

Mestna občina Celje
Komisija Mladi za Celje

OPTIMIZACIJA BREZZIČNEGA PRENOSA ENERGIJE IN POLNJENJE MOBILNIH NAPRAV

RAZISKOVALNA NALOGA

AVTORICA:

Ida Pintar

MENTORJA:

Mitja Suvajac

dr. Mihael Gojkošek

Celje, marec 2022

Gimnazija Celje – Center

Program: splošna gimnazija

OPTIMIZACIJA BREZŽIČNEGA PRENOSA ENERGIJE IN POLNJENJE MOBILNIH NAPRAV

RAZISKOVALNA NALOGA

AVTOR:

Ida Pintar

MENTORJA:

Mitja Suvajac

dr. Mihael Gojkošek

Mestna občina Celje, Mladi za Celje

Celje, 2022

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorjema Mitju Suvajcu in profesorju Mihaelu Gojkošku za pomoč pri obravnavi teorije, opravljanju eksperimentov in ustrezno usmerjanje pri izdelavi raziskovalne naloge. Hvala tudi Gimnaziji Celje – Center in Fakulteti za naravoslovje in matematiko Univerze v Mariboru za posojilo laboratorijskih pripomočkov, ki sem jih potrebovala pri izvedbi poskusov. Iskrena hvala tudi gospe prof. Bergit Vrečko za pregled in lektoriranje naloge. Prav tako hvala profesorici Anji Mikl za pomoč pri oblikovanju.

Kazalo

ZAHVALA.....	1
POVZETEK.....	1
ABSTRACT.....	2
1 UVOD	3
1.1 HIPOTEZE.....	4
1.1.1 Prva hipoteza.....	4
1.1.2 Druga hipoteza.....	4
1.1.3 Tretja hipoteza.....	4
1.1.4 Četrta hipoteza.....	4
1.1.5 Peta hipoteza.....	4
1.1.6 Šesta hipoteza.....	4
1.2 RAZISKOVALNE METODE	5
2 TEORETIČNA OSNOVA.....	6
2.1 MAGNETNO POLJE	6
2.2 MAGNETNA INDUKCIJA	9
2.3 IZMENIČNA NAPETOST	16
2.4 RESONANCA.....	17
2.5 MATEMATIČNI DEL OPTIMIZACIJE	19
2.5.1 TEORETIČNA NAPOVED VPLIVA RAZLIČNIH PARAMETROV	22
3 METODE DELA	24
3.1 EKSPERIMENT ZA PRVO HIPOTEZO	24
3.2 EKSPERIMENT ZA DRUGO HIPOTEZO.....	25
3.3 EKSPERIMENT ZA TRETJO HIPOTEZO	26
3.4 EKSPERIMENT ZA ČETRTO HIPOTEZO	29
3.5 EKSPERIMENT ZA PETO HIPOTEZO.....	30
3.6 EKSPERIMENT ZA ŠESTO HIPOTEZO	31
4 REZULTATI Z RAZPRAVO.....	32
4.1 REZULTATI PRVEGA EKSPERIMENTA	32
4.2 REZULTATI DRUGEGA EKSPERIMENTA.....	33
4.3 REZULTATI TRETJEGA EKSPERIMENTA	34
4.4 REZULTATI ČETRTEGA EKSPERIMENTA	35
4.5 REZULTATI PETEGA EKSPERIMENTA.....	37
4.6 REZULTATI ŠESTEGA EKSPERIMENTA.....	38

5	ZAKLJUČEK	39
	VIRI IN LITERATURA	40

Slika 1: Ureditev magnetnih domen.....	8
Slika 2: Graf gostote magnetnega polja v odvisnosti od jakosti magnetnega polja znotraj tuljave	9
Slika 3: Prikaz sil.....	10
Slika 4: Resonančna krivulja.....	18
Slika 5: Eksperiment meritve gostote magnetnega polja	24
Slika 6: Eksperiment meritve resonančne frekvence	25
Slika 7: Tuljave z različnim številom ovojev	26
Slika 8: Kondenzatorji z nadomestno kapaciteto	27
Slika 9: Oddajno in sprejemno vezje	28
Slika 10: Tuljave z različnimi polmeri.....	29
Slika 11: Oddajno vezje s potenciometrom in nespremenjeno sprejemno vezje	30
Slika 12: Slika oddajnega vezja s tuljavo s feromagnetnim jedrom in sprejemnega vezja	31
Slika 13: Slika tuljav	31
Slika 14: Vpliv gostote magnetnega polja oddajne tuljave na sprejemno tuljavo	36

Graf 1: Graf povprečne prenesene moči v odvisnosti od frekvence.....	22
Graf 2: Graf povprečne prenesene moči v odvisnosti od toka	22
Graf 3: Graf povprečne prenesene moči v odvisnosti od polmera sprejemne tuljave	23
Graf 4: Graf povprečne prenesene moči v odvisnosti od števila ovojev sprejemne tuljave	23
Graf 5: Graf magnetnopoljske gostote tuljave v odvisnosti od razdalje od nje z dodano teoretično napovedjo	32
Graf 6: Graf napetosti v odvisnosti od frekvence z dodano teoretično napovedjo	33
Graf 7: Graf povprečne prenesene moči v odvisnosti od števila ovojev sprejemne tuljave z dodano teoretično napovedjo	34
Graf 8: Graf povprečne prenesene moči v odvisnosti od polmera sprejemne tuljave z dodano teoretično napovedjo	35
Graf 9: Graf povprečne prenesene moči v odvisnosti od toka z dodano teoretično napovedjo	37

Shema 1: Shema oddajnega in sprejemnega vezja.....	19
Shema 2: Vezje za meritev gostote magnetnega polja	24
Shema 3: Vezje za merjenje resonančne frekvence.....	25
Shema 4: Oddajno vezje za meritev resonančne frekvence	26
Shema 5: Vezje s kondenzatorjem z določeno znano kapaciteto za merjenje resonančne frekvence.....	27
Shema 6: Oddajno in sprejemno vezje	28
Shema 7: Oddajno in sprejemno vezje	29
Shema 8: Oddajno vezje s potenciometrom in sprejemno vezje	30
Shema 9: Oddajno vezje s feromagnenim jedrom in sprejemno vezje	31
Tabela 1: Meritve oddajnega in sprejemnega vezja brez dodanega feromagnetnega jedra..	38
Tabela 2: Meritve oddajnega in sprejemnega vezja z dodanim feromagnetnim jedrom	38

POVZETEK

V raziskovalni nalogi se lotevamo problema brezžičnega prenosa energije. Najprej opišemo zgodovinski razvoj te tehnologije, nato pa postavimo svoj fizikalni teoretični model, ki nam služi kot osnova za postavljanje hipotez in iskanje možnosti optimizacije. Napovedi teoretičnega modela upoštevamo in jih preverimo eksperimentalno. Osredotočamo se predvsem na parametre sprejemnega vezja, število ovojev in polmer tuljave, tok na oddajnem vezju in frekvenco nihanja napetosti. Celotno zasnovo pa postavljamo v okvir uporabe v prenosnih napravah. Večino hipotez, ki jih je napovedala teorija, so eksperimentalne meritve potrdile. Kjer pa smo opazili očiten razkorak med njimi, pa smo svojo teorijo razširili.

ABSTRACT

In the present research paper we tackle the problem of wireless energy transfer. First we describe historical development of this technology and then present our own theoretical model which serves as a basis for forming our hypotheses and finding the possibilities for optimisation. We take into account the theoretical predictions and investigate them experimentally. We focused mainly on the parameters corresponding to the receiver circuit e.g. number of coil windings, coil radius, the current flowing through the transmitter circuit and the driving frequency of the voltage. All of our work is conducted with regards to the boundaries set by the possible use of such circuits in mobile devices. The majority of our hypotheses are confirmed by experimental results. Where we observe obvious discrepancies between the theory and experiments we adjust the theory to describe the present phenomena.

1 UVOD

Ljudje neprestano iščemo rešitve, ki bi nam olajšale vsakdanjik. Človeška radovednost, ki ji sledita hiter razvoj in napredek tehnologije, nam omogoča dosežke, ki so se še nedavno zdeli povsem nedosegljivi. Ena takšnih hitro razvijajočih se tehnologij je tudi brezžični prenos električne energije.

V začetku 19. stoletja sta André-Marie Ampère in Michael Faraday s svojimi odkritji in zakoni postavila temelj sodobne elektrotehnike. Njuno delo je nadgradil James Clerk Maxwell s svojo znamenito teoretično osnovo, Maxwellovimi enačbami za elektromagnetno polje in valovanje. Ta znanstvena načela so postala raziskovalno izhodišče za pionirje brezžičnega prenosa energije, kot so Tesla, Hutin in Leblanc (Zhong, Xu in Hui).

Nikola Tesla je bil nedvomno najvplivnejši, saj je bil s svojimi izumi precej pred časom. Obenem pa se njegove iznajdbe, kot so stroji za pridobivanje ter prenos energije izmeničnega toka, radijski oddajniki in sprejemniki, rentgenski aparati, tehnologija za daljinsko upravljanje, uporabljajo že več kot stoletje. Čeprav so bile nekatere sčasoma izboljšane, so se njihovi koncepti ohranili še danes. Tesla je poudaril, da bi lahko brezžični prenos energije potekal z magnetno resonančno sklopitvijo pri visoki frekvenci. Poleg magnetne resonančne sklopitve so bile raziskane številne alternativne tehnike brezžičnega prenosa energije, kot so mikrovalovni, laserski in kapacitivni prenos moči. Vendar se zdi, da za uporabo pri srednjih in višjih močeh Teslov pristop, ki temelji na sklopitvi z magnetno resonanco, presega druge tehnike v zmogljivosti in učinkovitosti prenosa energije, varnosti ter enostavnosti nadzora. Prav zaradi teh lastnosti vsi brezžični polnilci za prenosno elektroniko temeljijo na tem principu. Brezžično polnjenje pa ni omejeno samo na majhne napetosti in tokove, saj ga vedno širše uporabljajo tudi na drugih področjih, denimo za polnjenje električnih vozil med vožnjo (Zhong, Xu in Hui).

Raziskovanja sem se lotila, ker sem želela bolje razumeti potek brezžičnega prenosa energije in smiselnost njegove splošne uporabe pri polnjenju mobilnih naprav, saj polnilci, ki delujejo po tem mehanizmu še niso tako razširjeni med splošno populacijo. Moj glavni cilj je bil optimizirati vse parametre, ki vplivajo na učinkovitost prenosa

energije, in s tem najti najboljše pogoje, ki bi lahko bili koristni tudi za nadaljnji razvoj manj potratnih polnilcev.

1.1 HIPOTEZE

1.1.1 Prva hipoteza

Manjša kot je razdalja med sprejemno in oddajno tuljavo, večja je povprečna prenesena moč.

1.1.2 Druga hipoteza

Za naš sistem obstaja frekvenca, pri kateri je povprečna prenesena moč največja.

1.1.3 Tretja hipoteza

Za naš sistem obstaja število ovojev sprejemne tuljave, pri katerem je povprečna prenesena moč največja.

1.1.4 Četrta hipoteza

Za naš sistem obstaja polmer sprejemne tuljave, pri katerem je povprečna prenesena moč največja.

1.1.5 Peta hipoteza

Za naš sistem obstaja vrednost toka na oddajni tuljavi, pri kateri je povprečna prenesena moč največja.

1.1.6 Šesta hipoteza

Vstavljanje feromagnetnega jedra v oddajno tuljavo poveča povprečno preneseno moč.

1.2 RAZISKOVALNE METODE

Uporabljali smo dva glavna sklopa raziskovalnih metod. Najprej smo s teoretičnim razmislekom izpeljali enačbe, ki opisujejo naše pojave, in s pomočjo orodja Wolfram Mathematica vse te enačbe optimizirali po različnih parametrih. Dobili smo teoretične napovedi, ki so služile kot osnova za tvorjenje hipotez in eksperimentalno delo.

Pri eksperimentalnem delu smo uporabljali standardno laboratorijsko opremo (funkcijski generator, osciloskop, ampermeter, voltmeter, povezovalne žice, kondenzatorje). Izmerjene podatke smo prenesli v program OriginPro, jih opremili z napakami, izrisali grafe meritev in preverili njihovo ujemanje s teoretičnimi napovedmi.

2 TEORETIČNA OSNOVA

2.1 MAGNETNO POLJE

Magnetizem je ena od temeljnih lastnosti narave, ki izvira iz gibanja električnega polja. Vsak magnet - telo z magnetnimi lastnostmi - ima dva pola (severnega in južnega). Magnetno polje je prostor, v katerem na magnet učinkuje magnetna sila. Ponazorimo ga s silnicami, ki so usmerjene. Če so silnice ravne in med seboj vzporedne, pomeni, da je polje v vseh točkah po velikosti in tudi po smeri enako. Temu pravimo homogeno magnetno polje (Mohorič in Babič).

Tuljava je tokovni vodnik, ki je navit po plašču valja in tvori niz zaporednih tokovnih zank, v katerih je tok v isti smeri. Magnetno polje tuljave je vsota magnetnih polj posamezne tokovne zanke. V notranjosti tuljave je zgoščeno zaradi velike gostote silnic, v njeni zunanosti pa razredčeno, saj je enako število silnic razporejeno na večjem prostoru (Mohorič in Babič).

