



**Kauno technologijos universitetas**  
Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Indukcinio krovimo sistemos elektromobiliams tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Dominykas Katinauskas**  
Projekto autorius

**Prof. Robertas Lukočius**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2024**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Indukcinio krovimo sistemos elektromobiliams tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

---

**Dominykas Katinauskas**

Projekto autorius

**Prof. Robertas Lukočius**

Vadovas

**Asist. Artūras Baronas**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2024**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Dominykas Katinauskas

## **Indukcinio krovimo sistemos elektromobiliams tyrimas**

### Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Dominykas Katinauskas

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Katinauskas, Dominykas. Indukcinio krovimo sistemos elektromobiliams tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Robertas Lukočius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: IPT, WPT, belaidis krovimas, elektromobiliai, magnetiniai laukai;

Kaunas, 2024. 53 p.

### **Santrauka**

Magistro baigiamajame projekte yra daromas indukcinio krovimo sistemos elektromobiliams tyrimas. Ši sistema plečiantis elektromobilių pramonėje ir jų poreikiui, jau yra įgavusi pagreitį tobulėti ir vystytis. Šiame tyrime bus sukurtas fizinis maketas ir lyginamos jo galios priklausomybės nuo atstumo tarp ričių, dažnio, centro nesutaptiems. Analitinėje dalyje bus nagrinėjama literatūra, kuri padės labiau išsiginčyti į temą ir jos svarbą ir esamus niuansus susijus su indukcinio energijos perdavimu. Projektinėje dalyje bus projektuojama pati sistema, pasirenkami sistemos parametrai sumažintas dydis lyginant su realia sistema. Taip pat, pasirenkami sistemos komponentai maketui sukurti.

Katinauskas, Dominyukas. Investigation of Induction Charging System for Electric Vehicles. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Robertas Lukočius; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: IPT, WPT, wireless charging, electric cars, magnetic fields.

Kaunas, 2024. 53 p.

### **Summary**

In the master's final project, a study of the induction charging system for electric vehicles is carried out. With the expansion of the electric car industry and their demand, this system has already gained momentum to improve and develop. In this study, a physical model will be created and its power dependences on the distance between the coils, frequency, center will be compared for non-overlapping ones. The analytical part will examine the literature that will help to delve deeper into the topic and its importance and existing nuances in relation to inductive energy transfer. In the design part, the system itself will be designed, the system parameters will be selected and reduced in size compared to the real system. Also, select the system components to create the layout.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>7</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Santrumpų ir terminų sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>10</b>
<b>1. Analitinė dalis .....</b>	<b>11</b>
1.1. Elektromobiliai .....	11
1.1.1. Elektromobilių raida.....	11
1.1.2. Elektromobilių baterijų parametrai.....	11
1.2. Krovimo stotelės.....	13
1.2.1. Krovimo stotelių tipai.....	13
1.3. Indukcinis krovimas .....	14
1.3.1. Indukcinio krovimo veikimo principas .....	15
1.4. Galimos kompensacinės perdavimo grandinės pagal jungimo tipą .....	19
1.4.1. Nuosekliai-nuosekliai jungimas .....	19
1.4.2. Nuosekliai-lygiagrečiai jungimas.....	19
1.4.3. Lygiagrečiai-nuosekliai jungimas .....	19
1.4.4. Lygiagrečiai-lygiagrečiai jungimas .....	20
1.4.5. Palyginimas visų kompensacinių grandinių .....	20
1.5. Ričių parametrai .....	22
1.6. Indukcinio krovimo veikimo struktūra.....	22
1.7. Sistemos komponentai, kurie gerina induktyvųjų energijos perdavimą.....	23
1.7.1. Feromagnetikai .....	23
1.7.2. LITZ laidai.....	23
<b>2. Projektinė dalis .....</b>	<b>25</b>
2.1. Komponentų analizė .....	25
2.1.1. Tranzistoriai.....	25
2.2. Ričių parametrų skaičiavimai .....	25
2.3. Matematinis modelis .....	28
2.4. Principinės schemos sudarymas .....	29
2.5. Maketo gamyba .....	32
<b>3. Tiriamoji dalis.....</b>	<b>36</b>
3.1. Matematinio modulio tyrimas .....	36
3.2. Maketo tyrimas.....	39
3.3. „COMSOL Multiphysics“ programinėje įrangoje ričių tyrimas .....	44
<b>Išvados .....</b>	<b>49</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>51</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>54</b>

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Ličio jonų (Li-On) baterijos[4].....	12
<b>2 lentelė.</b> Nikelio ir metalo hibrido baterijos[5].....	12
<b>3 lentelė.</b> Švino rūgšties (SLA) baterijos[6].....	12
<b>4 lentelė.</b> Baterijų palyginimas.....	13
<b>5 lentelė.</b> Dažnio ir artumo efekto priklausomybė.....	18
<b>6 lentelė.</b> Kompensacinių grandinių palyginimas tarpusavyje.....	20
<b>7 lentelė.</b> Kompensacinių grandinių parametrų skaičiavimas.....	21
<b>8 lentelė.</b> Apskaičiuoti ričių parametrai .....	28
<b>9 lentelė.</b> Ričių parametrai .....	32
<b>10 lentelė.</b> Preliminarus komponentų sąrašas[sudaryta 2024-01-15] .....	33
<b>11 lentelė.</b> Matematinio modulio rezultatai prie 93kHz .....	36
<b>12 lentelė.</b> Matematinio modulio rezultatai prie 85 kHz .....	36
<b>13 lentelė.</b> Matematinio modulio rezultatai prie $f = 85 \text{ kHz}$ , $C_{ss} = 0.12 \mu\text{F}$ .....	37
<b>14 lentelė.</b> Maketas prie $f = 93\text{kHz}$ ; $U_{in}=12 \text{ V}$ ; $I_{out} = 3\text{A}$ ; $R_{load}= 0.4 \text{ m}\Omega$ ; $C_{ss}=0.1\mu\text{F}$ ; Cripple = $1\mu\text{F}$ ; .....	39
<b>15 lentelė.</b> Maketas prie $f = 93\text{kHz}$ ; $U_{in}= 5 \text{ V}$ ; $I_{out} = 3\text{A}$ ; $R_{load}= 0.4 \text{ m}\Omega$ ; $C_{ss}=0.1\mu\text{F}$ ; Cripple = $1\mu\text{F}$ .....	39
<b>16 lentelė.</b> Maketas prie $f = 93\text{kHz}$ ; $U_{in}= 12\text{V}$ ; $I_{out} = 3\text{A}$ ; $R_{load}= 0.4 \text{ m}\Omega$ ; $C_{ss}=0.1\mu\text{F}$ ; Cripple = $0.1\mu\text{F}$ .....	40
<b>17 lentelė.</b> Maketas prie $f = 93\text{kHz}$ ; $U_{in}= 5 \text{ V}$ ; $I_{out} = 3\text{A}$ ; $R_{load}= 0.4 \text{ m}\Omega$ ; $C_{ss}=0.1\mu\text{F}$ ; Cripple = $0.1\mu\text{F}$ .....	40
<b>18 lentelė.</b> Maketas prie $f = 93\text{kHz}$ ; $U_{in}= 12 \text{ V}$ ; $I_{out} = 3\text{A}$ ; $R_{load}= 2 \Omega$ ; $C_{ss}=0.1\mu\text{F}$ ; Cripple = $1\mu\text{F}$ ..	41
<b>19 lentelė.</b> Maketas prie $f = 93\text{kHz}$ ; $U_{in}= 5 \text{ V}$ ; $I_{out} = 3\text{A}$ ; $R_{load}= 2 \Omega$ ; $C_{ss}=0.1\mu\text{F}$ ; Cripple = $1\mu\text{F}$ ...	42
<b>20 lentelė.</b> Ričių parametrai keičiant atstumą tarp ričių.....	46
<b>21 lentelė.</b> Ričių parametrai keičiant ričių apvijų skaičių .....	46
<b>22 lentelė.</b> Ričių parametrai keičiant sistemos dažnį .....	47

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b>	Preliminari indukcinio krovimo sistema[16].....	15
<b>2 pav.</b>	Belaidės energijos perdavimo sistemos principinė schema[16].....	15
<b>3 pav.</b>	Belaidės energijos perdavimo atstojamoji schema[16].....	16
<b>4 pav.</b>	Nuosekliai-nuosekliai jungimo topologija[24].....	19
<b>5 pav.</b>	Nuosekliai-lygiagrečiai jungimo topologija[24].....	19
<b>6 pav.</b>	Lygiagrečiai-nuosekliai jungimo topologija[24].....	20
<b>7 pav.</b>	Lygiagrečiai- lygiagrečiai jungimo topologija[24].....	20
<b>8 pav.</b>	Belaidės krovimo sistemos struktūra.....	22
<b>9 pav.</b>	Magnetinio lauko paskirstymas panaudojant ferito šerdis[27].....	23
<b>10 pav.</b>	Litz kabelio pjūvis[13].....	24
<b>11 pav.</b>	LITZ kabelių katalogas[30].....	26
<b>12 pav.</b>	Pasirinkto kabelio parametrai[30].....	26
<b>13 pav.</b>	Populiariausios ričių formos.....	27
<b>14 pav.</b>	sukurtas matematinis modelis.....	28
<b>15 pav.</b>	Blokinė-struktūrinė schema.....	29
<b>16 pav.</b>	Siųstuvo principinė schema.....	29
<b>17 pav.</b>	Maitinimo principinė schema.....	30
<b>18 pav.</b>	MOSFET užtūros valdiklio principinė schema.....	31
<b>19 pav.</b>	Dažnio generatoriaus schema.....	31
<b>20 pav.</b>	Imtuvo principinė schema.....	32
<b>21 pav.</b>	Siųstuvo maketinė schema.....	33
<b>22 pav.</b>	Funkcijų inicijavimas.....	34
<b>23 pav.</b>	TIM2, dažnio ir PWM signalo konfigūracija.....	34
<b>24 pav.</b>	Imtuvo maketinė schema.....	35
<b>25 pav.</b>	Apskritimo tipo antena.....	35
<b>26 pav.</b>	Matematinio modelio rezultatų palyginimas tarp 93 kHz ir 85 kHz.....	37
<b>27 pav.</b>	Matematinio modelio rezultatų palyginimas tarp 93 kHz( $C_{ss}=0.1\mu F$ ) ir 85kHz( $C_{ss}=0.12\mu F$ ) .....	38
<b>28 pav.</b>	Maketo palyginamas kai $U_{in} = 5 V$ ; 12 V Cripple = 1uF; $R_{load}= 0.4 m\Omega$ .....	40
<b>29 pav.</b>	Maketo palyginamas kai $U_{in} = 5 V$ ; 12 V Cripple = 0.1uF; $R_{load}= 0.4 m\Omega$ ;.....	41
<b>30 pav.</b>	Maketo palyginamas kai $U_{in} = 5 V$ ; 12 V Cripple = 1uF; $R_{load}= 2 \Omega$ ;.....	42
<b>31 pav.</b>	Maketo palyginimas prie skirtingų parametrų.....	43
<b>32 pav.</b>	Matematinio modulio ir maketo naudingumo koeficiento palygimas.....	44
<b>33 pav.</b>	COMSOL programinėje įrangoje suprojektuota sistema.....	45
<b>34 pav.</b>	COMSOL programinėje įrangoje iširtos magnetinio lauko kryptys.....	45
<b>35 pav.</b>	Ryšio koeficiento priklausomybė nuo atstumo tarp ričių.....	46
<b>36 pav.</b>	Ryšio koeficiento priklausomybė nuo apvijų skaičiaus.....	47
<b>37 pav.</b>	Ryšio koeficientas priklausomybė nuo sistemos dažnio.....	48



## **Santrumpų ir terminų sąrašas**

IPT - Induktyvus galios perdavimas (Angl. Inductive power transmission)

EV – elektromobiliai (Angl. electric vehicles)

IEA – Tarptautinė energetikos agentūra (Angl. International Energy Agency)

BEV – elektromobilis (Angl. Battery electric vehicle)

HEV- hibridinis elektromobilis (Angl. Hybrid electric vehicle)

Li-ion – Ličio jonų baterija (Angl. Lithium-ion battery)

NiMh – Nikelio metalo hibrido baterija (Angl. Nickel–metal hydride battery)

BMS – baterijos valdymo sistema (Angl. Battery management system)

## Ivadas

Induktyvus galios perdavimas (IPT) yra nauja technologija, kuri naudojama daugelyje sričių – nuo telekomunikacijos prietaisų iki medicinos aparatų. IPT technologija naudoja elektromagnetinės indukcijos principą, tai yra, perduodant aukšto dažnio, kintamąją energiją iš siųstuvo ritės į imtuvo magnetinio lauko pagalba. Tai patogesnis, estetiškesnis ir saugesnis būdas nei tradicinis laidinis krovimas.

Nors IPT technologija turi daug pranašumų, yra keletas problemų, kurios riboja jos praktinį pritaikymą. Viena problema yra tai, kad oro tarpas tarp siunčiančios ir priimančios ritės gali būti efektyvus iki 10cm (elektromobiliuose nuo kelio dangos iki dugno yra maždaug 10-25cm), o didesnis oro tarpas tarp mašinos dugno ir kelio dangos lemia mažesnę sąsają tarp siųstuvo ir imtuvo ričių. Nevisiškas lygiagretumas tarp ričių dar labiau sumažina efektyvumą perduodant galią.

Mokslininkai pasiūlė keletą metodų, kaip pagerinti magnetinį ryšį, pavyzdžiui, naudoti ferito strypus, kurie priverčia magnetinį srautą nukrypti, kurių pagalba galima sumažinti oro tarpą ir horizontalų poslinkį. Dar vienas iš būdų yra siųstuvui ir imtuvui naudoti LITZ tipo kabelius, kad sumažinti paviršinį efektą. Tačiau IPT veikimo koeficientas tarp siunčiančios ir priimančios ričių vis dar yra mažesnis už tradiciniuose transformatoriuose, o bendras ričių sąsajos koeficiento diapazonas yra nuo 10 kHz iki 100 kHz.

Tai tiesiogiai veikia dvi svarbiausias indukcinio galios perdavimo sistemos įvertinimo parametrus: efektyvumą ir galios perdavimo kiekį. Galios koeficientas taip pat mažėja, kai mažėja magnetinė sąsaja, kuri yra visiškai priklausoma nuo oro tarpo tarp ričių, kuris gali būti sumažintas sumažinus atstumą tarp siųstuvo ir imtuvo ričių krovimo metu, kaip pavyzdys sumažinti padangų slėgį.

Taip pat, yra klausimų dėl saugos, susijusios su IPT skleidžiamomis magnetinėmis bangomis. Kadangi energija perduodama be laidų, yra rizika, kad kiti įrenginiai, kurie nėra numatytame atstume, gali sugauti elektromagnetinį lauką, ir susidurti su pavojingomis elektros srovėmis. Be to, yra susirūpinimų dėl elektromagnetinio spinduliavimo ir jo įtakos žmonių ir aplinkos sveikatai.

Nors IPT technologija dar turi trūkumų, jos potencialas yra didelis. Belaidžio įkrovimo stotelės elektromobiliams yra tik viena iš pritaikymo sričių. Be to, IPT taip pat gali būti naudojamas kitose srityse, tokiose kaip mažos galios įrenginių įkrovimas, medicinos prietaisų maitinimas ir netgi erdvėlaivių energijos tiekimas.

Indukcinės galios perdavimo technologija dar turi tobulėti ir išspręsti kai kurias problemas, IPT turi didelę perspektyvą ateityje elektromobilių pramonėje. Su elektromobilių rinkai augant ir vis daugiau įrenginių būnant priklausomiems nuo belaidžio maitinimo, IPT gali tapti svarbiu būdu elektros energijos perdavimui ir greitesniam technologiniam progresui.

**Darbo tikslas:** Ištirti indukcinio krovimo stotelės maketą. Galios priklausomybes nuo atstumo, grandinės parinkties ar sistemos padėties.

### Darbo uždaviniai:

- Išnagrinėti literatūrą susijusią su indukcinio energijos perdavimu ir jos optimizavimu
- Sukurti maketą indukcinio krovimo stotelės
- Eksperimentiškai ištyrinėti galios perdavimo priklausomybę nuo atstumo
- Sukurti matematinį modelį ir palyginti jį su fiziniu maketu.

## **1. Analitinė dalis**

Šioje dalyje bus apžvelgiami panašūs prietaisai ir tyrimai esantys rinkoje. Kadangi šis tyrimas nėra naujas tai bus apžvelgiami panašūs tyrimai. Taip pat bus apžvelgiami sistemos reikalavimai, privalumai ir trūkumai, efektyvumai.

### **1.1. Elektromobiliai**

Šioje dalyje bus apžvelgiama elektromobilių raida, jų baterijų parametrai ir galimybės. Šis tiriamasis darbas bus remtasi elektromobilių parametrais.

#### **1.1.1. Elektromobilių raida**

Pirmosios pasaulyje elektrinės transporto priemonės (EV) buvo senesnės nei benzinu varomi automobiliai, o pirmieji eksperimentiniai prototipai atsirado Vengrijoje, Nyderlanduose 1830 metais. Pirmuoju praktiniu elektromobiliu dažnai laikomas amerikiečių išradėjo William Morrison's automobilis kuris buvo pagamintas apie 1890 metais. Tačiau tais laikais šios transporto priemonės baterijos nebuvo galima antrą kartą įkrauti, todėl šis sprendimas transporto priemonės nebuvo priimtas. Šiuolaikiniai elektromobiliai atsirado 20 amžiaus pabaigoje reaguojant į 1973 metų naftos krizę ir didėjantį susirūpinimą dėl klimato kaitos. Pradedant nuo Toyota Prius, 2000-aisiais metais pradėjo stipriai vystytis ši hibridinio elektromobilio modelį. Nuo šio automobilio atsiradimo eksponentiškai pradėjo augti šio tipo transporto priemonių rinka. Kadangi pasaulis siekia pereiti prie tvarios ateities, o vyriausybės visame pasaulyje pradeda uždrausti pardavinėti vidaus degimo variklių transporto priemones. Elektromobilių pramonės ateitis atrodo šviesi.

Nors didelis šuolis elektromobilių pramonėje nuo vienos iki dešimties milijonų elektromobilių kelyje galėjo įvykti greitai, tačiau kitas žingsnis bus dar didesnis nei buvo. Tarptautinė energetikos agentūra (IEA) prognozuoja, kad bendras elektromobilių parkas (išskyrus elektrinius dviračius ir paspirtukus) išaugs nuo beveik 30 mln. 2022 metų iki maždaug 240 mln. 2030 metų, o vidutinės metinis augimo tempas bus apie 30 %. Be to, kiekvienais metais daugelis vyriausybių ir įmonių toliau imasi tvaresnio transporto tai yra nulinės emisijos. Europos sąjungos paskelbė, kad visi nauji automobiliai parduodami nuo 2035 metų, turi būti nulinės emisijos. JAV pareiškė kad iki 2030 metų pusę visų naujų transporto priemonių turi būti varomi vien tik elektra. Daugelyje kitų didžiųjų valstybių ėmėsi drausti vidaus degimo varomų transporto priemonių pardavimus arba visiškai juos uždrausti. Atsižvelgdami į tai, daugelis transporto priemonių gamintojų pareiškė savo ketinimus sustabdyti ICE pardavimą tam tikrose vietose ir pradėti elektra varomų transporto priemonių gamybą. Pavyzdžiui, GM planuoja iki 2035 m. nustoti gaminti benzininius keleivinius automobilius, furgonus ir visureigius. „Cadillac“, „Honda“, „Jaguar Land Rover“, „Mercedes“, „Mini“, „Volvo“ ir „Volkswagen“ prisiėmė panašius įsipareigojimus. Nors ir nežinome kas laukia ateityje, bet šios tendencijos kartu su nuolat augančia elektromobilių įkrovimo infrastruktūra ir didele elektromobilių paklausa rodo žalią šviesą – elektriniui mobilumui. [1,2]

#### **1.1.2. Elektromobilių baterijų parametrai**

Elektromobilių akumulatoriai yra vienas iš svarbiausių automobilio sistemos komponentų. BEV (Tik bateriją turintys elektromobiliai) automobiliuose akumulatoriai yra vienintelė „gyvybė“. Nes tik akumulatoriuje sukaupta elektros energija yra vienintelis energijos šaltinis vairuojant BEV automobilį. Elektromobilių akumuliatorių tipai taip pat priklauso nuo automobilio sistemos.

Populiariausias naudojamas elektromobilių akumuliatorius yra ličio jonų akumuliatorius. Hibridiniams elektromobiliams(HEV) tinkamiausia baterija yra NiMH.

