

# IZVEDBA PREDAJNE ZAVOJNICE U SUSTAVU BEZI CNOG PRIJENOSA ENERGIJE S HOMOGENOM RAZDIOBOM MAGNETSKOG POLJA

---

**Bilandžija, Domagoj**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:162760>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-24**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA

Domagoj Bilandžija

**IZVEDBA PREDAJNE ZAVOJNICE U  
SUSTAVU BEŽIČNOG PRIJENOSA  
ENERGIJE S HOMOGENOM  
RAZDIOBOM MAGNETSKOG POLJA**

Doktorska disertacija

Osijek, 2023.

Doktorska je disertacija izrađena na:

Zavodu za komunikacije,

Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek,

Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

**Mentor:** izv. prof. dr. sc. Davor Vinko

Disertacija ima 151 stranicu.

Doktorska disertacija broj: 90

### **Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:**

1. izv. prof. dr. sc. Vanja Mandrić, FERIT Osijek, predsjednica
2. izv. prof. dr. sc. Marinko Barukčić, FERIT Osijek, član
3. prof. dr. sc. Marin Golub, FER Zagreb, vanjski član
4. izv. prof. dr. sc. Emmanuel Karlo Nyarko, FERIT Osijek, zamjenik člana

### **Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:**

1. izv. prof. dr. sc. Vanja Mandrić, FERIT Osijek, predsjednica
2. izv. prof. dr. sc. Marinko Barukčić, FERIT Osijek, član
3. prof. dr. sc. Marin Golub, FER Zagreb, vanjski član
4. izv. prof. dr. sc. Emmanuel Karlo Nyarko, FERIT Osijek, zamjenik člana

**Datum obrane doktorske disertacije:** 18.01.2023.

# Sadržaj

	Stranica
1. Uvod . . . . .	1
2. Bežični prijenos energije posredstvom oscilirajućih magnetskih polja . . . . .	4
2.1. Induktivni bežični prijenos energije . . . . .	4
2.2. Rezonantni induktivni bežični prijenos energije . . . . .	9
2.2.1. Topologije sustava rezonantnog induktivnog WPT s dvije zavojnice . . . . .	12
2.2.2. Razdvajanje frekvencije u sustavu rezonantnog induktivnog WPT . . . . .	19
2.2.3. Prilagodba impedancije . . . . .	24
2.2.4. Homogeno magnetsko polje predajne zavojnice. . . . .	31
3. Postupak određivanja geometrije dvoslojne 3D predajne zavojnice s homogenom razdiobom magnet-skog polja u ravnini napajanja . . . . .	46
3.1. Postupak određivanja strukture 3D predajne zavojnice . . . . .	49
3.1.1. Postupak određivanja varijabli drugog sloja zavojnice, $W_2$ i $D_2$ . . . . .	51
3.1.2. Optimizacija dubine zavojnice $D$ . . . . .	61

3.2. Mjerenja. . . . .	64
4. Optimizacija 3D predajne zavojnice s homogenom razdiobom magnetskog polja u ravnini napajanja uz pomoć populacijskog algoritma i algoritama iz skupine evolucijskog računanja . . . . .	69
4.1. Kosimulacija <i>Python-FEMM</i> u svrhu optimizacije 2D modela zavojnice . . . . .	73
4.1.1. Optimizacija četiri varijable odluke 2D modela zavojnice <i>MIDACO</i> alatom. . . . .	77
4.1.2. Optimizacija četiri varijable odluke 2D modela zavojnice jednostavnim genetskim algoritmom iz <i>pygmo</i> biblioteke. . . . .	88
4.1.3. Optimizacija četiri varijable odluke 2D modela zavojnice diferencijalnom evolucijom iz <i>pygmo</i> biblioteke . . . . .	92
4.1.4. Optimizacija tri varijable odluke 2D modela zavojnice uz korištenje <i>MIDACO</i> , SGA i DE za h=30 mm. . . . .	96
4.2. Optimizacija varijabli odluke 2D i 3D modela zavojnice genetskim algoritmom u Ansys Maxwell-u . . . . .	100
4.2.1. Optimizacija dvije varijable odluke 2D modela zavojnice . . . . .	100
4.2.2. Optimizacija 3D modela zavojnice . . . . .	106
4.3. Mjerenja. . . . .	114
5. Zaključak. . . . .	119

Literatura . . . . .	122
Popis slika . . . . .	132
Popis tablica . . . . .	139
A. PRILOZI . . . . .	141
A.1. . . . .	141
A.2. . . . .	142
B. POPIS KRATICA . . . . .	145
SAŽETAK . . . . .	147
ABSTRACT . . . . .	149
BIOGRAFIJA . . . . .	151

# 1. Uvod

Prvi su zabilježeni eksperimenti s bežičnim prijenosom energije (engl. *Wireless Power Transfer, WPT*) izvedeni krajem 19. i početkom 20. stoljeća. Od tada pa sve do danas proučava se WPT koji se može klasificirati s obzirom na fizikalnu veličinu koja je posrednik prijenosa energije. Prema tome, u induktivnom se prijenosu energije koristi promjenjivo magnetsko polje (blisko polje), promjenjivo električno polje omogućuje kapacitivni prijenos energije te se radijacija elektromagnetskih valova (daleko polje) koristi pri prijenosu preko većih udaljenosti u usporedbi s prve dvije tehnike. Istraživanje opisano u ovoj disertaciji smješteno je u kontekst induktivnog bežičnog prijenosa energije.

U poglavlju koje slijedi uspoređuju se induktivni i rezonantni induktivni sustav za bežični prijenos energije. Nakon što je potvrđeno da je rezonantni induktivni sustav za bežični prijenos energije učinkovitiji za veće udaljenosti prijenosa (engl. *Transfer Distance*) i višekorisničko okruženje (engl. *Multiple Receiver System*) navedene su topologije rezonantnog induktivnog sustava za bežični prijenos energije između dvije zavojnice. Zatim su analizirani problemi koji se pojavljuju pri upotrebi rezonantnog induktivnog sustava za bežični prijenos energije. Dva istaknuta problema koji se pojavljuju pri rezonantnom induktivnom prijenosu energije su neusklađenost impedancija (engl. *Impedance Mismatching*) i razdvajanje frekvencije (engl. *Frequency Splitting*). Kroz pregled literature predstavljena su predložena rješenja tih



problema. Najviše pažnje pridaje se rješenjima koja specifičnim dizajnom predajne zavojnice (engl. *Transmitting Coil, TX Coil*) generiraju homogeno magnetsko polje (engl. *Homogeneous Magnetic Field*). Na kraju 2. poglavlja navedena je daljnja struktura ove doktorske disertacije koja je podijeljena na dva veća poglavlja u kojima su opisani ciljevi i metodologije korištene u znanstvenim istraživanjima na čijim su temeljima ostvareni znanstveni doprinosi.

Oba se poglavlja (3. i 4. poglavlje) bave optimizacijom TX zavojnice kako bi se generiralo homogeno polje. Simulacijama se u različitim programskim paketima računa magnetsko polje TX zavojnice. U 3. se poglavlju koristi iscrpno pretraživanje (engl. *Exhaustive Search*) za određivanje optimalne geometrije 3D predajne zavojnice za generiranje homogene razdiobe magnetskog polja. Nakon toga, u 4. se poglavlju opisuje primjena metaheurističkih algoritama koji se temelje na populaciji (engl. *Population-Based*) te onih koji pripadaju skupini algoritama evolucijskog računanja (engl. *Evolutionary Computation, EC*) za određivanje optimalnog dizajna TX zavojnice s homogenom distribucijom magnetskog polja.