Magnetno polje je težko izmeriti, ker izoliranega magnetnega pola v naravi ni. Vedno nastopa skupaj z nasprotnim polom. Velikost magnetnega polja okrog ravnega tokovnega vodnika je obratno sorazmerna z oddaljenostjo od vodnika in premo sorazmerna s tokom v vodniku. To lahko zapišemo tudi:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}. \quad (1)$$

$\mu_0 = 1,26 \times 10^{-6} \frac{Vs}{Am}$ predstavlja magnetno oz. indukcijsko konstanto. Sorazmernostni koeficient pa izhaja iz Amperovega zakona, ki pravi, da je magnetna napetost po zaključeni zanki sorazmerna s tokom, ki teče skozi ploskev, ki jo ta zanka objema (Mohorič in Babič).

Z izrazom za magnetno polje v okolici ravnega vodnika lahko izračunamo tudi polje neravnega vodnika. Predstavljamo si, da vodnik dolžine l razrežemo na dovolj majhne kose dl , da jih lahko obravnavamo kot ravne. Vsak tak kos prispeva $d\vec{B}$ k magnetnemu polju v točki za $\vec{r}$ oddaljeni od vodnika. Upoštevamo še, da je smer magnetnega polja

pravokotna na tokovni vodnik in $\vec{r}$. Dobimo izraz, ki mu pravimo Biot-Savartova enačba:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{\vec{r} \times d\vec{l}}{r^3}. \quad (2)$$

Gostota magnetnega polja v notranjosti dolge, ravne tuljave je sorazmerna s tokom po tuljavi in z gostoto navitja. Ploščina prečnega prereza tuljave (premer ovojev) pa na gostoto magnetnega polja ne vpliva. Izraz za gostoto magnetnega polja v sredini tuljave je:

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I. \quad (3)$$

Kvocient $\frac{N}{l}$ predstavlja število ovojev na dolžinsko enoto (Mohorič in Babič).

Gostoto magnetnega polja v točki prostora izračunamo kot vektorsko vsoto gostot magnetnega polja posameznega vodnika.

Za izračun gostote magnetnega polja v točki nad središčno osjo tuljave uporabimo Biot-Savartovo enačbo:

$$B = \frac{\mu_0 I r^2 N}{2(z^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (4)$$

(Halliday, Resnick in Walker, 2013, str.765)

Magnetno polje v snovi in njeni okolici se nekoliko spremeni, če postavimo kos snovi v prostor z gostoto magnetnega polja B_0 . Sprememba nastane zaradi medsebojnega vpliva med zunanjim magnetnim poljem in magnetnimi polji posameznih atomov. Izrazimo jo s kvocientom gostote magnetnega polja v snovi B in gostote magnetnega polja na istem mestu brez dodane snovi B_0 (Mohorič in Babič).

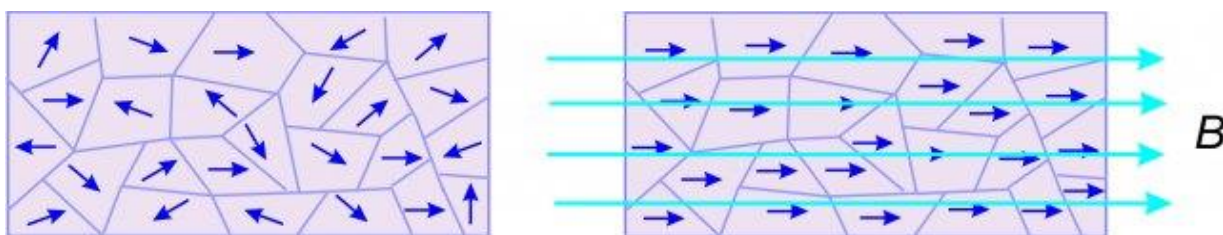
Temu pravimo magnetna permeabilnost snovi:

$$\mu = \frac{B}{B_0}. \quad (5)$$

Faktor relativne permeabilnosti snovi pove, kolikokrat se gostota B magnetnega polja v snovi oslabi ali ojača glede na gostoto B_0 v praznem prostoru in kako je odvisna od jakosti magnetnega polja (Mohorič in Babič).

Za feromagnetne snovi velja, da je njihova permeabilnost veliko večja od 1 ($\mu \gg 1$).

Pri pojavu feromagnetizma se gostota magnetnega polja v snovi močno poveča. V nekaterih snoveh so magnetni momenti lokalno že urejeni v magnetne domene (večje gruče). To so skupki magnetno urejenih osnovnih gradnikov. Makroskopsko telo po navadi v okolici ne ustvarja magnetnega polja, ker njihovi skupni momenti kažejo v različne smeri. Če telo postavimo v zunanje magnetno polje, dobimo ojačan paramagnetni pojav, saj se magnetni momenti obrnejo v smeri silnic zunanjega polja. Pri feromagnetih ostanejo magnetne domene orientirane v isti smeri kot zunanje magnetno polje. Takšne snovi lahko namagnetimo in tudi razmagnetimo. Razmagnetimo jih z močnim segrevanjem ali s postavitvijo v nasprotno usmerjeno zunanje magnetno polje (Mohorič in Babič).

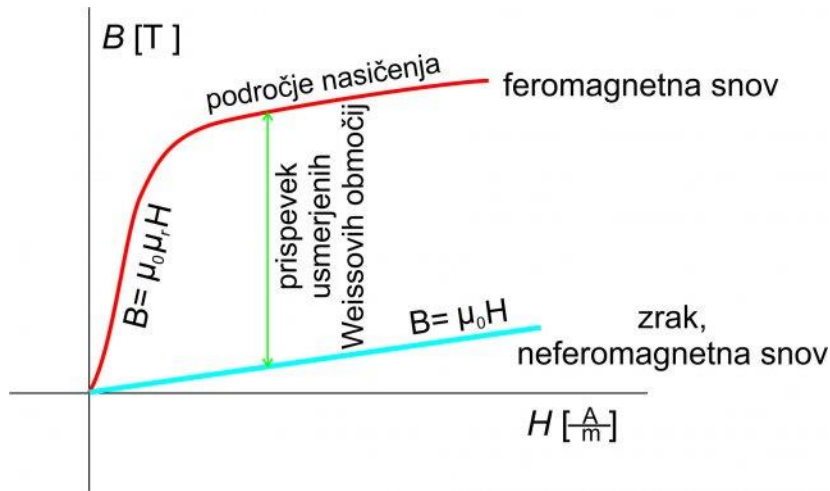


Slika 1: Ureditev magnetnih domen

(https://si.openprof.com/wb/snov_v_magnetnem_polju?ch=212)

Če postavimo telo iz feromagnetne snovi v tuljavo - rdeča krivulja na spodnji sliki - in povečamo tok, ki teče skozi njo, se povečuje magnetnopoljska jakost znotraj tuljave. Domene v jedru se pričnejo usmerjati in s svojim magnetnim poljem dodatno krepijo zunanje magnetno polje – strmo naraščanje rdeče krivulje. Telo postaja vse močnejši magnet – položnejši desni del krivulje. Ko so urejene vse magnetne domene, je snov namagnetena, in tudi če večamo tok, se ne more bolj namagnetiti. Magnetno polje v feromagnetni snovi se nekoliko zmanjša, ko tok zmanjšujemo, saj se orientacija določenih magnetnih domen spremeni. Tudi ko toka ni več, nekatere domene ostanejo

obrnjene v smeri zunanega polja. Če telo vzamemo iz tuljave, dobimo trajni magnet (Mohorič in Babič).



Slika 2: Graf gostote magnetnega polja v odvisnosti od jakosti magnetnega polja znotraj tuljave

(https://si.openprof.com/wb/snov_v_magnetnem_polju?ch=212)

Če telo pustimo na istem mestu in obrnemo smer toka, se domene začno obračati v smeri novega polja. Če tok spet zmanjšamo na nič, dobimo magnet z nasprotno polarizacijo (Mohorič in Babič).

2.2 MAGNETNA INDUKCIJA

Pri tuljavi je gostota silnic vzdolž osi tuljave večja, ko povečamo tok po njej. Magnetni pretok skozi ploskev se spreminja s številom silnic magnetnega polja, ki to ploskev prebadajo. Njegova smer je odvisna od smeri silnic, ki prebadajo ploskev. Magnetni pretok homogenega polja skozi ravno ploskev definiramo z izrazom:

$$\Phi_m = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cos \alpha. \quad (6)$$

Če je ploskev pravokotna na silnice oz. je položena vzdolž silnic magnetnega polja, je magnetni pretok skozi njo enak nič (Mohorič in Babič).

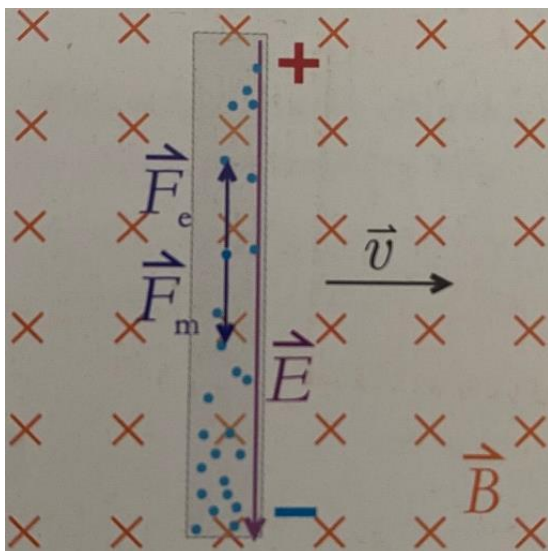
Denimo, da imamo kovinsko palico, v kateri so prevodniški elektroni. Premaknemo jo v smeri pravokotno na silnice magnetnega polja. Na vsakega od nosilcev naboja deluje sila usmerjena pravokotno, na silnice magnetnega polja in na hitrost palice z velikostjo:

$$F = evB. \quad (7)$$

Negativni naboj se kopiči na spodnjem delu palice, na zgornjem pa ostaja kovina s primanjkljajem elektronov, ki je naelektrena pozitivno. Do tega pojava pride, ker magnetna sila potiska elektrone navzdol (Mohorič in Babič).

Na začetku na krajiščih palice ni električnega polja in ni presežka nabojev. Zato se prvi gibljivi elektroni neovirano premaknejo na konec palice. Električno polje nastane šele, ko se na koncih palice pojavi presežek naboja. Le-to deluje na elektrone z električno silo, usmerjeno navzgor. Prej nakopičeni elektroni s svojim negativnim nabojem odbijajo naslednje elektrone, zato se proti krajišču premaknejo malo težje. Ko je električna sila na prevodniške elektrone v notranjosti palice enako velika magnetni, ki jih potiska proti koncu palice, se kopičenje elektronov ustavi (Mohorič in Babič).

$$F_e = F_m \rightarrow evB = eE. \quad (8)$$



Slika 3: Prikaz sil

(MOHORIČ, Aleš, in BABIČ, Vitomir. 2015. FIZIKA 3: Učbenik za fiziko v 3. letniku gimnazij in štiriletnih strokovnih šol. Ljubljana: Mladinska knjiga. ISBN 978-961-01-2653-9, str. 93)

Če električni naboj okrajšamo, dobimo izraz za jakost električnega polja v palici:

$$E = vB. \quad (9)$$

Napetost med koncema palice z dolžino l , je $U = El$. Z gostoto električnega polja izrazimo jakost električnega polja in dobimo izraz za inducirano napetost (napetost med koncema prevodne palice, ki se giblje v magnetnem polju).

$$U_i = lvB. \quad (10)$$

Črka l predstavlja dolžino tistega dela palice, ki je v magnetnem polju. Ta enačba velja, če je hitrost pravokotna na silnice magnetnega polja. Če je hitrost vzporedna s silnicami magnetnega polja, je $U_i = 0$. Pojavu napetosti v prevodniku med gibanjem skozi magnetno polje pravimo magnetna indukcija (Mohorič in Babič).

Z gibanjem vodnika skozi magnetno polje smo med koncema vodnika ustvarili napetost. Toka v vodniku ni, razen na začetku, ko se naboj na koncih palice še nabira. Palico z razdeljenim nabojem lahko primerjamo z baterijo, saj je med priključkoma baterije napetost. Tok pa se pojavi, ko priključka sklenemo v električni krog. Podobno je z vodnikom. Med njegovima koncema se ustvari napetost, ko se premika prečno na silnice magnetnega polja. Zanko moramo skleniti z vodnikom tako, da se glede na prvi giblje drugače ali v drugačnem magnetnem polju, saj v nasprotnem primeru toka ne bo (Mohorič in Babič).

Predstavljamo si vodnik, ki drsi po prevodnih, vzporednih tračnicah. Ti ležita v magnetnem polju in sta na koncu sklenjeni s porabnikom. Ko premikamo vodnik s stalno hitrostjo skozi magnetno polje, inducirana napetost požene tok po tračnicah in skozi porabnik (žarnica zaradi toka zasveti). Tračnice sproti odvajajo elektrone, ki jih magnetna sila kopiči na negativnem koncu vodnika, skozi porabnik na drug konec vodnika. Magnetna sila potiska pozitivno naelektrene elektrone na koncu vodnika proti negativno naelektrenemu koncu vodnika. Ko elektrone premakne na drugo stran, opravi delo. Tak vodnik ima vse lastnosti vira napetosti, saj opravlja delo med prenašanjem elektronov s pozitivnega na negativni priključek in vzdržuje stalno napetost med priključkoma (Mohorič in Babič).