Elektromobilių baterijos skiriasi nuo vidaus degimo transporto priemonių. Vidaus degimo variklių transporto priemonių akumuliatoriai yra pritaikyti taip kaip energijos kaupimo sistema, galinti tiekti energiją ilgą ir tvarų laikotarpį atlikti tokioms funkcijoms: degimo kibirkščiai sukurti, komforto elektrinių dalių užtikrinimui ir kitoms panašioms sistemoms.[3,8]

Dažniausiai naudojamos elektromobilių baterijos:

**1 lentelė.** Ličio jonų (Li-On) baterijos[4]

<b>Masės ir energijos tankis</b>	100-180 Wh/kg	<b>Savaiminio išsikrovimo greitis</b>	1-5 %/mėnesį
<b>Tūrio ir energijos santykis</b>	200-300 Wh/L	<b>Ciklų kiekis</b>	500-1500
<b>Galios tankis</b>	1000-5000 W/Kg	<b>Kaina</b>	0.5-2.5 USD/Wh
<b>Įkrovimo/iškrovimo efektyvumas</b>	95-99 %		

**2 lentelė.** Nikelio ir metalo hibrido baterijos[5]

<b>Masės ir energijos tankis</b>	40-120 Wh/kg	<b>Savaiminio išsikrovimo greitis</b>	30 %/mėnesį
<b>Tūrio santykis energijos</b>	140-400 Wh/L	<b>Ciklų kiekis</b>	500-1000
<b>Galios tankis</b>	300-1000 W/Kg	<b>Kaina</b>	0.3-0.6 USD/Wh
<b>Įkrovimo/iškrovimo efektyvumas</b>	65-80 %		

**3 lentelė.** Švino rūgšties (SLA) baterijos[6]

<b>Masės ir energijos tankis</b>	30-40 Wh/kg	<b>Savaiminio išsikrovimo greitis</b>	3-20 %/mėnesį
<b>Tūrio santykis energijos</b>	60-75 Wh/L	<b>Ciklų kiekis</b>	500 - 800
<b>Galios tankis</b>	180 W/Kg	<b>Kaina</b>	0.15-0.30 USD/Wh
<b>Įkrovimo/iškrovimo efektyvumas</b>	70-92 %		

- Ultrakondensatorius- superkondensatorius. Šio tipo baterija nėra panaši į bateriją. Skirtingai nuo kitų baterijų, kurios buvo paminėtos aukščiau. Ultra kondensatoriai kaupia skystį, tarp elektrodo ir elektrolito. Didėjant skysčio paviršiaus plotui tarp elektrodo ir elektrolito didėja ir energijos kaupimo talpa. Šios baterijos yra skirtos kaip antrinės saugojimo krūviui

priemonėms elektromobiliuose. Taip yra todėl, kad ultra kondensatorius padeda elektrotechninėms baterijoms padidinti išskiriamos galios dydį. [7]

Žemiau pateikiama lentelė palyginimui tarp baterijų išvardintų aukščiau.

**4 lentelė.** Baterijų palyginimas

	<b>Ličio jonų</b>	<b>Nikelio ir metalo hibrido</b>	<b>Švino rūgšties</b>	<b>Ultrakondensatorių - superkondensatorių</b>
Prieinamumas	+	-	+	-
Energijos efektyvumas	+	+	+	+
Temperatūrinis našumas	+	-	-	+
Svoris	+	+	+	+
Gyvavimo ciklai	+	-	+	-

## 1.2. Krovimo stotelės

Elektrinių transporto priemonių įkrovimo stotelė, taip pat vadinama EV įkrovimo stotimi, yra elementas, suteikiantis elektros energijos tiekimą. Elektrinių automobilių savininkai gali įkrauti savo transporto priemones namuose, darbe ar kelionės metu. Kai kurios transporto priemonės turi įmontuotus keitiklius, leidžiančius juos prijungti prie įprasto 220 V elektros lizdo, tačiau kitiems reikalinga įkrovimo stotis. Viešosios įkrovimo stotelės yra įrengtos gatvėse, prekybos centruose, restoranuose ir automobilių stovėjimo aikštelėse, o jų įvairovė yra didelė, kad atitiktų skirtingus standartus. Paprastai naudojami įkrovikliai su trimis kombinuotosios įkrovimo sistemomis - CCS, CHAdeMO ir AC (nuolatinės įtampos) greituoju krovimu, skirti normaliam nuolatiniam naudojimui. [9]

### 1.2.1. Krovimo stotelių tipai

Krovimo stotelių tipai:

1. Privačios krovimo stotelės - šias stoteles įrengia elektromobilių savininkai savo gyvenamuosiuose namuose. Paprastai jos naudoja įprastą namų elektros lizdą ir automobilis įkraunamas per naktį.
2. Stacionarios krovimo stotelės - šias paslaugas paprastai teikia privačios ar komercinės organizacijos už atitinkamą mokestį arba nemokamai. Jos gali būti lėto arba greito krovimo stotelės ir dažnai skatina elektromobilių savininkus įkrauti savo automobilius, kol jie naudojami netoliese esančiomis paslaugomis. Tai gali būti automobilių statymas pačios organizacijos darbuotojams, automobilių statymas prekybos centruose, mažuose centruose ir viešojo transporto stotyse.
3. Greito įkrovimo stotelės - tai stotelės, kurių galia yra didesnė nei 50 kW, ir per 15–40 minučių gali nuvažiuoti didesnę nei 150 kilometrų atstumą. Paprastai šios stotelės būna

įrengtos poilsiavietėse šalia magistralinių kelių, kad būtų galima keliauti elektromobiliais dideliais atstumais.

4. Baterijų keitimas (CARB) - tai nauja elektromobilių krovimo paslauga, kuri populiarėja užsienio šalyse ir ateityje gali tapti populiariu ir Lietuvoje. Ši paslauga leidžia per 15 minučių gauti papildomus 320 km ir yra labiau populiariu kaip avarinė serviso paslauga, kai automobilis sustoja vietovėje, kur aplink nėra galimybės pasikrauti transporto priemonės, tačiau gali būti naudojama ir degalinėse norint sutaupyti laiką krovimui. [9]

Kadangi elektromobilių poreikis didėja ir atstumai nuvažiuojami vienu įkrovimu didėja, tai turi neatsilikti ir įkrovimo sistemos, kurias reikia tobulinti ir gerinti. Tai pat, vienas iš potencialių būdų įkrauti elektromobilio bateriją yra ir indukcinis krovimas.

### 1.3. Indukcinis krovimas

Belaidė elektromobilio įkrovimo technologija yra perspektyvi alternatyva įprastam laidinio įkrovimo būdui. Laidinio įkrovimo procesas yra varginantis ir ilgas, reikalaujantis automobilio savininko laiko ir pastangų. Be to, laidai gali būti pažeisti ir kabelių jungimas yra ne visada patogus, tai pat ir ne saugus. Belaidės krovimo technologijos pagrindas yra elektromagnetinė indukcija, kuri buvo atrasta jau prieš daugiau nei šimtą metų.

Elektromagnetinės indukcijos principas yra pagrįstas magnetinio lauko sukūrimu, kai kintamos srovės siūstuvai yra naudojami sukurti elektrinį lauką kitame ritės gale - imtuve. Šios technologijos naudojimas yra plačiai paplitęs nuo dantų šepetėlių krovimo iki didelės galios elektrinių transporto priemonių.

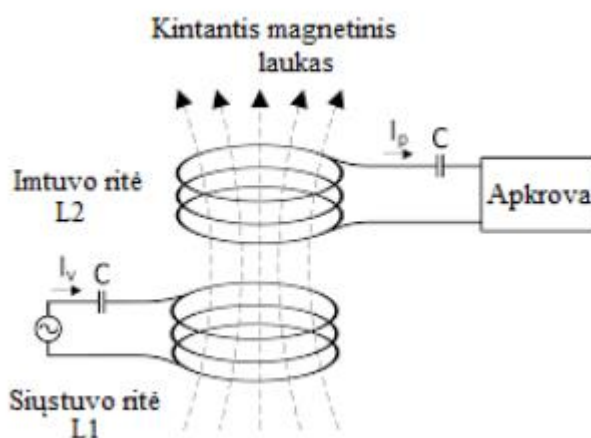
Belaidės krovimo technologijos yra vystomos dvejopai - radiaciniu ir neradiaciniu būdu. Radiacinis perdavimas naudoja elektromagnetinį lauką, mikrobangų ar radijo bangų terpę energijos perdavimui. Tačiau dėl saugos reikalavimų, tokio tipo energijos perdavimas yra ribotas. Neradiacinis būdas, kurio veikimo principas pagrįstas elektromagnetiniu lauku, yra perspektyvesnis, nes perduodamas energijos kiekis yra neribojamas. Tačiau dar yra daug techninių problemų, susijusių su įtampos reguliavimu, energijos praradimais ir kt. Vis dėlto, belaidė elektromobilio krovimo technologija yra plėtojama ir sparčiai tobulinama, siekiant sumažinti krovimo procesą iki kelių minučių ir užtikrinti patogumą, efektyvumą ir saugumą. [14,15]

Vertinant šiuolaikinį populiarųjį elektromobilio krovimą laidu ir indukcinio būdu, indukcinio būdu krovimas turi daug privalumų. Pavyzdžiui, indukcinis krovimas nereikalauja jokių jungiamųjų kabelių, o tai sutaupo laiko ir išvengia kabelių įvairovės problemų. Be to, mažesnės talpos baterijos reiškia mažesnę elektromobilio masę, mažesnes sąnaudas ir galimybę išnaudoti daugiau atsinaujinančios energijos. Indukcinis krovimas taip pat užtikrina ilgesnį sistemos ilgaamžiškumą, kadangi nėra kontaktinių dalių, kurios būtų veikiamos mechaninio poveikio kiekvieną dieną. Be to, ši inovacija suteikia platesnę galimybių racioną, ypač tiems prietaisams, kur sudėtinga pakeisti išsikrovusias baterijas ar neįmanoma prijungti laidų baterijų įkrovimui, kaip pavyzdžiui kūno implantai ir panašūs dalykai.

Tačiau, indukcinio krovimo sistema turi ir tam tikrų trūkumų, tokių kaip aukštesnė įdiegimo kaina, didesnės šilumos emisijos, techninės kliūtys ir poreikis išlaikyti kuo mažesnę atstumą tarp siūstuvo ir imtuvo. Šie trūkumai gali kelti iššūkius, ypač kai reikia greitai judančių priemonių suvartojimo apskaitos ir priskyrimo EV savininkams, atsiskaitymui už šias elektromobilių krovimo paslaugas.

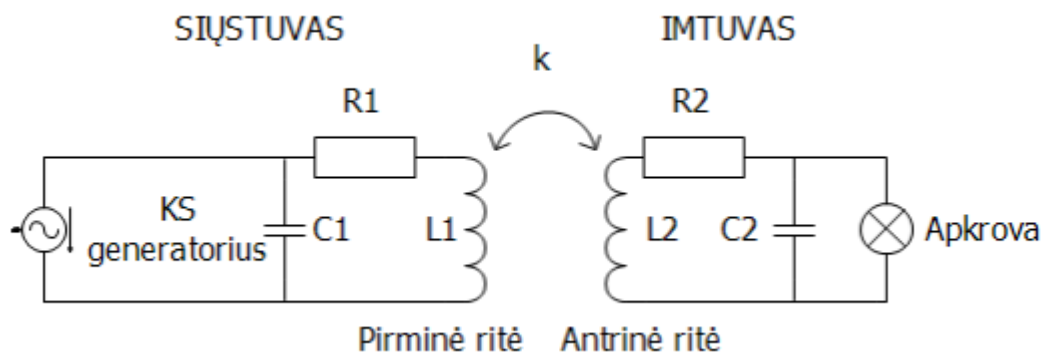
### 1.3.1. Indukcinio krovimo veikimo principas

IPT principas yra pagrįstas elektromagnetinio indukcijos reiškiniu. Kintama srovė, tekanti per siūstuvo ritę, sukuria kintamąjį magnetinį lauką, kuris perduoda energiją į imtuvo ritę, esančią kitame įrenginio gale. Imtuvo ritėje elektromagnetinis laukas sukelia elektros srovę, kuri gali būti naudojama įkrauti akumuliatorių. Indukcinio įkroviklio efektyvumas priklauso nuo daugelio veiksnių, įskaitant siūstuvo ir imtuvo ritės konstrukciją ir matmenis, jų tarpusavio padėtį, atstumą tarp jų ir galios perdavimo atstumą. Didelės atstumo IPT technologijos leidžia perduoti energiją per atstumus iki kelių metrų, naudojant dažnius nuo kelių KHz iki kelių MHz. IPT technologijos taikymo sritys yra labai įvairios, nuo nejudančių objektų (pvz., nejudančių elektroninių įrenginių) įkrovimo iki elektrinių transporto priemonių įkrovimo. Taip pat IPT technologija gali būti taikoma energijos perdavimui sunkiai prieinamose vietose, pvz., laivybose ar žemės ūkio mašinose. Preliminarus veikimo principas yra pavaizduotas žemiau esančiame paveiksle.



1 pav. Preliminari indukcinio krovimo sistema[16]

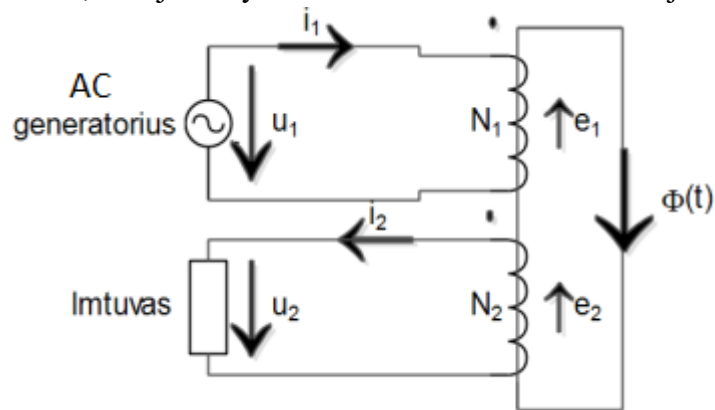
Pagrindinės dalys, kurios sudaro bevielės energijos perdavimo sistemą, yra siūstuvo ritė L1 ir imtuvo ritė L2 (pavaizduota 1 paveikslėlyje). Abi ritės susijungia į abipusio magnetinio ryšio induktyvumo sistemą, kurioje kintama srovė teka siūstuvo ritėje ir sukuria kintamą magnetinį lauką, kuris indukuoja elektrovarą (EVJ) imtuvo ritėje. Bevielės energijos perdavimo sistemos principinė schema yra pateikta 2 paveikslėlyje.



2 pav. Belaidės energijos perdavimo sistemos principinė schema[16]

Pavaizduota belaidės energijos perdavimo sandara, kurioje yra dvi apvijos, o jų ryšys yra magnetinis, nes jos veria bendrą magnetinį srautą. Pirmoji apvija, kuriai tiekiami elektros energija,

vadinama pirminė, o antra apvija, kuri tiekia elektros energiją imtuvui, vadinama antrine. Įėjimo dydžius žymime indeksu "1", o išėjimo dydžius - indeksu "2". Tai vaizduojama 3 paveiksle.



**3 pav.** Belaidės energijos perdavimo atstojamoji schema[16]

Belaidės sistemos veikimo principas remiasi abipusės indukcijos reiškiniu. Kintamojo maitinimo šaltinio  $U_1(t)$  prijungta pirminė ritė, kuri turi  $N_1$  kiekį gyslų. Pirminėje siųstuvo ritėje tekanti kintamoji srove  $I_1(t)$  sukuria EVJ  $N_1 i_1$ , sukurdamą kintamąjį magnetinį srautą  $\Phi(t)$  siųstuvo ritėje. Šis srautas veria abi apvijas (siųstuvą ir imtuvą) indukuodama jų EVJ  $e_1(t)$  ir  $e_2(t)$ . Magnetinių ir elektrinių dydžių seka galima matyti 3 paveiksle.

Kadangi abi ritės yra suvyniotos ta pačia kryptimi ir jas veikia vienintelis kuriamas magnetinis srautas, tai tiek pirmojo, tiek antrojo kontūro apimantį magnetinį srautą žymime taip, kad taikant dešinio sraigto taisyklę sraigto galvos judėjimo kryptys būtų tokios pačios, kaip ir srovės kryptys, o sraigto sukimosi kryptys sutaptų su magnetinio lauko linijų kryptimi. Taip pat antrajame kontūre elektrovaros  $e_2$  kryptis sutampa su  $e_1$  kryptimis.

Nagrinėjant elektromagnetines fizikas (elektrinius dydžius ir magnetinį srautą) sistemoje, kurią sudaro pirmasis ir antrasis kontūrai, būtina naudoti kompleksinius dydžius. Elektros jėgos, kurias sukuria ši sistema, gali būti išreikštos taip:

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

$$e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt}; \quad (2)$$

čia:

$N_1, N_2$  – Pirminės ir antrinės ritės vijų skaičius;

$\frac{d\Phi}{dt}$  – Magnetinio srauto kitimo greitis nuo laiko;

$d\Phi$  – Magnetinio srauto pokytis.

Laikant, kad magnetinio srauto kitimo sinusinis dydis, išreiškiame:

$$-\dot{\Phi} = \Phi_m \sin \omega t; \quad (3)$$

čia  $\Phi$  – magnetinis srautas,

$\Phi_m$  – magnetinio srauto didžiausias dydis,



$\omega$  – harmoninio dydžio fazės kitimo sparta.

Atlikę prastinimą gauname:

$$e1 = E1_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}); \quad (4)$$

$$e2 = E2_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}); \quad (5)$$

čia  $E1_m, E2_m$  - maksimalios elektrovaros pirminėje ir antrinėje ritėse.

Toliau šie dydžiai išreiškiami kompleksiniais dydžiais:

$$E1 = E1 e^{j\pi/2}; \quad (6)$$

$$E2 = E2 e^{j\pi/2}; \quad (7)$$

Toliau išreiškiamo elektrovarų efektines vertes:

$$E1 = 4,44fN1\Phi_m; \quad (8)$$

$$E2 = 4,44fN2\Phi_m; \quad (9)$$

čia  $f$  – energijos šaltinio maitinimo dažnis, Hz.

Belaidės energijos perdavimo koeficientas apskaičiuojamas pirminio kontūro elektrovaros santykiu su antrinio kontūro elektrovara: [13,14]

$$K = \frac{E1}{E2} = \frac{N1}{N2}; \quad (10)$$

Kadangi šioje sistemoje bus ganėtinai didelis dažnis (80-90kHz) nuo jo atsiranda „skin-effect“. Jeigu jo neįvertinus pradeda mažėti sistemos efektyvumas, nes magnetinis laukas perneša energiją ne per visą laidininko skerspjūvį.

Bendra „skin-effect“ formulė, kai nėra dielektrinių ar magnetinių nuostolių:

$$\delta = \sqrt{\frac{2p}{\omega\mu}} \sqrt{\sqrt{1 + (p\omega\varepsilon)^2} + p\omega\varepsilon}; \quad (11)$$

čia  $p$  - laidininko savitoji varža;

$\omega$  - kampinis srovės dažnis  $=2\pi f$ , kur  $f$  yra dažnis;

$\mu$  - laidininko pralaidumas.

Taip pat šią formulę supaprastinus gauname:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi * \mu * \sigma * f}}; \quad (12)$$

Čia  $\mu$  - magnetinio lauko konstanta, laisvos erdvės, pralaidumas

$\sigma$  – laidininko medžiagos laidumas.

Žemiau esančioje lentelėje parodyta artumo efekto ir dažnio priklausomybė. [18]

**5 lentelė.** Dažnio ir artumo efekto priklausomybė

Dažnis, f	„Skin depth” $\delta$ (variniame laide)
10 kHz	0.66 mm
50 kHz	0.30 mm
100 kHz	0.21 mm
500 kHz	0.094 mm = 94 $\mu$ m

Ritės Q koeficientas yra jos kokybės arba efektyvumo matas. Jis parodo ritėje sukauptos energijos ir energijos prarastos per ciklą dėl varžos ir kitų nuostolių santykį. Didesnis Q koeficientas rodo, kad ritė yra efektyvesnė ir turi mažesnius nuostolius. Ritės koeficientas gali būti apskaičiuojant naudojant šią formulę:

$$Q = \frac{\omega L}{R}; \quad (13)$$

čia  $\omega$  – kampinis dažnis;

$L$  – ritės induktyvumas;

$R$  – ritės varža omais.

Indukcinio energijos perdavimo kontekste yra svarbus ir ryšio faktorius, kuris apibūdina magnetinį ryšį tarp galios siūstuvo ir imtuvo. Kokybės faktorius įvertina, kaip stipriai siūstuvai ir imtuvai sąveikauja tarpusavyje. Šio koeficiento reikšmės galimos tarp 0 ir 1. Kuo gautas rezultatas arčiau 1 tuo geresnis ričių susietumas. [25]

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}; \quad (14)$$

Taip pat, svarbus parametras yra ir abipusis induktyvumas (M). Kai ritėje indukuojama elektros srovė dėl srauto pokyčio ritės artume, tai vadinama abipusiu induktyvumu. Paprastai tariant, kai įtampos pokytis vienoje ritėje sukelia įtampą imtuvo ritėje. Šio parametro formulė yra pateikiama žemiau.[26]

$$M = \frac{\mu_0 \mu_1 N_1 N_2 A}{L}; \quad (15)$$

čia,  $N_1, N_2$  – Siūstuvo ir imtuvo apsukimų skaičius;

$A$  – Skerspjūvio plotas;

$L$  – Ritės ilgis;

$\mu_0$  – Laisvos erdvės pralaidumas =  $4\pi \cdot 10^{-7}$ ;

$\mu_1$  – Santykinis minkštosios geležies šerdies pralaidumas.

## 1.4. Galimos kompensacinės perdavimo grandinės pagal jungimo tipą

Įprastoje IPT sistemoje pagrindinis veiksnys, skirtas pagerinti įvesties galios koeficientą ir antrinės sistemos pusė turi būti kompensuojamos, kad būtų galima perduoti didelį kiekį energijos per nuotolį. Paprasčiausia kompensacija gali būti pasitelkus varžas, talpumus ir induktyvumus. Kai kurie IPT trūkumai atsiranda dėl aukšto veikimo dažnio, dėl kurio sumažėja ir galios koeficientas. Šie trūkumai gali susikelti didžiulius sistemos nuostolius. Vienas iš sprendimų yra į grandines papildomai prijungti kondensatorių, priklausomai nuo aplinkybių. Šie nuostoliai atsiranda dėl oro tarpo tarp pirminės ir antrinės vijos, todėl yra rekomenduojama tiek siųstuvo tiek imtuvo pusėse atsižvelgti į tai. Todėl yra siekiamas rezonansas, prijungiant kondensatorių abejose pusėse. Iš viso yra keturi skirtingi būdai juos pajungti, kurie bus trumpai aprašomi toliau. [19,20,21]

### 1.4.1. Nuosekliai-nuosekliai jungimas

Šis jungimas pirminėje ritėje padeda sumažinti pirminę įtampą ir priklauso nuo vartotojo poreikio, o antrinėje ritėje, jeigu kompensuojama nuosekliai, gali padėti stabilizuoti išėjimo įtampą. Šioje situacijoje tiek siųstuvo tiek imtuvo ritėse nuosekliai prieš ritę prijungiamas kondensatorius. Ši topologija užtikrina tinkamą ir kokybišką energijos perdavimą. Bet šis variantas įprastai naudojamas mažo nuotolio taikymui, nes efektyvumas tarp ričių greitai krenta dėl didėjančio oro tarpo tarp ričių. Šio tipo jungimas parodytas žemiau esančiame 4 paveiksle.