Kao dodatna varijabla odluke (engl. *Decision Variable*) u optimizaciji strukture 3D TX zavojnice s homogenim magnetskim poljem, uvedena je i raspodjela struje te se optimizacija 3D TX zavojnice izvodi u dva koraka: optimizacija 2D modela 3D TX zavojnice i optimizacija 3D modela iste zavojnice uz korištenje ranije određenih optimalnih rješenja iz optimizacije 2D modela zavojnice. Temeljna je struktura 3D TX zavojnice određena iscrpnim pretraživanjem, a zavojnica optimirana populacijskim algoritmom i algoritmima evolucijskog računanja posjeduje bolja svojstva u smislu veće jakosti magnetskog polja (veći prijenos energije), većeg područja u kojem je prisutno

homogeno polje i manjeg profila odnosno dubine zavojnice. Ideja optimizacije 3D TX zavojnice u dva koraka je smanjenje trajanja optimizacije 3D modela zavojnice uslijed već ranije određenih optimalnih rješenja iz optimizacije 2D modela zavojnice. Općenito je optimizacija 2D modela značajno manje vremenski zahtjevna u usporedbi sa simulacijama odnosno optimizacijom nekog 3D modela.

## 2. Bežični prijenos energije posredstvom oscilirajućih magnetskih polja

### 2.1. Induktivni bežični prijenos energije

Bežični prijenos energije između dva ili više induktivno, tj. magnetski povezanih električnih krugova temelji se na pojavi koju opisuje Faraday-Lenzov zakon o elektromagnetskoj indukciji. Ako se zavojnica nalazi unutar oscilirajućeg magnetskog polja, na njezinim se priključnicama inducira napon. Struja, kao posljedica induciranog napona, koja bi tada potekla zavojnicom bila bi takvog smjera da generira magnetsko polje koje nastoji poništiti trenutnu promjenu magnetskog polja koje je induciralo napon u zavojnici. Matematički je zapis Faraday-Lenzovog zakona:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt}, \quad (2-1)$$

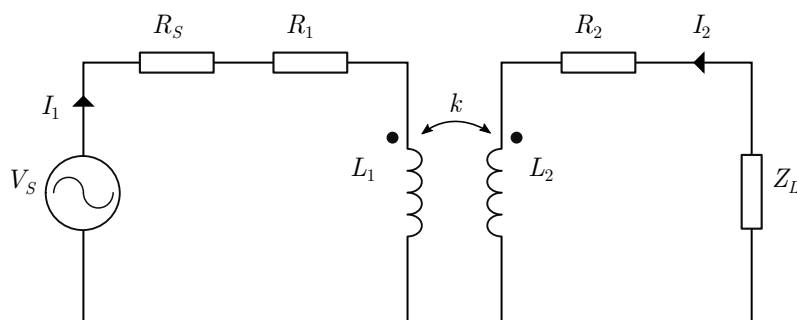
gdje je  $e$  trenutna vrijednost induciranog napona na krajevima zavojnice koja se nalazi u oscilirajućem magnetskom polju,  $N$  broj namota zavojnice na kojoj se inducira napon  $e$  i  $d\phi/dt$  brzina promjene magnetskog toka  $\phi$  u vremenu  $t$ .

Primjer induktivnog bežičnog prijenosa energije je prijenos energije u transformatoru s primarne na sekundarnu zavojnicu. Kako su u transformatoru zavojnice magnetski povezane magnetskim tokom koji cirkulira feromagnet-

skom jezgrom ( $\mu_{\text{Fe}} = 4000$ , [1]), karakteristična je jaka magnetska veza između primarne i sekundarne zavojnice. Drugim riječima, faktor magnetske veze  $k$  (engl. *Coupling Coefficient*) je visokog iznosa, ( $k \approx 1$ ), rasipni magnetski tok je vrlo mali u usporedbi s glavnim magnetskim tokom koji povezuje dvije zavojnice transformatora.

S druge strane, sustav WPT koji primjenjuje induktivni bežični prijenos energije preko određene udaljenosti između predajne zavojnice i prijemne zavojnice (engl. *Receiving Coil, RX Coil*) najčešće se događa u zraku, vodi ( $\mu_{\text{zrak}} \approx \mu_{\text{voda}} \approx 1$ , [1]) i ljudskom tkivu čija relativna magnetska permeabilnost nije specificirana u postojećoj literaturi, ali se pretpostavlja da je približno jednaka broju jedan. Stoga je u takvom okruženju značajno slabija magnetska veza između dvije magnetski vezane zavojnice u usporedbi s magnetskom vezom primara i sekundara transformatora.

Cilj je sustava induktivnog WPT učinkovit prijenos energije s predajne na prijemnu zavojnicu. Kako bi se ispitala učinkovitost sustava induktivnog WPT, kojeg čine jedna predajna i jedna prijemna zavojnica, modelirane su dvije identične planarne spiralne zavojnice u *Ansys Maxwell*-u te je provedena simulacija elektromagnetskih polja za različite udaljenosti između zavojnica. Zavojnice su postavljene koaksijalno i svaka se sastoji od 12 namotaja. Simulacijom za različite udaljenosti između zavojnica dobiveni su samoinduk-



**Slika 2.1:** Električna shema sustava za induktivni bežični prijenos energije

tiviteti  $L_1 = L_2$ , međuintuktivitet  $M$  i faktor magnetske veze  $k$ . Na temelju poznatih vrijednosti  $L_1$ ,  $L_2$  i  $k$  za tri različite udaljenosti prijenosa, konstruirana je električna shema u *Simplorer*-u (*Ansys Maxwell* simulator) prikazana na slici 2.1. Samoinduktivitet  $L_1$  predstavlja predajnu, a samoinduktivitet  $L_2$  prijemnu zavojnicu. Osim  $L_1$ , predajni podsustav čine izmjenični izvor električne energije  $V_S$ , unutarnji otpor tog izvora  $R_S = 0.1 \Omega$  i otpor predajne zavojnice  $R_1 = 0.5 \Omega$ . Napon izvora  $V_S$  je sinusnog valnog oblika, amplitude 20 V i promjenjive frekvencije  $f$ , čiji je matematički zapis:

$$v(t) = 20 \sin(2\pi ft). \quad (2-2)$$

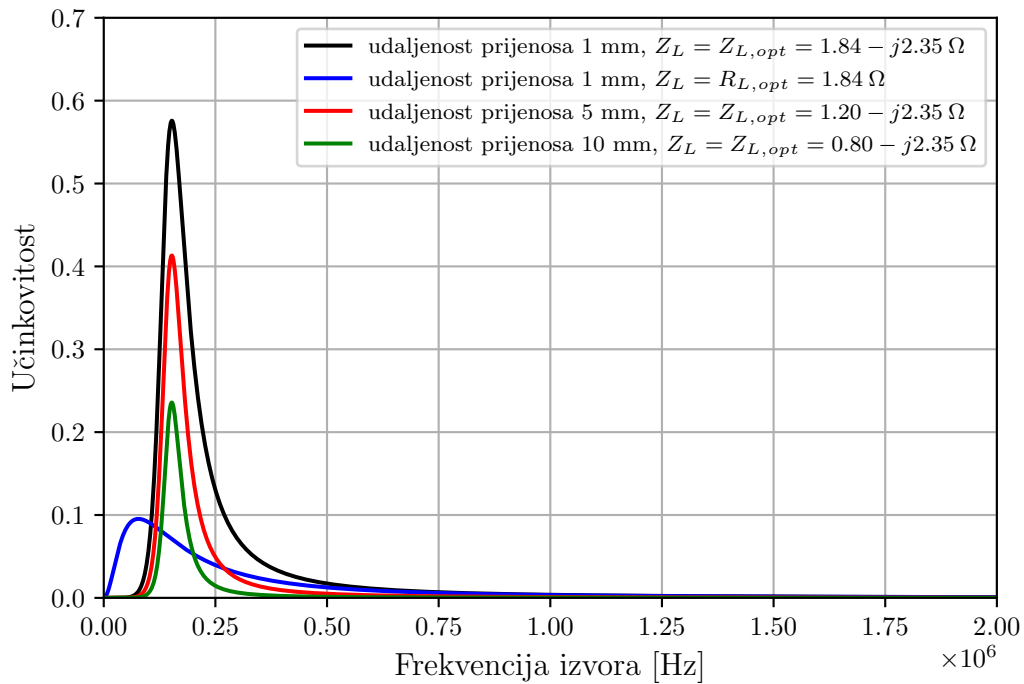
Prijemni se podsustav sastoji od prijemne zavojnice samoinduktiviteta  $L_2$ , otpora prijemne zavojnice  $R_2$  i impedancije trošila  $Z_L$ . Kako su zavojnice geometrijski identične i izrađene od bakra, vrijedi  $R_2 = R_1 = 0.5 \Omega$ . Ovdje je potrebno spomenuti da su iznosi otpora zavojnica sa slike 2.1 odabrani u skladu s do sada stečenim iskustvom o otporima zavojnica koji se koriste u bežičnom induktivnom prijenosu energije, [2, 3]. Iznosi samoinduktiviteta predajne i prijemne zavojnice su konstantni bez obzira na promjenu udaljenosti između njih pa za svaku udaljenost prijenosa u simulacijama vrijedi  $L_1 = L_2 = 2.493 \mu\text{H}$ . Međutim, promjenom udaljenosti između zavojnica mijenja se faktor magnetske veze, odnosno međuintuktivitet jer vrijedi:

