykinė paklaida, %	Vidutinė santykinė paklaida, %	Didžiausia absoliutinė paklaida, mW	Mažiausia absoliutinė paklaida, mW	Vidutinė absoliutinė paklaida, mW
1	3,59	0,59	2,02	100,12	1,60	34,36
2	3,74	0,55	2,12	112,62	1,51	35,30
3	8,20	3,06	6,35	143,33	18,16	73,73
Netiesinė apkrova						
1	7,29	2,30	3,27	210,98	9,79	53,95
2	7,38	1,64	3,69	221,42	19,77	62,74
3	13,61	1,09	7,47	118,51	31,72	84,81

Iš gautų eksperimentinių rezultatų, kurie yra pateikti 5 lentelėje, matoma, kad vertinant vidutines paklaidas pats tiksliausias matavimo metodas yra pirmasis. Eksperimentų apibendrinti rezultatai su netiesinėmis ir tiesinėmis apkrovomis, kai kinta tarpusavio induktyvumas, pateikti 6 lentelėje. Joje pateikti kiekvienu metodu gautų didžiausių ir mažiausių santykinų paklaidų, vidutinės santykinės paklaidos modulių reikšmės, matuojant kiekvienu metodu.

6 lentelė. Gautų eksperimentinių rezultatų palyginimas, kai kinta tarpusavio induktyvumas

Tiesinė apkrova			
Metodo Nr.	Didžiausia santykinė paklaida, %	Mažiausia santykinė paklaida, %	Vidutinė santykinė paklaida, %
1	11,45	1,45	4,95
2	26,79	1,33	5,34
3	12,03	0,4	6,35
Netiesinė apkrova			
1	23,40	2,44	7,57
2	14,07	1,85	4,4
3	9,01	1,8	6,46

Iš gautų eksperimentinių rezultatų, kurie yra pateikti 4 lentelėje, matoma, kad vertinant vidutinę santykinę paklaidą esant tiesinei apkrovai pats tiksliausias matavimo metodas yra pirmasis, o esant netiesinei apkrovai – antrasis.

Antruoju ir trečiuoju metodais gauti rezultatai tiesiogiai priklauso nuo to, kaip tiksliai yra išmatuoti rezonansinių kontūrų talpumai, induktyvumai ir varžos. Visi parazitiniai talpumai ir induktyvumai gali iškraipyti rezultatus. Taip galimai nutiko šiuo atveju, kadangi rezultatai gauti su didesne paklaida nei matuojant pirmuoju metodu.

Išvados

1. Projektuojamai bevielės energijos perdavimo sistemai išsirinkta naudoti *nuoseklus* – *nuoseklus* topologija, kadangi su šia topologija, esant kintamai apkrovai imtuve ir esant skirtingoms tarpusavio induktyvumo reikšmėms, rezonanso kontūrų komponentų parametrai išlieka tokie pat, kad būtų tenkinama suderinamumo rezonansiniam dažniui formulė. Esant kitoms trimis topologijoms – norint išlaikyti suderinimo sąlygas kintant apkrovai imtuve ar tarpusavio induktyvumui tarp siųstuvo ir imtuvo ričių – turi būti keičiami ir komponentų parametrai.
2. Pasiūlyti trys skirtingi perduodamos galios matavimo metodai, kuriais neprisijungiant prie imtuvo ir matavimus atliekant tik siųstuvo pusėje galima nustatyti, kokia galia yra perduodama į imtuvą. Visais trimis metodais matavimai yra atliekami įtampą ir srovę matuojant siųstuvo pusėje. Pirmuoju būdu sistemų komponentai yra nežinomi, antruoju ir trečiuoju metodais – privaloma žinoti pagrindinius siųstuvo ir imtuvo rezonansinių kontūrų parametrus: induktyvumą, talpumą, varžą. Matavimo paklaidos antruoju ir trečiuoju metodais tiesiogiai priklauso nuo žinomų parametrų tikslumo ir parazitinių talpumų bei induktyvumų, todėl norint gauti tikslius matavimus ir mažas paklaidas – būtina labai tiksliai, su aukštos klasės matavimo prietaisais, išmatuoti komponentų parametrus.
3. Naudojant *MATLAB/SIMULINK* modeliavimo sistemą buvo atlikti modelių įvertinimai visiems trimis matavimo metodams. Gauta, kad pats tiksliausias yra pirmasis matavimo metodas. Kintant apkrovai imtuve, santykinės paklaidos vidurkis gaunamas 0,07 % su tiesine apkrova ir 0,59 % su netiesine apkrova. Kintant tarpusavio induktyvumui, santykinės paklaidos vidurkis gaunamas 0,21 % su tiesine apkrova ir 1,39 % su netiesine apkrova. Iš gautų rezultatų matome, kad turint netiesinę apkrovą imtuve matavimo rezultatai gaunami su didesne paklaida.
4. Suprojektuota ir pagaminta reali bevielio energijos perdavimo sistema. Atlikus eksperimentinius bandymus gauta, kad pats tiksliausias yra pirmasis matavimo metodas. Kintant apkrovai imtuve, santykinės paklaidos vidurkis gaunamas 2,02 % su tiesine apkrova ir 3,27 % su netiesine apkrova. Kintant tarpusavio induktyvumui, santykinės paklaidos vidurkis gaunamas 4,95 % su tiesine apkrova ir 7,57 % su netiesine apkrova. Iš gautų rezultatų matome, kad turint netiesinę apkrovą imtuve matavimo rezultatai gaunami su didesne paklaida. Paklaida daugiausia išauga tada, kai siųstuvo ir imtuvo ritės yra labai nutolusios viena nuo kitos, tada tarpusavio induktyvumas yra mažiausias. Didėjant tarpusavio induktyvumui – mažėja santykinė paklaida. Lyginant modeliavimo ir eksperimentinius rezultatus matoma, kad eksperimentais gautos paklaidos yra daug didesnės nei modeliavimo metu. To priežastis yra nuskaitymo metodas osciloskopu, kuris turi tik 8 bitų *analogas* – *kodas* keitiklį. Signalų nuskaitymui naudojant didelio bitų skaičiaus *analogas* – *kodas* keitiklį būtų galima tiksliau nuskaityti duomenis ir gauti geresnius rezultatus.