4 pav. Nuosekliai-nuosekliai jungimo topologija[24]

### 1.4.2. Nuosekliai-lygiagrečiai jungimas

Šis jungimas turi tipišką struktūrą jau pirminėje ritėje kaip ir prieš tai aptartame pavyzdyje, bet antrinėje dalyje kondensatorius jungiamas lygiagrečiai ritei. Todėl taip yra pasiekama stabili srovė antrinėje ritėje. Atstumas tarp ričių galimas nuo kelių centimetrų iki kelių dešimčių centimetrų. Šios kompensacijos grandinės skirtos sistemoms su daugybe apkrovų, kaip pavyzdžiui transporto priemonių sistemoms. Šio tipo jungimas parodytas žemiau esančiame 5 paveiksle.



5 pav. Nuosekliai-lygiagrečiai jungimo topologija[24]

### 1.4.3. Lygiagrečiai-nuosekliai jungimas

Šioje sistemoje pirminėje dalyje yra kondensatorius jungiamas lygiagrečiai ritei, o imtuvo dalyje kondensatorius nuosekliai. Dėl tokio jungimo pirminėje ritėje yra ribojama perduodama srovė į antrinę ritę, to pasekoje sumažėja magnetinio lauko stiprumas. Atstumas tarp ričių galimas kaip ir SP tipo grandinėse nuo kelių centimetrų iki kelių dešimčių. Šio tipo jungimas parodytas žemiau esančiame 6 paveiksle.



6 pav. Lygiagrečiai-nuosekliai jungimo topologija[24]

#### 1.4.4. Lygiagrečiai-lygiagrečiai jungimas

Šioje jungimo topologijoje kondensatoriai tiek siūstuvo tiek įmtuvo grandinėse yra jungiami lygiagrečiai rite. Šio jungimo pranašumas yra magnetinio lauko atstumas, nes jis siekia nuo dešimčių centimetrų iki kelių metrų. PP sistemoje yra sudėtingiau pasiekti tinkamą rezonansinį dažnį, bet šioje sistemoje mažiau energijos yra prarandama dėl apkrovos pastovaus kitimo. Bet naudingumas ir perduodama galia yra labai prasta. Šio tipo jungimas parodytas žemiau esančiame 7 paveiksle.



7 pav. Lygiagrečiai- lygiagrečiai jungimo topologija[24]

#### 1.4.5. Palyginimas visų kompensacinių grandinių

Šiame skyrelyje bus palyginamų kompensacinių grandinių: nominali įtampa, impedansas(z), perduodama galia nepriklausomai nuo apkrovos, efektyvus lyginant didelius atstumus, privalumai, trūkumai, taikymai ir galios lygis. Šis palyginimas yra pateikiamas žemiau esančioje lentelėje.

6 lentelė. Kompensacinių grandinių palyginimas tarpusavyje

Grandinės jungimas				
Parametrai	Nuosekliai-nuosekliai	Nuosekliai-lygiagrečiai	Lygiagrečiai-nuosekliai	Lygiagrečiai-lygiagrečiai
Nominali įtampa	Maža, bet daugiau nei SP tipe	Mažiausia galima įtampa	Aukšta įtampa lyginant su SS ir SP	Aukšta įtampa lyginant su SS ir SP
Impedansas(z)	Mažėja kartu su sistemos netikslumu	Mažėja kartu su sistemos netikslumu	Didėja kartu su sistemos netikslumu	Didėja kartu su sistemos netikslumu
Perdavimas nepriklausomai nuo apkrovos	Įtampa ir srovė	Įtampa ir srovė	Įtampa	Srovė
Efektyvus lyginant didelius atstumus	Mažas	Mažas	Didelis	Didelis
Privalumai	Išėjimo srovė yra nepriklausoma nuo apkrovos esant rezonansui	Gali būti mažesnė antrinė ritė. Antrinio lygiagretus rezonansinis	Parametru derinimas yra lengvas	Parametru derinimas yra lengvas

		keitiklis, kuris suteikia stabilę srovę		
Trūkumai	Didelio skersmens ritės. Dalinės apkrovos metu apkrova nepriklauso nuo įtampos perdavimo santykio. Aukšto dažnio srovė teka per kondensatorių, todėl kondensatoriaus reikia galingesnio	Nuolatinės įtampos komponentus gali pasiekti kintama srovė, reikia papildomų apsaugų antrinėje grandinėje.	Norint perduoti srovę reikalinga šaltinio įvestis siekiant pašalinti momentinius įtampos pokyčius. Norint perduoti didelę galią, reikalinga aukštos įtampos įvesties dėl susidarancios didelės varžos.	Mažas galios koeficientas. Reikalingas galingas srovės šaltinis. Norint perduoti didelę galią, reikia aukštos įtampos dėl susidariusios varžos.
Taikymai	Elektromobiliai	Biomedicinos taikymas, mažos galios įtaisams	Didelės galios elektriniai autobusai	Didelės galios elektriniai autobusai
Perduodamos galios lygis	Didelis	Mažas ir vidutinis	Didelis	Didelis

Taip pat skaičiavimui kompensacinių grandinių  $Z_{\text{link}}$ (ryšio impedansas) ir  $C_1$ (Pirminė talpa)parametrams naudojamos formulės yra pateikiamos žemiau esančioje lentelėje.[24]

**7 lentelė.** Kompensacinių grandinių parametru skaičiavimas

Jungimo topologija	Jungties varžą ( $Z_{\text{link}}$ )	Pirminis talpumas ( $C_1$ )
SS (Nuosekliai-nuosekliai)	$Z_{L1} + \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{(\omega M)^2}{Z_{L2} + \frac{1}{j\omega C_2} + R_L}$	$\frac{1}{\omega_r^2 L_1}$
SP (Nuosekliai-lygiagrečiai)	$Z_{L1} + \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{(\omega M)^2}{Z_{L2} + \frac{1}{j\omega C_2} + 1/R_L}$	$\frac{1}{\omega_r^2 (L_1 - \frac{M^2}{L_2^2})}$
PS (Lygiagrečiai-nuosekliai)	$\frac{1}{j\omega C_1 + \frac{1}{Z_{L1} + \frac{(\omega M)^2}{Z_{L2} + \frac{1}{j\omega C_2} + R_L}}}$	$\frac{L_1}{\omega_r^2 L_1^2 + (\frac{\omega_r^2 M^2}{R})^2}$
PP (Lygiagrečiai-lygiagrečiai)	$\frac{1}{j\omega C_1 + \frac{1}{Z_{L1} + \frac{(\omega M)^2}{Z_{L2} + \frac{1}{j\omega C_2} + 1/R_L}}}$	$\frac{L_1 - \frac{M^2}{L_2}}{\omega_r^2 (L_1 - \frac{M^2}{L_2})^2 + (\frac{M^2 R}{L_2^2})^2}$

Čia  $Z_{L1}$  – Siųstuvo induktyvumo impedanso varža;

$Z_{L2}$  – Imtuvo induktyvumo impedanso varža;

M – Abipusis induktyvumas.

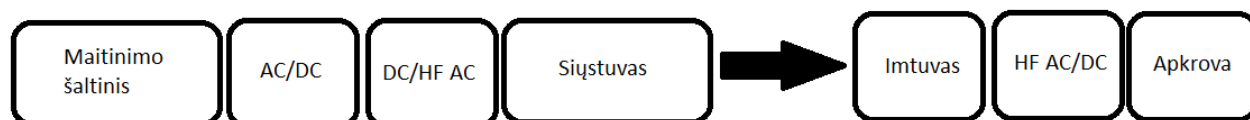
### 1.5. Ričių parametrai

Ritės formos parametrai yra svarbūs projektuojant indukcinės energijos perdavimo sistemas. Šie parametrai padeda nustatyti ritinių dydį, formą ir konfigūraciją, o tai gali turėti didelės įtakos sistemos efektyvumui ir veikimui. Ritės formos parametrai yra šie:

- Ritės skersmuo – šis skersmuo yra skersmuo ar spindulys pačios ritės. Tai lemia ritės dydį ir yra svarbus veiksnys nustatant ritės induktyvumą ir varžą. Didesnis ritės skersmuo paprastai padidina induktyvumą, o tai gali būti naudinga norint pasiekti aukštesnį siųstuvo ir imtuvo ričių efektyvumą. Tačiau didesnis skersmuo nereiškia, kad viskas tik geriau. To pasėkoje gali būti problematiška naudojant ribotą erdvę. Taip pat, didesnis ritės skersmuo gali padidinti varžą, kuri sukeltų didesnius galios nuostolius.
- Ritės aukštis – atstumas tarp ritės apačios ir viršaus. Šis parametras taip pat vaidina svarbų vaidmenį nustatant ritės induktyvumą ir vidinę varžą. Aukštesnė ritė paprastai padidins induktyvumą, o tai gali būti naudinga norint pasiekti didesnę efektyvumą tarp ričių. Taip pat, kaip ir skersmuo, aukštis gali irgi turėti didelę įtaką ritės varžai.
- Ritės vijų skaičius – šis parametras reiškia kiek kartų viela yra apvyniota ritės forma. Šis parametras svarbus, nes nuo jo priklauso ritės induktyvumas ir varža. Padidinus vijų skaičių paprastai padidėja ir induktyvumas, o tai gali būti naudinga norint pasiekti didesnę sistemos efektyvumą.
- Ritės forma – dažniausiai ritės būna apvalios formos, bet gali būti ir kitokių formų tokių kaip kvadratas ar „X“ forma. Dažniausiai renkama yra apskritimo forma, bet ritės forma gali kisti priklausomai kur ši sistema būtų taikoma.
- Ritės medžiaga – ritės medžiagą stengiamasi imti kuo laidesnę, kaip pavyzdžiui varis. Medžiaga iš ko ritė yra susukta gali turėti įtakos ritės varžai, induktyvumui ir Q koeficientui, taip pat ir sistemos efektyvumui. [22,23]

### 1.6. Indukcinio krovimo veikimo struktūra

IPT krovimo stotelės yra pagrįstos elektromagnetinės indukcijos veikimu, struktūrinė schema yra pateikiama žemiau. [10,11,12,13]



8 pav. Belaidės krovimo sistemos struktūra

Šia sistemą sudaro:

**Maitinimo šaltinis** – Tai prietaisas, kuris maitina visą esamą sistemą. Šiuo atveju prietaisas turi išduoti tokią galią, kuri yra reikalinga krauti prietaisą su įskaičiuotais nuostoliais perdavimo metu.

**Įtampos keitiklis** – Ši sistemos dalis yra labai svarbi perdavimo procesuose bei magnetinio lauko sukūrimui. Pirmoji dalis „AC/DC“ konvertuos iš maitinimo šaltinio tekančią elektros srovę į nuolatinę elektros srovę. Toliau sekant sistemos struktūra yra dar vienas keitiklis „DC/HF AC“. Šis keitiklis iš nuolatinės srovės konvertuos energiją į kintamą ir aukšto dažnio (80kHz-90kHz)

**Siųstuvas** – Ši sistemos dalis, kuris bus prijungta prie aukšto dažnio kintamosios įtampos, bus belaidės energijos perdavimo vienas iš pagrindinių parametrų. Ji kurs magnetinį lauką imtuvui.

**Imtuvas** – Ši sistemos dalis yra imtuvas, kuris „gaudys“ siųstuvo sukurtą magnetinę energiją perduotą nuotoliu būdu.

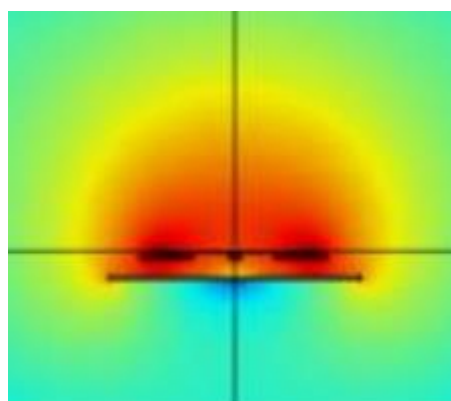
**Apkrova** – DC įtampą imanti apkrova, šiuo atveju bus varža ar varžynas norint „įimituoti“ tinkamas apkrovas sistemai.

Ši sistema su principinėmis schemomis bus aprašyta plačiau projektinėje dalyje.

## 1.7. Sistemos komponentai, kurie gerina induktyvųjį energijos perdavimą

### 1.7.1. Feromagnetikai

Ferito šerdys vaidina svarbų vaidmenį indukcinio energijos perdavimo sistemose, ypač gerinant magnetinės skverbties koeficientą tarp siųstuvo ir imtuvo. Pirmiausia įtraukiant feromagnetiką į IPT ričių dizainą, pagerinamas susietumas abiejų ričių to pasėkoje sumažėja energijos nuostoliai, nes ferito šerdis pasižymi dideliu magnetiniu pralaidumu, leidžiant sutelkti magnetinį srautą konkrečiau iš siųstuvo į imtuvą. Kadangi ferito šerdis yra pagaminta iš feritinių medžiagų (keraminiai junginiai), daugiausiai sudaryti iš geležies oksido FE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kartu su kitais metalų oksidais. Šios medžiagos pasižymi dideliu magnetiniu pralaidumu, to pasėkoje ferito šerdys padeda konkrečiau lauku perduoti magnetinę energiją. Taip pat, ferito šerdį apriboja magnetinį lauką ir nukreipia reikiama kryptimi, taip yra didinamas sistemos efektyvumas. Magnetinio lauko pasiskirstymą galima matyti 9 paveiksle. [27]



9 pav. Magnetinio lauko pasiskirstymas panaudojant ferito šerdį[27]

### 1.7.2. LITZ laidai

LITZ kabelis yra specializuota laidų konstrukcija, kurią galima pritaikyti įvairiose srityse, įskaitant ir belaidį energijos perdavimą. Šis laidas sukurtas taip, kad sumažintų paviršiaus efektą ir artumo efektą, dėl kurio IPT sistemos didesniuose dažniuose patiria vis didesnę nuostolį. Šį kabelį sudaro

daugybė plonų vielos gijų, atskirai izoliuotų ir susuktų arba supintų kartu pagal vieną iš kelių nustatytų standartų. Šio kabelio pjūvi galima matyti 10 paveiksle.



**10 pav.** Litz kabelio pjūvis[13]

Paviršiaus ir artumo efektai stiprėja didėjant perdavimo dažniui. Todėl aukštesniuose dažniuose nuo 10 KHz jau yra rekomenduojama naudoti šio tipo kabelį, dėl prieš tai paminėtų efektų. Dėl paviršiaus efekto srovė susikoncentruoja šalia laidininko paviršiaus, ir neina per visą laido skerspjūvi, atveju jeigu nenaudojamas atitinkamo skersmens laidas, todėl srovė pasiskirsto netolygiai. Litz kabelis praktiškai pašalina paviršiaus ir artumo efektus, todėl tai yra vienas iš būdų didinti sistemos efektyvumą. [13]



## 2. Projektinė dalis

Šioje dalyje bus apžvelgiami belaidžio krovimo galimos grandinės ir jų komponentai, sudaroma principinė schema ir matematinis modelis.

### 2.1. Komponentų analizė

Pagrindiniai komponentai dideliame kiekiui energijos perduoti yra naudojami tranzistoriai, kurie privalo sukurti didelio dažnio kintamąją įtampą. Todėl šiuo atveju reikia apžvelgti, kurie tranzistoriai yra naudingesnis Mosfet ar IGBT, nes reikalingi parametrai, kaip dažnis, įtampa ir srovė yra žinomi. Taip pat yra svarbu ir kompensacinės grandinės, kurios yra prieš ritę ir po jos, dėl šių grandinių yra išgaunamas dar didesnis efektyvumas.

#### 2.1.1. Tranzistoriai

Kadangi, kad gauti didesnę galią išgauti pagrinde yra naudojami dviejų tipų tranzistoriai tai: MOSFET tipo ar IGBT tipo tranzistoriai, reikia juos apžvelgti ir palyginti, kuris tipas yra labiau tinkami šiai sistemai kurti. Toliau bus trumpai apžvelgiami paminėti tranzistoriai.

Metalo oksido puslaidininkinio lauko efekto tranzistoriai (**mosfet** – toliau mosfet) dažniausiai naudojamas puslaidininkis skaitmeninėse ir analoginėse grandinėse, taip pat yra naudingas kaip galios stiprinimo grandinėse. Vienas iš svarbiausių šio tipo tranzistoriaus pliusas yra greitas jo perjungimas ir minimalaus energijos suvartojimo perjungimo metu (nuostoliai). Šis tranzistorius turi tris jungtis: ištaka (S), užtūra (G) ir santaka (D). Uztūra valdo energijos tekėjimą tarp santakos ir ištakos, o mosfet tranzistorius yra atidaromas tiekiant įtampą į užtūrą. Tai leidžia išjungti ar įjungti tekėjimą tarp tranzistoriaus ištakos ir santakos. Kai į užtūrą netiekama įtampa, tranzistoriaus vidinė varža stipriai padidėja, to pasekoje energija negali būti perduodama per jį. Dažniausiai užtūra yra valdoma 3.3 V arba 5V įtampa, ką gali tiekti kiekvienas mikrovaldiklis. Mosfet tipo tranzistorius buvo sukurtas didelei galiai perduoti. [28]

#### IGBT tranzistorius

Izoliuotos užtūros dvipolis tranzistorius (**IGBT** – toliau IGBT) yra įprasto dvipolio jungties BJT ir mosfet darinys, todėl jis idealiai tinka kaip puslaidininkiu perjungimo komponentas. Kadangi IGBT tranzistoriui yra paimta tik geriausios mosfet ir BJT tranzistorių savybės – didelę įėjimo varžą ir didelį mosfet perjungimo greitį, kuris to pasekoje gali valdyti dideles kolektoriaus – emiterio sroves su beveik nuline užtūros pasipriešimu. Šis tranzistorius irgi yra valdomas įtampa kaip ir prieš tai minėtas mosfet tranzistorius. Kadangi šie tranzistoriai yra pagrinde naudojami galios elektronikoje, inventoriuose, keitikliuose todėl šis puikiai tinkamas planuojamai sistemai įgyvendinti. Taip pat, IGBT yra vienakryptis komponentas tai reiškia, kad gali tiekti srovę tik į vieną pusę, skirtingai nei mosfet tranzistorius, kurie turi dvikrypčio srovės perjungimo galimybę[29]

### 2.2. Ričių parametrų skaičiavimai

Šiame skyrelyje, bus aprašoma kaip buvo matematiškai apskaičiuoti ritės parametrai ir į ką buvo atsižvelgta.

Norint susukti ritę reikia nuspręsti koks kabelis bus naudojamas. Kadangi norimas dažnis yra apie 80-100kHz, norint išvengti magnetinių laukų nuostolių tokių kaip paviršinis efektas ar artumo

efektas. Todėl buvo pasirinktas LITZ tipo kabelis. LITZ kabelis yra specializuota laidų konstrukcija, kurią galima pritaikyti įvairiose srityse, įskaitant ir belaidį energijos perdavimą. Šis laidas sukurtas taip, kad sumažintų paviršiaus efektą ir artumo efektą, dėl kurio IPT sistemos didesniuose dažniuose patiria vis didesnę nuostolį. Šį kabelį sudaro daugybė plonų vielos gijų, atskirai izoliuotų ir susuktų arba supintų kartu pagal vieną iš kelių nustatytų standartų. Šio kabelio pjūvi galima matyti 10 paveiksle. Kabelis yra parenkamas iš katalogo: „rmcybernetics“[30]

Current	3A	3A	5A	6A	12A	18A	20A (polyimide film)	20A (No Silk)	40A (No Silk)	40A	70A
Strand Size (mm)	0.1	0.07	0.2	0.15	0.05	0.05	0.05	0.2	0.1	0.1	0.1
No. of Strands	75	160	25	60	1000	1500	1740	100	1000	1000	2000



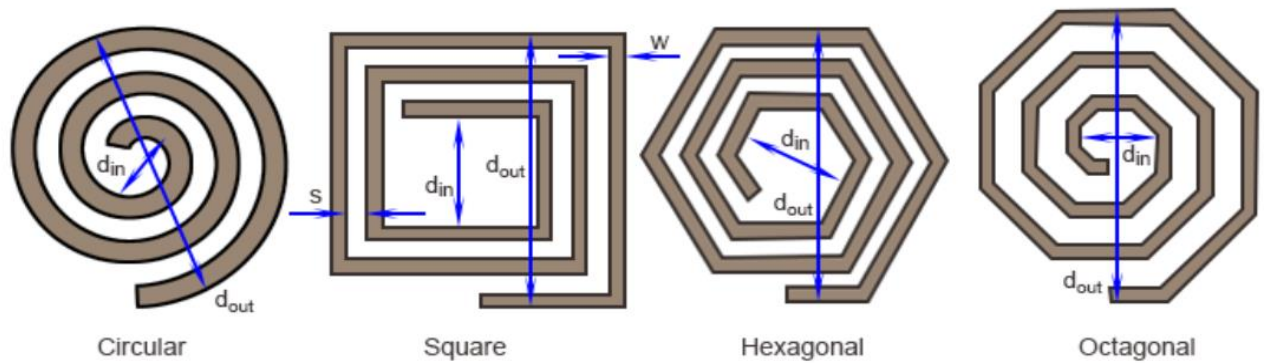
11 pav. LITZ kabelių katalogas[30]

Buvo pasirinktas LITZ kabelis kuris gali atlaikyti 40 amperų srovės, vienos gyslos storis yra 0.1mm., o bendras visų gyslų skersmuo yra 4.4 mm, kurio nominalas yra 5AWG, ir šį kabelį iš viso sudaro 1000 izoliuotų gyslų. Tą galima matyti ir žemiau esančiame 12 paveiksle.