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}. \quad (2-3)$$

Učinkovitost sustava za induktivni prijenos energije sa slike 2.1 može se odrediti prema sljedećem izrazu:

$$\eta = \frac{P_L}{P_{in}}, \quad (2-4)$$

prema kojem je učinkovitost  $\eta$  jednaka omjeru radne snage trošila i radne snage izvora. U proračunu se koriste efektivne vrijednosti struja i napona. Na slici 2.2 prikazana je frekvencijska karakteristika učinkovitosti prijenosa sustava sa slike 2.1 za različite udaljenosti prijenosa. Raspon je frekvencije izvora  $V_S$  od 0 do 2 MHz.



**Slika 2.2:** Učinkovitost u ovisnosti o frekvenciji izvora pri optimalnoj impedanciji za različite udaljenosti prijenosa - rezultati simulacije

Da bi se postigla maksimalna učinkovitost prijenosa preko neke udaljenosti potrebno je primjeniti optimalnu impedanciju trošila [4] koja je definirana izrazom:

$$Z_{L,opt} = R_2 \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2} - j\omega L_2. \quad (2-5)$$

Optimalna se impedancija trošila određuje za udaljenosti prijenosa energije od 1 mm, 5 mm i 10 mm. Potrebno je izračunati faktore dobrote predajne zavojnice,  $Q_1$ , i prijemne zavojnice,  $Q_2$ . Za izračun faktora dobrote obje

zavojnice koristi se izraz:

$$Q_{1,2} = \omega L_{1,2}/R_{1,2}, \quad (2-6)$$

pri frekvenciji izvora napajanja  $f = 150$  kHz, uz  $\omega = 2\pi f$ . Simulacijama je određen faktor magnetske veze,  $k$ , za navedene udaljenosti prijenosa energije. Iznosi su ostalih veličina iz izraza (2-5) poznati i navedeni ranije u radu. Reaktancija optimalne impedancije trošila  $-j\omega L_2$  je konjugirano kompleksni broj reaktancije prijemne zavojnice  $X_{L_2} = j\omega L_2$ . Kako bi reaktancija optimalnog trošila bila u skladu s jednadžbom (2-5), u simulacijama je optimalna impedancija trošila postavljena kao

$$Z_{L,opt} = R_2 \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2} - jX_C. \quad (2-7)$$

Pri tome vrijedi da je  $-X_{L_2} = X_C = 1/\omega C$ . Na taj način smanjuje se ukupna impedancija prijemnog podsustava odnosno povećava se struja  $I_2$  sa slike 2.1 što doprinosi poboljšanju učinkovitosti sustava jer se povećava radna snaga trošila:

$$P_L = I_2^2 \cdot R_L. \quad (2-8)$$

Energija uskladištena u reaktivnim komponentama prijemnog podsustava također doprinosi poboljšanju učinkovitosti jer se smanjuje struja izvora napajanja  $I_1$  sa slike 2.1 odnosno snaga:

$$P_{in} = \text{Re} \{I_1\} \cdot V_S. \quad (2-9)$$

Naime, korištenjem uskladištene energije reaktivnih komponenata kada je  $Z_L = Z_{L,opt}$ , potrebno je manje energije iz izvora napajanja u usporedbi s energijom izvora napajanja koja je potrebna u slučaju radnog otpora kao

trošila,  $Z_L = R_{L,opt}$ . Frekvencijska karakteristika učinkovitosti sustava induktivnog WPT sa slike 2.1, uz optimalnu impedanciju trošila prikazana je na slici 2.2 gdje se primjećuje značajno povećanje maksimalne učinkovitosti smanjivanjem udaljenosti prijenosa energije. Maksimalna učinkovitost prijenosa preko udaljenosti od 1 mm uz primjenu optimalne impedancije iznosi 0.573. U praktičnim slučajevima, impedancija trošila nije optimalnog iznosa koji se može odrediti prema jednadžbi (2-5). Tako se, u slučaju kada se impedancija trošila sastoji samo od optimalnog radnog otpora,  $R_{L,opt}$ , učinkovitost drastično smanjuje,  $\eta_{max} = 0.095$ , iako je udaljenost prijenosa samo 1 mm.

Na temelju provedenog proračuna učinkovitosti mogu se izvesti sljedeći zaključci o induktivnom bežičnom prijenosu energije:

- za učinkovit je prijenos potrebno primijeniti optimalnu impedanciju trošila,
- uz optimalnu impedanciju trošila, za učinkovit je prijenos potreban visok faktor magnetske veze  $k$  koji se ostvaruje jednakim dimenzijama predajne i prijemne zavojnice koje su međusobno vrlo bliske (u promatranom slučaju udaljenost prijenosa je 1 mm),
- prijenos energije jedne predajne zavojnice prema više prijemnih zavojnica,  $RX_1, RX_2, \dots, RX_n$ , nije učinkovit jer se u tom slučaju podrazumijeva mali iznos faktora magnetske veze,  $k_{1,2,\dots,n} \ll 1$  ili npr.  $k \approx 0.05$ .

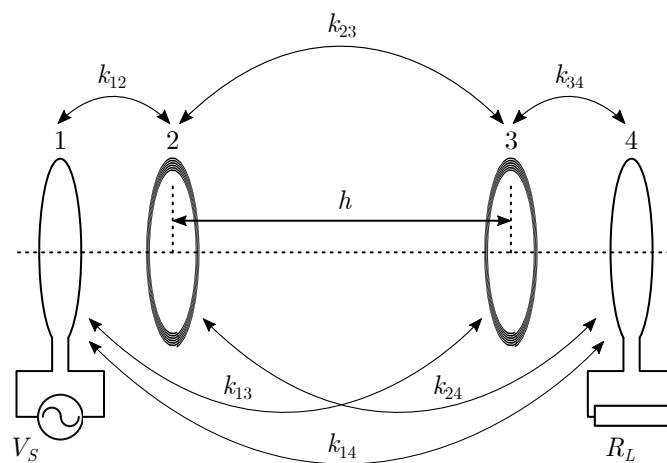
## 2.2. Rezonantni induktivni bežični prijenos energije

Učinkovitost induktivnog bežičnog prijenosa energije obrnuto je proporcionalna trećoj potenciji udaljenosti prijenosa ( $\eta \propto 1/h^3$ ), [3]. Zbog toga je istaknuti problem induktivnog bežičnog prijenosa energije niska učinkovitost preko udaljenosti većih od nekoliko centimetara, [2, 3, 5]. Nasuprot tome,



učinkoviti se bežični prijenos energije preko udaljenosti prijenosa u kojima je induktivni bežični prijenos neučinkovit može ostvariti upotrebom rezonantnog induktivnog vezivanja pri kojem su, za razliku od induktivnog vezivanja, predajna i prijemna zavojnica u rezonanciji. Općenito je udaljenost prijenosa energije između zavojnica takvog sustava WPT dva do tri puta veća od najveće dimenzije tih zavojnica, [5]. Rezonantna je frekvencija predajnog podsustava  $f_{TX}$  jednaka rezonantnoj frekvenciji prijemnog podsustava  $f_{RX}$ , [2]. Eksperimentalno je potvrđeno da odstupanje frekvencije predajnog ili prijemnog podsustava od zajedničke rezonante frekvencije doprinosi značajnom smanjenju snage koja se predaje trošilu, [5].