Na vodnik zaradi toka deluje magnetna sila z velikostjo $F = IlB$. Smer sile je nasprotna smeri gibanja vodnika. Vodnik bi se ustavil zaradi zaviralne magnetne sile, če ga ne bi ves čas premikali v smeri gibanja. Za stalno inducirano napetost v tokovnem vodniku je potrebna zunanja sila, ki med premikanjem vodnika opravlja delo. Moč te sile je:

$$P_m = Fv = IlBv, \text{ ki je enaka električni moči vira napetosti } P_e = IU_i.$$

Če izraza izenačimo, ponovno ugotovimo:

$$IU_i = IlBv \rightarrow U_i = lvB. \quad (11)$$

Predznak inducirane napetosti je tak, da skuša poganjati tok v taki smeri, da je magnetna sila na vodnik zaviralna.

Če obravnavamo premikajoči se vodnik in električni krog skupaj kot tokovno zanko, lahko ugotovimo, da spreminjanje magnetnega pretoka skozi to zanko povzroči poganjanje toka po električnem krogu. Ploskev vodnika, ki jo objame zanka, se med gibanjem povečuje, zato jo prebada vedno več silnic magnetnega polja. Magnetni pretok skozi zanko se poveča, ko se vodnik v časovnem intervalu Δt premakne za $\Delta x = v\Delta t$. Iz $\Phi_m = BS$ se torej poveča na $\Phi_m = B(S + lv\Delta t)$. Sprememba magnetnega polja je $\Delta\Phi_m = lvB\Delta t$, kjer lahko prepoznamo inducirano napetost $U_i = lvB$. Izraz lahko napišemo tudi kot $U_i = -\frac{\Delta\Phi_m}{\Delta t}$, ki ga imenujemo indukcijski oz. Faradayev zakon. Negativni predznak izhaja iz Lenzovega pravila, ki pravi, da ima napetost smer, s katero skuša preprečevati spreminjanje toka po tuljavi (Mohorič in Babič).

Inducirana napetost nastane ob vsaki spremembi magnetnega pretoka skozi zaključeno zanko. Te nastanejo, če se spreminjajo njena velikost, gostota magnetnega polja na mestu zanke ali pa orientacija zanke glede na silnice magnetnega polja (Mohorič in Babič).

V splošnem pa Faradayev zakon zapišemo kot:

$$\frac{\partial\Phi_m}{\partial t} = -U_i. \quad (12)$$

Magnetni pretok v tuljavi se spreminja, če se spreminja zunanje magnetno polje, v katerem se nahaja. Tuljava s tokom pa ustvari tudi lastno magnetno polje. V njeni sredini je gostota magnetnega polja enaka:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l}. \quad (13)$$

Ker je gostota vzporedna z geometrijsko osjo tuljave, velja, da je magnetni pretok skozi vsak ovoj:

$$\Phi_{ml} = BS = \mu_0 \frac{NI}{l}. \quad (14)$$

Skupni pretok skozi vseh N ovojev tuljave je:

$$\Phi_m = N\Phi_{ml} = \mu_0 \frac{N^2 S}{l} I. \quad (15)$$

Lastni magnetni pretok skozi tuljavo je sorazmeren s tokom po ovojih tuljave:

$$\Phi_m = LI. \quad (16)$$

Sorazmernostni koeficient predstavlja induktivnost ravne tuljave:

$$L = \mu_0 \frac{N^2 S}{l}. \quad (17)$$

Njena enota je henri s simbolom H. Velja $1 H = 1 \frac{Vs}{A}$. Induktivnost tuljave je zanjo značilna lastnost, ki je odvisna le od njenih geometrijskih lastnosti: preseka, dolžine, oblike in števila ovojev (Mohorič in Babič).

Če se spremeni tok po ovojih tuljave, se spremeni tudi lastni magnetni pretok skozi tuljavo. Vsaka sprememba magnetnega pretoka inducira napetost:

$$U_i = - \frac{\Delta \Phi_m}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (18)$$

»Med priključkoma tuljave, po kateri teče spremenljiv električni tok, se inducira napetost, ki je sorazmerna s hitrostjo spreminjanja toka. Negativni predznak je posledica Lenzovega pravila in pove, da ima napetost smer, s katero skuša preprečevati spreminjanje toka po tuljavi. Ko tok raste, je napetost negativna in povzroči nasprotni tok. Ko tok pada, je napetost pozitivna in povzroči tok v enaki smeri. Induktivnost predstavlja torej nekakšno upiranje tuljave spremembi toka v njej.

Na tuljavi se vsakič, ko se v njej spreminja tok, inducira napetost, ki spreminjanje toka zavira. Hitreje ko se tok spreminja, večja je ta napetost. Tuljavo lahko obravnavamo kot upornik, katerega upor je tem večji, čim hitrejše so spremembe toka v njej, zato deluje tuljava pri nizkofrekvenčnih tokovih kot kratek stik, pri visokofrekvenčnih pa je njen upor zelo velik.»

(Mohorič in Babič, 2015, str. 102)

Za magnetno energijo je potreben tok; če ga v tuljavi ni, je tudi magnetna energija enaka nič. Ko tuljavo priključimo na vir napetosti, tok skozi njo narašča. Med tem opravi vir napetosti delo:

$$A_e = U\bar{I}\Delta t. \quad (19)$$

in v tuljavi nastane magnetno polje. V izraz vstavimo povprečni tok, ker tok v tuljavi narašča od nič do končne vrednosti, ki je enak polovici končnega toka. Inducirana napetost na tuljavi je enaka napetosti vira, če je na vir napetosti priključena le tuljava in jo lahko izrazimo z induktivnostjo tuljave: $U_i = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$. Torej je električno delo:

$$A_e = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}\bar{I}\Delta t = -L\bar{I}\Delta I. \quad (20)$$

Če upoštevamo, da je povprečni tok enak polovici končnega, sprememba toka pa je enaka končnemu, dobimo:

$$A_e = -L\bar{I}\Delta I = -L\frac{I}{2}I = -\frac{1}{2}LI^2. \quad (21)$$

Ker električno delo vira poveča energijo tuljave, zanemarimo predznak:

$$W_m = \frac{1}{2}LI^2. \quad (22)$$

Ko izključimo vir napetosti, ki poganja tok po tuljavi, ta sprosti energijo. Tok se začne zmanjševati, prav tako se spreminja njen magnetni pretok, zato se med priključkoma tuljave inducira napetost. Ko se magnetno polje v tuljavi izniči, ni več induciranega toka (Mohorič in Babič).

Energija tuljave je odvisna od njene induktivnosti. Induktivnost pa določajo geometrijske lastnosti tuljave, kot so dolžina, presek in število ovojev.

Energijo tuljave lahko zapišemo tudi kot:

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 N^2 S}{l} I^2. \quad (23)$$

Pri tem lahko za kvadrat toka vstavimo izraz iz enačbe za gostoto magnetnega polja v sredini tuljave:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l} \rightarrow I^2 = \frac{B^2 l^2}{\mu_0^2 N^2} \quad (24)$$

in dobimo:

$$W_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} V \quad (V = Sl). \quad (25)$$

Magnetna energija je zbrana v določeni prostornini, to opisuje gostota energije magnetnega polja:

$$w_m = \frac{W_m}{V} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0}. \quad (26)$$

Če povežemo kondenzator s tuljavo, dobimo električni nihajni krog. Da električni naboj niha, je treba nihajnemu krogu dovesti nekaj energije (kondenzator naelektrimo prek stikala). Če vir izključimo, se začne naelektreni kondenzator prazniti skozi tuljavo. V njej se spreminja magnetni pretok in na njej se inducira napetost. Ker ta hoče ohranjati prejšnje stanje, se kondenzator prazni počasneje, kot bi se sicer. Ker se med praznjenjem zmanjšujeta električno polje in naboj, se manjša električna energija kondenzatorja. V tuljavi je vse večji tok, zato se povečujeta magnetno polje in magnetna energija. V tuljavi je magnetno polje največje, ko v kondenzatorju ni več električnega polja. Tok se začne zmanjševati, s tem tudi gostota magnetnega polja in magnetni pretok. Inducirana napetost pa skuša ohraniti tok, zato ga poganja v isti smeri, kot ga je prej kondenzator. Kondenzator polni s tem tokom. Naboj na kondenzatorju je tak kot na začetku, ko v tuljavi ni več magnetnega polja. Tako se energija magnetnega polja iz tuljave pretoči zopet v kondenzator, ki prejema energijo električnega polja. To se ponovi še v nasprotni smeri, in ko se kondenzator ponovno nabije, nihaj naredi električni nihajni krog (Mohorič in Babič).

Največji energiji kondenzatorja in tuljave sta enaki:

$$\frac{e_0^2}{2C} = \frac{1}{2}LI_0^2. \quad (27)$$

Iz enačbe lahko izpeljemo zvezo med amplitudo toka in amplitudo naboja:

$$I_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}e_0. \quad (28)$$

Tok predstavlja hitrost spreminjanja naboja ($I = \frac{\Delta e}{\Delta t}$). Definicija toka spominja na definicijo hitrosti: $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$. Sklepamo lahko, da je lastni nihajni čas t_0 električnega nihajnega kroga enak: $v_0 = \omega x_0 \rightarrow I_0 = \omega x_0 \rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}},$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{2\pi}{t_0} \rightarrow t_0 = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (29)$$

Omenjeni električni nihajni krog je dušen, saj se žice tuljave zaradi toka grejejo in električno energijo pretvarjajo v toploto na upor.

Nedušeno nihanje lahko ustvarimo le, če v nihajni krog sproti dovajamo izgubljeno energijo. Takšen električni nihajni krog imenujemo električni oscilator.

»V električnem nihanju krogu niha električni naboj. Frekvenca nihanja je določena z induktivnostjo tuljave in kapaciteto kondenzatorja. Energija nihanja je vsota električne energije, ki je zbrana v kondenzatorju, ter magnetne energije, ki je zbrana v tuljavi« (Mohorič in Babič, 2015, str. 107).

2.3 IZMENIČNA NAPETOST

Kot že omenjeno, je inducirana napetost posledica spreminjanja magnetnega pretoka skozi zaključeno zanko. Če tokovno zanko v magnetnem polju vrtimo, se magnetni pretok skozi njo neprestano spreminja in med priključkoma zanke se inducira napetost.

»Med vrtenjem tuljave s stalno kotno hitrostjo ω v homogenem magnetnem polju okoli osi, pravokotne na silnice magnetnega polja, nastaja izmenična napetost, ki jo opišemo z enačbo:

$$U = U_0 \sin(\omega t). \quad (30)$$

Če to napetost priključimo v krog s porabnikom, se smer toka periodično spreminja. Tok v krogu niha z enako krožno frekvenco kot napetost.«

(Mohorič in Babič, 2015, str. 99)

Ko priključimo ohmski porabnik na izmenično napetost, tok v njem niha in porabnik prejema električno moč:

$$P = UI = U_0 \sin(\omega t) I_0 \sin(\omega t) = U_0 I_0 \sin^2(\omega t). \quad (31)$$

Moč niha s kvadratom sinusa časa med nič in največjo vrednostjo P_0 .

Povprečna moč je enaka: $\bar{P} = U_{ef} I_{ef}$, pri čemer velja, da je $U_{ef} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$ in $I_{ef} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$.

V splošnem so vezja sestavljena iz komponent, ki imajo tri različne narave. Ohmsko, kapacitivno ali induktivno. Različne lastnosti elektronskih komponent povzročajo v vezju različne fazne premike med nihanjem toka in napetosti. Definiramo ga kot:

$$x(t) = x_0 \sin(\omega t + \delta). \quad (32)$$

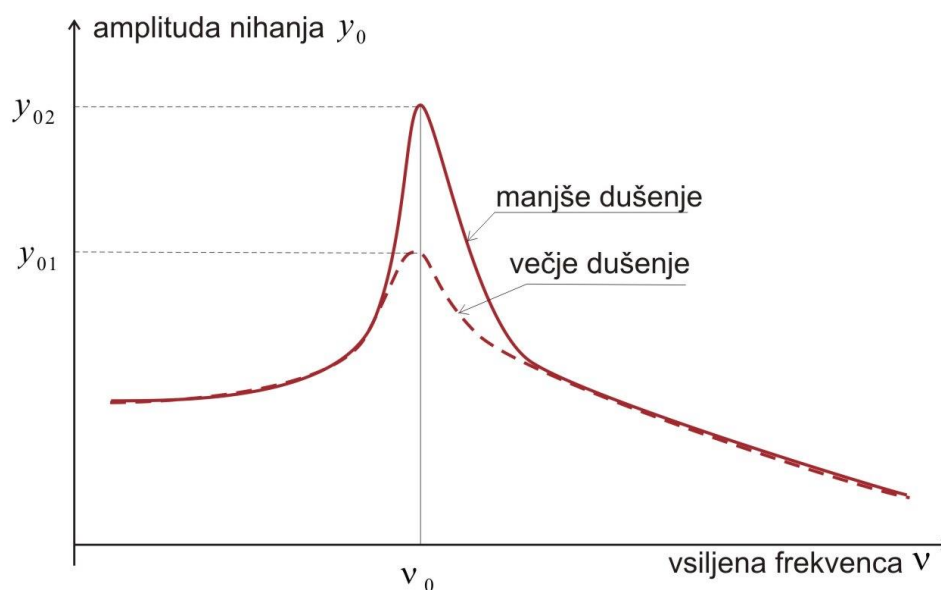
Fazni premik v vezju povzroči t. i. jalov tok, ki porablja moč. Izognemo se mu tako, da spravimo fazni premik na nič, kar pa se zgodi pri resonančni frekvenci.