Rated Current	Approximate Diameter	Strand Diameter	Total Strands
40A	4.4 mm (5 AWG)	0.1mm	1000

12 pav. Pasirinkto kabelio parametrai[30]

Pasirinkus kabelį norimą kabelį reikia nuspręsti kokios formos bus sukama ritė. Žemiau esančiame paveiksle yra pateiktos populiariausios ričių formos.



13 pav. Populiariausios ričių formos

Yra parenkama pati pirma, kurios tipas yra „CIRCULAR“. Jos induktyvumą galima apskaičiuoti žemiau pateikiamomis formulėmis:

$$L_{CIRC} = 31.33 * \mu_0 * n^2 * \frac{a^2}{8a+11c}; \quad (16)$$

Čia,  $L_{circ}$  – yra induktyvumas matuojamas Henriais (H);

$a$  - Vidutinis diametras, m.

$$a = \frac{d_{in} + d_{out}}{4}; \quad (17)$$

$c$  – Plotis pačios ritės, m.

$$c = \frac{d_{out} - d_{in}}{2}; \quad (17)$$

$\mu_0$  – vakuomo pralaidumas Henriais vienam metrui (H/m),

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}; \quad (18)$$

$n$  – yra apvijų skaičius.[31]

Kabelio ilgį šio tipo ritei galima apskaičiuoti žemiau pateikiama formule. (19)

$$L_{ilgis} = \pi * n * \frac{d_{out} + d_{in}}{2}; \quad (19)$$

Ritės parametrai  $d_{out}$  yra pasirenkamas, o  $d_{in}$  parametras yra apskaičiuojamas žemiau pateikiama formule. (20)

$$d_{in} = \frac{d_{out}}{2 * C}; \quad (20)$$

čia,  $C$  yra apytikslis diametras, mūsų atveju  $C=4.4\text{mm}$ .

Toliau žinant ritės induktyvumą, pagal „Series to series“ topologiją, galima apskaičiuoti reikalingą kompensacinę talpą abeiose pusėse. Skaičiavimui naudojamos formulės pateikiamos 7 lentelėje.

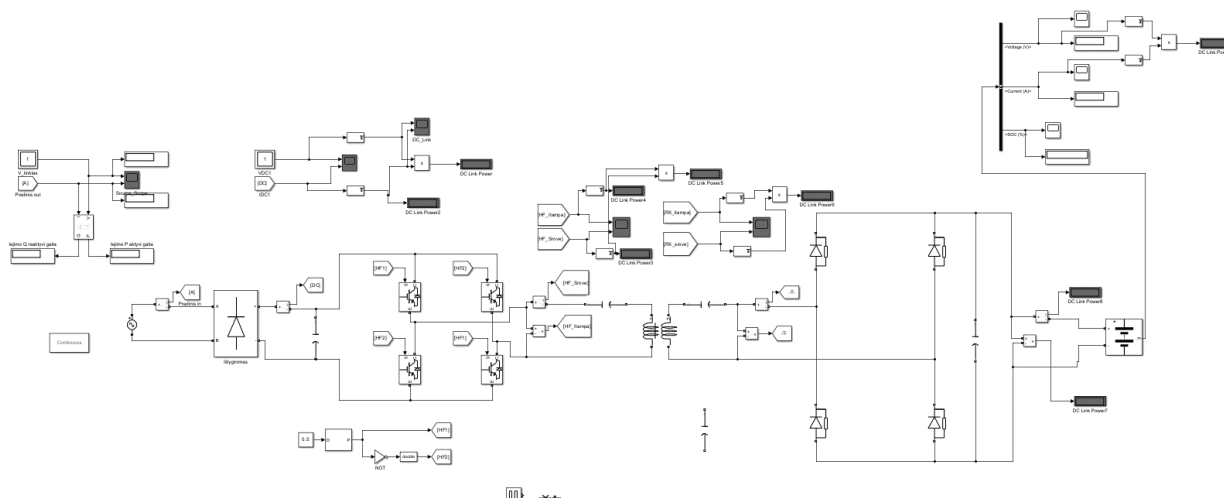
Žemiau bus pateikiama lentelė, kurioje yra suvesti visi šių ričių duomenys:

**8 lentelė.** Apskaičiuoti ričių parametrai

D1out,mm	300	D2out,mm	250
D1in,mm	34.09	D2in,mm	28.41
D1avg,mm	282.95	D2avg,mm	235.8
L2ilgis,mm	17833.77	L2ilgis,mm	17833.77
R1,Ω	0.037986	R2,Ω	0.034448
L1,uH	1.58	L2,uH	1.55
SSC1,uF	1.58	SSC2,uF	1.55

### 2.3. Matematinis modelis

Šiame skyrelyje bus trumpai apžvelgiamas sukurtas teorinis matematinis modelis, kurio rezultatai bus lyginami su praktiškai išmatuotomis reikšmėmis. Šis modelis buvo sukurtas remiantis 8 paveiksle pavaizduota struktūriniu schema. Realizuotas matematinis modelis buvo „matlab simulink“ programinėje įrangoje. O sukurtą matematinį modelį galima matyti žemiau esančiame paveiksle.[32,33]



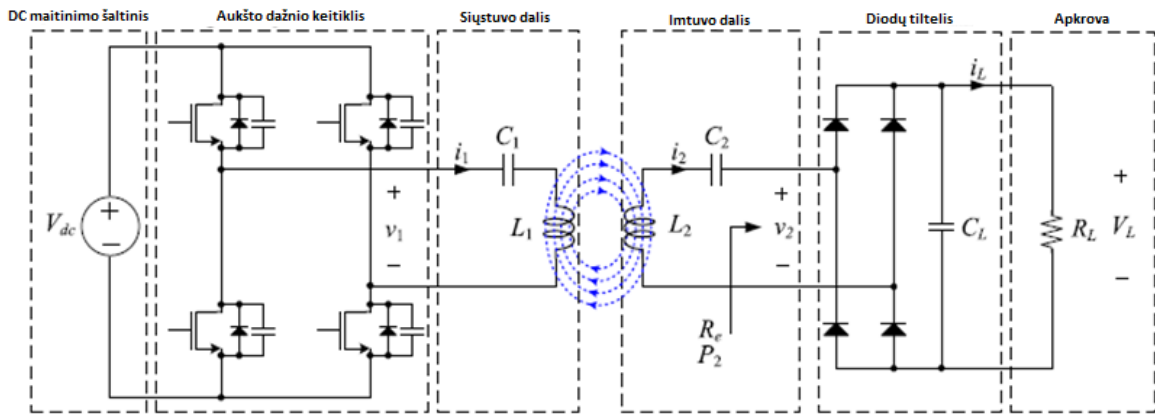
**14 pav.** Sukurtas matematinis modelis

Šis modelis veikia iš 220V tinklo su viena faze. Toliau elektros srovė yra išlyginama, kad būtų gaunama nuolatinė srovė. Prieš keičiant nuolatinę įtampą į aukšto dažnio kintamąją įtampą reikia įdėti „C<sub>ripple</sub>“, šis komponentas grandinėje yra reikalingas, kad būtų palaikomas tiekiamos įtampos stabilumas. Toliau tęsiant yra sumodeliuotas įtampos dažnio keitimas iš 0 HZ į 100kHz, per IGBT tipo tranzistorius, jie yra atidaromi skirtingai nustatyta tvarka, valdant juos PWM tipo signalu. Toliau žiūrint yra pagrindinės šios sistemos komponentas tai perdavimo ir priėmimo ritės, kurių parametrai buvo skaičiuoti 2.2 skyrelyje. Po priėmimo įtampa yra išlyginama iki nuolatinės ir perduodama į bateriją krauti. Taip pat, šios sistemos efektyvumas yra 94 %, nes nuolatinės įtampos perduodama 10390 W, o bateriją krauna 9740 W galia. Toliau šiame darbe bus kuriamas fizinis

maketas ir fizinio maketo gauti rezultatai bus lyginami su teoriniais matematinio modelio rezultatais.

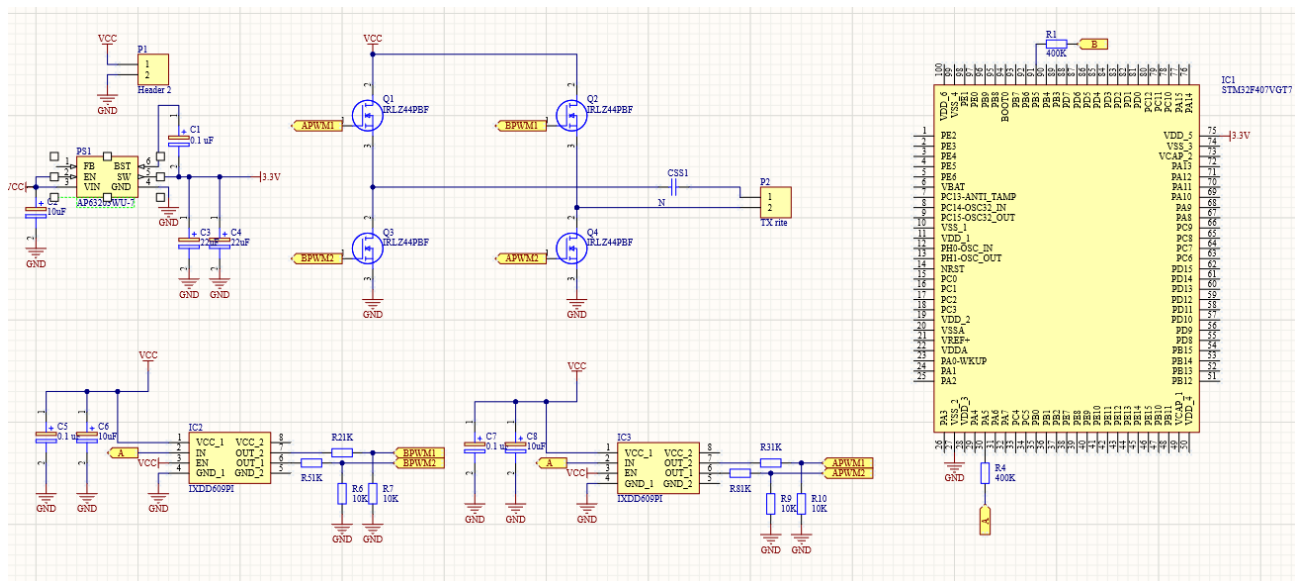
## 2.4. Principinės schemos sudarymas

Šioje dalyje bus sudaroma principinė schema, kuri bus sudaryta iš dviejų dalių. Tai pirmoji principinė schema bus siūstuvu dalies, o kita imtuvo dalies, taip yra daroma dėl paprastumo ir lengvesnio suvokimo atskiriant šią sistemą į dvi atskiras dalis. Apačioje esančiame paveiksle yra pavaizduota blokinė-struktūrinė IPT sistemos schema.



15 pav. Blokinė-struktūrinė schema

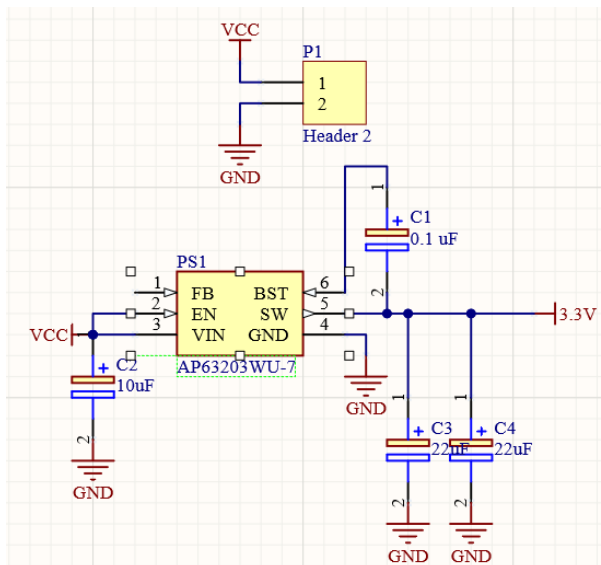
Remiantis 15 paveikslu buvo sudėlioti komponentai į struktūrinę schemą, komponentai buvo parinkti remiantis gamintojų nurodymais. Sistemai valdyti buvo pasirinktas STM32F407VG mikrovaldiklis. Sistema bus valdoma per IO išėjimus ir kuriamas PWM signalas, šį signalą sustiprins „gate-driver“ ir taip bus sukuriamas norimas dažnis sistemoje. Principinę schemą siūstuvu pusės galima matyti žemiau esančiame paveiksle.



16 pav. Siūstuvu principinė schema

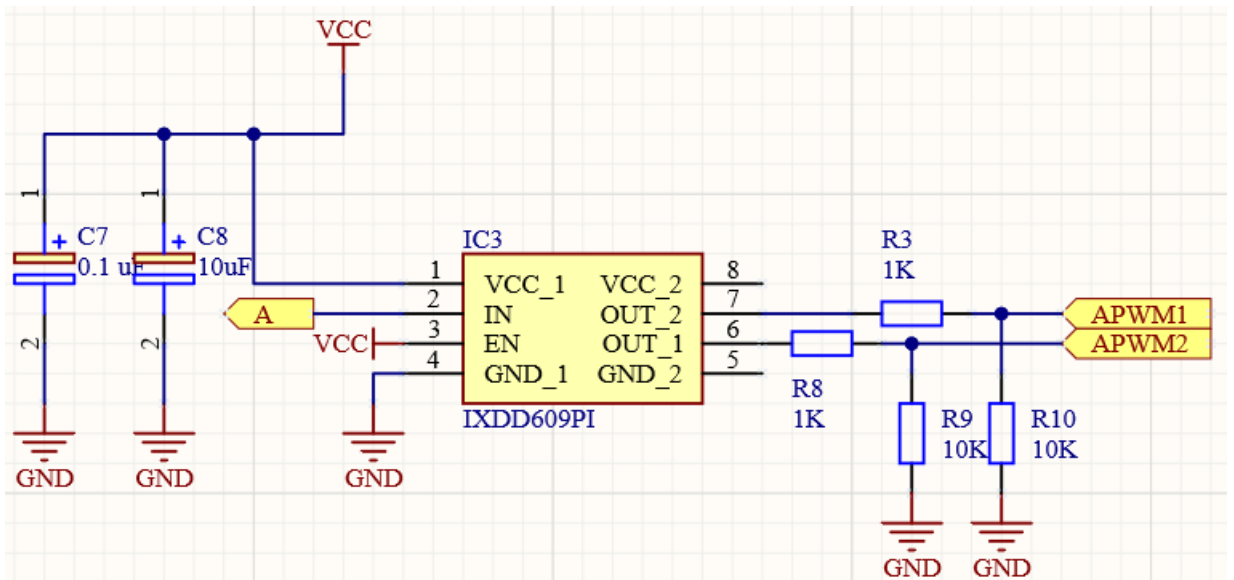
Apačioje 17 paveiksle yra matoma maitinimo principinė schema. Buvo pasirinktas AP63203WU-7 įtampos reguliatorius. Jis buvo pasirinktas todėl, kad įėjimo įtampa gali būti tarp 3.8 V iki 32 V, kas

yra priimta kuriamai sistemai. Mikrovaldiklis reikalauja nuo 30 mA iki 40 mA, priklauso nuo jo apkrovimo, šis keitiklis buvo pasirinktas dėl jo kainos ir paprastumo jį suprojektuoti. Nepriklausomai nuo įėjimo įtampos ši įtampos reguliatorių galima sureguliuoti reikiamą įtampą nuo 1.2 V iki 12 V. Pasirenkant C1, C2, C3, C4 reikšmės yra nustatoma 3.3 V maitinimo įtampa, kuri yra reikalaujama pasirinkto mikrovaldiklio.



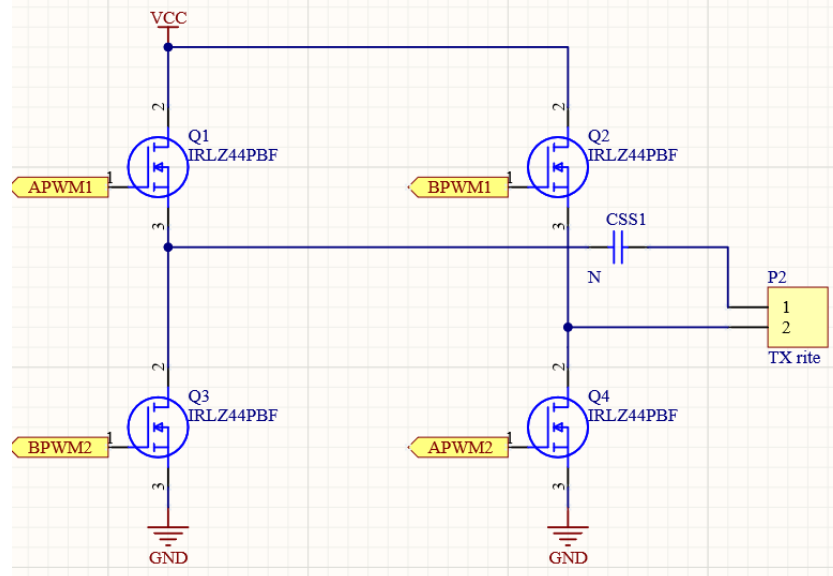
17 pav. Maitinimo principinė schema

Žemiau esančiame 18 paveiksle yra matoma MOSFET užtūros valdiklio schema. Šis grandynas siųstuvo grandinėje yra reikalingas, kad užtikrinti įtampą reikalingą tranzistoriaus užtūros valdymui. Kadangi mikrovaldiklis per IO išėjimus gali paduoti iki 3.3 V to pakanka, bet kai yra padaromas PWM signalas, įtampa sumažėja proporcingai nuo impulso trukmės ir nustatyto greičio. PWM darbo ciklas yra 50 % ir nebeužtenka atidarinti tranzistoriaus užtūros. Atidaryti tranzistoriaus užtūrą slenkstinė įtampa yra min. 2V, todėl ją reikia pakelti iki maitinimo įtampos. C7 ir C8 talpumai yra skirti užtikrinti įtampą be trikdžių, nufiltruoja netolygumus sistemoje. PWM signalas ateina į antrą išvadą (IN), maksimali galima srovė, kuri gali ateiti į įterptinį grandyną yra 20 uA, po išėjimo iš mikrovaldiklio yra įdėtas 400 kΩ varža, kad tai užtikrinti. Taip pat, kad nesudegtų valdiklis iš kitos pusės (OUT\_1 ir OUT\_2), yra uždedami dvi varžos 1 kΩ ir 10 kΩ nominalų. Jos yra parinktos pagal, leidžiamas maksimalias sroves į OUT išvadus. Nominalo 10 kΩ varža yra skirta elektronų nušuntavimui, o 1 kΩ yra skirta sureguliuoti srovę, kad grįžtamaisiais procesais nesudegintų pačio įterptinio grandyno.



18 pav. MOSFET užtūros valdiklio principinė schema

Ši perdavimo dalies principinės schemos dalis yra pati svarbiausia, ji atlieka visą pagrindinį darbą. Per užtūrą atkeliauja pasirinktas PWM signalas, to pasekoje tranzistorius atsidaro ir energija perkeliama per kompensacinį talpumą CSS1 talpumą ir per P2 ritę, kad susikompensuotų induktyvumas su induktyvumu ir pasirinktu dažniu. Naudojama formulė talpumui skaičiuoti yra pateikta 7 lentelėje, prie SS skilties. Į P2 jungtis yra jungiama perdavimo antena. Ateinantys PWM signalai yra vienas kitam priešingi, kad būtų sukurtas magnetinis laukas. Tranzistorius yra valdomas per užtūros išvadą (gate), ir kad jį atidaryti yra reikalinga minimaliai 2 voltų įtampa. Kokybiškai atidarinti mosfet'ą padeda prieš užtūrą uždėti mosfet įterptiniai grandynai (mosfet driver).

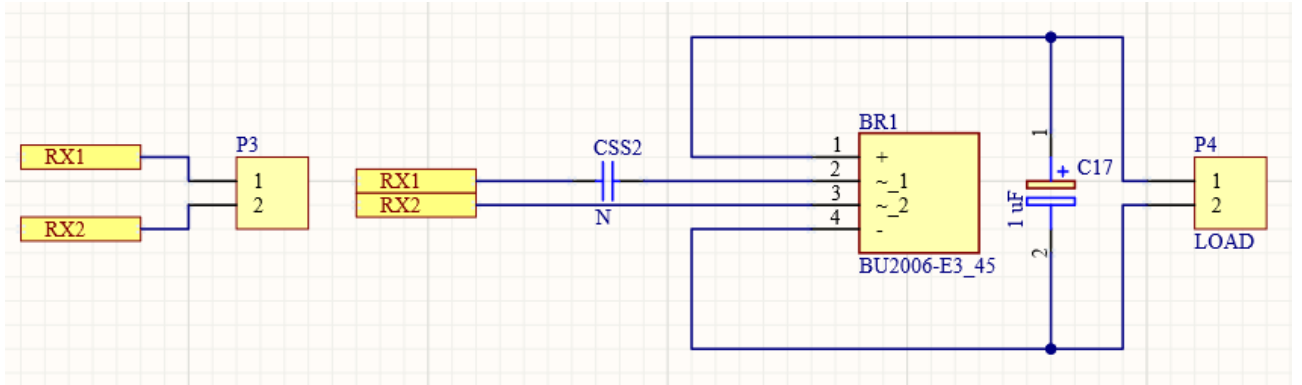


19 pav. Dažnio generatoriaus schema

Toliau buvo, kuriama priimančioji ritė, kurios paskirtis yra priimti tiekiamą belaidį energijos perdavimą ir jį padaryti naudojamą, todėl buvo pasirinktas diodų tiltas, kuris išlygina ateinančią aukšto dažnio kintamą įtampą ir ją išlygina į nuolatinę įtampą. Talpumas C13 yra reikalingas, kad sumažintų triukšmus, vykstant pereinamiesiems procesams. O jis yra apskaičiuojamas žemiau pateikiama 16 formule[38].

$$C_{ripple} = \frac{I}{(2 * f * V_{peak})}; \quad (16)$$

Įsistačius reikšmes yra gaunamas 1 uF talpos nominalas. CSS2 talpumas yra apskaičiuojamas kaip ir CSS1, kadangi ritės abiejuose galuose yra vienodos ritės tai talpumų nominalai bus taip pat vienodi.