U literaturi, istraživanje znanstvenika s MIT-a [5] predstavlja polazište istraživanja rezonantnog induktivnog vezivanja u sustavima WPT. Predložen je sustav rezonantnog WPT s četiri zavojnice, slika 2.3, koji prema eksperimentima ostvaruje učinkovitost  $\approx 40\%$  za udaljenost prijenosa koja premašuje 2 m. Prema [5], općenito u sustavu povezanih rezonancija (npr. akustična, magnetska, nuklearna rezonancija), postoji režim jakog vezivanja gdje se pojavljuje maksimalna učinkovitost prijenosa energije. Režim jakog vezivanja



**Slika 2.3:** Sustav rezonantnog WPT s četiri zavojnice, [5]: 1-uzbudna zavojnica, 2-TX zavojnica, 3-RX zavojnica, 4-zavojnica s trošilom

predajnog i prijemnog podsustava sustava rezonantnog WPT opisan je nejednadžbom, prema [6]:

$$k\sqrt{Q_1Q_2} \geq 1. \quad (2-10)$$

Drugim riječima, visoka učinkovitost sustava rezonantnog WPT ovisi o faktoru magnetske veze  $k$  između predajne i prijemne zavojnice i o pripadajućim faktorima dobrote obje zavojnice,  $Q_1$  i  $Q_2$ . Dakle, prema izrazu (2-10), postoji mogućnost da se pri vrlo niskom faktoru magnetske veze između zavojnica i uz visoke faktore dobrote predajne i prijemne zavojnice osigura bežični prijenos energije s visokom učinkovitošću odnosno zadovoljena je nejednadžba (2-10). U skladu s tim, značajke su sustava rezonantnog WPT niska vrijednost faktora magnetske veze (tipično  $0.01 \leq k \leq 0.1$ ) i visoke vrijednosti faktora dobrote zavojnica [2, 5–7]. Režim jakog vezivanja odnosno učinkoviti sustav rezonantnog WPT podrazumijeva različite scenarije u kojima je nizak faktor magnetske veze uz visoke faktore dobrota zavojnica. Osim ranije navedenih većih udaljenosti prijenosa (povećanjem udaljenosti prijenosa energije smanjuje se  $k$ ), učinkoviti se prijenos energije može ostvariti istovremeno prema više prijemnih podsustava unutar jednog sustava WPT gdje je predajna zavojnica značajno većih dimenzija u odnosu na dimenzije prijemnih zavojnica [6, 8–10]. Rezonancija se postiže dodavanjem kondenzatora u električni krug predajnog i prijemnog podsustava. Ovisno o vrsti spoja između zavojnice i kondenzatora, moguće su četiri različite topologije sustava rezonantnog WPT s jednim predajnim i jednim prijemnim podsustavom. Predajni podsustav sa slike 2.3 sastoji se od dvije zavojnice, uzbudne i predajne zavojnice. Također, prijemni se podsustav sa slike 2.3 sastoji od dvije zavojnice, prijemne i zavojnice na koju je priključeno trošilo  $R_L$ . Ako se u takvom sustavu ne upotrebljavaju uzbudna zavojnica i zavojnica priključena na trošilo

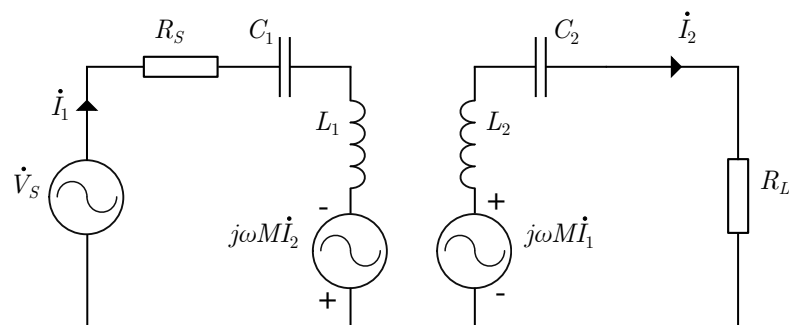
nego se izravno na predajnu i na prijemnu zavojnicu spaja izvor napajanja,  $V_S$ , odnosno trošilo,  $R_L$ , tada takav sustav rezonantnog WPT koristi dvije zavojnice za bežični prijenos energije.

### 2.2.1. Topologije sustava rezonantnog induktivnog WPT s dvije zavojnice

U ovom se potpoglavlju uz pomoć ekvivalentnih shema sustava rezonantnog WPT formuliraju jednadžbe koje opisuju snagu trošila i učinkovitost prijenosa za četiri različite topologije sustava rezonantnog WPT s ukupno dvije zavojnice, jedna TX i jedna RX zavojnica. Prema međusobnom spoju kondenzatora i zavojnice, razlikuju se topologije: serijsko-serijska (S-S), serijsko-paralelna (S-P), paralelno-serijska (P-S) i paralelno-paralelna (P-P). U nastavku se pojavljuju ekvivalentne sheme navedenih topologija u kojima predajni krug čine izvor napajanja napona  $\dot{V}_S$ , unutarnji otpor izvora napajanja  $R_S$ , kapacitet kondenzatora u predajnom krugu  $C_1$ , samoinduktivitet predajne zavojnice  $L_1$ . Prijemni krug čine prijemna zavojnica čiji je samoinduktivitet  $L_2$ , kapacitet kondenzatora u prijemnom krugu  $C_2$  te trošilo koje je radni otpor  $R_L$ .

#### Topologija S-S

Na slici 2.4 prikazana je ekvivalentna shema topologije S-S. Prema Kirch-



Slika 2.4: Ekvivalentna shema, topologija S-S

hoffovom zakonu za napone, za shemu sa slike 2.4 vrijede sljedeće jednadžbe:

$$\dot{V}_S = Z_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2, \quad (2-11)$$

$$j\omega M \dot{I}_1 = \dot{I}_2 Z_2. \quad (2-12)$$

Kako se radi o magnetski vezanim krugovima,  $j\omega M \dot{I}_1$  je napon induciran na prijemnoj zavojnici pod utjecajem magnetskog polja predajne zavojnice. Također, napon  $j\omega M \dot{I}_2$  u predajnom krugu je posljedica magnetskog polja prijemne zavojnice odnosno struje  $\dot{I}_2$ . Jednadžbe (2-11) i (2-12) se mogu pojednostaviti i tada poprimaju izraz:

$$\dot{V}_S = (Z_1 + Z_r) \dot{I}_1, \quad (2-13)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{j\omega M}{Z_2} \dot{I}_1, \quad (2-14)$$

gdje je  $Z_1$  impedancija predajnog kruga,  $Z_r = \omega^2 M^2 / Z_2$  je reflektirana impedancija, a  $Z_2$  je impedancija prijemnog kruga, [11]. Impedancije predajnog i prijemnog kruga su:

$$Z_1 = R_S + \frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L_1 = R_S + jX_1, \quad (2-15)$$