2.4 RESONANCA

Resonanca je lastnost sistema, da ob zunanjem vzbujanju z različnimi frekvencami pri resonančni frekvenci niha z bistveno večjo amplitudo kot pri ostalih frekvencah. Impedanca (upor porabnika električnemu toku) kondenzatorja v zaporednem RLC vezju je obratno sorazmerna s frekvenco, medtem ko je impedanca tuljave sorazmerna s frekvenco. Pri resonančnem nihaju je impedanca kondenzatorja nasprotno enaka impedanci tuljave in njuna vektorska vsota je enaka nič. Zato veljata enačbi:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad \text{in} \quad \omega_{RES} = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (33)$$

To vezje ima pri resonančni frekvenci minimalno impedanco, ki je enaka upornosti upornika. Pri napetostnem vzburjanju nihajnega kroga bo na viru napetosti pri resonančni frekvenci najmanjša napetost. Za nihanje z resonančno frekvenco je potrebno najmanj energije. Posledično bo v resonančnem stanju največja amplituda toka in amplituda napetosti. Ker velja enačba $P = UI$, bo takrat tudi povprečna prenesena moč največja, kar pa je tudi naš končni cilj (Jenko).

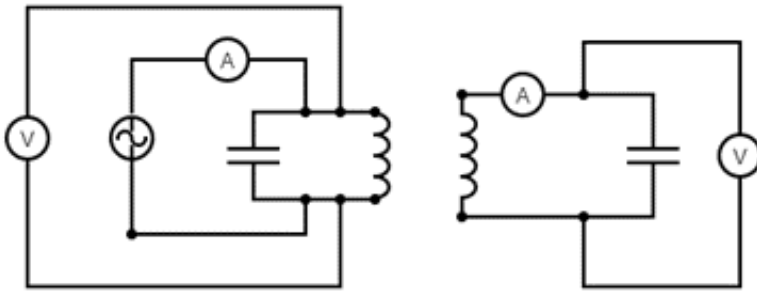


Slika 4: Resonančna krivulja

(<https://si.openprof.com/wb/nihala?ch=332>)

2.5 MATEMATIČNI DEL OPTIMIZACIJE

Za brezžični prenos energije v našem primeru uporabljamo dve podobni vezji. Obe sta sestavljeni iz tuljave in kondenzatorja, razlikujeta pa se po tem, da ima oddajna vezje priključen vir napetosti, sprejemno vezje pa načeloma nek porabnik. Odsotnost porabnika ne vpliva na meritve.



Shema 1: Shema oddajnega in sprejemnega vezja

Glavni pojav, ki ga bomo izkoristili za prenos energije, je magnetna indukcija, torej moramo najprej izračunati, kakšno magnetno polje povzroča naša oddajna tuljava. Njeno magnetno polje izračunamo s pomočjo Biot-Savartove enačbe, ki nam da rezultat:

$$B(z) = \frac{\mu_0 I r^2 N}{2(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (34)$$

(Halliday, Resnick in Walker, 2013, str.765)

Iz enačbe lahko razberemo, da bo gostota magnetnega polja največja, ko bo $z = 0$ (razdalja od tuljave enaka nič) in da bo čim večja, tem večji je tok, ki teče skozi tuljavo:

$$B(0) = \frac{\mu_0 I N}{2r}. \quad (35)$$

Zdaj imamo definirano magnetno polje oddajnega vezja. Za izračun povprečne prenesene moči pa potrebujemo še napetost, ki se zaradi tega inducira na sprejemnem

vezju. To dobimo z uporabo Faradayevega zakona: $U_i = \oint \vec{E} d\vec{s} = - \frac{\partial \phi_m}{\partial t}$. Ko smo izračunali inducirano napetost na sprejemni tuljavi, potrebujemo še samo impedanco našega sprejemnega vezja:

$$z = \sqrt{R^2 + (X_c - X_L)^2}. \quad (36)$$

Pri tem upoštevamo, da sta konduktanca in induktanca (reaktanca kondenzatorja ter tuljave) nasprotno enaki:

$$X_c = \frac{1}{C\omega}, \quad X_L = L\omega, \quad (37)$$

$$z = \sqrt{R^2 + \frac{1}{C^2\omega^2} - 2\frac{L}{C} + L^2\omega^2}. \quad (38)$$

(Halliday, Resnick in Walker)

in lahko izračunamo preneseno moč, ki je odvisna od časa:

$$P(t) = I(t)U(t). \quad (39)$$

Izhajamo iz Ohmovega zakona: $I = \frac{U}{R}$. Ker imamo izmenični tok, namesto upornosti vključimo impedanco, torej je $I = \frac{U}{z}$. V zgornjo enačbo vstavimo dobljeno enačbo toka:

$$P(t) = \frac{U^2}{z}. \quad (40)$$

Upoštevamo enačbo za inducirano napetost, ki smo jo izpeljali iz osnovne enačbe:

$$U_i = -S_{SPR} \frac{\partial B_{ODD}}{\partial t} \quad (\text{Halliday, Resnick in Walker}).$$

Inducirana napetost na sprejemni tuljavi je: $U_i = -S_{SPR} \frac{\mu_0 N_{ODD} I_0 \cos(\omega t)}{2r_{ODD}} \omega$,

$$U_i = -\pi r_{SPR}^2 \frac{\mu_0 N_{ODD} I_0 N_{SPR}}{2r_{ODD}} \omega. \quad (41)$$

Pri enačbi upoštevamo, da ima sprejemna tuljava N_{SPR} ovojov (Mohorič in Babič).

Upoštevamo tudi enačbo za impedanco (enačba (38)):

$$P(t) = \frac{\omega^2 \pi^2 r_{SPR}^4 \mu_0^2 N_{ODD}^2 N_{SPR}^2 I_0^2 \cos^2(\omega t)}{4r_{ODD}^2 \sqrt{R_{SPR}^2 + \frac{1}{C^2 \omega^2} - 2 \frac{L}{C} + L^2 \omega^2}}. \quad (42)$$

Pri tem v števcu upoštevamo:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l}. \quad (43)$$

Ker so frekvence zelo visoke, povprečimo celoten izraz po času in dobimo $1/2P$:

$$\begin{aligned} \langle P \rangle &= \frac{U^2}{2Z}, \\ \langle P \rangle &= \frac{\omega^2 \pi^2 r_{SPR}^4 \mu_0^2 N_{ODD}^2 N_{SPR}^2 I_0^2}{8r_{ODD}^2 \sqrt{R^2 + \frac{1}{C^2 \omega^2} - 2 \frac{\mu_0 N^2 S}{Cl} + \frac{\mu_0^2 N^4 S^2 \omega^2}{l^2}}}. \end{aligned} \quad (44)$$

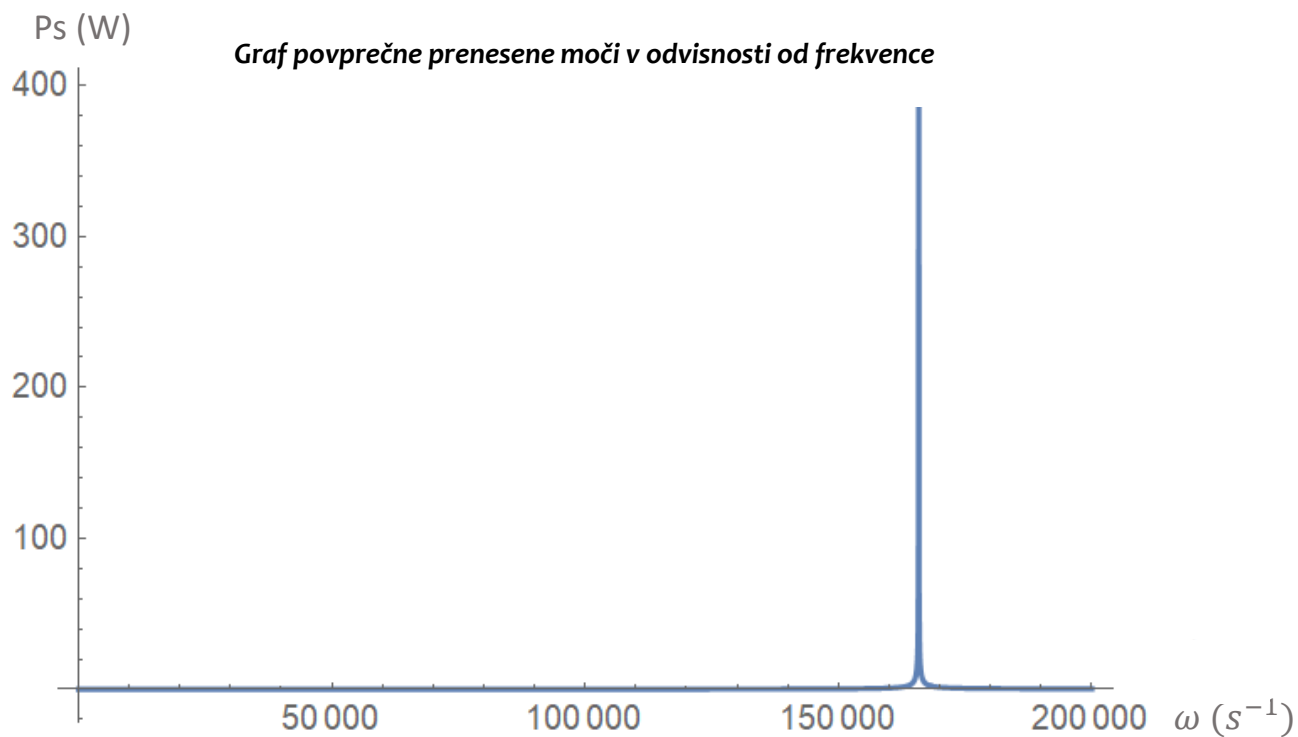
(V imenovalcu upoštevamo enačbo (43).)

Napetost smo povprečili po času, ker s tem dobimo efektivno napetost, s katero lahko računamo povprečno preneseno moč.

Vidimo, da bo povprečna prenesena moč odvisna od števila ovojev sprejemne tuljave, njene velikosti, toka na oddajni tuljavi in gonilne frekvence. Vsakega od teh parametrov se bomo lotili sistematično in ga teoretično optimizirali ter naše hipoteze in napovedi preverili s poskusi.