**20 pav.** Imtuvo principinė schema

Talpumas CSS1 ir CSS2 skaičiavimui ir nustatymui iš pradžių reikia nuspręsti kokio induktyvumo antenos bus. Skaičiavimams bus naudojamos formulės 16 – 20 ir žemiau pateikiama esančioje lentelėje yra pateikiami gauti rezultatai pačios ritės parametrus gauti. Antena bus gaminama iš 1.5mm<sup>2</sup> monolitinio laido.

**9 lentelė.** Ričių parametrai

Ričių parametrai	
Dout	100mm
N	20
W(laido diametras)	1.5mm
Tarpai tarp laidų	0.1mm
Suskačiuoti parametrai	
Din	36.2mm
Davg	68.1mm
L(induktyvumas)	29.29μH
C(talpumas)	0.1μF
Dažnis, kHz	93

Iš skaičiavimų yra matoma kad pasirenkant 0.1 μF talpumą šiai ritei, yra gaunamas 93 kHz dažnis. Šis skaičiavimas yra reikalingas, kad susikompensuotų LC grandinė ir liktų perdavimo grandinėje tik varža R.

## 2.5. Maketo gamyba

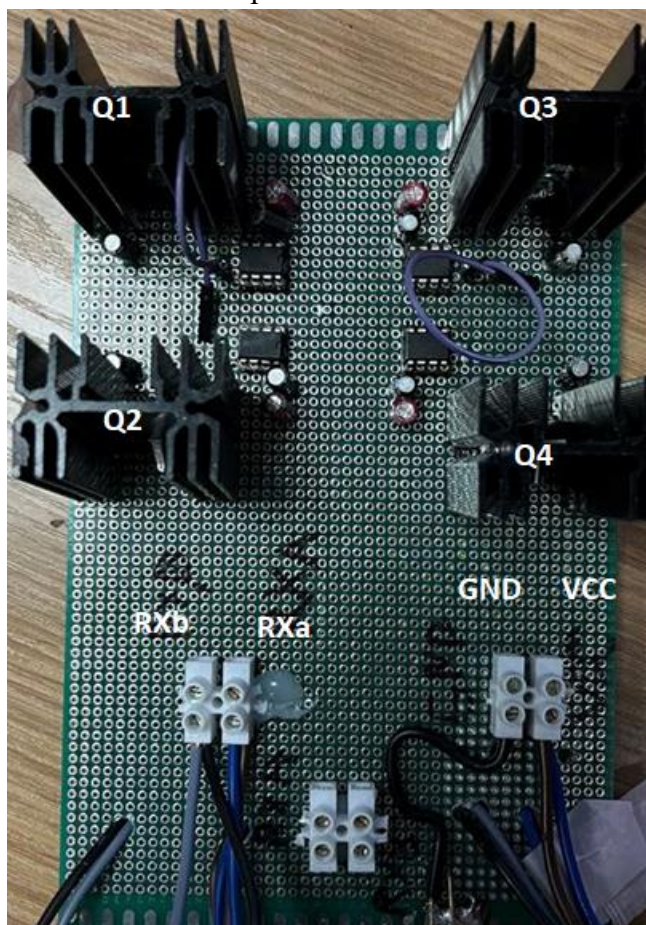
Maketo gamybai pirmiausia reikia susidaryti BOM (bill of material). Preliminarus komponentų sąrašas yra pateikiamas žemiau esančioje lentelėje su trumpu jų aprašymu ir nuoroda pas tiekėją.



**10 lentelė.** Preliminarus komponentų sąrašas[sudaryta 2024-01-15]

Komponento ID	Trumpas aprašymas	Nuorodą pas tiekėją
VISHAY IRLZ44PBF	N-MOSFET	<a href="https://lt.farnell.com/vishay/irlz44pbf/mosfet-n-ch-60v-50a-to-220/dp/3772732">https://lt.farnell.com/vishay/irlz44pbf/mosfet-n-ch-60v-50a-to-220/dp/3772732</a>
IXYS SEMICONDUCTOR IXDD609PI	MOSFET GATE DRIVER	<a href="https://lt.farnell.com/ixys-semiconductor/ixdd609pi/mosfet-driver-40-to-125deg-c/dp/3580482?st=mosfer%20driver">https://lt.farnell.com/ixys-semiconductor/ixdd609pi/mosfet-driver-40-to-125deg-c/dp/3580482?st=mosfer%20driver</a>
WURTH ELEKTRONIK 860010772001	0.1 $\mu$ F CAP	<a href="https://lt.farnell.com/wurth-elektronik/860010772001/cap-0-1-f-63v-20/dp/2465757">https://lt.farnell.com/wurth-elektronik/860010772001/cap-0-1-f-63v-20/dp/2465757</a>
PANASONIC EEUEB1J100SH	10 $\mu$ F CAP	<a href="https://lt.farnell.com/panasonic/eeueb1j100sh/cap-10-f-63v-20/dp/2805571">https://lt.farnell.com/panasonic/eeueb1j100sh/cap-10-f-63v-20/dp/2805571</a>
VISHAY S103M47Z5UN63J7R	10 nF CAP	<a href="https://lt.farnell.com/vishay/s103m47z5un63j7r/cap-0-01-f-1-kv-20-z5u/dp/2860149">https://lt.farnell.com/vishay/s103m47z5un63j7r/cap-0-01-f-1-kv-20-z5u/dp/2860149</a>
PANASONIC EEUEB1J100SH	22 $\mu$ F CAP	<a href="https://lt.farnell.com/panasonic/eeueb1j100sh/cap-10-f-63v-20/dp/2805571">https://lt.farnell.com/panasonic/eeueb1j100sh/cap-10-f-63v-20/dp/2805571</a>
VISHAY BU2006-E3/45	diode bridge	<a href="https://lt.farnell.com/vishay/bu2006-e3-45/rectifier-bridge-600v-20a-bu/dp/1815622?st=diode%20bridge">https://lt.farnell.com/vishay/bu2006-e3-45/rectifier-bridge-600v-20a-bu/dp/1815622?st=diode%20bridge</a>
PANASONIC ECA1JM221	220 $\mu$ F CAP	<a href="https://lt.farnell.com/panasonic/eca1jm221/cap-220-f-63v-20/dp/9693874">https://lt.farnell.com/panasonic/eca1jm221/cap-220-f-63v-20/dp/9693874</a>
RUBYCON 400RX301R5M8X11.5	1.5 $\mu$ F CAP	<a href="https://lt.farnell.com/rubycon/400rx301r5m8x11-5/cap-1-5-f-400v-20/dp/2342144">https://lt.farnell.com/rubycon/400rx301r5m8x11-5/cap-1-5-f-400v-20/dp/2342144</a>

Atkeliavus komponentams, buvo surinktos perdavimo ir priėmimo grandinės, rezultatus galima matyti, 21 paveiksle siūstovo maketas ir 24 paveiksle imtuvo maketinė schema.



**21 pav.** Siūstovo maketinė schema

Aukščiau esančiame 21 paveiksle yra surinktas maketas, pagal principinę schemą, kuri yra pavaizduota 16 paveiksle. Ši grandinė yra universali VCC, galima tiekti iki 35 V ir 15 A srovės. Taip pat yra palikti išvadai, paveikslėlyje žiūrėti RXb ir RXa, į šį trumpiklį ateina ištakos iš reikiamų mosfet tipo tranzistorių ir suteikia galimybę pasirinkti ir testuoti daugiau ričių pagal tai pritaikius kondensatorius. Šiuo atveju yra pasirenkamas 0.1  $\mu$ F talpos kondensatorius ir 23 paveiksle pavaizduota ritė, kuri pagal skaičiavimus turi 29.29  $\mu$ H induktyvumą. Kad šiuos L ir C suprastinti yra pasirenkamas 93 kHz darbinis dažnis, prie tokio dažnio minėtų komponentų varža yra suprastinama iki nulio, lieka tik sistemos ir antenos vidinės varžos. Paduodamas PWM signalas perduodamas per violetinius laidus, kurie yra matomi 21 paveikslėlyje.

Toliau yra konfigūruojamas pasirinktas mikrovaldiklis STM32F407 ir rašomas jam programinis kodas. Svarbiausios kodo vietos su paaiškinimais bus sekančiuose paveikslėliuose.

```
void MX_TIM2_Init(void);

int main(void) {

    HAL_Init();      /* Inicijuojame HAL biblioteka */
    MX_TIM2_Init(); /* Inicijuojame TIM2 laikmatį */

    while (1)
    {
    }
}
```

22 pav. Funkcijų inicijavimas

Aukščiau esančiame paveikslėlyje yra matoma, kad vyksta bibliotekos HAL\_Init() inicijavimas ir MX\_TIM2\_Init() laikmačio iškvietimas. HAL\_Init biblioteka skirta inicijuoti esminius mikrovaldiklio periferinius įrenginius, o MX\_TIM2\_Init yra laikmačio inicijavimas, kad jį būtų galima keisti ir valdyti pagal parašytą kodą.

```
htim2.Instance = TIM2;
// Apskaičiuojame reikšmę period'o registrui, kad gauti 93 kHz dažnį
htim2.Init.Period = SystemCoreClock / 93000 - 1; // -1 dėl skaičiavimo nuo 0
htim2.Init.Prescaler = 0;
htim2.Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_UP;
htim2.Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
htim2.Init.AutoReloadPrecaler = 0;

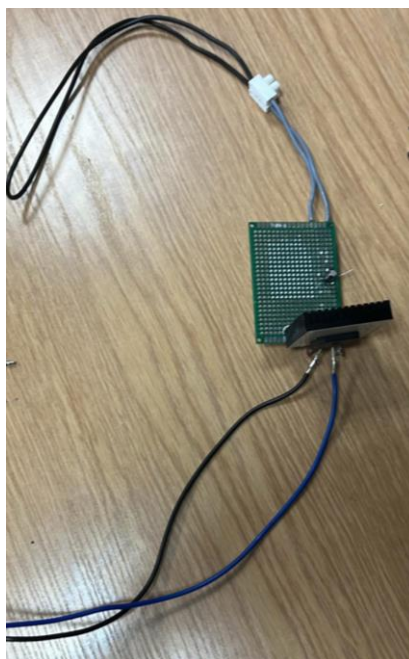
/* Kanalo 1 konfigūracija */
TIM_OC_InitTypeDef sConfigOC1;

sConfigOC1.OCMode = TIM_OCMode_PWM1;
sConfigOC1.Pulse = htim2.Init.Period / 2; // 50% duty cycle
sConfigOC1.OCpolarity = TIM_OCPolarity_HIGH;
sConfigOC1.OCNPolarity = TIM_OCNPolarity_LOW;
sConfigOC1.OCIdleState = TIM_OCIdleState_SET;
sConfigOC1.OCNIdleState = TIM_OCNIdleState_RESET;
sConfigOC1.OCMode = TIM_OCMode_PWM1;
sConfigOC1.OCFastMode = TIM_OCFAST_DISABLE;
```

23 pav. TIM2, dažnio ir PWM signalo konfigūracija

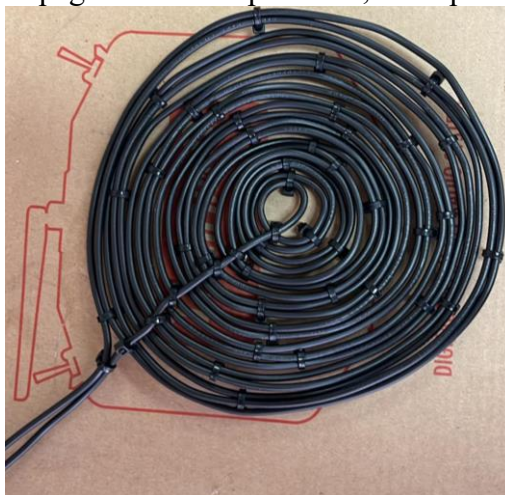
Aukščiau pateiktame kodo fragmente yra pateikiama TIM2, dažnio ir PWM signalo konfigūracija. Tai yra įgalinamas TIM2 laikmatis ir nustatomas jo dažnis 93 kHz. Toliau kanalo 1 konfigūracija, yra nustatoma, įgalinimas PWM signalo ir nustatomas jam „duty cycle“, kurio sistema reikalauja, antrojo kanalo konfigūracija yra panaši tik priešingai nustatomas veikimas pačio PWM signalo, nuo kokio signalo pradėti laikrodį. Svarbiausias programinio kodo dalis galima rasti priedas 1. Ši kodo dalis yra svarbi sistemoje, nes ji nustato sistemos veikimo dažnį, kadangi maketas yra kuriamas su mintimi, kad būtų galima diegti ir kitokio tipo rites ir prisitaikyti prie pačios sistemos ir ją tyrinėti.

Žemiau matomame 24 paveiksle yra priimančioji grandinė, ji yra ganėtinai paprasta, visą darbą keitimo padaro diodų tiltas VISHAY BU2006-E3/45 ir kondensatorius, kuris yra jungiamas lygiagrečiai nuolatinės įtampos plusui ir minusui.



24 pav. Imtuvo maketinė schema

Žemiau esančiame paveiksle yra susuktos apskritimo tipo antenos pagal 9 lentelėje nurodytus parametrus. Šios ritės buvo susukta naudojant monolitini 1.5mm<sup>2</sup> skerspjūvio ir plastikiniai dirželiai. Šios susuktos ritės, yra pagrindinis komponentas, kuris perneša energiją nuotoliniu būdu.



25 pav. Apskritimo tipo antena

### 3. Tiriamoji dalis

Šioje dalyje bus ištyrinėtas matematinis modelis ir maketas. Bus keičiami tiek maketo ir matematinio modelio parametrai, komponentai ir palyginami tarpusavyje. Taip pat, bus ištyrinėta ir analitiškai „COMSOL“ programinėje įrangoje.

#### 3.1. Matematinio modulio tyrimas

Iš pradžių buvo tyrimas matematinio modulio naudingumas, kuris priklauso nuo efektyvumo perduodant energiją per atstumą. Kadangi ričių parametrai yra 29.29  $\mu\text{H}$  ir nuosekliai rezonuojantys kondensatoriai gaunasi po 0.1  $\mu\text{F}$  talpos yra gaunamas 93 kHz dažnis. Tyrimo rezultatai yra pateikiami žemiau esančioje 11 lentelėje. Atstumas buvo apskaičiuojamas naudojant tarpusavio varžos ir tarpusavio induktyvumo formulėmis.

11 lentelė. Matematinio modulio rezultatai prie 93kHz

D(atstumas, tarp ričių), cm	Pin, W	Pout, W	Naudingumas koeficientas
0	10390	9683	0.932
1	10390	9580	0.922
2	10390	9434	0.908
3	10390	9320	0.897
4	10390	9081	0.874
5	10390	8894	0.856
6	10390	8780	0.845
7	10390	8437	0.812
8	10390	8250	0.794
9	10390	8083	0.778
10	10390	7730	0.744

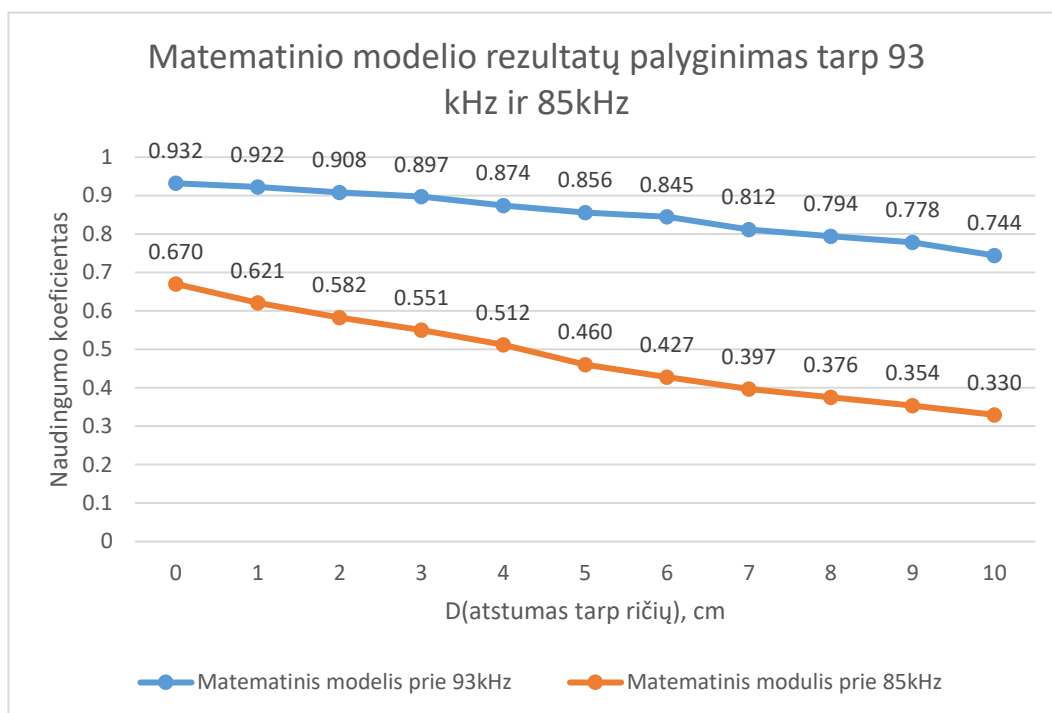
Kadangi šios sistemos rezonansinis dažnis gavosi 93kHz dėl LC grandinės parametru, buvo pabandyta ištestuoti matematinį modulį prie standartiškai naudojamo dažnio 85 kHz. Induktyvumas buvo paliktas iš praeito matavimo 29.29  $\mu\text{H}$ , o talpos dydis 0.1  $\mu\text{F}$ . Šio tyrimo rezultatai yra pateikiami 12 lentelėje.

12 lentelė. Matematinio modulio rezultatai prie 85 kHz

D(atstumas, tarp ričių), cm	Pin, W	Pout, W	Naudingumas koeficientas
0	10390	6961	0.670
1	10390	6447	0.621
2	10390	6051	0.582
3	10390	5720	0.551
4	10390	5321	0.512
5	10390	4783	0.460
6	10390	4441	0.427
7	10390	4125	0.397
8	10390	3902	0.376
9	10390	3678	0.354
10	10390	3425	0.330

Apačioje esančiame 26 paveiksle yra pateikiama matematinio modelio rezultatų palyginimas tarp 93kHz ir 85 kHz dažnių. Iš pateikto grafiko matyti kad naudingumo skirtumas yra ganėtinai didelis.

Prie 0cm atstumo tarp ričių naudingumo skirtumas siekia 26 %, o prie tolimiausio ištirto atstumo skirtumas yra 44 %.



**26 pav.** Matematinio modelio rezultatų palyginimas tarp 93 kHz ir 85 kHz

Aukščiau pateiktame paveiksle yra susidaręs efektyvumo skirtumas prie didesnių dažnių. Šis skirtumas atsiranda dėl LC grandinės, žemiau yra pateikiama 17 formulė rezonansinio dažnio skaičiavimui rasti.

$$f_{rez} = \frac{1}{(2 * \pi * \sqrt{L * C})}; \quad (17)$$

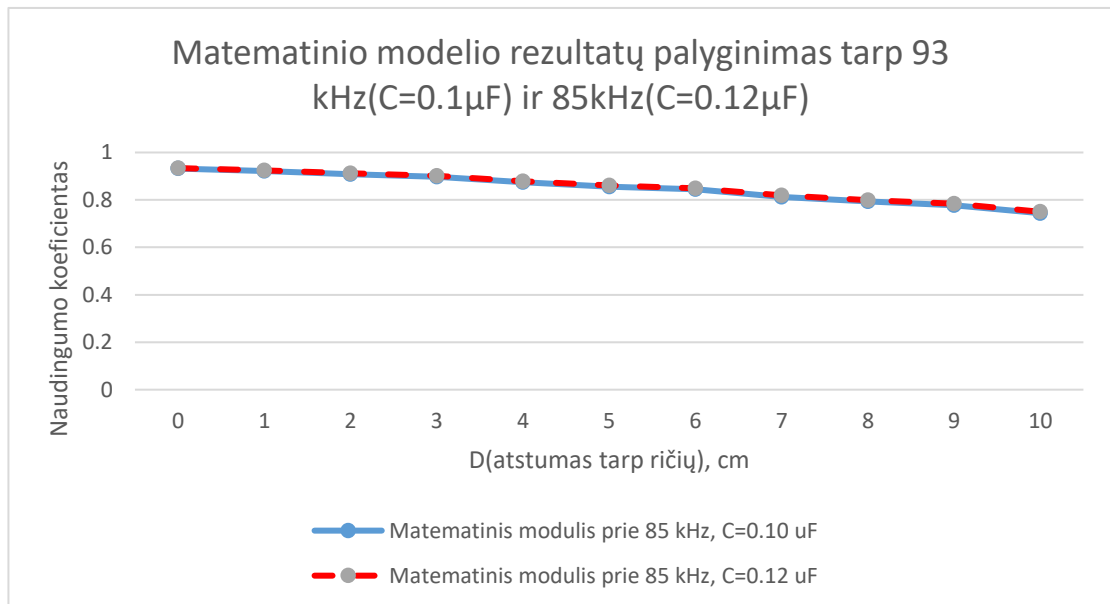
Iš pateiktos formulės, galima išsiskaičiuoti talpumo parametą prie 85 kHz dažnio. Talpumo parametras yra gaunamas 0.12  $\mu$ F. Žemiau esančioje 13 lentelėje yra pateikiami rezultatai prie 85kHz.