Literatūros sąrašas

1. SIQI, L. and C. C. MI. Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications. IEEE Journal of Emerging and selected topics in power electronics [interaktyvus]. 2015 3(1), pp. 4-17 [Žiūrėta 2021-05-19]. ISSN 2168-6785. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2319453>.
2. CHU, S. Y. and A. -T. AVESTRUZ. Transfer-power measurement: A non-contact method for fair and accurate metering of wireless power transfer in electric vehicles. Iš: 2017 IEEE 18th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), July 9-12, 2017, Stanford, CA, USA [Žiūrėta 2021-05-19]. ISBN 978-1-5090-5326-1. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/COMPEL.2017.8013344>.
3. CHU, S. Y., A. -T. AVESTRUZ and X. CUI. Accurate Transfer-Power Measurement for Wireless Charging of Electric Vehicles Under Misalignment. Iš: 2018 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (Wow). June 3-7, 2018, Montreal, QC, Canada. [Žiūrėta 2021-05-19]. ISBN 978-1-5386-2465-4. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/WoW.2018.8450889>.
4. ALI, A. Fundamentals of Inductively Coupled Wireless Power Transfer Systems. Iš: EUGEN, C. Wireless Power Transfer - Fundamentals and Technologies. 2016. [Žiūrėta 2021-05-19]. ISBN 978-953-51-2468-9. Prieiga per <http://dx.doi.org/10.5772/63013>.
5. MEHROTRA, Rajeev. Wireless Power Transfer, its Applications, and its limits. 2014 [Žiūrėta 2021-05-19]. Prieiga per <https://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-14/ftp/power.pdf>.
6. YANG, D., S. WON, J. TIAN, Z. CHENG and J. KIM. A Method of Estimating Mutual Inductance and Load Resistance Using Harmonic Components in Wireless Power Transfer System. Energies [interaktyvus]. 2019, 12(14) [Žiūrėta 2021-05-19]. Prieiga per <https://doi.org/10.3390/en12142728>.
7. PANCHAL, C., S. STEGEN, J. LU. Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system. Engineering Science and Technology, an International Journal [interaktyvus]. 2018, 21(5), pp. 922-937 [Žiūrėta 2021-05-19]. ISSN: 2215-0986. Prieiga per <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.06.015>
8. CAMPI, T., S. CRUCIANI, F. MARADEI and M. FELIZIANI. Magnetic Field during Wireless Charging in an Electric Vehicle According to Standard SAE J2954. Energies [interaktyvus]. 2019 12(9) 17 [Žiūrėta 2021-05-19]. Prieiga per <https://doi.org/10.3390/en12091795>.
9. SUKMA, I. and I. SUPONO. Design and simulation of 145 kHz wireless power transfer for low power application. Iš: 2017 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET). October 23 – 24, 2017, Jakarta, Indonesia. [Žiūrėta 2021-05-19]. ISBN: 978-1-5386-3849-1. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/ICRAMET.2017.8253150>.
10. ZHANG, W. and C. C. MI. Compensation Topologies of High-Power Wireless Power Transfer Systems. IEEE Transactions on Vehicular Technology [interaktyvus]. 2016 65(6), pp. 4768 – 4778 [Žiūrėta 2021-05-19]. ISSN 1939-9359. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2454292>.
11. STIELAU O. H. and G.A. COVIC. Design of loosely coupled inductive power transfer systems. Iš: PowerCon 2000. 2000 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No.00EX409). December 4 – 7, 2000, Perth, WA, Australia. [Žiūrėta 2021-05-19]. ISBN 0-7803-6338-8. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/ICPST.2000.900036>.