$$Z_2 = R_L + \frac{1}{j\omega C_2} + j\omega L_2 = R_L + jX_2. \quad (2-16)$$

Ako se za slučaj sustava rezonantnog WPT postavi da je  $L_1 = L_2 = L$ ,  $C_1 = C_2 = C$  uz frekvenciju izvora napajanja  $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$ , tada je takav sustav u rezonanciji jedino uz topologiju S-S. Naime, prilikom rezonancije imaginarni je dio impedancije prijemnog kruga,  $\text{Im}(Z_2)$ , iz jednadžbe (2-16) jednak nuli, a isto vrijedi i za imaginarni dio ekvivalentne impedancije čitavog sustava rezonantnog WPT,  $\text{Im}(Z_{ekv})$ , bez obzira na topologiju sustava rezo-

nantnog WPT, pri čemu je  $Z_{ekv} = Z_1 + Z_r$ . Međutim, primjenom iste metode preostale tri topologije (S-P, P-S i P-P) sustava rezonantnog WPT nisu u rezonanciji i potreban je drugi način za postizanje rezonancije umjesto jednostavnog rješenja ( $L_1 = L_2 = L$ ,  $C_1 = C_2 = C$  uz frekvenciju izvora napajanja  $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$ ). Rezonantna se frekvencija sustava WPT s topologijom S-S određuje prema izrazu  $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$ .

Za topologiju S-S, radna snaga  $P_2$  koja se prenosi s predajnog na prijemni krug i učinkovitost  $\eta$  prijenosa određeni su sljedećim izrazom [11]:

$$P_2 = V_S^2 \frac{\frac{\omega_0^2 M^2}{R_L}}{\left(R_S + \frac{\omega_0^2 M^2}{R_L}\right)^2}, \quad (2-17)$$

$$\eta = \frac{\frac{\omega_0^2 M^2}{R_L}}{R_S + \frac{\omega_0^2 M^2}{R_L}}. \quad (2-18)$$

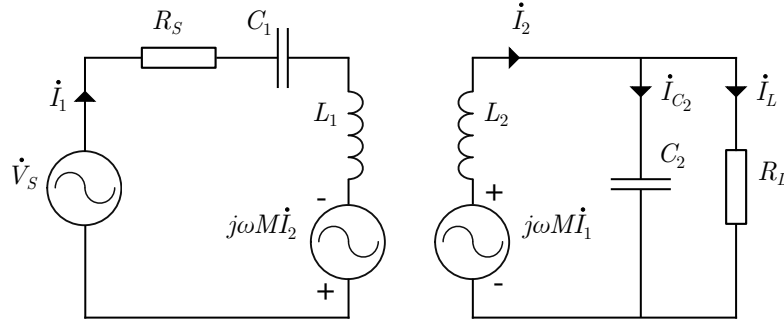
### Topologija S-P

Karakteristika je topologije S-P serijski spoj kondenzatora i zavojnice u predajnom krugu te paralelni spoj kondenzatora i zavojnice u prijemnom krugu. Na slici 2.5 prikazana je ekvivalentna shema topologije S-P. Prema Kirchhoffovom zakonu za napone, za shemu sa slike 2.5 također vrijede jednadžbe (2-11) i (2-12). Impedancije predajnog i prijemnog kruga su:

$$Z_1 = R_S + \frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L_1 = R_S + jX_1, \quad (2-19)$$

$$Z_2 = j\omega L_2 + \frac{R_L - j\omega C_2 R_L^2}{1 + (\omega C_2 R_L)^2} = \frac{R_L}{1 + (\omega C_2 R_L)^2} + jX_2. \quad (2-20)$$

Kako metoda postavljanja vrijednosti induktiviteta i kapaciteta primijenjena u topologiji S-S nije odgovarajuća za preostale topologije, u [11] se



Slika 2.5: Ekvivalentna shema, topologija S-P

predlaže sljedeća procedura: postavlja se da je  $L_1 = L_2 = L$ , kapacitet  $C_2$  je konstantne vrijednosti dok se kapacitet  $C_1$  prilagođava, rezonantna frekvencija sustava WPT se postavlja tako da se osigura rezonancija prijemnog kruga i prema rezonantnoj frekvenciji određuje se kapacitet  $C_1$ . Time je osiguran učinkoviti prijenos energije jer je sustav WPT u rezonanciji.

Zato se za slučaj topologije S-P sustava rezonantnog WPT odabire rezonantna frekvencija:

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\sqrt{\frac{C_2 R_L^2 - L}{L C_2^2 R_L^2}}}{2\pi}, \quad (2-21)$$

koja osigurava da je  $\text{Im}(Z_2)$  iz jednadžbe (2-20) jednak nuli. Postavlja se frekvencija izvora napajanja koja odgovara rezonantnoj frekvenciji  $f_0$ . Kako bi vrijedilo  $\text{Im}(Z_{ekv}) = 0$ , potrebno je podesiti kapacitet predajnog kruga, [11]:

$$C_1 = \frac{C_2^2 R_L^2}{C_2 R_L^2 - L} \quad (2-22)$$

Za topologiju S-P, radna snaga,  $P_2$ , koja se prenosi s predajnog na prijemni krug i učinkovitost prijenosa,  $\eta$ , određeni su sljedećim izrazima, [11]:

$$P_2 = V_S^2 \frac{\frac{\omega_0^2 M^2}{R_L} (1 + \omega_0^2 C_2^2 R_L^2)}{\left[ R_S + \frac{\omega_0^2 M^2}{R_L} (1 + \omega_0^2 C_2^2 R_L^2) \right]^2}, \quad (2-23)$$

$$\eta = \frac{\frac{\omega_0^2 M^2}{R_L} (1 + \omega_0^2 C_2^2 R_L^2)}{R_S + \frac{\omega_0^2 M^2}{R_L} (1 + \omega_0^2 C_2^2 R_L^2)}. \quad (2-24)$$

Snaga  $P_2$  je radna snaga na reflektiranoj impedanciji  $Z_r$  pa je skraćeni izraz za snagu iz jednadžbe (2-23):

$$P_2 = \frac{V_S^2 Z_r}{(R_S + Z_r)^2}. \quad (2-25)$$

Učinkovitost prijenosa jednaka je omjeru radne snage reflektirane impedancije i ukupne radne snage sustava rezonantnog WPT. U izrazima (2-23) i (2-24) vijedi  $\omega_0 = 2\pi f_0$ .

### Topologija P-S

Topologiju P-S sustava rezonantnog WPT prikazuje slika 2.6. Prema Kirchhoffovom zakonu za napone postavljaju se jednadžbe za opis naponskih prilika u predajnom i prijemnom krugu:

$$\dot{V}_S = Z_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 + \dot{I}_S R_S, \quad (2-26)$$

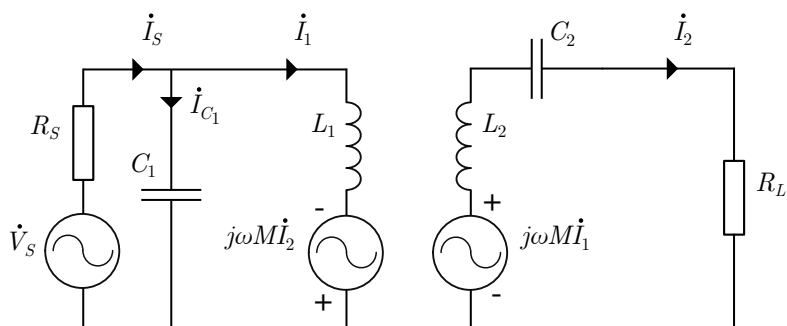
$$j\omega M \dot{I}_1 = \dot{I}_2 Z_2. \quad (2-27)$$

Impedancija  $Z_1$  je induktivna reaktancija predajnog kruga, a  $Z_2$  je ukupna impedancija prijemnog kruga:

$$Z_1 = j\omega L_1 = jX_1, \quad (2-28)$$

$$Z_2 = j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + R_L = R_L + jX_2. \quad (2-29)$$