**13 lentelė.** Matematinio modulio rezultatai prie  $f = 85$  kHz,  $C_{ss} = 0.12 \mu$ F

D(atstumas, tarp ričių), cm	Pin, W	Pout, W	Naudingumas koeficientas
0	10390	9704	0.934
1	10390	9611	0.925
2	10390	9486	0.913
3	10390	9361	0.901
4	10390	9122	0.878
5	10390	8946	0.861
6	10390	8821	0.849
7	10390	8509	0.819
8	10390	8302	0.799
9	10390	8146	0.784
10	10390	7793	0.75

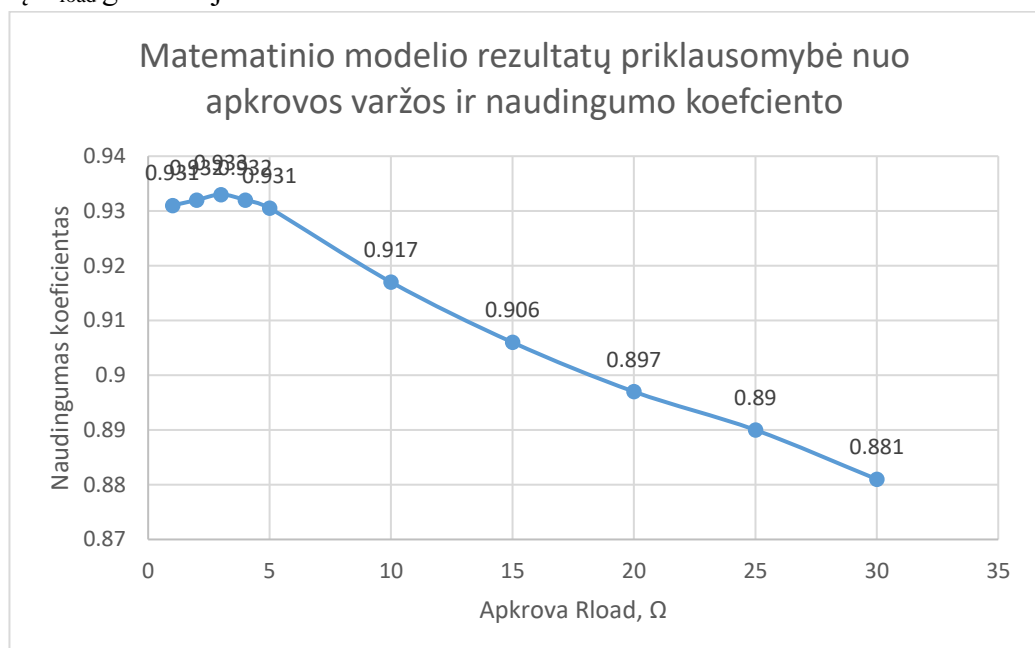


Kaip matyti iš žemiau esančio 27 paveikslo. Suderinus LC grandinės kompensacines talpas, naudingumo kreivė gaunasi beveik tokia pati. Šiuose matavimuose skiriasi ir dažnis ir kompensaciniai talpumas.



27 pav. Matematinio modelio rezultatų palyginimas tarp 93 kHz( $C_{ss}=0.1\mu\text{F}$ ) ir 85kHz( $C_{ss}=0.12\mu\text{F}$ )

Žemiau pateiktame paveiksle yra pateikta matematinio modelio prie standartinių parametų tyrimas, kaip naudingumo koeficientas priklauso nuo apkrovos varžos  $R_{load}$ . Kaip matyti iš gaunamų rezultatų naudingumo koeficientas neturi priklausomybės nuo didėjančios ar mažėjančios varžos. Galima spręsti taip, kad (žiūrėti 8 paveikslą), kad tarp HF AC/DC keitiklio ir apkrovos galima dėti papildomai jungti įtampos reguliatorių, dėti papildomai varžą kuri limituotų pratenkančią srovę į baterijas. Taip pat, galima apgalvoti variantą dėti dar vieną DC/DC keitiklį, kuris nustatytų reikiamą varžos dydį  $R_{load}$  grandinėje.



28 pav. Matematinio modelio rezultatų priklausomybė nuo apkrovos varžos ir naudingumo koeficiento

### 3.2. Maketo tyrimas

Pagaminus įrenginius, kurie yra pavaizduoti 21 ir 24 paveiksle, buvo atliktas jų tyrimas. Komponentų parametrai yra tokie, kokie yra nurodyti principinėse schemose, kurias galima rasti 16 ir 20 paveiksluose. Matuojami parametrai buvo įtampa ( $U_{out}$ ) ir srovė ( $I_{out}$ ) ant 24 paveiksle pavaizduoto P4 trumpiklio. Žemiau esančiose 14, 15 lentelėse yra pateikiami gauti rezultatai prie  $U_{in}=5V;12V$  ir  $I_{out} = 3A$ . Taip pat, svarbu paminėti dėl techninių kliūčių matavimai prasideda ne nuo  $d = 0$  cm, o nuo  $d = 0.5$  cm.

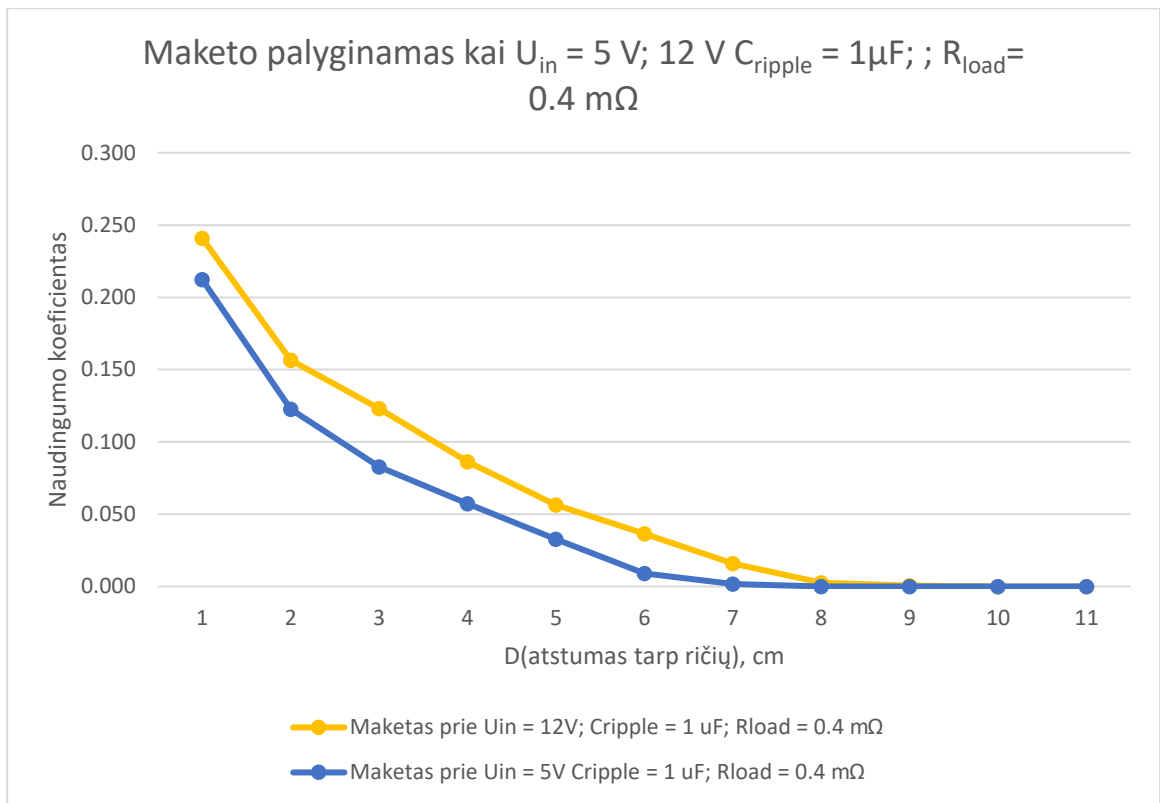
**14 lentelė.** Maketas prie  $f = 93kHz$ ;  $U_{in}=12 V$ ;  $I_{out} = 3A$ ;  $R_{load}= 0.4 m\Omega$ ;  $C_{ss}=0.1\mu F$ ; Cripple =  $1\mu F$ ;

D(atstumas, tarp ričių), cm	Pin, W	Pout, W	Naudingumas koeficientas
0.5	36	8.67	0.241
1	36	5.64	0.157
2	36	4.43	0.123
3	36	3.10	0.086
4	36	2.03	0.057
5	36	1.32	0.037
6	36	0.57	0.016
7	36	0.10	0.003
8	36	0.03	0.001
9	36	0.00	0.000
D(atstumas, tarp ričių), cm	Pin, W	Pout, W	Naudingumas koeficientas
10	36	0.00	0.000

**15 lentelė.** Maketas prie  $f = 93kHz$ ;  $U_{in} = 5 V$ ;  $I_{out} = 3A$ ;  $R_{load}= 0.4 m\Omega$ ;  $C_{ss}=0.1\mu F$ ; Cripple =  $1\mu F$

D(atstumas, tarp ričių), cm	Pin, W	Pout, W	Naudingumas koeficientas
0.5	15	3.18	0.212
1	15	1.84	0.123
2	15	1.24	0.083
3	15	0.86	0.057
4	15	0.49	0.033
5	15	0.13	0.009
6	15	0.03	0.002
7	15	0.00	0.000
8	15	0.00	0.000
9	15	0.00	0.000
10	15	0.00	0.000

Žemiau esančiame paveiksle yra palyginami rezultatai iš lentelių 14 ir 15. Lyginami naudingumo koeficientai ir atstumas tarp ričių. Yra pastebėta, kad su šios sistemos prie skirtingų maitinimo įtampų, naudingumo koeficientas skiriasi. Tai gali būti dėl sukuriama magnetinio lauko, kuris priklauso nuo įtampos dydžio arba nuo antrinėje grandinėje esančios  $C_{ripple}$  talpos dydžio.



**29 pav.** Maketo palyginamas kai  $U_{in} = 5\text{ V}; 12\text{ V}$   $C_{ripple} = 1\mu\text{F}; R_{load} = 0.4\text{ m}\Omega$

Toliau buvo pabandyta pakeisti  $C_{ripple}$  talpumą. Pakeistas talpumas buvo iš  $1\mu\text{F}$  į  $0.1\mu\text{F}$ . Rezultatai pateikiami 16 ir 17 lentelėse.

**16 lentelė.** Maketas prie  $f = 93\text{kHz}; U_{in} = 12\text{V}; I_{out} = 3\text{A}; R_{load} = 0.4\text{ m}\Omega; C_{ss} = 0.1\mu\text{F}; C_{ripple} = 0.1\mu\text{F};$

D(atstumas, tarp ričių), cm	P <sub>in</sub> , W	P <sub>out</sub> , W	Naudingumas koeficientas
0.5	36	9.20	0.256
1	36	5.85	0.163
2	36	4.58	0.127
3	36	3.18	0.088
4	36	2.12	0.059
5	36	1.42	0.040
6	36	0.61	0.017
7	36	0.11	0.003
8	36	0.03	0.001
9	36	0.00	0.000
10	36	0.00	0.000

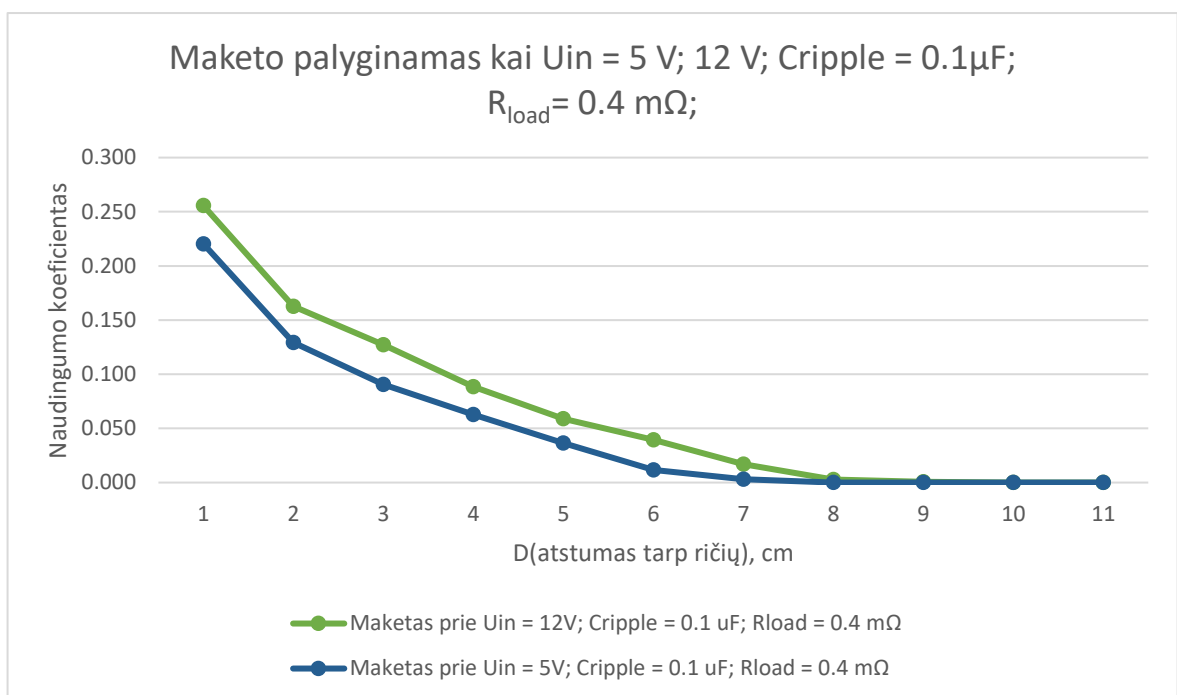
**17 lentelė.** Maketas prie  $f = 93\text{kHz}; U_{in} = 5\text{ V}; I_{out} = 3\text{A}; R_{load} = 0.4\text{ m}\Omega; C_{ss} = 0.1\mu\text{F}; C_{ripple} = 0.1\mu\text{F};$

D(atstumas, tarp ričių), cm	P <sub>in</sub> , W	P <sub>out</sub> , W	Naudingumas koeficientas
0.5	15	3.30	0.220
1	15	1.94	0.129
2	15	1.36	0.091
3	15	0.94	0.063



4	15	0.55	0.036
5	15	0.18	0.012
6	15	0.05	0.003
7	15	0.00	0.000
8	15	0.00	0.000
9	15	0.00	0.000
10	15	0.00	0.000

Iš apačioje esančio grafiko galima matyti tą pačią mažėjančią tendenciją kaip ir su  $C_{ripple} = 1 \mu F$ , bet efektyvumas padidėjo. Kaip prieš tai buvo gautas prie  $d = 0.5 \text{ cm}$  efektyvumo koeficientas gavosi 0.241, o kai lyginamojo talpumo dydį sumažinau antrinėje grandinėje efektyvumas pakilo iki 0.256. Iš šio tyrimo yra nustatyta, kad antrinės grandinės derinimui turi būti nustatyta ir būtina fiksuoti gaunami energijos parametrai, kaip įtampa ir srovė. Kadangi energija yra perduodama per orą, reikia įvertinti ir patį atstumą ir galimą įtampos ir srovės dydį antrinėje ritės gale už diodų tilto.



**30 pav.** Maketo palyginamas kai  $U_{in} = 5 \text{ V}; 12 \text{ V}; C_{ripple} = 0.1 \mu F; R_{load} = 0.4 \text{ m}\Omega;$

Toliau makete buvo pakeista galutinė iš  $R_{load}$  vertė iš  $0.4 \text{ m}\Omega$  į  $2 \Omega$  varžą. Žemiau esančiose lentelėse 18 ir 19 yra pateikiami gauti rezultatai

**18 lentelė.** Maketas prie  $f = 93 \text{ kHz}; U_{in} = 12 \text{ V}; I_{out} = 3 \text{ A}; R_{load} = 2 \Omega; C_{ss} = 0.1 \mu F; C_{ripple} = 1 \mu F;$

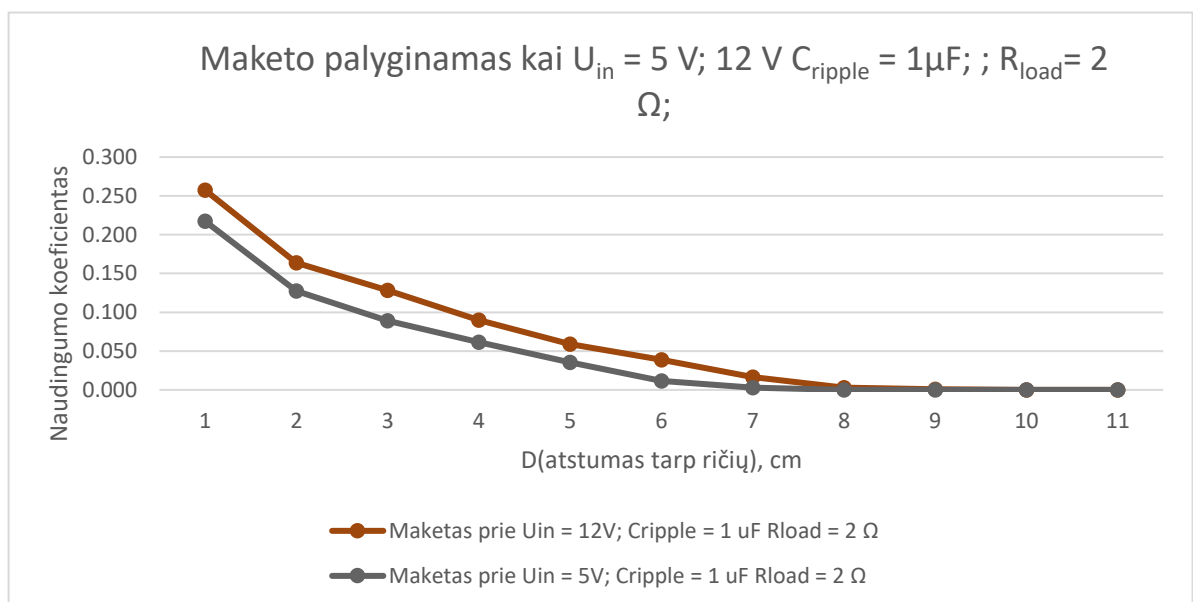
D(atstumas, tarp ričių), cm	$P_{in}$ , W	$P_{out}$ , W	Naudingumas koeficientas
0.5	36	9.27	0.257
1	36	5.89	0.164
2	36	4.62	0.128
3	36	3.23	0.090
4	36	0.21	0.006
5	36	1.40	0.039
6	36	0.59	0.016
7	36	0.10	0.003

8	36	0.03	0.001
9	36	0.00	0.000
10	36	0.00	0.000

**19 lentelė.** Maketas prie  $f = 93\text{kHz}$ ;  $U_{in} = 5\text{ V}$ ;  $I_{out} = 3\text{A}$ ;  $R_{load} = 2\ \Omega$ ;  $C_{ss} = 0.1\ \mu\text{F}$ ;  $C_{ripple} = 1\ \mu\text{F}$ ;

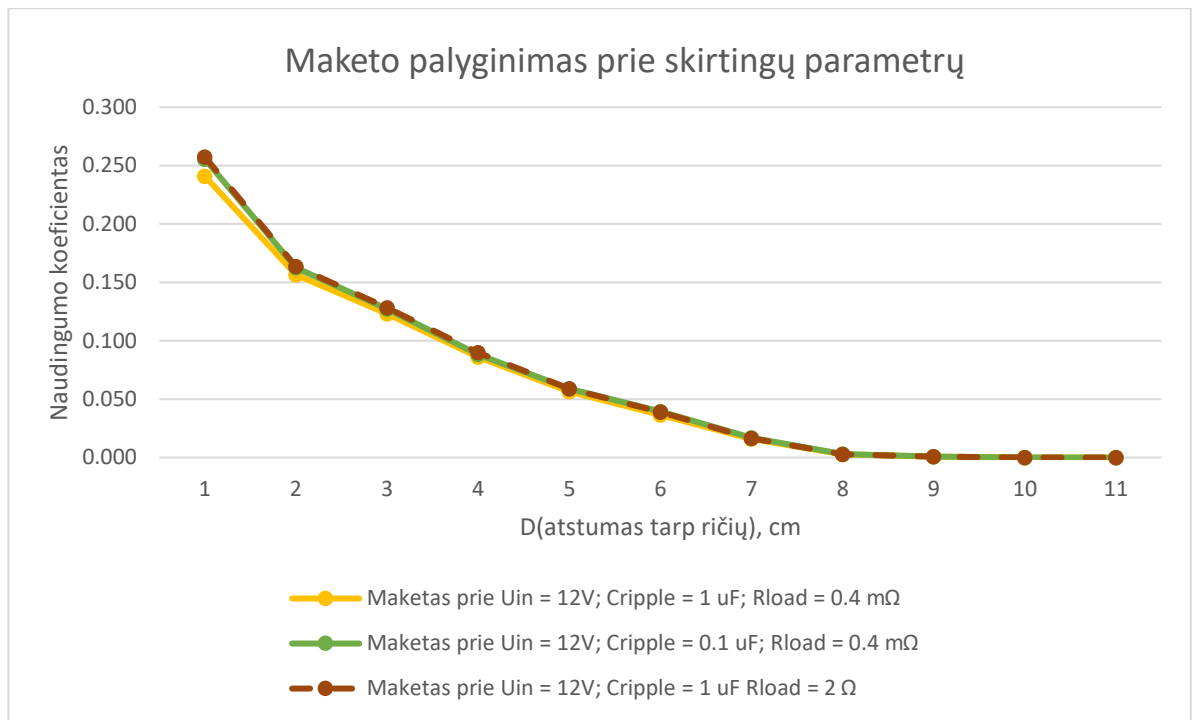
D(atstumas, tarp ričių), cm	Pin, W	Pout, W	Naudingumas koeficientas
0.5	15	3.26	0.217
1	15	1.91	0.127
2	15	1.34	0.089
3	15	0.92	0.061
4	15	0.53	0.036
5	15	0.17	0.011
6	15	0.05	0.003
7	15	0.00	0.000
D(atstumas, tarp ričių), cm	Pin, W	Pout, W	Naudingumas koeficientas
8	15	0.00	0.000
9	15	0.00	0.000
10	15	0.00	0.000

Prie standartinių parametų, buvo pakeista ir  $R_{load}$  varžos dydis į žymiai didesni. Pateiktus lentelės duomenis galima matyti grafiškai atvaizduotus 31 paveiksle. Iš žemiau esančio paveikslo galima pastebėti didesnę efektyvumo koeficientą, nei kai varža buvo  $R_{load} = 0.4\ \text{m}\Omega$ . Iš šio atlikto matavimo, galima nustatyti, kad efektyvumą didina ir apkrovos varža.