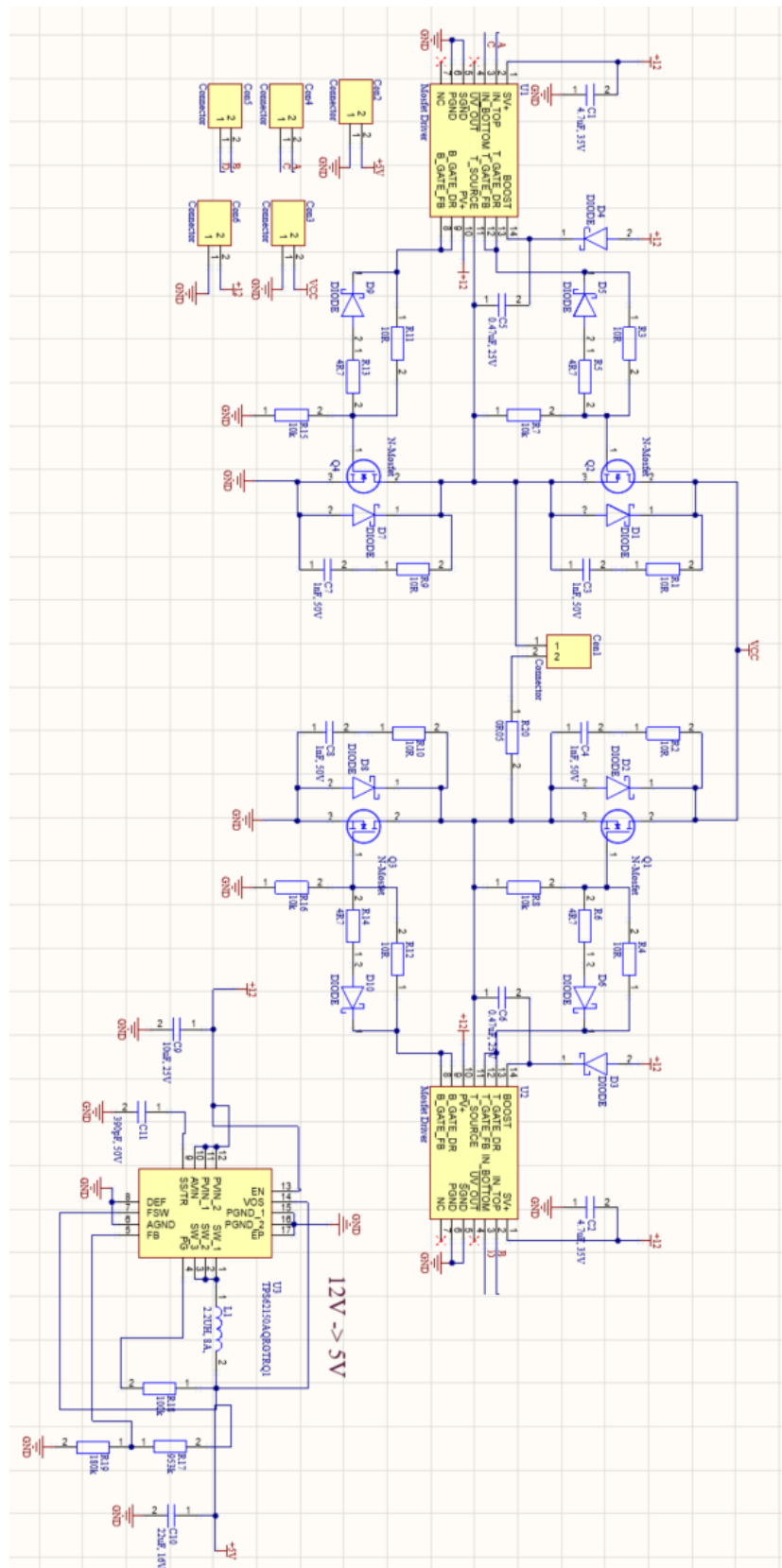
12. WANG, C., O.H. STIELAU, G.A. COVIC. Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [interaktyvus]. 2005 52(5), pp. 1308 – 1314 [Žiūrėta 2021-05-19]. ISSN 0278-0046. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/TIE.2005.855672>.
13. LI, W., H. ZHAO, J. DENG, S. LI, C. C. MI. Comparison Study on SS and Double-Sided LCC Compensation Topologies for EV/PHEV Wireless Chargers. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* [interaktyvus]. 2016 65(6), pp. 4429 – 4439 [Žiūrėta 2021-03-28]. ISSN 1939-9359. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2479938>.
14. GATI, E., S. KOKOSIS, N. PATSOURAKIS and S. MANIAS. Comparison of Series Compensation Topologies for Inductive Chargers of Biomedical Implantable Devices. *Electronics* [interaktyvus]. 2020 9(1) [Žiūrėta 2021-05-19]. Prieiga per <https://doi.org/10.3390/electronics9010008>.
15. BING, J., T. LONGZHAO; Y. ZIHAO; W. LIEYUE; L. GUORONG. A Novel Distance Measurement Method Based on Reflected Impedance for Resonant Wireless Power Transmission System. Iš: 2020 Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES). May 29 – 31, 2020, Chengdu, China. [Žiūrėta 2021-05-19]. ISBN 978-1-7281-6782-4. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/AEEES48850.2020.9121404>.
16. BEAMS, D. M. and S. G. ANNAM. Validation of a reflected-impedance design method for wireless power transfer applications. Iš: 2012 IEEE 55th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). August 5 – 8, 2012, Boise, ID, USA. [Žiūrėta 2021-05-19]. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/MWSCAS.2012.6292131>.
17. SHEVCHENKO, V., O. HUSEY, R. STRZELECKI, B. PAKHALIUK, N. POLIAKOV, S. NATALIA. Compensation Topologies in IPT Systems: Standards, Requirements, Classification, Analysis, Comparison and Application. *IEEE Access*[interaktyvus]. 2019 7, pp 120559 –120580 [Žiūrėta 2021-05-19]. ISSN 2169-3536. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2937891>.
18. SOM, C. Nad M. A. de ROOIJ. *Trilogy of Wireless Power Transfer. 1 – oji laida*. Germany: Würth Elektronik, 2019. ISBN 978-3-89929371-5.
19. LIANG, L. H., Z. Z. LIU, Y. J. HOU, H. ZENG, Z. K. YUE and S. CUI. Study on frequency characteristics of wireless power transmission system based on magnetic coupling resonance. Iš: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 93, 2017 International Conference on New Energy and Future Energy System (NEFES 2017)*. September 22–25, 2017, Kunming, China. [Žiūrėta 2021-05-19]. Prieiga per <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/93/1/012063>.
20. HUANG, R., B. ZHANG, D. QIU, Y. ZHANG. Frequency Splitting Phenomena of Magnetic Resonant Coupling Wireless Power Transfer. *IEEE Transactions on Magnetics* [interaktyvus]. 2014 50(11). ISSN 0018-9464. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2331143>.
21. LIU, X., Y. CHEN, S. LI, Q. ZHANG, Z. LIU, Y. JIN. Load and mutual inductance estimation of wireless power transfer system for electric vehicles. Iš: 2019 IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference (IFEEC). November 25 – 28, 2019, Singapore [Žiūrėta 2021-05-19]. ISBN:978-1-7281-3153-5. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/IFEEC47410.2019.9015065>.
22. MAULANA, E., Z. Abidin, W. DJURIATNO. *Wireless Power Transfer Characterization Based on Inductive Coupling Method*. Iš: 2018 Electrical Power, Electronics, Communications, Controls