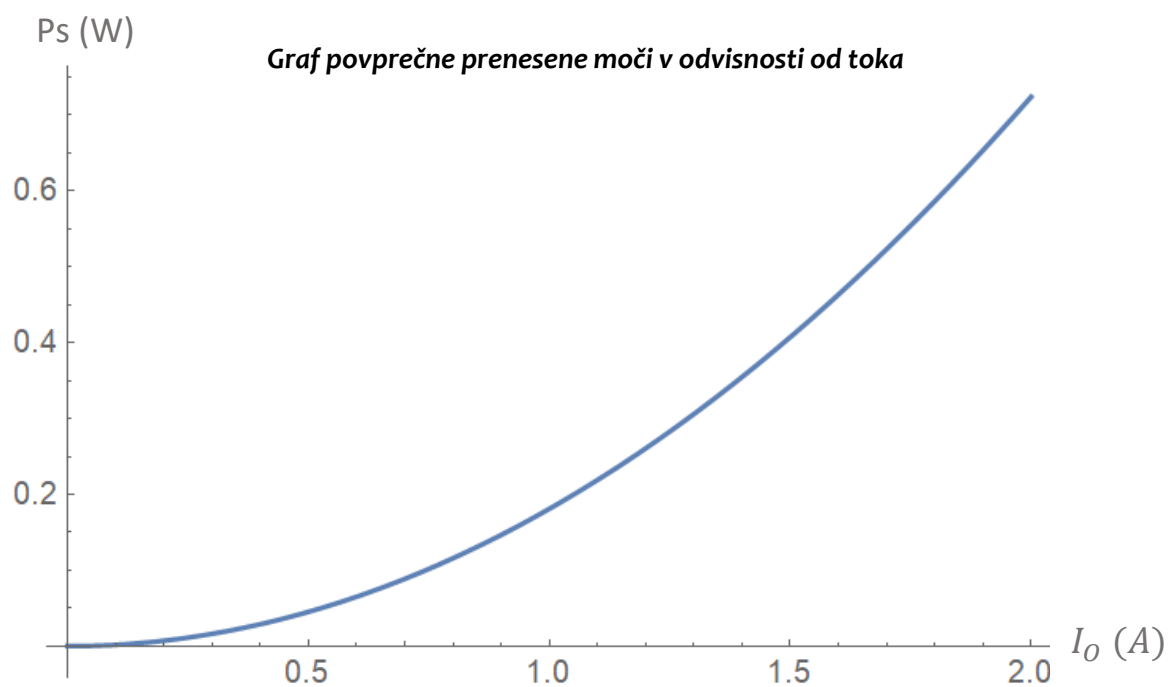
2.5.1 TEORETIČNA NAPOVED VPLIVA RAZLIČNIH PARAMETROV

2.5.1.1 Vpliv frekvence



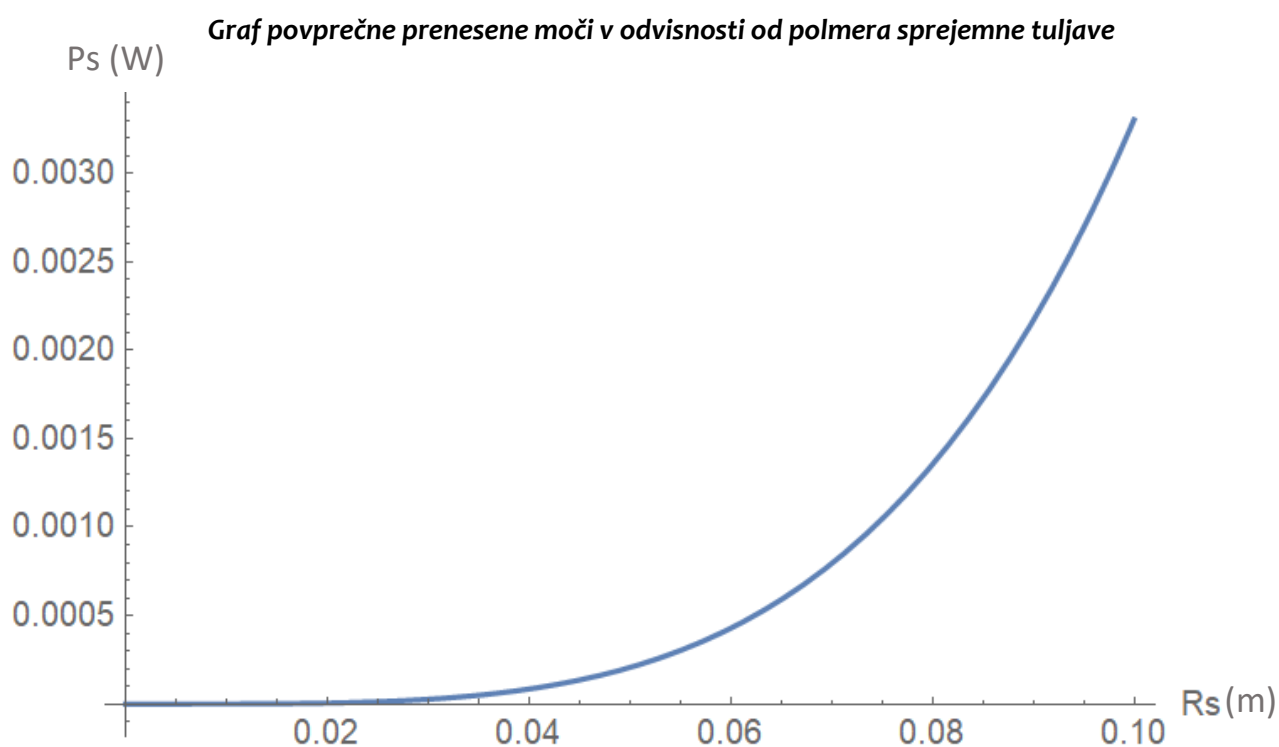
Graf 1: Graf povprečne prenesene moči v odvisnosti od frekvence

2.5.1.2 Vpliv toka



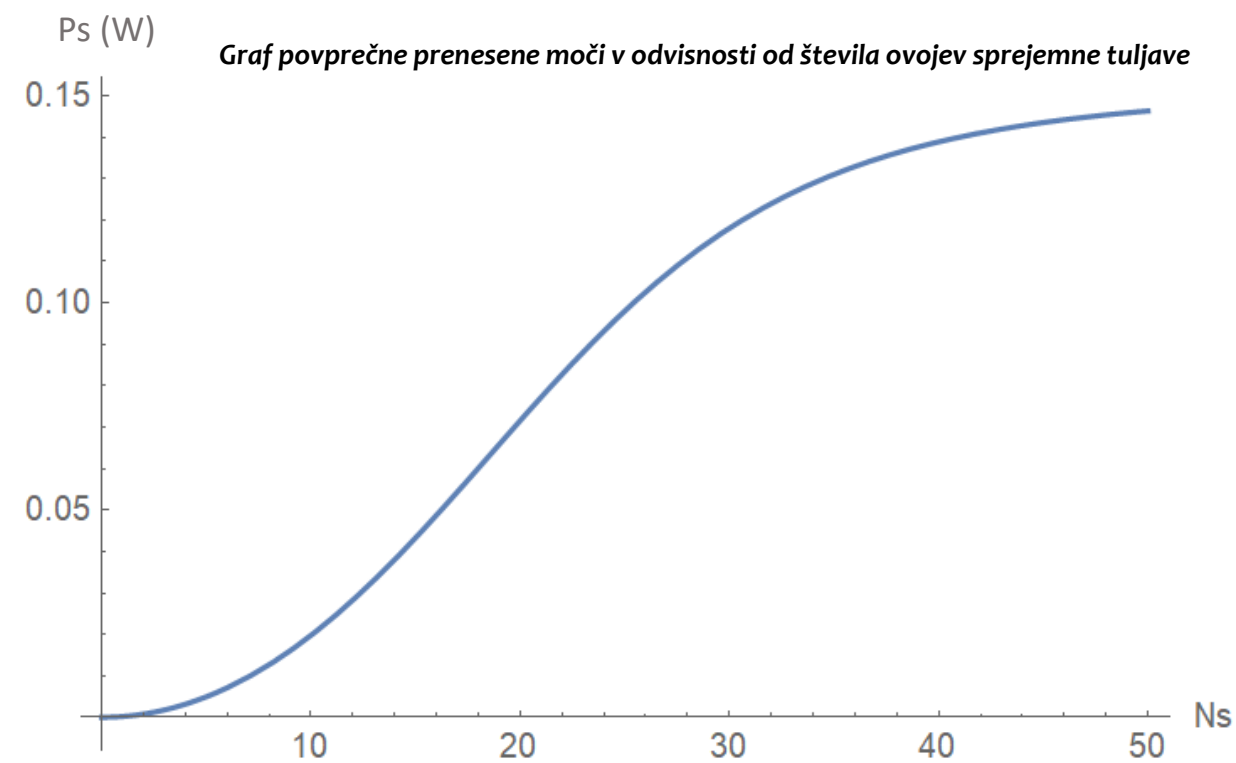
Graf 2: Graf povprečne prenesene moči v odvisnosti od toka

2.5.1.3 Vpliv polmera sprejemne tuljave



Graf 3: Graf povprečne prenesene moči v odvisnosti od polmera sprejemne tuljave

2.5.1.4 Vpliv števila ovojev sprejemne tuljave



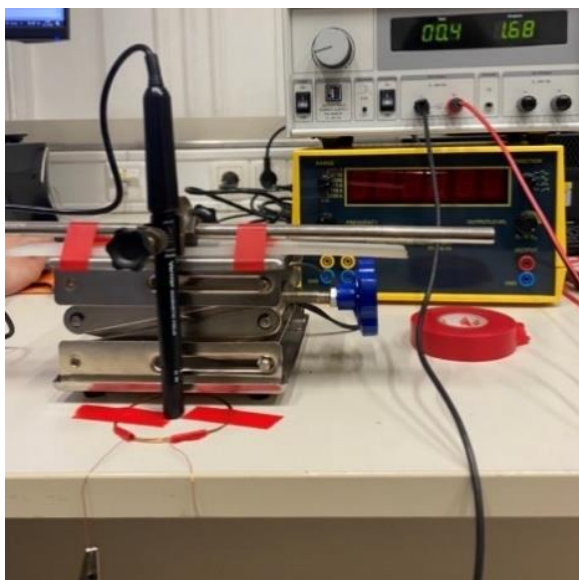
Graf 4: Graf povprečne prenesene moči v odvisnosti od števila ovojev sprejemne tuljave

3 METODE DELA

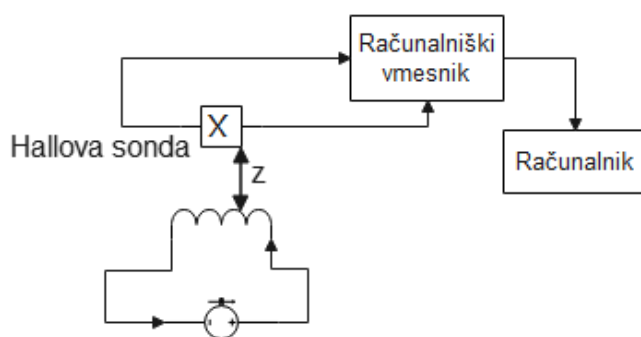
Za poskuse potrebujemo: žico (sprejemno in oddajno tuljavo), povezovalne žice, kondenzatorja na vsakem vezju, ampermetra in osciloskop, ki ga uporabljamo kot voltmeter.

3.1 EKSPERIMENT ZA PRVO HIPOTEZO

Pri prvem poskusu smo merili gostoto magnetnega polja v odvisnosti od razdalje od tuljave, s čimer smo hoteli pokazati, da se gostota magnetnega polja s povečanjem razdalje od tuljave zmanjšuje. Vezje smo sestavili z virom enosmerne napetosti, tuljavo in povezovalnimi žicami. Gostoto magnetnega polja smo merili s Hallovo sondo, ki je preko vmesnika povezana z računalnikom. S pomočjo laboratorijske mizice, smo jo premikali po centralni osi tuljave navzgor, da bi zagotovili le navpično gibanje.



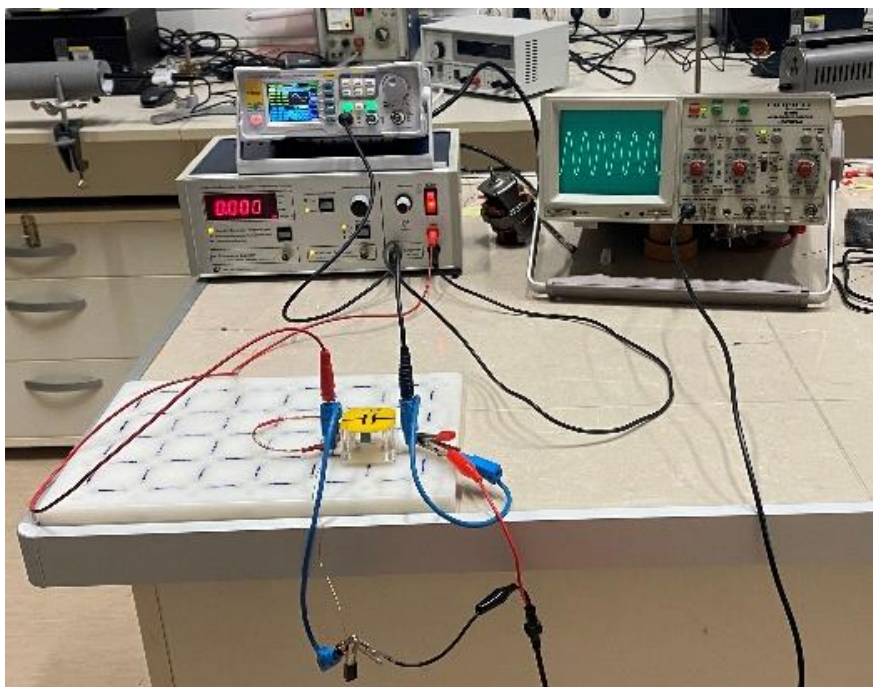
Slika 5: Eksperiment meritve gostote magnetnega polja



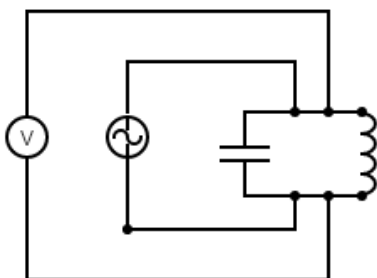
Shema 2: Vezje za meritev gostote magnetnega polja

3.2 EKSPERIMENT ZA DRUGO HIPOTEZO

Z drugim eksperimentom smo merili resonančno frekvenco. Na vzporedno vezana kondenzator in tuljavo sta prav tako vzporedno vezana osciloskop in funkcijski generator, ki lahko oddaja izmenično napetost s poljubno frekvenco. Najprej prečesemo razpon frekvenc od 0 do nekaj 100 kHz in opazujemo napetost na vezju na osciloskopu. V določenem frekvenčnem območju (50-150 kHz) opazimo izrazit skok amplitude napetosti, zato ga podrobneje preučimo. Tam v majhnih korakih spreminjamo frekvenco, dokler amplituda napetosti ne doseže največje vrednosti.