U skladu s ranije navedenom procedurom, određena je rezonantna frekvencija prijemnog kruga  $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC_2}$  pri kojoj je imaginarni dio impedancije  $Z_2$  iz jednadžbe (2-29),  $\text{Im}(Z_2) = 0$ . Nakon toga određen je izraz za kapacitet



Slika 2.6: Ekvivalentna shema, topologija P-S

predajnog kruga:

$$C_1 = \frac{L^3 C_2^2}{L^3 C_2} + \frac{M^4}{R_L^2}, \quad (2-30)$$

pa je imaginarni dio ekvivalentne impedancije sustava rezonantnog WPT,  $\text{Im}(Z_{ekv}) = 0$ . Frekvencija izvora napajanja jednaka je rezonantnoj frekvenciji prijemnog kruga  $f_0$ . Radna snaga prijemnog kruga i učinkovitost prijenosa, za slučaj topologije P-S, zapisane su u jednadžbama (2-31) i (2-32).

$$P_2 = V_S^2 \frac{\frac{\omega_0^2 M^2}{R_L}}{\omega_0^2 L^2 + \left(\frac{\omega_0^2 M^2}{R_L}\right)^2}, \quad (2-31)$$

$$\eta = \frac{\frac{\omega_0^2 M^2}{R_L}}{\left|j\omega_0 L + \frac{\omega_0^2 M^2}{R_L}\right|} \quad (2-32)$$

### Topologija P-P

Topologija P-P sustava rezonantnog WPT s jednim predajnim i jednim prijemnim podsustavom prikazana je na slici 2.7. Jednadžbe, (2-26) i (2-27), koje vrijede za napone u topologiji P-S, vrijede i za napone u topologiji P-P. U ovom slučaju impedancije  $Z_1$  i  $Z_2$  iz (2-26) i (2-27) su, prema [11]:

$$Z_1 = j\omega L_1 = jX_1, \quad (2-33)$$



$$Z_2 = j\omega L_2 + \frac{R_L - j\omega C_2 R_L^2}{1 + (\omega C_2 R_L)^2} = \frac{R_L}{1 + (\omega C_2 R_L)^2} + jX_2. \quad (2-34)$$

Rezonantna je frekvencija sustava:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{\sqrt{\frac{C_2 R_L^2 - L}{L C_2^2 R_L^2}}}{2\pi} \quad (2-35)$$

pri kojoj je imaginarni dio impedancije  $Z_2$  iz jednadžbe (2-34),  $\text{Im}(Z_2) = 0$ . Da bi sustav rezonantnog WPT bio u rezonanciji pri frekvenciji  $f_0$ , kapacitet predajnog kruga  $C_1$  je, prema [11]:

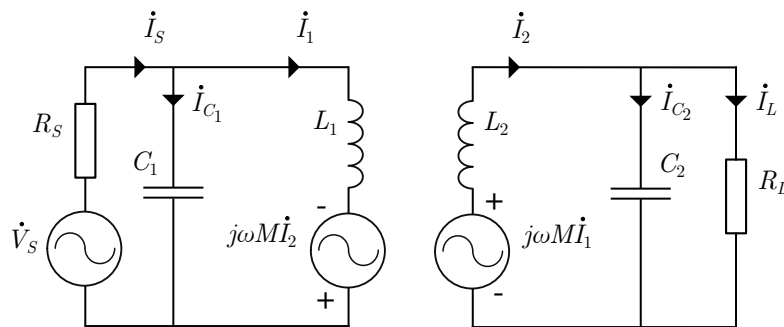
$$C_1 = \frac{L^5 C_2^2}{L^5 C^2 - \frac{L^6}{R_L^2} + \frac{M^4 (C_2 R_L^2 - L)^2}{R_L^2}} \quad (2-36)$$

Za slučaj topologije P-P sustava rezonantnog WPT, radna snaga prijemnog podsustava i učinkovitost pri rezonanciji opisuju se sljedećim jednadžbama:

$$P_2 = V_S^2 \frac{\frac{\omega_0^2 M^2}{R_L} (1 + \omega_0^2 C_2^2 R_L^2)}{\omega_0^2 L^2 + \left( \frac{\omega_0^2 M^2}{R_L} (1 + \omega_0^2 C_2^2 R_L^2) \right)^2}, \quad (2-37)$$

$$\eta = \frac{\frac{\omega_0^2 M^2}{R_L} (1 + \omega_0^2 C_2^2 R_L^2)}{\left| j\omega_0 L + \frac{\omega_0^2 M^2}{R_L} (1 + \omega_0^2 C_2^2 R_L^2) \right|}. \quad (2-38)$$

Ranije navedeni izrazi za radnu snagu prijemnog podsustava  $P_2$  i učinkovitost prijenosa  $\eta$  određeni su za sustav rezonantnog WPT u kojemu se udalje-



Slika 2.7: Ekvivalentna shema, topologija P-P

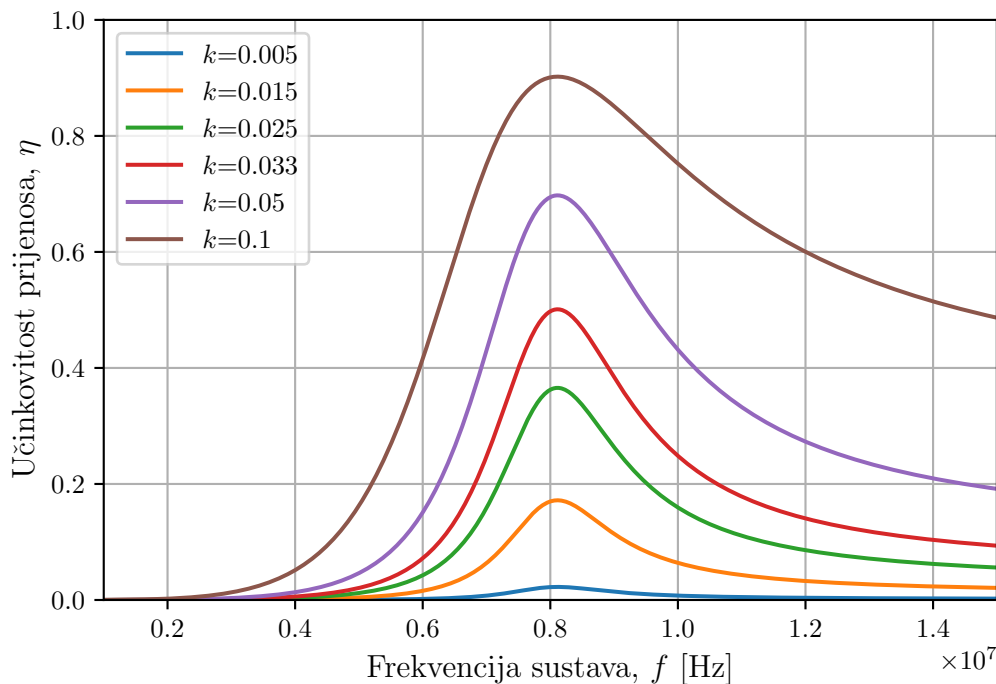
nost prijenosa odnosno udaljenost između predajne i prijemne zavojnice ne mijenja. Također, zavojnice su međusobno postavljene koaksijalno.

### 2.2.2. Razdvajanje frekvencije u sustavu rezonantnog induktivnog WPT

Razdvajanje frekvencije je pojava koja se povezuje s izlaznim frekvencijskim karakteristikama sustava rezonantnog WPT, a to su najčešće snaga  $P_L$  i napon na trošilu  $V_L$  u ovisnosti o frekvenciji sustava rezonantnog WPT. Pojava je prisutna u sustavu rezonantnog WPT s dvije [12–18], tri [13] i četiri zavojnice [3] između kojih se obavlja prijenos energije. Od svih topologija, topologija S-S se najčešće koristi u sustavima rezonantnog WPT s dvije zavojnice, [16].