- and Informatics Seminar (EECCIS). October 9 – 11, 2018, Batu, Indonesia [Žiūrėta 2021-05-19]. ISBN:978-1-5386-5251-0. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/EECCIS.2018.8692901>.
23. SU, Y. -G., H.-Y. ZHANG; Z.-H. WANG, A. P. HU, L. CHEN, Y. SUN. Steady-State Load Identification Method of Inductive Power Transfer System Based on Switching Capacitors. *IEEE Transactions on Power Electronics* [interaktyvus]. 2015 30(11), pp. 6349 – 6355 [Žiūrėta 2021-05-19]. ISSN 0885-8993. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2411755>.
 24. LEE, S. -W., Y. -G. CHOI, J. -H. KIM, B. KANG. Wireless Battery Charging Circuit Using Load Estimation without Wireless Communication. *Energies* [interaktyvus]. 2019 12(23) [Žiūrėta 2021-05-19]. Prieiga per <https://doi.org/10.3390/en12234489>.
 25. SONG, K., Z. LI, J. JIANG, C. ZHU. Constant Current/Voltage Charging Operation for Series–Series and Series–Parallel Compensated Wireless Power Transfer Systems Employing Primary–Side Controller. *IEEE Transactions on Power Electronics* [interaktyvus]. 2018 33(9), pp. 8065 – 8080 [Žiūrėta 2021-05-19]. ISSN: 0885-8993. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2767099>.
 26. QIAN, L., M. CHEN, K. CUI, G.S. SHI, J. WANG, Y. XIA. Modeling of Mutual Inductance Between Two Misalignment Planar Coils in Wireless Power Transfer. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* [interaktyvus]. 2020 30(8), pp. 814 – 817 [Žiūrėta 2021-05-19]. ISSN: 1558-1764. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/LMWC.2020.3006211>.
 27. SAMANCHUEN, T., K. JIRASEREEAMORNKUL, C. EKKARAVARODOME, T. SINGHAVILAI. A Review of Wireless Power Transfer for Electric Vehicles: Technologies and Standards. Iš: 2019 4th Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference (TIMES-iCON). December 11 – 13, 2019, Bangkok, Thailand [Žiūrėta 2021-05-19]. ISBN: 978-1-7281-3755-1. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/TIMES-iCON47539.2019.9024667>.
 28. SHI, W., F. GRAZIAN, J. DONG, T. B. Soeiro, P. Bauer. Analysis of Magnetic Field Emissions in Inductive Power Transfer EV Chargers Following Reference Designs in SAE J2954/2019. Iš: 2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). October 10 – 21, 2020, Seville, Spain [Žiūrėta 2021-05-19]. ISBN: 978-1-7281-3320-1. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/ISCAS45731.2020.9180787>.
 29. HARIRI, A., M. E. HARIRI, A. E. SAYYED, A. O. MOHAMMED. An Iterative Design Approach for Shielding of WPT Systems in Electric Vehicle Charging Applications. Iš: 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). October 17 – 20, 2016, Hangzhou, China [Žiūrėta 2021-05-19]. ISBN: 978-1-5090-3528-1. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/VPPC.2016.7791613>.
 30. JACKLE, T. Application Note 105. Power measurement and its theoretical background. 2 – oji laida. Germany: ZES ZIMMER Electronic Systems GmbH. Prieiga per <https://www.zes.com/en/Service/Downloads/Documents/Application-Notes>.
 31. DEBBOU, M., F. Colet. Inductive wireless power transfer for electric vehicle dynamic charging. Iš: 2016 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW). October 4 – 6, 2016, Knoxville, TN, USA [Žiūrėta 2021-05-19]. ISBN: 978-1-5090-3414-7. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/WoW.2016.7772077>.
 32. MALENGRET, M., T. GAUNT. Active Currents, Power Factor, and Apparent Power for Practical Power Delivery Systems. Iš: *IEEE Access* [interaktyvus]. 2020 3(1), pp. 133095 –