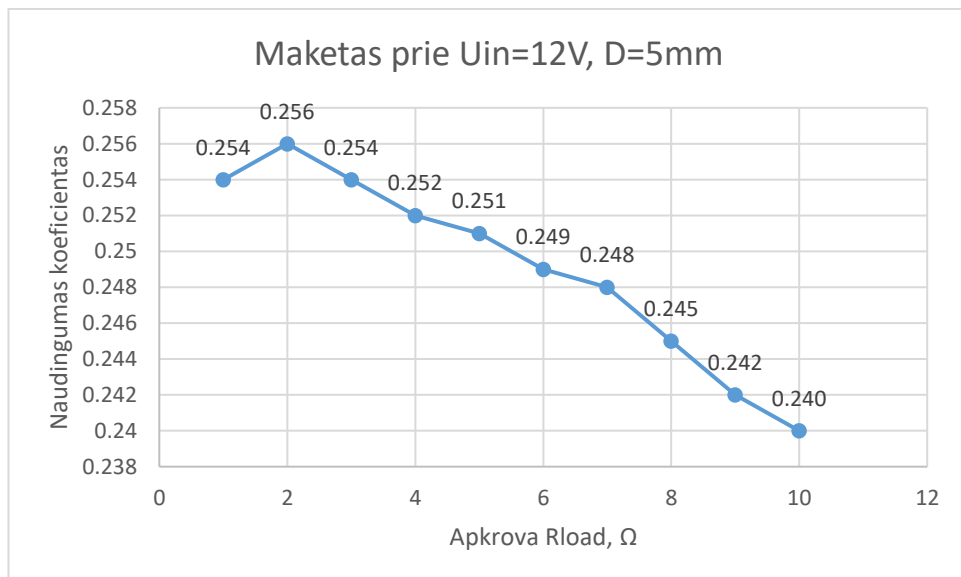
**31 pav.** Maketo palyginamas kai  $U_{in} = 5\text{ V}$ ;  $12\text{ V}$   $C_{ripple} = 1\ \mu\text{F}$ ;  $R_{load} = 2\ \Omega$ ;

Toliau yra lyginama prieš tai išmatuotų parametų rezultatai tarpusavyje kai yra  $U_{in} = 12\text{ V}$ . Rezultatu galima matyti žemiau esančiame 32 paveiksle



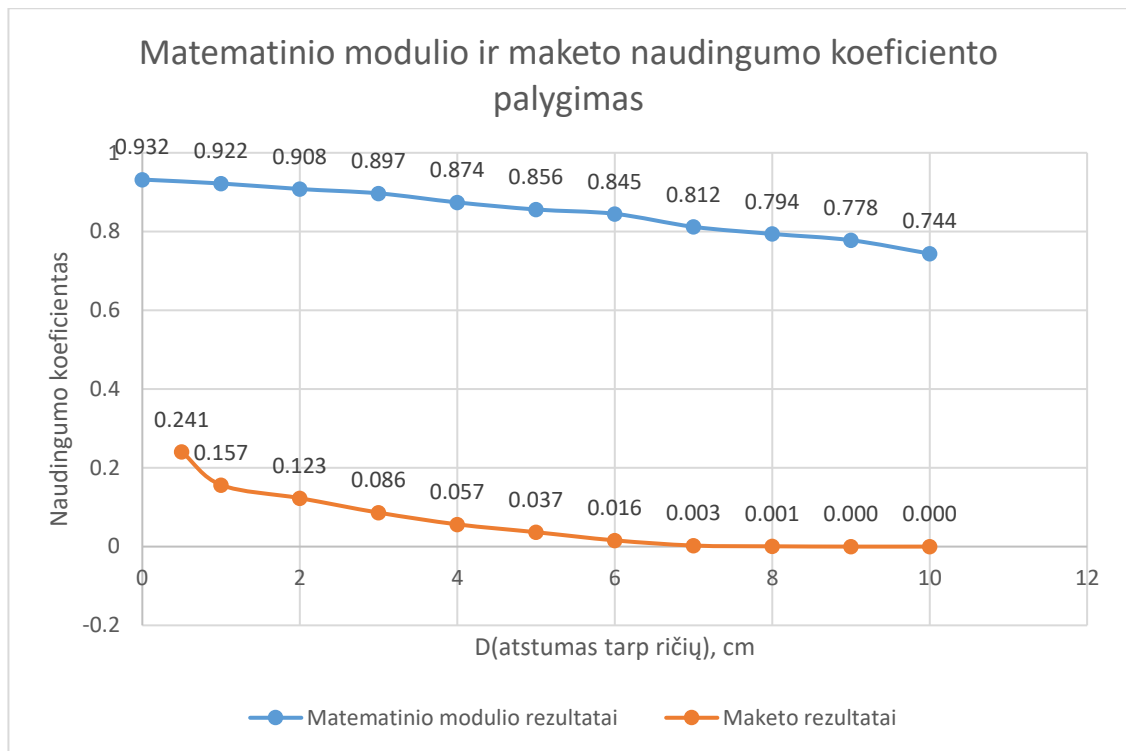
32 pav. Maketo palyginimas prie skirtingų parametru

Žemiau esančiame paveiksle yra patyrinėtas maketas prie standartinių parametru, bet keičiant apkrovos varžą nuo  $1 \Omega$  iki  $10 \Omega$ . Tiekama yra  $U_{in} = 12V$ , o atstumas tarp ričių yra išlaikomas  $5 \text{ mm}$ . Yra matoma, kad norint gauti maksimalų efektyvumą energijos perdavime, reikia įvertinti ir fiksuoti apkrovos varžą, šiuo atveju didžiausias energijos kiekis buvo perduotas su  $2 \Omega$  apkrovos varža.



33 pav. Matematinio modelio rezultatų priklausomybė nuo apkrovos varžos ir naudingumo koeficiento

Iš gautų rezultatų visumos yra pastebėta, kad įtaką gautam energijos perduodamam kiekiui turi įtakos ir pačios grandinės pati priimančiosios antenos grandinė ir jos komponentų parametrai. Šiuo atveju keičiant  $C_{ripple}$  ir  $R_{load}$  gaunami geresni rezultatai nei dydžius taikant prie  $U_{in}$ . Taip pat, yra palyginama matematinio modulio ir maketo geriausi rezultatai tarpusavyje, rezultatus galima matyti žemiau esančiame 34 paveiksle.



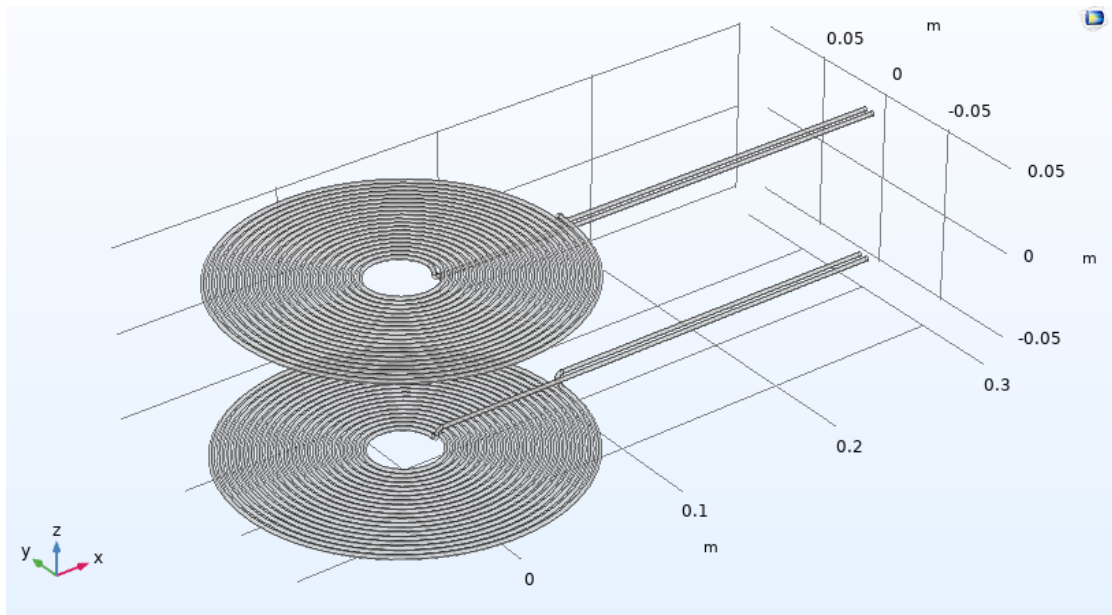
**34 pav.** Matematinio modulio ir maketo naudingumo koeficiento palygimas

Aukščiau yra pateikiami geriausi rezultatai iš matematinio modulio gauti ir, iš maketo. Šių rezultatų skirtumą galėjo įtakoti keli faktoriai tokie kaip: Ričių kokybė, grandinės parametrų parinkimas, dėl didelio dažnio susidarantys procesai tokie kaip paviršinis efektas ar artumo efektai. Įvertinus šiuos sprendimus, šios sistemos perduodamas energijos kiekis būtų didesnis. Taip pat, yra matoma iš maketo pateiktų rezultatų, kad magnetinis laukas nutrunka ties 6cm (prie 5V maitinimo įtampos) ar 8cm (prie 12V maitinimo įtampos). Tai dar vienas iš parametrų ką reikėtų didinti šiai sistemai tai yra maitinimo įtampa sistemoje. Šiame makete nepavyko padidinti įtampos iki galimos 35V, (per tranzistorių galima didžiausia įtampa) dėl atsirandančių labai didelių temperatūrų ant tranzistorių. Kad išvengti esamos išskylančios problemos dėl temperatūros, reikia įdėti didesnius pasyvinius radiatorius arba dėti aktyvųjų vėsimą, bet aktyvusis vėsimas papildomai vartoja energiją sukurti ventiliatoriams.

### 3.3. „COMSOL Multiphysics“ programinėje įrangoje ričių tyrimas

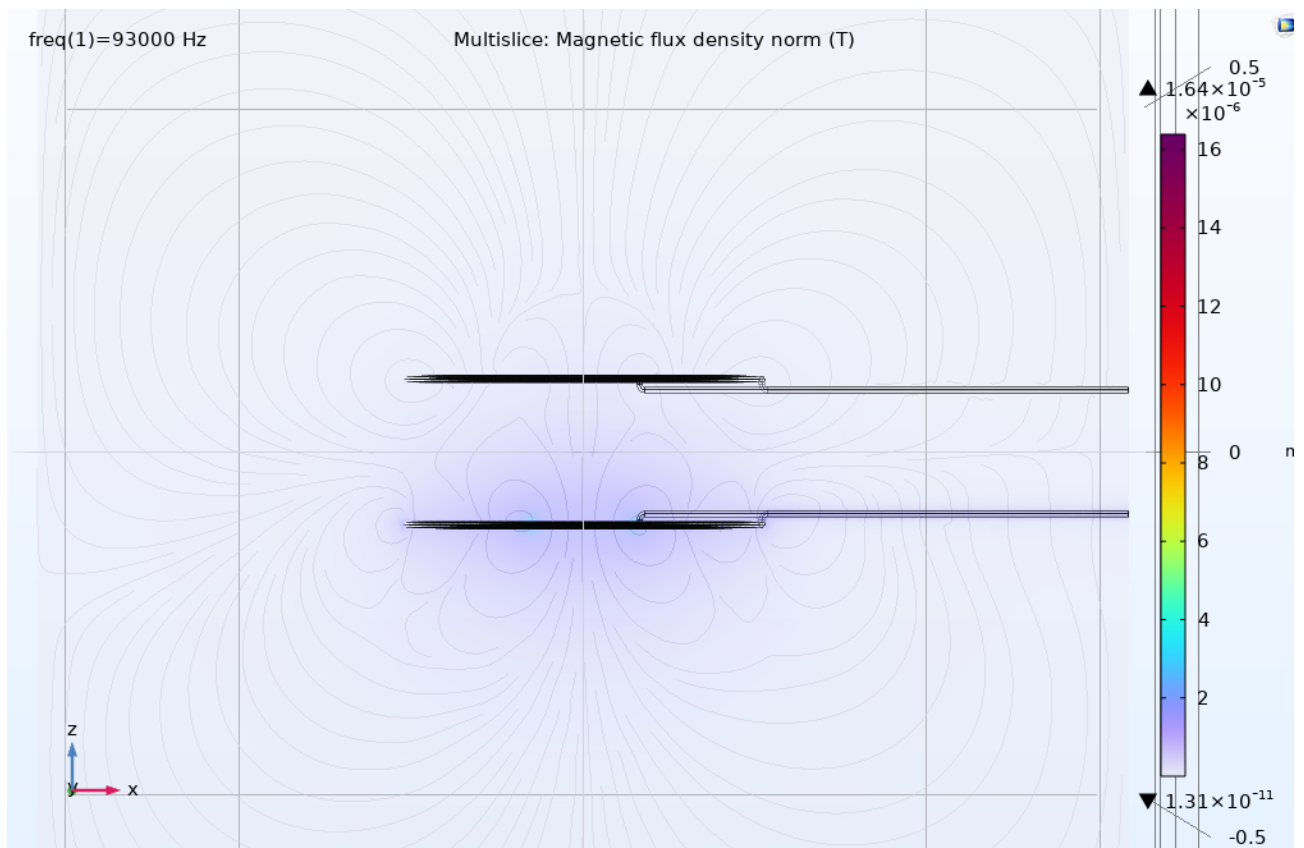
Pasitelkus programinę įrangą „COMSOL Multiphysics“ (toliau COMSOL) buvo sukurtas, maketinės sistemos siūstovo ir imtuvo ritės. Sukurtą modelį galima matyti žemiau esančiame 35 paveiksle. Čia yra pavaizduotos dvi ritės, kurios yra identiškos viena kitai. Jos parametrai yra tokie:

Oro tarpas tarp laidų - 0.1cm; laido diametras – 1.5mm<sup>2</sup>; Oro tarpas – 10cm; Skersmuo – 10cm; apvijų skaičius – 20; dažnis – 93kHz.



**35 pav.** COMSOL programinėje įrangoje suprojektuota sistema

Čia bus išrytinėta analitiškai, kaip pasiskirsto magnetinis laukas, kaip nuo atstumo tarp ričių pasiskirsto ričių parametrai, kaip pasiskirsto ritės parametrai esant skirtingiems apvijų skaičiams, kaip pasiskirsto ričių parametrai esant skirtingiems dažniams. Žemiau esančiame 36 paveiksle yra pateikta sistemos magnetinio lauko pasiskirstymas ir kryptys.

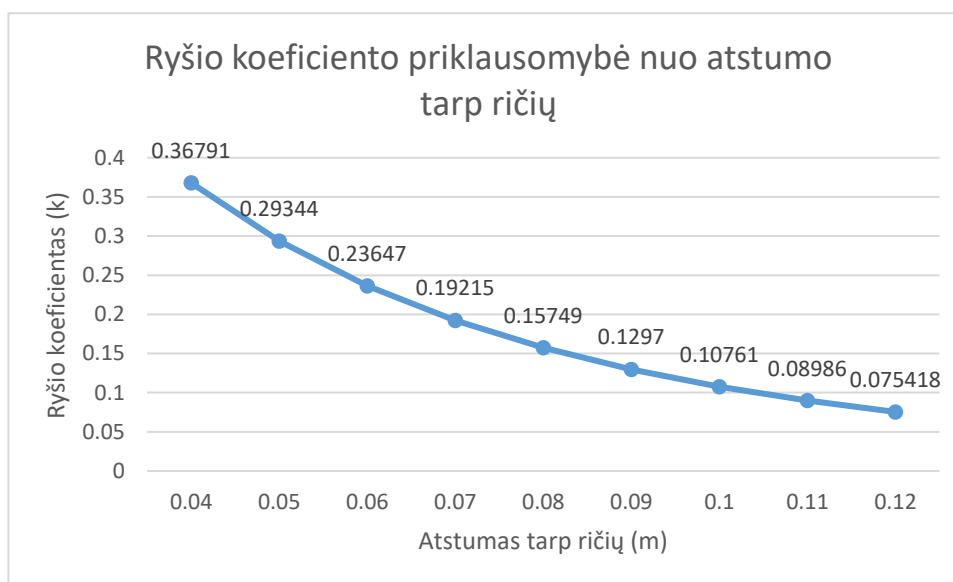


**36 pav.** COMSOL programinėje įrangoje ištirtos magnetinio lauko kryptys

Toliau buvo išbandyta, kaip parametrai keičiasi keičiant atstumą tarp ričių. Rezultatus galima pamatyti 20 lentelėje, ir 37 paveiksle atstumo ir ryšio koeficiento priklausomybę. Iš grafiko galima pastebėti, kad didėjant atstumui ryšio koeficientas mažėja.

**20 lentelė.** Ričių parametrai keičiant atstumą tarp ričių

Atstumas tarp ričių (m)	Dažnis (Hz)	Ritės induktyvumas (H)	Ritės varža (AC) ( $\Omega$ )	Abipusis induktyvumas (H)	Ryšio koeficientas (k)
0.04	93000	3.65E-05	0.35773	1.34E-05	0.36791
0.05	93000	3.67E-05	0.35031	1.08E-05	0.29344
0.06	93000	3.67E-05	0.34171	8.69E-06	0.23647
0.07	93000	3.68E-05	0.3339	7.07E-06	0.19215
0.08	93000	3.69E-05	0.32826	5.80E-06	0.15749
0.09	93000	3.69E-05	0.32472	4.78E-06	0.1297
0.1	93000	3.69E-05	0.32294	3.97E-06	0.10761
0.11	93000	3.69E-05	0.3218	3.32E-06	0.08986
0.12	93000	3.69E-05	0.32613	2.78E-06	0.075418



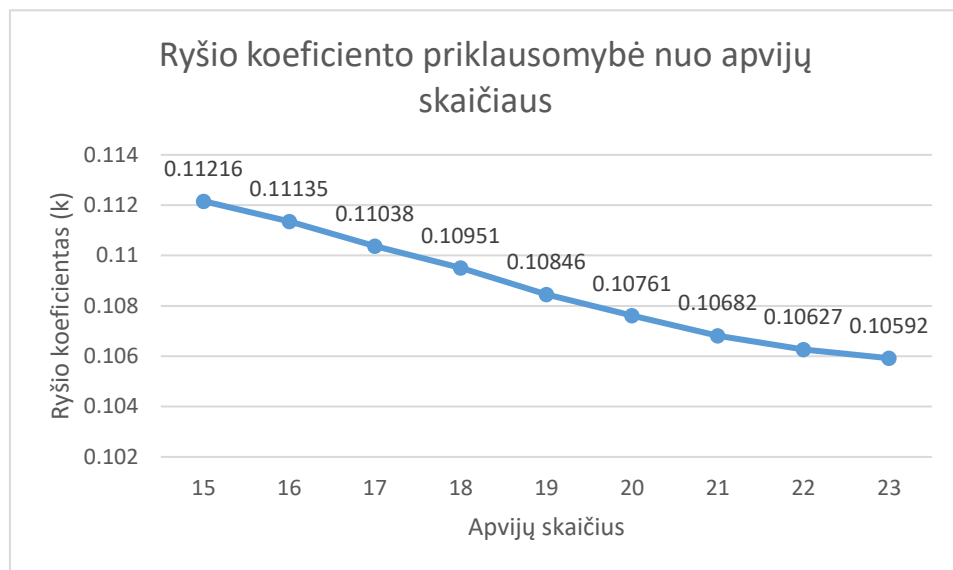
**37 pav.** Ryšio koeficiento priklausomybė nuo atstumo tarp ričių

Kitas tyrimas buvo programinėje įrangoje ryšio koeficiento priklausomybė nuo ričių apvijų skaičiaus. Rezultatus galima matyti 21 lentelėje ir 35 paveiksle ryšio koeficiento priklausomybė nuo ričių apvijų skaičiaus, išliekant parametrams tokiems pat kaip pradžioje. Iš pateikto paveiksle esančio grafiko yra pastebima, kad ryšio koeficientas yra šiek tiek didesnis kai ritė turi mažiau apvijų.