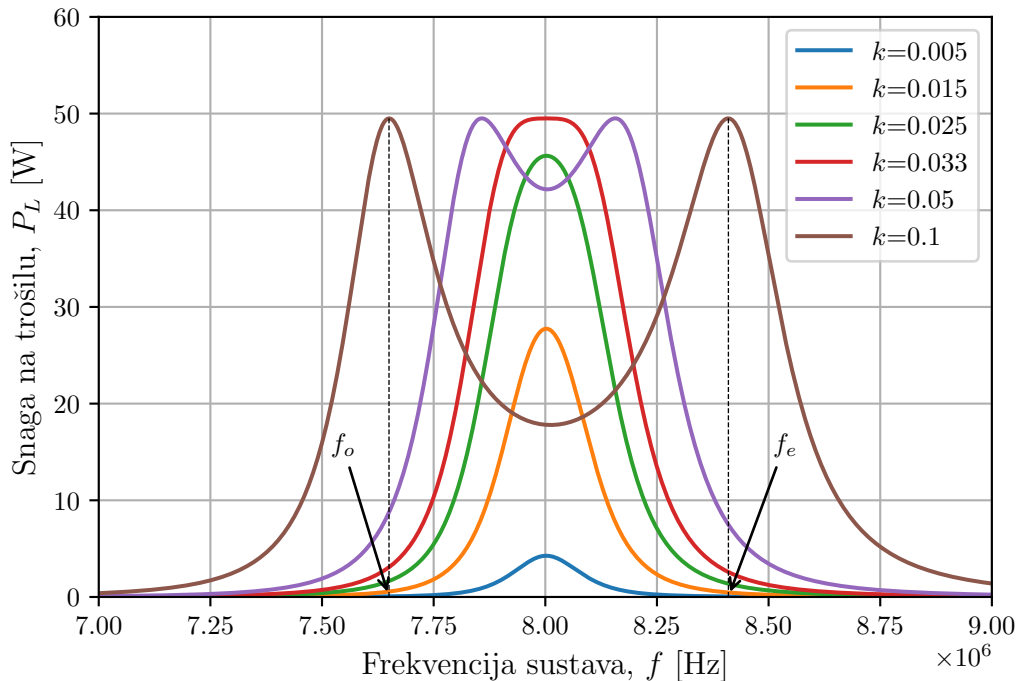
U nastavku su prikazane frekvencijske karakteristike učinkovitosti  $\eta$ , slika 2.8, i snage trošila  $P_L$ , slika 2.9, za različite faktore magnetske veze sustava rezonantnog WPT s topologijom S-S, slika 2.4. Parametri su promatranog sustava rezonantnog WPT sljedeći:  $V_S = 100$  V,  $C_1 = C_2 = 13.19$  pF,  $L_1 = L_2 = 30$   $\mu$ H,  $R_S = 50$   $\Omega$ ,  $R_L = 50$   $\Omega$ ,  $f_0 \approx 8$  MHz. Premda se učinkovitost sustava rezonantnog WPT povremeno povezuje s pojavom razdvajanja frekvencije, maksimalna se učinkovitost postiže jedino pri osnovnoj rezonantnoj frekvenciji (engl. *Fundamental Frequency*) sustava  $f_0$  bez obzira na iznos faktora magnetske veze (slika 2.8). Za razliku od učinkovitosti, za snagu na trošilu to vrijedi samo za određeni raspon vrijednosti faktora magnetske veze  $k$  [19], slika 2.9. Učinkovitost sa slike 2.8 računa se kao omjer radne snage trošila i radne snage izvora, [13]. Radna se snaga trošila,  $P_L = |\dot{I}_2|^2 R_L$ , može zapisati u sljedećem obliku:

$$P_L = \frac{(\omega M |\dot{V}_S|)^2 R_L}{[R_S R_L - X_1 X_2 + (\omega M)^2]^2 + (R_S X_2 + R_L X_1)^2}, \quad (2-39)$$



**Slika 2.8:** Učinkovitost sustava rezonantnog WPT (topologija S-S) za različite faktore magnetske veze u ovisnosti o frekvenciji sustava

koji opisuju krivulje na slici 2.9. Na slici 2.8 jasno se uočava da učinkovitost sustava rezonantnog WPT raste s povećanjem faktora magnetske veze odnosno smanjenjem udaljenosti između zavojnica. Suprotno tome, povećanjem faktora magnetske veze između predajne i prijemne zavojnice iznad iznosa koji je veći od kritičnog faktora magnetske veze (engl. *Critical Coupling Coefficient*), koji se definira kao  $k_c = 1/\sqrt{Q_{TX} \cdot Q_{RX}}$ , dolazi do razdvajanja osnovne rezonantne frekvencije u frekvencijskoj karakteristici snage trošila, [13]. Faktor magnetske veze  $k_c$  pri kojemu se za navedene parametre sustava rezonantnog WPT ostvaruje kritično vezivanje (engl. *Critical Coupling*) iznosi približno 0.033. Pojmom razdvajanje frekvencije opisuje se pojava da se pri  $k > k_c$  maksimalna snaga trošila više ne postiže pri osnovnoj rezonantnoj frekvenciji sustava  $f_0$  nego pri drugim rezonantnim frekvencijama čiji iznos ovisi o faktoru magnetske veze. Razdvajanje frekvencije u sustavu rezonant-



**Slika 2.9:** Snaga na trošilu sustava rezonantnog WPT (topologija S-S) za različite faktore magnetske veze u ovisnosti o frekvenciji sustava

nog WPT s dvije zavojnice očituje se u maksimalnoj snazi pri neparnoj (engl. *Odd*)  $f_o$  i parnoj (engl. *Even*)  $f_e$  rezonantnoj frekvenciji, slika 2.9. U odnosu na sustav rezonantnog WPT s dvije zavojnice, u sustavima s više zavojnica pojavljuje se više rezonantnih frekvencija u području razdvajanja frekvencije, [16]. Na slici 2.9 označene su neparna i parna rezonantna frekvencija za faktor magnetske veze  $k = 0.1$ . Neparna rezonantna frekvencija je nižih vrijednosti dok je parna rezonantna frekvencija viših vrijednosti s obzirom na vrijednost osnovne rezonantne frekvencije. Za područje oslobođeno razdvajanja frekvencije vrijedi  $k < k_c$  i snaga na trošilu je veća što je veći faktor magnetske veze. Također u tom području vrijedi da krivulja snage trošila u ovisnosti o frekvenciji sustava ima jednu maksimalnu vrijednost pri osnovnoj rezonantnoj frekvenciji sustava. Za kritično vezivanje vrijedi  $k = k_c$  te krivulja snage u ovisnosti o frekvenciji i dalje ima jednu maksimalnu vrijednost (pri

osnovnoj rezonantnoj frekvenciji) koja je većeg iznosa nego za slučaj  $k < k_c$ . Daljnjim povećanjem faktora magnetske veze dolazi do divergiranja osnovne rezonantne frekvencije u neparnu i parnu rezonantnu frekvenciju. Najveća snaga na trošilu pojavljuje se pri neparnoj i parnoj rezonantnoj frekvenciji čije odstupanje od osnovne rezonantne frekvencije raste s povećanjem faktora magnetske veze, slika 2.9. U ovom području snaga na trošilu pri osnovnoj rezonantnoj frekvenciji sustava je značajno manja u odnosu na snagu pri neparnoj i parnoj rezonantnoj frekvenciji. Stoga je fiksna frekvencija sustava rezonantnog WPT problem u području razdvajanja frekvencije.