Slika 6: Eksperiment meritve resonančne frekvence



Shema 3: Vezje za merjenje resonančne frekvence

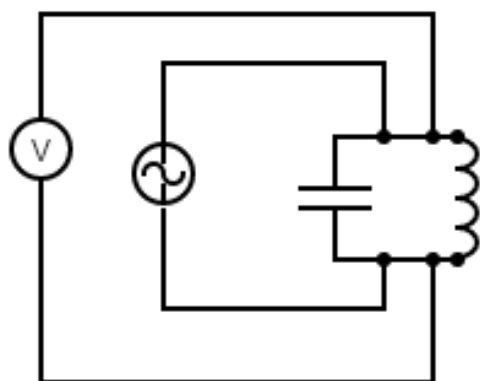
3.3 EKSPERIMENT ZA TRETJO HIPOTEZO

Glede na tretjo hipotezo, ki se nanaša na število ovojev, izdelamo tuljave z različnim številom ovojev ($N = 2$, $N = 5$, $N = 10$, $N = 15$, $N = 20$).



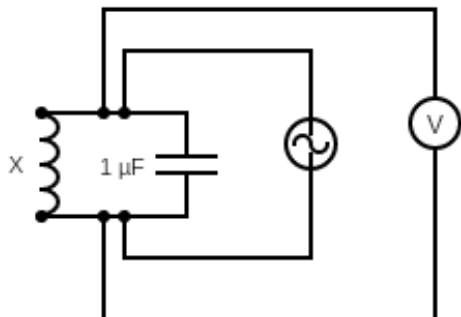
Slika 7: Tuljave z različnim številom ovojev

Na začetku poskusa nas zanima resonančna frekvenca oddajnega vezja, kjer sta vzporedno vezana izbrana tuljava in kondenzator z neko določeno induktivnostjo ter kapaciteto.



Shema 4: Oddajno vezje za meritev resonančne frekvence

Nato v novo vezje povežemo kondenzator z določeno znano kapaciteto in tuljavo (ki jo spreminjamo, glede na število ovojev) ter merimo resonančno frekvenco za vsako vezje posebej, da lahko določimo induktivnosti tuljav.



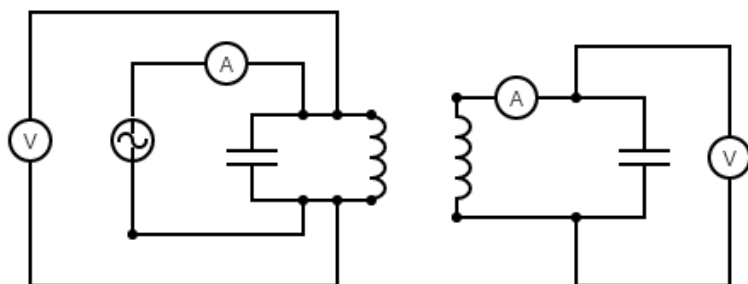
Shema 5: Vezje s kondenzatorjem z določeno znano kapaciteto za merjenje resonančne frekvence

Ko izračunamo induktivnosti tuljav, uporabimo fiksno resonančno frekvenco oddajnega vezja in izračunamo potrebne kapacitete kondenzatorjev za vezavo k vsaki tuljavi, tako da imajo vsa sprejemna vezja enako resonančno frekvenco kot oddajno vezje. Izdelamo kondenzatorje z iskanimi nadomestnimi kapacitetami.

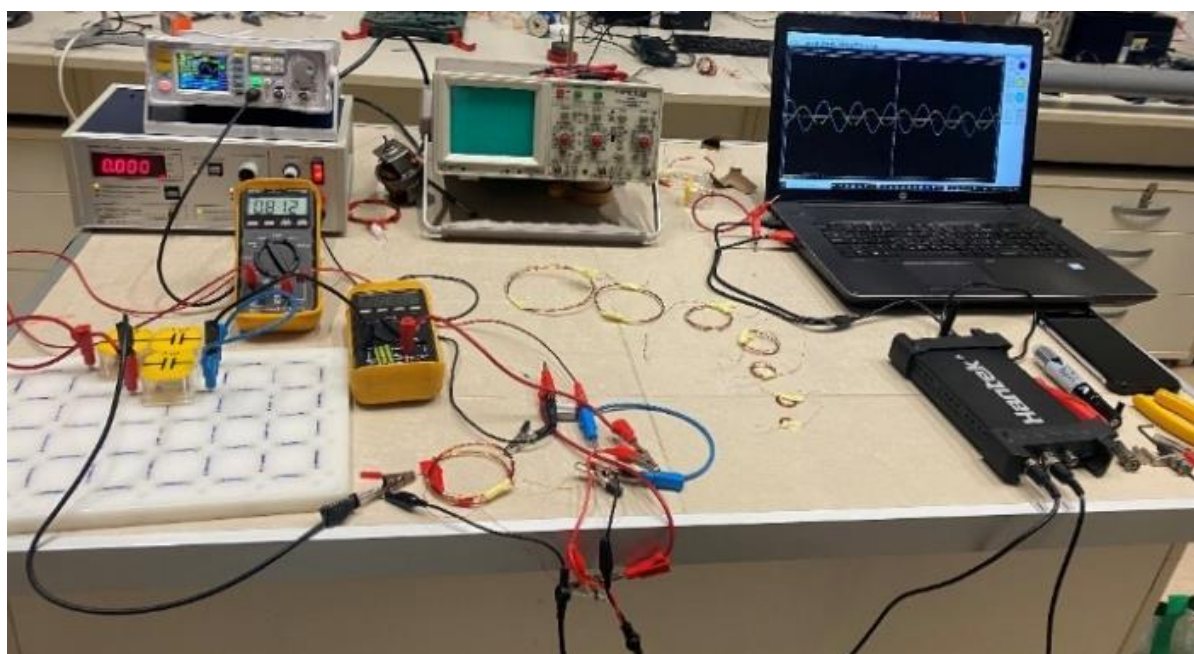


Slika 8: Kondenzatorji z nadomestno kapaciteto

Sestavimo sprejemno vezje s kondenzatorjem, ki ustreza tuljavi. Na funkcijskem generatorju nastavimo resonančno frekvenco oddajnega vezja in v obe vezji dodamo še ampermeter in osciloskop, da lahko merimo amplitudi toka in napetosti ter tako računamo povprečno preneseno moč.



Shema 6: Oddajno in sprejemno vezje



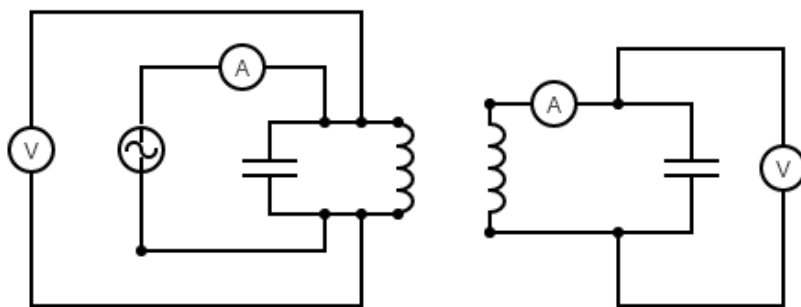
Slika 9: Oddajno in sprejemno vezje

3.4 EKSPERIMENT ZA ČETRTO HIPOTEZO

Glede na četrto hipotezo, ki se nanaša na polmer, izdelamo tuljave z različnimi polmeri ($r_1 = 5,4 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$, $r_2 = 7,8 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$, $r_3 = 12,4 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$, $r_4 = 15,8 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$, $r_5 = 24,2 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$, $r_6 = 32,6 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$, $r_7 = 39,0 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$, $r_8 = 47,8 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$). Vezje in potek poskusa ostajata enaka kot pri tretjem eksperimentu, le da v tem primeru spreminjamo tuljave, ki se razlikujejo po velikosti polmera.



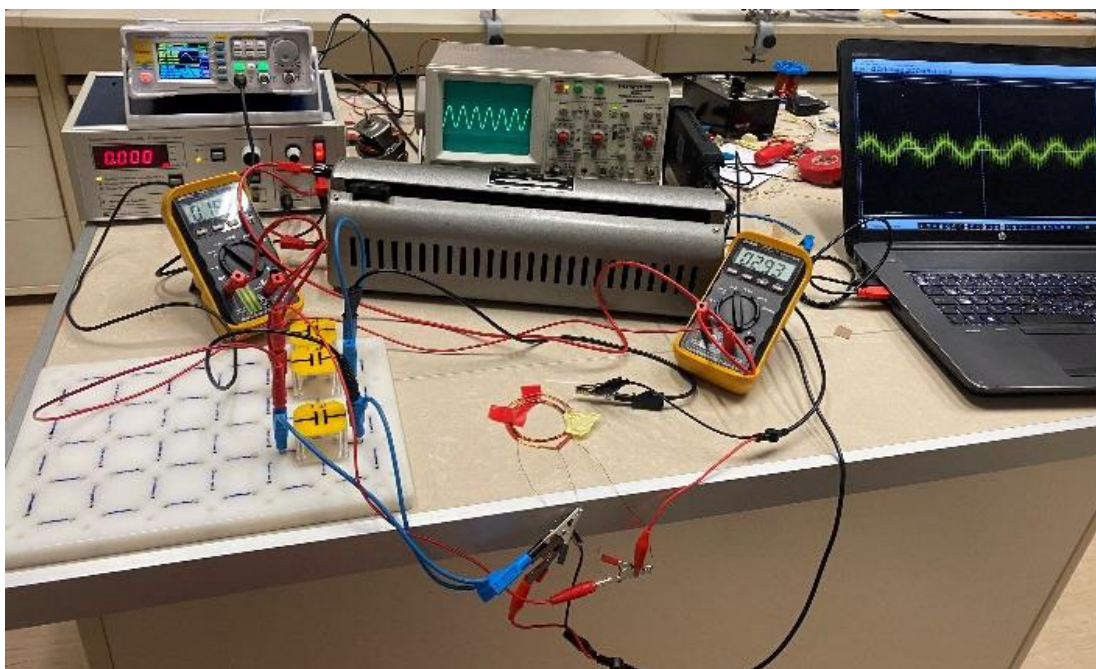
Slika 10: Tuljave z različnimi polmeri



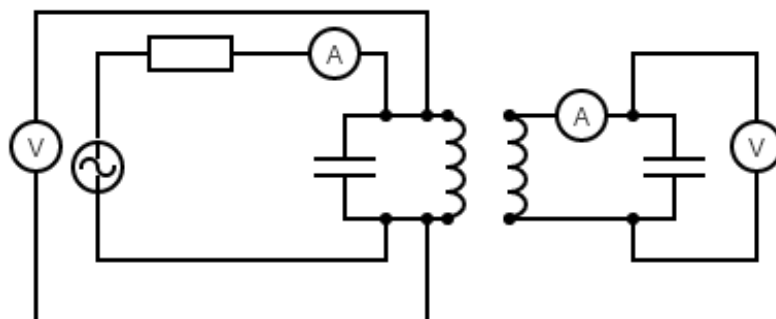
Shema 7: Oddajno in sprejemno vezje

3.5 EKSPERIMENT ZA PETO HIPOTEZO

Pri petem poskusu uporabimo že znano oddajno in sprejemno vezje, le da v oddajnem vezju zaporedno za virom izmenične napetosti vežemo potenciometer (upornik, ki mu lahko reguliramo upor). S spreminjanjem upora na oddajnem vezju spreminjamo tok na tuljavi in lastnosti magnetnega polja in vplivamo na povprečno preneseno moč. Podobno kot v eksperimentih tri in štiri merimo amplitudo toka ter napetosti.



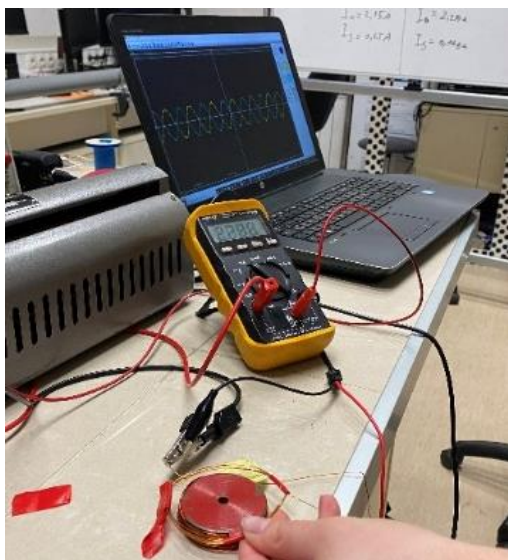
Slika 11: Oddajno vezje s potenciometrom in nespremenjeno sprejemno vezje



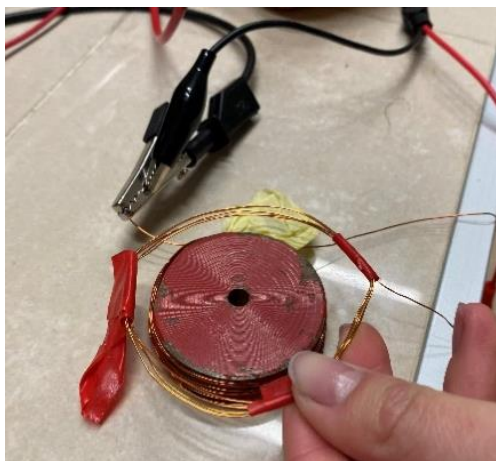
Shema 8: Oddajno vezje s potenciometrom in sprejemno vezje

3.6 EKSPERIMENT ZA ŠESTO HIPOTEZO

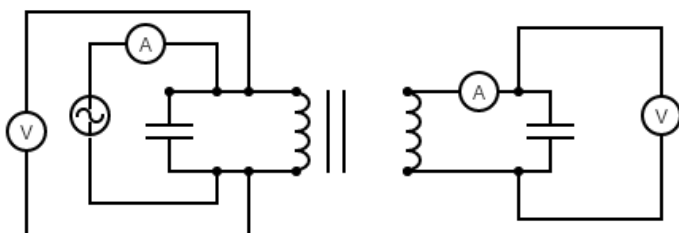
Pri šestem eksperimentu ponovno uporabimo že znano oddajno in sprejemno vezje, le da v oddajno tuljavo dodamo feromagnetno jedro, ki se ujema z velikostjo tuljave. Izmerimo amplitude toka in napetosti na sprejemnem in oddajnem vezju.