- 133113 [Žiūrėta 2021-05-19]. ISSN: 2169-3536. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010638>.
33. OSNACH, OLEKSANDR. The apparent power of electric circuits with switching elements in single-phase systems. Iš: 2009 10th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation. September 15 – 17, 2009, Lodz, Poland [Žiūrėta 2021-05-19]. ISSN: 2150-6655. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/EPQU.2009.5318864>.
34. OBAYASHI, S., Y. KANEKIYO, K. NISHIZAWA, H. KUSADA. 85-kHz band 450-W Inductive Power Transfer for Unmanned Aerial Vehicle Wireless Charging Port. Iš: 2019 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC). June 18 – 21, 2019, London, UK [Žiūrėta 2021-05-19]. ISSN: 2573-7651. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/WPTC45513.2019.9055626>.
35. SHIN, J., S. SHIN, S. CHUNG, Y. KIM, G. JUNG, S. JEON. Design of buried power line for roadway-powered electric vehicle system. Iš: 2013 IEEE Wireless Power Transfer (WPT). May 15 – 16, 2013, Perugia, Italy [Žiūrėta 2021-05-19]. ISBN: 978-1-4673-5010-5. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/WPT.2013.6556880>.
36. MAEMURA, M., A. WENDT. Dynamic Power Transfer as a Feature - Employing Stationary WPT Devices for Dynamic Operation. Iš: 2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW). November 15 – 19, 2020, Seoul, Korea [Žiūrėta 2021-05-19]. ISBN:978-1-7281-3746-9. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/WoW47795.2020.9291316>.
37. JOSEPH, B., D.V BHOIR. Design and Simulation of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle. Iš: 2019 International Conference on Advances in Computing, Communication and Control (ICAC3). December 20 – 21, 2019, Mumbai, India [Žiūrėta 2021-05-19]. ISBN: 978-1-7281-2386-8. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/ICAC347590.2019.9036745>.
38. SHINOHARA, N. History and Innovation of Wireless Power Transfer via Microwaves. IEEE Journal of Microwaves [interaktyvus]. 2021 1(1), pp. 218 – 228 [Žiūrėta 2021-05-19]. ISSN: 2692-8388. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/JMW.2020.3030896>.
39. MOUSTAPHA, E., H. B. AZZA, M. JEMLI. Simplified Electrical Circuit of Inductive Coupled Power Transfer System Based on the Reflected Input Impedance. Iš: 2019 International Conference on Signal, Control and Communication (SCC). December 16 – 18, 2019, Hammamet, Tunisia [Žiūrėta 2021-05-26]. ISBN: 978-1-7281-3597-7. Prieiga per <https://doi.org/10.1109/SCC47175.2019.9116150>.