**21 lentelė.** Ričių parametrai keičiant ričių apvijų skaičių

Apvijų skaičius	Dažnis (Hz)	Ritės induktyvumas (H)	Ritės varža (AC) ( $\Omega$ )	Abipusis induktyvumas (H)	Ryšio koeficientas (k)
15	93000	3.16E-05	2.11E-01	3.54E-06	0.11216
16	93000	3.31E-05	2.26E-01	3.69E-06	0.11135
17	93000	3.44E-05	2.57E-01	3.80E-06	0.11038
18	93000	3.55E-05	2.73E-01	3.88E-06	0.10951
19	93000	3.63E-05	3.02E-01	3.93E-06	0.10846

20	93000	3.69E-05	3.23E-01	3.97E-06	0.10761
21	93000	3.73E-05	3.53E-01	3.98E-06	0.10682
22	93000	3.74E-05	3.74E-01	3.98E-06	0.10627
23	93000	3.75E-05	3.99E-01	3.97E-06	0.10592

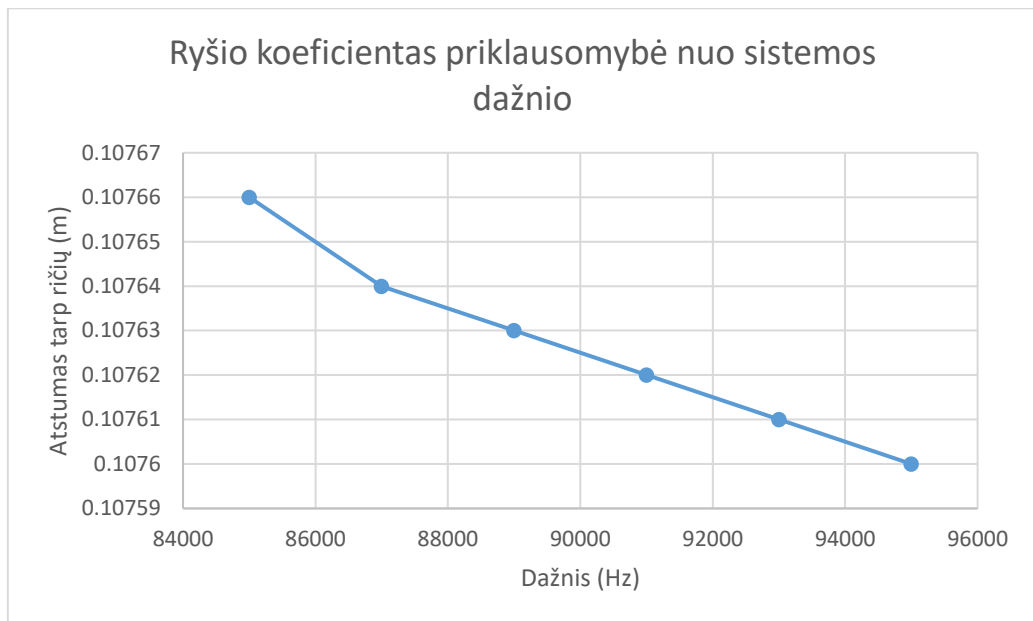


**38 pav.** Ryšio koeficiento priklausomybė nuo apvijų skaičiaus

Toliau buvo atliekamas paskutinis tyrimas tai keičiant sistemos dažnį. Rezultatus galima matyti 22 esančioje lentelėje ir 39 paveiksle, kuriame yra nubraižyta priklausomybė ryšio koeficiento nuo sistemos darbinio dažnio. Kaip yra pastebima, sistemos darbinis dažnis nelabai turi įtakos ryšio koeficientui ir ritės varžai.

**22 lentelė.** Ričių parametrai keičiant sistemos dažnį

Dažnis (Hz)	Ritės induktyvumas (H)	Ritės varža (AC) ( $\Omega$ )	Abipusis induktyvumas (H)	Ryšio koeficientas (k)
85000	3.69E-05	0.315	3.97E-06	0.10766
87000	3.69E-05	0.3171	3.97E-06	0.10764
89000	3.69E-05	0.31912	3.97E-06	0.10763
91000	3.69E-05	0.32106	3.97E-06	0.10762
93000	3.69E-05	0.32292	3.97E-06	0.10761
95000	3.69E-05	0.32471	3.97E-06	0.1076



**39 pav.** Ryšio koeficientas priklausomybė nuo sistemos dažnio

Iš šio tyrimo galima susidaryti požiūrį, kad kuriant IPT sistemą visi parametrai persipina vieni per kitus ir reikia atrasti „aukso viduriuką“, kad sistema būtų tinkamai ir efektyviai pritaikyta elektromobilių pramonėje.



## Išvados

1. Belaidžio energijos perdavimo rezonansinis režimas leidžia efektyviai perduoti energiją, pagerinti derinimo, imtuvo ir siūstuvo ričių galuose, toleranciją ir sumažinti nuostolius. Tačiau norint pasiekti ir palaikyti rezonansą viso veikimo metu yra reikalingas kruopštus dažnio derinimas ir atsižvelgti į sistemos sudėtingumą.
2. Sukurtas matematinis modelis atspindi belaidžio krovimo sistemą, pradedant nuo įtampos tiesioginio keitimo, IGBT tipo tranzistorių valdymo per PWM signalus, ir baigiant perdavimo ir priėmimo ritėmis. Modelio veikimas patikrintas naudojant „Matlab Simulink“ programinę įrangą. Modeliuojant matematinį modelį, prie kuriamos sistemos parametrų, mažiausias pasirinktas atstumas buvo 0cm, o tolimiausias 10 cm tarpas tarp ričių. Prie 0cm atstumo tarp antenų, efektyvumas buvo 93%, o prie 10 cm buvo gautas 74%. Pakeičiant dažnį pačioje sistemoje iš 93 kHz į 85 kHz, buvo gautas mažesnis efektyvumas. Prie 0cm buvo 67 %, o prie maksimalaus nustatyto 10cm atstumo gauta 33 %. Sistemos perduodamos galios kiekis nukrito, dėl rezonansinio LC grandinėje nesuderinimo. O suderinus grandinės talpą-  $C_{ss}$  prie 85kHz, gaunami panašūs rezultatai kaip ir prie 93kHz, tai yra, prie 0cm efektyvumas 93 %. O prie 10cm tarpa 75 % efektyvumas.
3. Sukurtas fizinis maketas, kuris gali perduoti energiją nuotoliniu būdu. Maketo siunčiamos energijos naudingumo efektyvumas, prie suprojektuotų parametrų 24 %, kai atstumas tarp ričių yra 0.5cm, tolimiausiame matuotame atstume 8cm efektyvumas yra 0.1%, prie 8 cm tarpo. Šį efektyvumą galėjo lemti fizikiniai veiksniai, kaip paviršinis efektas, artumo efektas, nekokybiškai susukta ritė, netinkamai pasirinkti sistemos parametrai ir kaip  $C_{ripple}$  talpumas. Kadangi energija yra perduodama per orą, reikia įvertinti patį atstumą ir galimą įtampos kritimą antrinėje dalyje ir pagal tai skaičiuoti sistemos komponentų parametrus.
4. Modeliuojant „COMSOL“ programinėje įrangoje buvo žiūrėta kaip keičiasi pagrindiniai ričių parametrai kaip, ritės induktyvumas, ritės varža, abipusis induktyvumas, ryšio koeficientas. Buvo keičiami atstumai tarp ričių, apvijų skaičius ir sistemos dažnis. Didžiausią įtaką sistemos parametrams darė keitimas atstumas tarp ričių. Kaip prie 4cm tarpo tarp ričių ryšio koeficientas gavosi 0.37 o prie tolimiausio 12cm atstumo modeliuojant gavosi 0.07. Tai yra ganėtinai didelis skirtumas, kaip tokiai sistemai.

Didėjant siūstuvo kintamam magnetiniui laukui, magnetinis laukas praporčiškai didėja antrinėje dalyje. Šiame tiriamajame darbe buvo pastebėta, kad keičiant bet kokią sistemos parametą reikia žinoti dėsningumus kitų parametrų kaip jie yra susiję vieni su kitais ir atrasti „aukso viduriuką“ nusistatytiems reikalavimams įgyvendinti. Taip pat, diegiant tokią sistemą reikia įvertinti kaip sumažinti šilumą, kuri yra sukuriama tranzistoriams keičiant būsenoms, vienas iš sprendimo būdų yra dėti labai didelius aušinimo radiatorius arba daryti aktyvinį vėdinimą/aušinimą sistemos, tai gali būti pučiant šaltą orą ar skysčiu.

Svarbu paminėti, kad standartinės tokio tipo sistemos veikia standartiniu 85kHz dažniu, mano sukurtos sistemos rezonansinis dažnis gavosi 93kHz, tai galėjo įtakoti tiek ritės tiek kondensatoriaus pasirinkimai projektavimo metu.

### Pasiūlymai:

Kitų tyrimu metu panagrinėti, kaip kinta efektyvumas pakeičiant ritės formą, pakeičiant ritės laidą į minėtą LITZ kabelį. Taip pat ritės kituose paviršiaus galuose įdėti feromagnetines šerdis ir išsiaiškinti, kokios formos ir kuriose vietose yra padidinamas ryšio koeficientas, nes feromagnetis gali pakreipti magnetinį lauką efektyvesniu keliu.

## Literatūros sąrašas

1. History of the electric car [2023 update] [interaktyvus] 2023 [žiūrėta 2023-05-06] Prieiga per internetą: <<https://blog.evbox.com/electric-cars-history>>
2. Rebecca Matulka ir kt. The History of the Electric Car [interaktyvus] 2014 [žiūrėta 2023-05-06] Prieiga per internetą: <<https://www.energy.gov/articles/history-electric-car> >
3. DUAN, Z. ir kt. Rectangular coils optimization for wireless power transmission. In Radio Science [interaktyvus]. 2012. Vol. 47, no. 3, p. 3012. [žiūrėta 2023-05-06]. . Prieiga per internetą: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2011RS004970>>.
4. MAY, G.J. ir kt. Lead batteries for utility energy storage: A review. In Journal of Energy Storage [interaktyvus]. 2018. Vol. 15, p. 145–157. [žiūrėta 2023-05-06]. . Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016%2Fj.est.2017.11.008>>.
5. ZIEGLER, M.S. - TRANCIK, J.E. Re-examining rates of lithium-ion battery technology improvement and cost decline. In Energy & Environmental Science [interaktyvus]. 2021. Vol. 14, no. 4, p. 1635–1651. [žiūrėta 2023-05-06] . Prieiga per internetą: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:220830992#id-name=S2CID>>.
6. FOTOUHI, A. ir kt. Electric vehicle battery parameter identification and SOC observability analysis: NiMH and Li-S case studies. In IET Power Electronics [interaktyvus]. 2017. Vol. 10, no. 11, p. 1289–1297. [žiūrėta 2023-05-06]. . Prieiga per internetą: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/iet-pel.2016.0777>>.
7. YU, G.L. ir kt. Interaction phenomena in graphene seen through quantum capacitance. In PNAS [interaktyvus]. 2013. Vol. 110, no. 9, p. 3282–3286. [žiūrėta 2023-05-06]. . Prieiga per internetą: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3587260#id-name=PMC>>.
8. JHAVERI, K. ir kt. Life cycle assessment of thin-wall ductile cast iron for automotive lightweighting applications. In Sustainable Materials and Technologies . 2018. Vol. 15, p. 1–8. [žiūrėta 2023-05-06]. Prieiga per internetą: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S187770581600059X?token=892C0DDAC5A0DD64EEEC8341CBD0A0A16C0609C9DD9CD6F7213672D3396E00388CD90A5147CDB05EB7979BA1255EA758&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230506124902>>
9. Zicheng Bi ir kt. A review of wireless power transfer for electric vehicles: Prospects to enhance sustainable mobility. 2014 [žiūrėta 2023-05-06]. Prieiga per internetą: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916309448> >
10. LIN, F.Y. ir kt. Differentiating coupling factor and VA transfer of IPT systems using bipolar pad primaries. In 2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference, SPEC 2016 . 2016. [žiūrėta 2023-05-06]. Prieiga per internetą: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1364032116302568?token=E3BB5820173B6958E9B3E809D1F3CDF69DD5F6DAE99D8232D6F4FA662903F9CF6A87F9B0E50294AACF5E11E61456D885&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230506145529>>
11. Brian dipert ir kt. Wireless charging: The state of disunion. [interaktyvus]. 2019 .[žiūrėta 2023-05-06]. Prieiga per internetą: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Inductive\\_charging](https://en.wikipedia.org/wiki/Inductive_charging)>
12. How Does Wireless Charging Work? In [interaktyvus]. [žiūrėta 2023-05-06]. Prieiga per internetą: <<https://www.scienceabc.com/innovation/how-does-qi-wireless-inductive-charging-work-samsung-charger.html>>.
13. AHIRE, D.B. ir kt. Compensation topologies for wireless power transmission system in medical implant applications: A review. In Biosensors and Bioelectronics: X . 2022. Vol. 11, p. 100180. [žiūrėta 2023-05-06]. Prieiga per internetą: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221499371730129X>>
14. "Wireless Power Transfer Technologies for Electric Vehicles" by Naoki Shinohara and Takashi Ohira, IEEE Industrial Electronics Magazine (žiūrėta 2023-05-06)
15. "Wireless Charging Technology for Electric Vehicles: A Technology and Market Analysis" by Roland Berger Strategy Consultants, [interaktyvus] 2013 [žiūrėta 2023-05-06]. Prieiga per internetą:

- [https://www.researchgate.net/publication/261124150\\_Wireless\\_power\\_transmission\\_progress\\_for\\_electric\\_vehicle\\_in\\_Japan](https://www.researchgate.net/publication/261124150_Wireless_power_transmission_progress_for_electric_vehicle_in_Japan)
16. J. Butrimaitė ir kt. F I Z I K A biomedicinos ir fizinių mokslų studentams II dalis Elektra Magnetizmas Medicininė elektronika Optika [interaktyvus]. 2005. [žiūrėta 2023-05-06]. Prieiga per internetą: [https://www.ff.vu.lt/external/ff/files/institutai/LTC/Studijos/mokomosios\\_lab/fbml/literatura/fizika\\_iidalis.pdf](https://www.ff.vu.lt/external/ff/files/institutai/LTC/Studijos/mokomosios_lab/fbml/literatura/fizika_iidalis.pdf)
  17. Litz Wire, HF-Litz, High Frequency Litz Wire, Litz Wire for High Efficiency | ELEKTRISOLA. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2023-05-13]. Prieiga per internetą: <https://www.elektrisola.com/en/Litz-Wire/Info#skin-effect-and-skin-depth>.
  18. GATI, E. ir kt. Comparison of Series Compensation Topologies for Inductive Chargers of Biomedical Implantable Devices. In Electronics 2020, Vol. 9, Page 8 [interaktyvus]. 2019. Vol. 9, no. 1, p. 8. [žiūrėta 2023-05-13]. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/1/8/htm>.
  19. An Optimizable Circuit Structure for High-Efficiency Wireless Power Transfer [interaktyvus]. 2013 [žiūrėta 2023-05-13] Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6099606>.
  20. VARIKKOTTIL, S. ir kt. Role of Power Converters in Inductive Power Transfer System for Public Transport—A Comprehensive Review. In Symmetry 2022, Vol. 14, Page 508 [interaktyvus]. 2022. Vol. 14, no. 3, p. 508. [žiūrėta 2023-05-14]. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/2073-8994/14/3/508/htm>.
  21. DUAN, Z. ir kt. Rectangular coils optimization for wireless power transmission. In Radio Science [interaktyvus]. 2012. Vol. 47, no. 3, p. 3012. [žiūrėta 2023-05-15]. . Prieiga per internetą: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2011RS004970>.
  22. AWUAH, C.M. ir kt. Novel coil design and analysis for high-power wireless power transfer with enhanced Q-factor. In Scientific Reports 2023 13:1 [interaktyvus]. 2023. Vol. 13, no. 1, p. 1–15. [žiūrėta 2024-05-15]. . Prieiga per internetą: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-31389-y>.
  23. D.B. Ahire ir kt. Compensation topologies for wireless power transmission system in medical implant applications: A review [interaktyvus]. 2022. [žiūrėta 2023-05-21]. Prieiga per internetą. [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590137022000759?ref=pdf\\_download&fr=RR-2&rr=7ce77c45a969bc19](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590137022000759?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=7ce77c45a969bc19)
  24. Fei Yang Lin ir kt. Differentiating coupling factor and VA transfer of IPT systems using bipolar pad primaries. [interaktyvus]. 2022. [žiūrėta 2023-05-21]. Prieiga per internetą. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7846211>
  25. How Mutual Inductance functions and Learn About its Related Law. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-05-15]. Prieiga per internetą: <https://unacademy.com/content/neet-ug/study-material/physics/how-mutual-inductance-functions-and-learn-about-its-related-law/>.
  26. TAN, L. ir kt. Analysis and Performance Improvement of WPT Systems in the Environment of Single Non-Ferromagnetic Metal Plates. In Energies 2016, Vol. 9, Page 576 [interaktyvus]. 2016. Vol. 9, no. 8, p. 576. [žiūrėta 2023-05-28]. . Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/1996-1073/9/8/576/htm>.
  27. MOSFET Buying Guide - What is a MOSFET? In [interaktyvus]. [žiūrėta 2023-10-07]. Prieiga per internetą: <https://uk.rs-online.com/web/content/discovery/ideas-and-advice/mosfet-guide>.
  28. Insulated Gate Bipolar Transistor or IGBT Transistor. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2023-10-07]. Prieiga per internetą: <https://www.electronics-tutorials.ws/power/insulated-gate-bipolar-transistor.html>.
  29. Litz Wire - Various sizes of Litz Wire for sale with high power ratings. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-01-19]. Prieiga per internetą: <https://www.rmcybernetics.com/shop/wire-cable/litz-wire>.
  30. NFC/RFID Planar Spiral Coil Inductance Calculator • Electrical, RF and Electronics Calculators • Online Unit Converters. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-01-19]. Prieiga per internetą:

- <<https://www.translatorscafe.com/unit-converter/en-US/calculator/planar-coil-inductance/?d=45&du=mm&w=1&wu=mm&s=1&su=mm&n=10&ct=S>>.
31. IRWANTO, M. ir kt. Modelling of Wireless Power Transfer System Using MATLAB SIMULINK. In 2022 IEEE 13th Control and System Graduate Research Colloquium, ICSGRC 2022 - Conference Proceedings . 2022. p. 21–24. Prieiga per interta : <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9845181>> [žiūrėta 2024-01-19]
  32. IBRAHIM, M. Wireless Inductive Charging for Electrical Vehicules: Electromagnetic Modelling and Interoperability Analysis. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-01-19] . Prieiga per internetą: <<https://theses.hal.science/tel-01127163>>.
  33. <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AND9016-D.PDF> [žiūrėta 2024-02-06]
  34. How to use PWM INPUT in STM32 » ControllersTech. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-02-26].
  35. Prieiga per internetą: <<https://controllerstech.com/pwm-input-in-stm32/>>.
  36. NFC/RFID Planar Spiral Coil Inductance Calculator • Electrical, RF and Electronics Calculators • Online Unit Converters. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-04-19]. Prieiga per internetą: <<https://www.translatorscafe.com/unit-converter/en-US/calculator/planar-coil-inductance/?d=45&du=mm&w=1&wu=mm&s=1&su=mm&n=10&ct=S>>.
  37. Calculating smoothing capacitors - Page 1. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-04-19]. Prieiga per internetą: <<https://www.eevblog.com/forum/beginners/calculating-smoothing-capacitors/>>.
  38. Capacitor Smoothing Circuits & Calculations » Electronics Notes. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-05-15]. Prieiga per internetą: <[https://www.electronics-notes.com/articles/analogue\\_circuits/power-supply-electronics/capacitor-smoothing-circuits.php](https://www.electronics-notes.com/articles/analogue_circuits/power-supply-electronics/capacitor-smoothing-circuits.php)>.

## Priedai

Priedas 1: Programinės įrangos kodas

```
#include "main.h"

void MX_TIM2_Init(void);

int main(void) {

    HAL_Init();    /* Inicijuojame HAL biblioteką */
    MX_TIM2_Init(); /* Inicijuojame TIM2 laikmatį */

    while (1)
    {
    }
}

void MX_TIM2_Init(void) /* TIM2 konfigūracija*/
{
    TIM_HandleTypeDef htim2;

    htim2.Instance = TIM2;
    // Apskaičiuojame reikšmę period'o registru, kad gauti 93 kHz dažnį
    htim2.Init.Period = SystemCoreClock / 93000 - 1; // -1 dėl skaičiavimo nuo 0
    htim2.Init.Prescaler = 0;
    htim2.Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_UP;
    htim2.Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
    htim2.Init.AutoReloadPrescaler = 0;

    /* Kanalo 1 konfigūracija */
    TIM_OC_InitTypeDef sConfigOC1;

    sConfigOC1.OCMode = TIM_OCMODE_PWM1;
    sConfigOC1.Pulse = htim2.Init.Period / 2; // 50% duty cycle
    sConfigOC1.OCpolarity = TIM_OCPOлярITY_HIGH;
    sConfigOC1.OCNPolarity = TIM_OCNPOLARITY_LOW;
    sConfigOC1.OCIdleState = TIM_OCIDLESTATE_SET;
    sConfigOC1.OCNIdleState = TIM_OCNIDLESTATE_RESET;
    sConfigOC1.OCMode = TIM_OCMODE_PWM1;
    sConfigOC1.OCFastMode = TIM_OCFAST_DISABLE;

    /* Kanalo 2 konfigūracija */
    TIM_OC_InitTypeDef sConfigOC2;

    sConfigOC2.OCMode = TIM_OCMODE_PWM1;
    sConfigOC2.Pulse = htim2.Init.Period / 2; // 50% duty cycle
    sConfigOC2.OCpolarity = TIM_OCPOлярITY_LOW;
    sConfigOC2.OCNPolarity = TIM_OCNPOLARITY_HIGH;
    sConfigOC2.OCIdleState = TIM_OCIDLESTATE_SET;
    sConfigOC2.OCNIdleState = TIM_OCNIDLESTATE_RESET;
    sConfigOC2.OCMode = TIM_OCMODE_PWM1;
    sConfigOC2.OCFastMode = TIM_OCFAST_DISABLE;

    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure;

    __HAL_RCC_GPIOA_CLK_ENABLE();

    GPIO_InitStructure.Pin = GPIO_PIN_0 | GPIO_PIN_1;
    GPIO_InitStructure.Mode = GPIO_MODE_AF_PP;
    GPIO_InitStructure.Pull = GPIO_NOPULL;
    GPIO_InitStructure.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_HIGH;
```

```

GPIO_InitStruct.Alternate = GPIO_AF2_TIM2;
HAL_GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStruct);

if (HAL_TIM_OC_Init(&htim2) != HAL_OK) /* Inicializuojame TIM2 laikmati */
{
    Error_Handler();
}

if (HAL_TIM_OC_ConfigChannel(&htim2, &sConfigOC1, TIM_CHANNEL_1) != HAL_OK) /*
Ijungiame TIM2 kanalo 1 išvesti */
{
    Error_Handler();
}

if (HAL_TIM_OC_ConfigChannel(&htim2, &sConfigOC2, TIM_CHANNEL_2) != HAL_OK) /*
Ijungiame TIM2 kanalo 2 išvesti */
{
    Error_Handler();
}

if (HAL_TIM_OC_Start(&htim2) != HAL_OK) /* Pradedame TIM2 laikmati */
{
    Error_Handler();
}
}

```