Slika 12: Slika oddajnega vezja s tuljavo s feromagnetnim jedrom in sprejemnega vezja



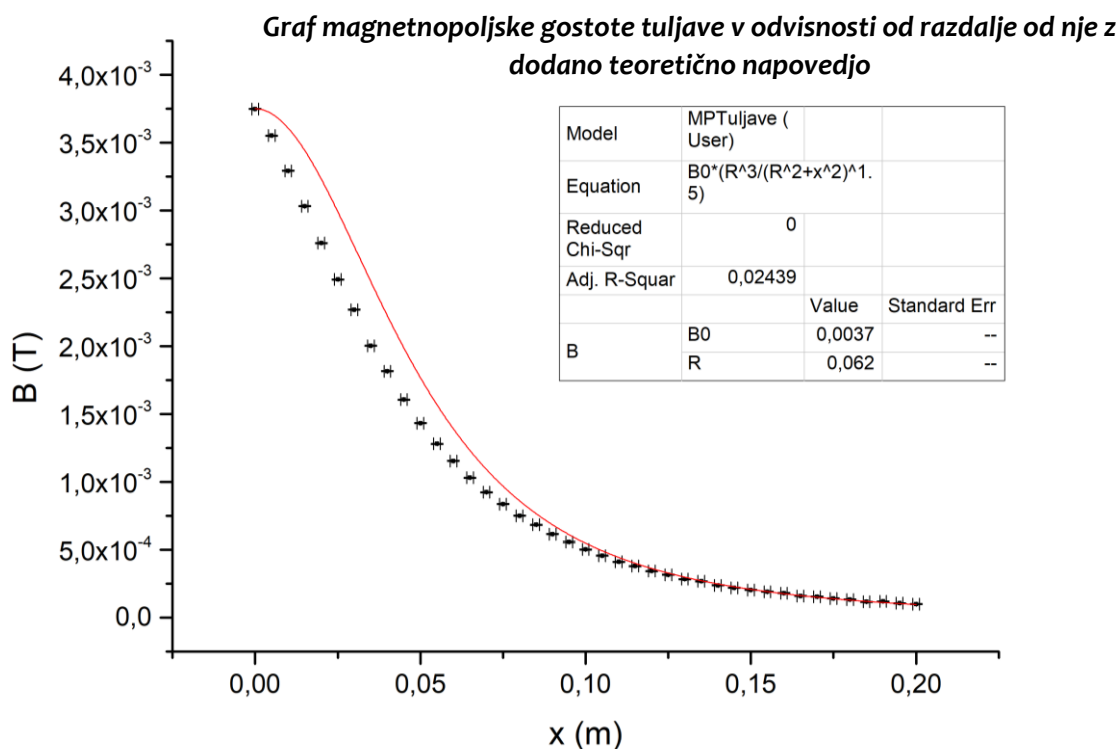
Slika 13: Slika tuljav



Shema 9: Oddajno vezje s feromagnetnim jedrom in sprejemno vezje

4 REZULTATI Z RAZPRAVO

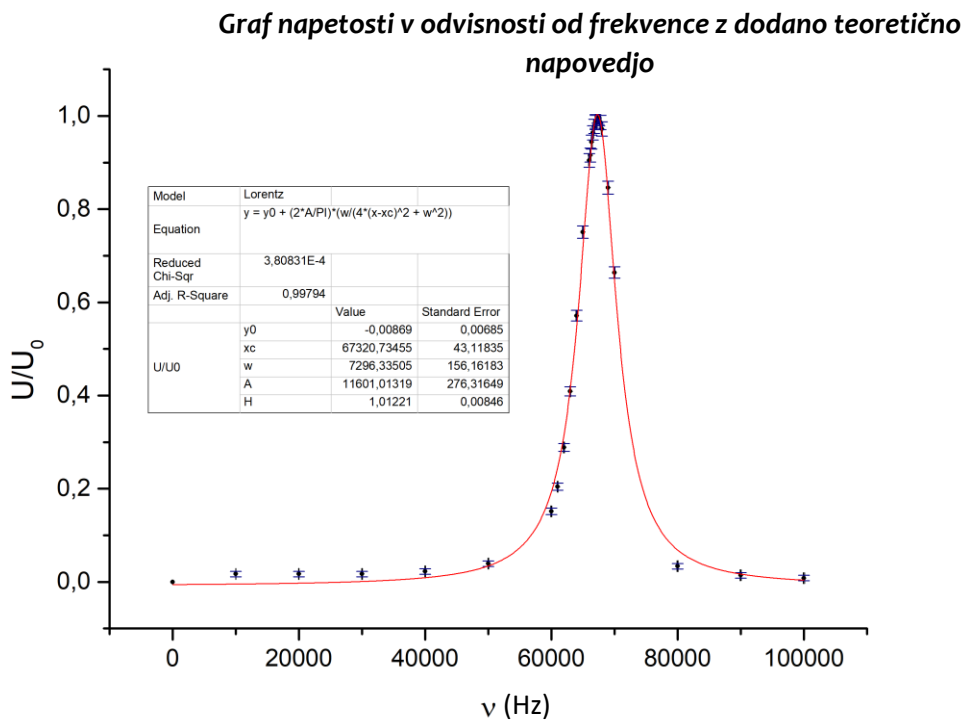
4.1 REZULTATI PRVEGA EKSPERIMENTA



Graf 5: Graf magnetnopoljske gostote tuljave v odvisnosti od razdalje od nje z dodano teoretično napovedjo

Izmerjeni podatki se kvalitativno ujemajo s teoretično napovedjo, medtem ko se kvantitativno ne. Odstopanje, manjša gostota magnetnega polja, ni moteče, ker so v prostoru tudi druge naprave, ki jo zmanjšujejo. Z diagrama razberemo monotono padanje funkcije, kar pomeni, da je pri najmanjši razdalji gostota magnetnega polja največja. Na podlagi razbranega potrjujem hipotezo, da se z manjšanjem razdalje med sprejemno in oddajno tuljavo večja povprečna prenesena moč in to ugotovitev upoštevam pri nadaljnjih eksperimentih.

4.2 REZULTATI DRUGEGA EKSPERIMENTA

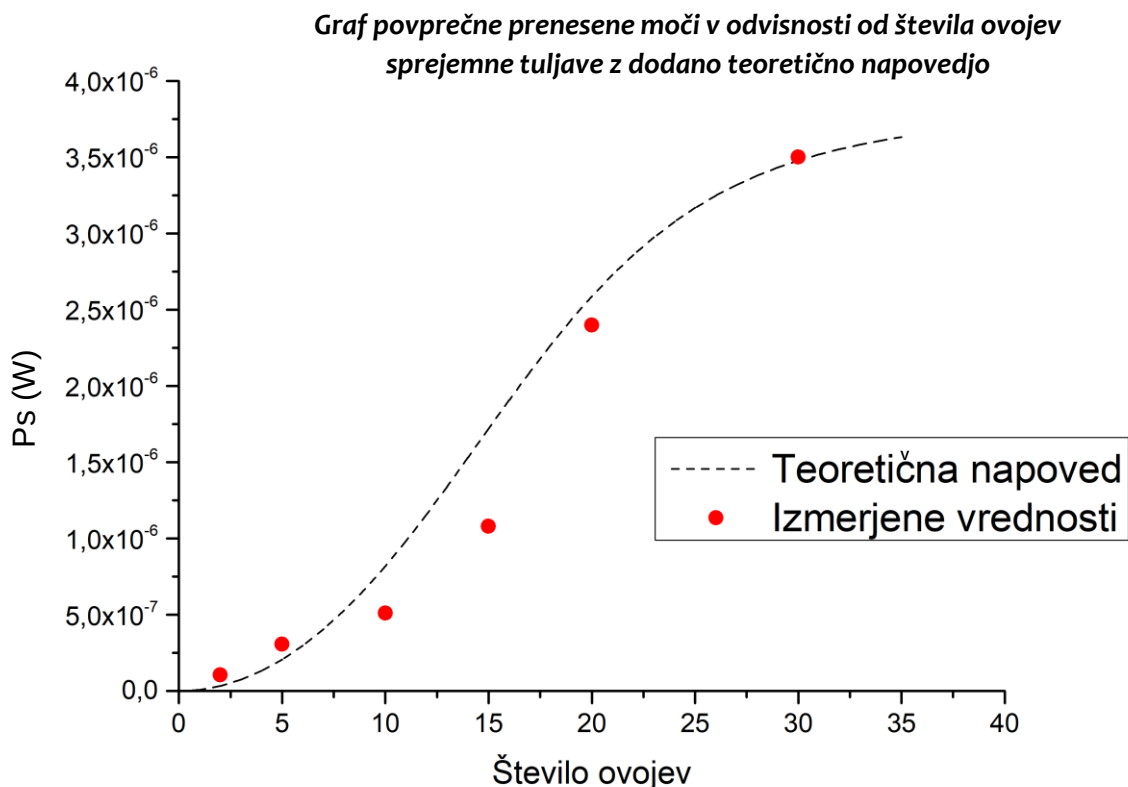


Graf 6: Graf napetosti v odvisnosti od frekvence z dodano teoretično napovedjo

Iz izmerjenih podatkov je jasno razviden strm skok napetosti na vezju pri njegovi lastni frekvenci. V lastni frekvenci je tudi fazni premik med tokom in napetostjo enak 0, torej je prenesena moč največja, kar potrjuje drugo hipotezo. Skupaj s prvo hipotezo postavi osnovo za nadaljnje delo, ki temelji na minimalni razdalji med tuljavama in resonančni sklopitvi obeh vezij.

Podobno analizo smo izvedli za vse različne tuljave (optimizacija po polmeru in ovojih), vendar vseh grafov nismo prikazali v nalogi, smo pa uporabili končne rezultate njihovih prilagoditvenih funkcij.

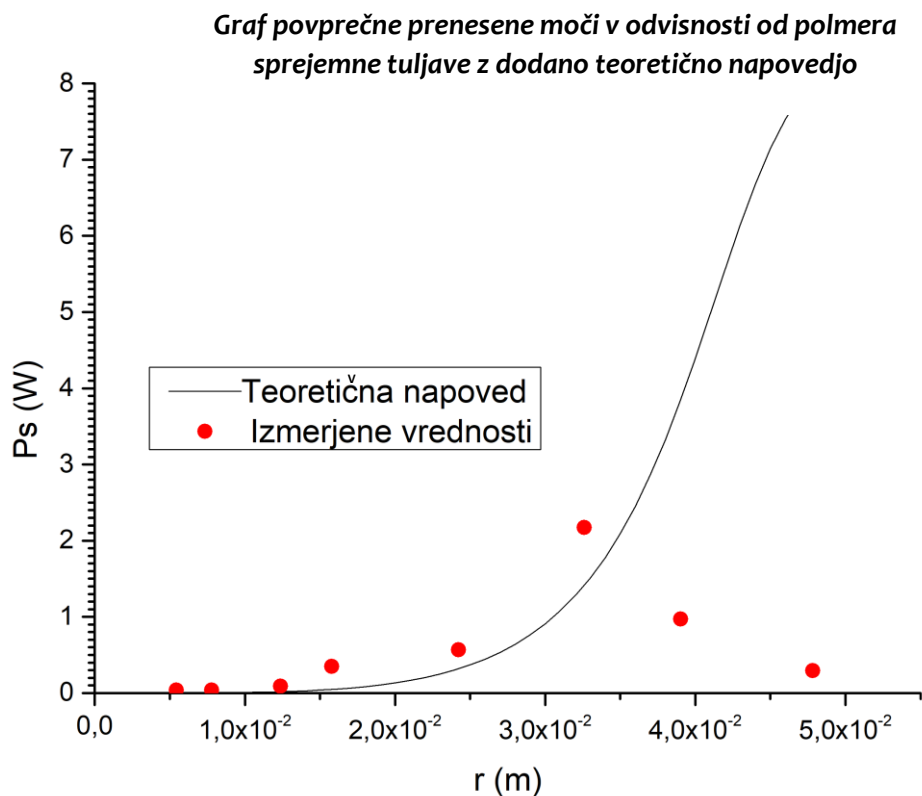
4.3 REZULTATI TRETJEGA EKSPERIMENTA



Graf 7: Graf povprečne prenesene moči v odvisnosti od števila ovojev sprejemne tuljave z dodano teoretično napovedjo