Priedai

1 priedas. Suprojektuota siūstuvo elektrinė schema



2 priedas. Komponentų sąrašas

Aprašymas	Kiekis	Gamintojas	Prekės numeris
CAP CER 4.7UF 35V X7R 0805	2	TDK	CGA4J1X7R1V475K125AC
CAP CER 0.001uF 50VDC X7R 10% SMD 0805 Paper T/R	4	Samsung	CL21B102KBANNNC
CAP CER 0.47UF 25V X7R 0805	2	Samsung	CL21B474KAFNNNE
CAP CER 10UF 25V X7R 1206	1	TDK	CGA5L1X7R1E106K160AC
CAP CER 22UF 16V X7R 1210	1	Taiyo Yuden	EMK325B7226KMHT
CAP CER 390PF 50V X7R 0402	1	Murata	GCM155R71H391KA37D
Terminal Block, Screw Type, 5.08	6	CUI	TB006-508-02BE
DIODE, SCHOTTKY, 40V 1A SMA PKG	10	STMicroelectronics	STPS140A
INDUCTOR, 2.2UH, 8A, 20%, 38MHZ, REEL	1	Coilcraft	XFL4020-222MEC
MOSFET N-CH 40V 77A TO220AB	4	NXP Semiconductors	PSMN8R040PS127
RES 10 OHM 1/8W 5% 0805	8	Stackpole Electronics	RMCF0805JG10R0
RES 10K OHM 1% 1/8W 0805	4	Stackpole Electronics	RMCF0805FT10K0
RES SMD 953K OHM 1% 1/5W 0402	1	Vishay Dale	CRCW0402953KFKEDHP
RES SMD 100K OHM 1% 1/16W 0402	1	Vishay	CRCW0402100KFKED
RES SMD 180K OHM 1% 1/5W 0402	1	Vishay Dale	CRCW0402180KFKEDHP
RES 0R05 1/2W 1206	1	Ohmite	KDV12FR050ET
IC PWR MOSFET DRIVER N-CH 14SOIC	2	Analog Devices / Linear Technology	LT1160IS#PBF
IC REG BUCK ADJ 1A SYNC 16QFN	1	Texas Instruments	TPS62150AQRGTRQ1
RES 4.7 OHM 1/8W 5% 0805	4	Stackpole Electronics	RMCF0805FT4R70CT