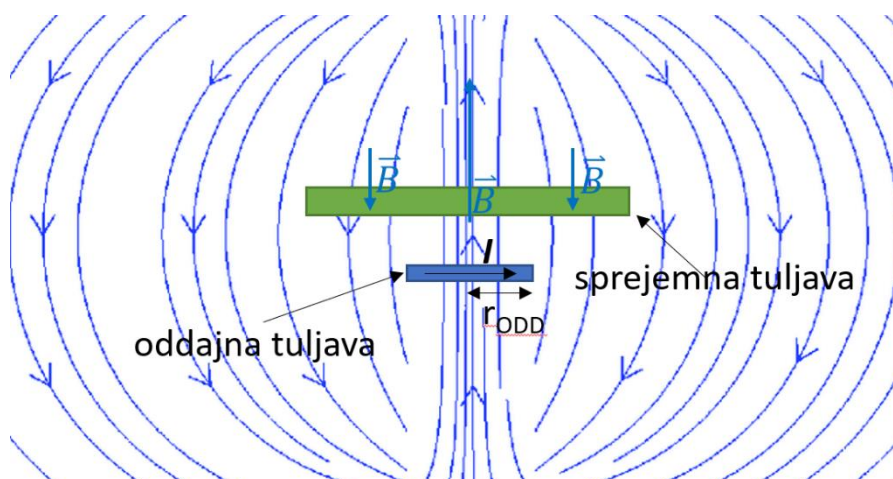
Teorija napoveduje monotono povečevanje povprečne prenesene moči do nekega števila ovojev (v našem primeru okoli 35). Z nadaljnjim večanjem števila ovojev se povprečna prenesena moč sicer povečuje, ampak je povečanje moči glede na povečanje števila ovojev zelo majhno (Funkcija je položna. Odvod funkcije je pozitiven, a zelo majhen.). Pri meritvah se sicer pojavljajo odstopanja, ki jih lahko pripišemo neenakomernosti tuljav in ostalim motečim elektromagnetnim valovanjem v prostoru. Z dobrim ujemanjem izmerjenih vrednosti in teoretične napovedi potrjujem tretjo hipotezo, ki pravi, da za naš sistem obstaja število ovojev sprejemne tuljave, pri katerem je povprečna prenesena moč največja. Z ozirom na omejitve, ki jih predstavlja velikost mobilnih naprav, števila ovojev ne moremo povečevati v nedogled, temveč se zadovoljimo, ko postane naša funkcija položnejša.

4.4 REZULTATI ČETRTEGA EKSPERIMENTA



Graf 8: Graf povprečne prenesene moči v odvisnosti od polmera sprejemne tuljave z dodano teoretično napovedjo

Teorija predvideva rast povprečne prenesene moči z večanjem polmera sprejemne tuljave. Do nekega polmera se izmerjene vrednosti dokaj dobro podrejajo teoretični napovedi. Pri polmerih večjih od 3,5 cm, pa teorija popolnoma odpove. Razlog za odstopanje vidimo na sliki 14.

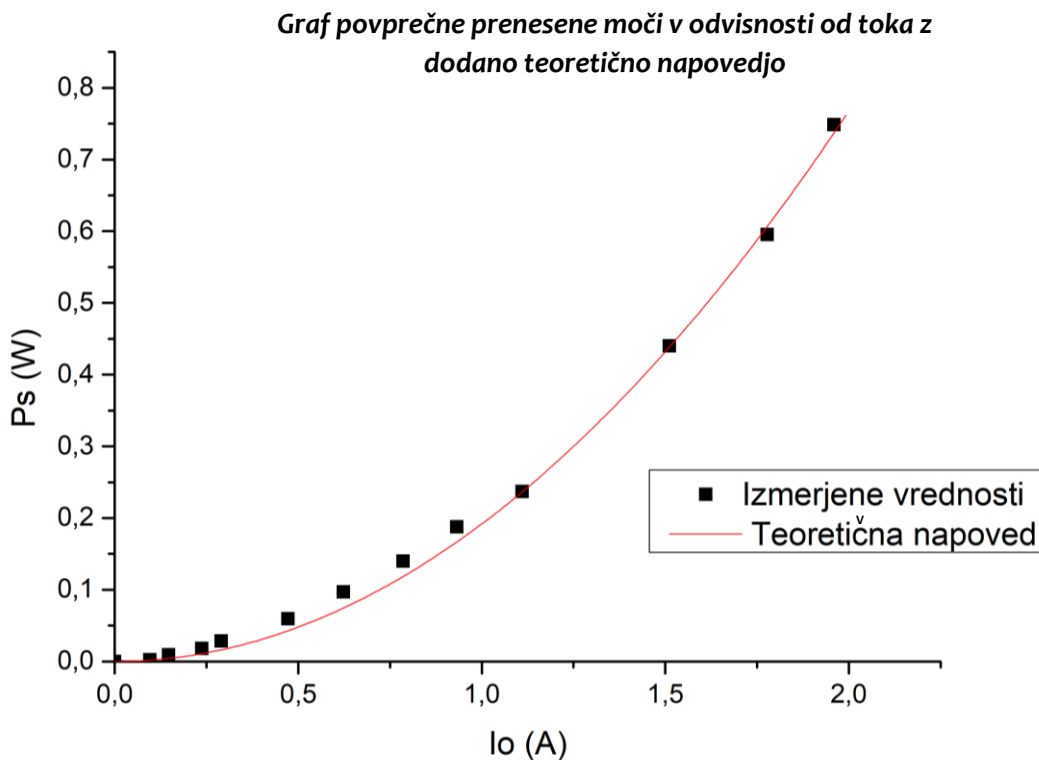


Slika 14: Vpliv gostote magnetnega polja oddajne tuljave na sprejemno tuljavo

Na sliki je prikazano magnetno polje oddajne tuljave v nekem trenutku. Vidimo, da so vse magnetne silnice, ki potekajo skozi sprejemno tuljavo, do velikosti polmera oddajne tuljave, usmerjene navzgor. V istem trenutku pa so vse silnice zunaj tega polmera usmerjene v nasprotno smer. To drži v vsakem trenutku. Prav te nasprotno usmerjene silnice zmanjšujejo magnetni pretok skozi sprejemno tuljavo in s tem inducirano napetost na njej. Od tod torej razlog za manjšo preneseno moč pri preseženem polmeru. Kritična velikost polmera sprejemne tuljave je velikost polmera oddajne tuljave.

Potrjujem četrto hipotezo, ki pravi, da za naš sistem obstaja polmer sprejemne tuljave, pri katerem je povprečna prenesena moč največja.

4.5 REZULTATI PETEGA EKSPERIMENTA



Graf 9: Graf povprečne prenesene moči v odvisnosti od toka z dodano teoretično napovedjo

Teorija napoveduje kvadratno odvisnost prenesene moči od amplitude dovedenega toka na oddajno vezje. To napoved meritve odlično potrdijo in s tem tudi peto hipotezo, ki pravi, da za naš sistem obstaja vrednost toka na oddajni tuljavi, pri katerem je povprečna prenesena moč največja. Teoretična napoved predvideva rast prenesene moči tudi preko izmerjenih vrednosti, vendar elementi vezij tega ne bi prenesli.

4.6 REZULTATI ŠESTEGA EKSPERIMENTA

Z dodajanjem feromagnetnega jedra oddajni tuljavi močno povečamo gostoto njenega magnetnega polja. To povečanje vpliva na inducirano napetost na sprejemni tuljavi, kar se lepo pokaže s povečanjem povprečne prenesene moči. S tem potrjujem šesto hipotezo, ki pravi, da dodatek feromagnetnega jedra v oddajno tuljavo poveča povprečno preneseno moč.

	U [V]	I [A]	P [W]	Ps/Po
oddajno	2,13	2,28	4,86	5,1 %
sprejemno	1,43	0,18	0,25	

Tabela 1: Meritve oddajnega in sprejemnega vezja brez dodanega feromagnetnega jedra

	U [V]	I [A]	P [W]	Ps/Po
oddajno	1,93	2,15	4,15	6,7 %
sprejemno	1,13	0,25	0,28	

Tabela 2: Meritve oddajnega in sprejemnega vezja z dodanim feromagnetnim jedrom

5 ZAKLJUČEK

V raziskovalni nalogi smo teoretično in eksperimentalno raziskali nekatere lastnosti vezij za brezžični prenos energije. Teoretični model je podal parametre, ki smo jih nato raziskali še eksperimentalno in v večini primerov opazili dobro ujemanje teorije in poskusov. Vsa razhajanja smo poskusili čim bolje pojasniti z razumljivimi fizikalnimi teorijami, ki nadgrajujejo naš matematični model. Za izdelavo te naloge smo pripravili več kot dvajset različnih vezij in na njih opravili številne meritve. Navkljub obširnosti eksperimentalnega dela pa teorija napoveduje nekaj parametrov, ki jih je treba še raziskati. Predvsem velja bolje preučiti oddajno vezje in možnosti njegove optimizacije za uporabo s prenosnimi napravami. V prihodnje moramo več pozornosti usmeriti v zunanje dejavnike, ki nezanemarljivo vplivajo na naša vezja.

Če bi se ponovno lotili izdelave te naloge, bi se še bolj osredotočili na razširitev matematičnega modela, ki bi še točneje napovedal optimalne pogoje brezžičnega prenosa energije. V bodoče bi na podlagi ugotovitev poskusili izdelati učinkovit polnilec.

Raziskovanje mi je odstrlo drugačno plat fizike in matematike. Naučila sem se uporabljati mnogo programskih orodij, ki mi bodo koristila pri nadaljnjem izobraževanju in delu. Poblíž sem spoznala tudi laboratorijsko opremo, ki je do sedaj še nisem uporabljala. Vse pridobljene veščine bom lahko s pridom uporabljala v prihodnosti.

VIRI IN LITERATURA

- Bekaroo, G. in Seeam, A. (2016). *Improving wireless charging energy efficiency of mobile phones: analysis of key practices*. V IEEE International conference on emerging technologies and innovative business practices for the transformation of societies (EmergiTech) (str. 357-360).
- Halliday, D., Resnick, R. in Walker, J. (2013). *Fundamentals of physics*. John Wiley and Sons.
- Jenko, M. (1961). *Elektrotehnika* [online]. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo. Dostopno na spletnem naslovu: https://www.fs.uni-lj.si/fakulteta_za_strojinstvo/zalozba/e_publikacije/2017070515164631/Elektrotehnika/
- Mohorič, A. in Babič, V. (2015). *Fizika 3: Učbenik za fiziko v 3. letniku gimnazij in štiriletnih strokovnih šol*. Ljubljana: Mladinska knjiga. ISBN 978-961-01-2653-9
- Shinohara, N. (2018). *Wireless power transfer: Theory, technology, and applications*. London: Institution of Engineering and Technology.
- Zhong, W., Xu, D. in Hui, R. S. Y. (2020). *Wireless power transfer: Between distance and efficiency*. Singapore: Springer Nature. ISBN 978-981-15-2441-7
- Snov v magnetnem polju. (b.d.). Pridobljeno s https://si.openprof.com/wb/snov_v_magnetnem_polju?ch=212

IZJAVA*

Mentorja Mitja Suvajac in Mihael Gojkošek v skladu z 20. členom Pravilnika o organizaciji mladinske raziskovalne dejavnosti »Mladi za Celje« Mestne občine Celje, zagotavlja, da je v raziskovalni nalogi z naslovom Optimizacija brezžičnega prenosa energije in polnjenje mobilnih naprav, katere avtor/-ica je Ida Pintar:

- besedilo v tiskani in elektronski obliki istovetno,
- pri raziskovanju uporabljeno gradivo navedeno v seznamu uporabljene literature,
- da je za objavo fotografij v nalogi pridobljeno avtorjevo dovoljenje in je hranjeno v šolskem arhivu,
- da sme Osrednja knjižnica Celje objaviti raziskovalno nalogo v polnem besedilu na knjižničnih portalih z navedbo, da je raziskovalna naloga nastala v okviru projekta Mladi za Celje,
- da je raziskovalno nalogo dovoljeno uporabiti za izobraževalne in raziskovalne namene s povzemanjem misli, idej, konceptov oziroma besedil iz naloge ob upoštevanju avtorstva in korektnem citiranju,
- da smo seznanjeni z razpisni pogoji projekta Mladi za Celje.

Celje, 22. 3. 2022



Podpis mentorja

Podpis odgovorne osebe

*

POJASNILO

V skladu z 20. členom Pravilnika raziskovalne dejavnosti »Mladi za Celje« Mestne občine Celje je potrebno podpisano izjavo mentorja (-ice) in odgovorne osebe šole vključiti v izvod za knjižnico, dovoljenje za objavo avtorja (-ice) fotografskega gradiva, katerega ni avtor (-ica) raziskovalne naloge, pa hrani šola v svojem arhivu.