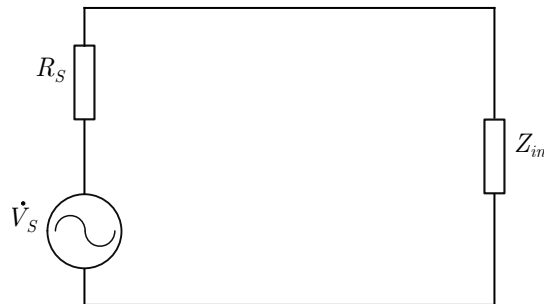
Za postizanje maksimalne snage na trošilu u području razdvajanja frekvencije potrebno je postaviti frekvenciju sustava koja odgovara parnoj ili neparnoj rezonantnoj frekvenciji. Zato se za područje razdvajanja frekvencije predlaže praćenje frekvencije (engl. *Frequency Tracking*) sustava rezonantnog WPT. Praćenje i ručno podešavanje frekvencije sustava predloženo je u [13, 17]. Praćenje faznog kuta između napona i struje predajne zavojnice omogućava detekciju rezonancije. Naime, sustav je u rezonanciji kada nema faznog pomaka (engl. *Zero-Phase*) između struje predajnog kruga i napona izvora napajanja. Autori rada [3] predlažu automatsko podešavanje frekvencije uz praćenje predane i reflektirane snage predajnog podsustava u ovisnosti o frekvenciji sustava. Nadalje, sustav za automatsko praćenje i podešavanje frekvencije u području razdvajanja frekvencije realiziran je uz mjerenje radne snage trošila i izvora napajanja, [20]. Upotrebom algoritma za podešavanje frekvencije osigurava se učinkoviti prijenos energije u području razdvajanja frekvencije.

U sustavima za praćenje frekvencije redovito se za područje razdvajanja frekvencije odabire neparna rezonantna frekvencija [3, 13, 17, 20]. Autori

rada [3], u kojem se proučava sustav rezonantnog WPT s četiri zavojnice, predlažu neparnu rezonantnu frekvenciju zbog pozitivnog utjecaja faktora magnetske veze između uzbudne petlje i prijemne zavojnice,  $k_{13}$  sa slike 2.3, koji doprinosi povećanju struje kroz prijemnu zavojnicu. Prema [13], simulacijama je utvrđeno da je pri neparnoj rezonantnoj frekvenciji amplituda magnetskog polja veća u odnosu na amplitudu magnetskog polja pri parnoj rezonantnoj frekvenciji. Zbog toga se pri neparnoj rezonantnoj frekvenciji na krajevima iste prijemne zavojnice inducira veći napon  $e$  opisan jednadžbom (2-1). Povećanje struje prijemne zavojnice iz [3] doprinosi povećanju snage na trošilu dok povećanje induciranog napona na krajevima prijemne zavojnice iz [13] općenito može doprinijeti povećanju snage na trošilu ponovo zbog povećanja struje prijemne zavojnice. Prema [17], odstupanje je neparne rezonantne frekvencije od osnovne rezonantne frekvencije u području razdvajanja frekvencije manje nego odstupanje parne rezonantne frekvencije. Veća divergencija parne rezonantne frekvencije primjetna je i na slici 2.9 gdje je  $f_e - f_0 > |f_o - f_0|$ . Iz tog razloga preporuča se praćenje i podešavanje sustava na rad pri neparnoj rezonantnoj frekvenciji u području razdvajanja frekvencije. U prilog odabiru neparne rezonantne frekvencije ide i činjenica da su, prema [20], manji gubici zračenja pri neparnoj rezonantnoj frekvenciji u odnosu na rad pri parnoj rezonantnoj frekvenciji.

### 2.2.3. Prilagodba impedancije

Sve se ranije navedene topologije sustava rezonantnog WPT s dvije zavojnice mogu prikazati uz pomoć pojednostavljenog ekvivalentnog kruga, [11, 16, 21, 22]:



**Slika 2.10:** *Pojednostavljena ekvivalentna shema svih topologija sustava rezonantnog WPT s dvije zavojnice*

gdje je  $V_S$  izvor napajanja,  $R_S$  unutarnji otpor izvora napajanja, a  $Z_{in}$  ulazna impedancija sustava rezonantnog WPT. Ulazna impedancija sustava sastoji se od impedancije predajnog kruga  $Z_1$  i reflektirane impedancije  $Z_r$ :

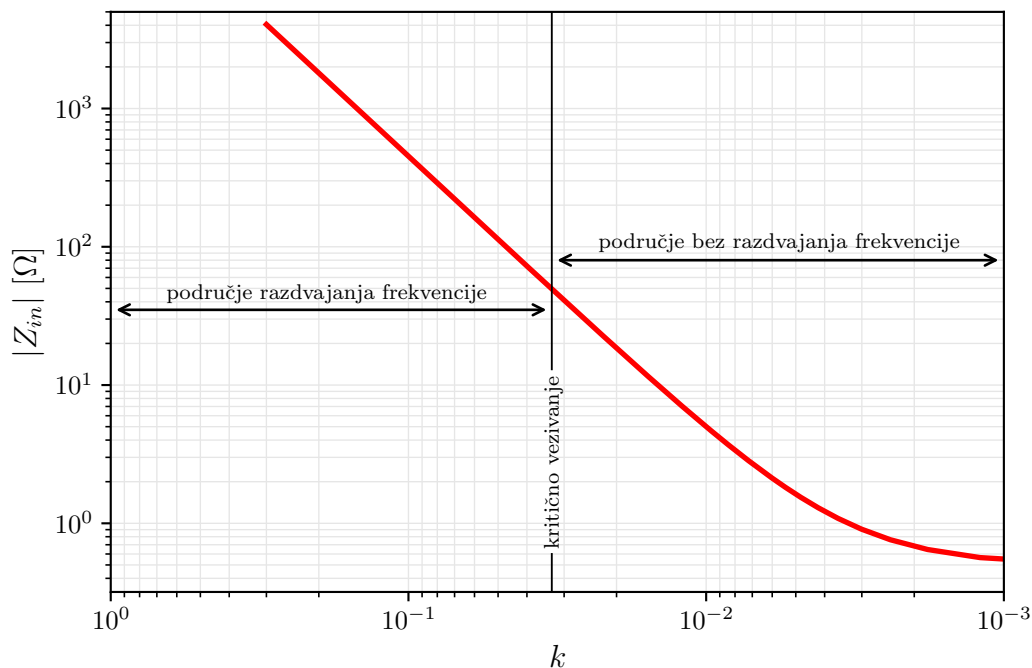
$$Z_{in} = Z_1 + Z_r = Z_1 + \frac{(\omega M)^2}{Z_2}. \quad (2-40)$$

Vrijednosti impedancije predajnog kruga  $Z_1$  i prijemnog kruga  $Z_2$  ovise o vrsti spoja zavojnice i kondenzatora (serijski ili paralelni spoj). Kako bi se maksimizirao prijenos snage u nekom sustavu potrebno je, prema teoremu o prijenosu maksimalne snage, postaviti da impedancija trošila bude kompleksno konjugirana impedancija izvora. Međutim, pri prijenosu maksimalne snage ostvaruje se učinkovitost od 50%. Za maksimizaciju prijenosa energije u sustavu rezonantnog WPT s dvije zavojnice nužno je uspostaviti [21]:

- rezonanciju, odnosno da imaginarni dio ulazne impedancije  $Z_{in}$  bude jednak nuli,

- te da realni dio ulazne impedancije  $\text{Re}(Z_{in})$  bude jednak otporu izvora napajanja  $R_S$ .

Iz jednadžbe (2-40) jasno je da se ulazna impedancija sustava rezonantnog WPT mijenja s promjenom udaljenosti prijenosa energije što je navedeno i u literaturi [21–24]. Drugim riječima, promjenom faktora magnetske veze dolazi do promjene međuinduktiviteta kojim se opisuje povezanost predajne i prijemne zavojnice. Na sljedećoj slici prikazan je modul ulazne impedancije u ovisnosti o faktoru magnetske veze pri osnovnoj rezonantnoj frekvenciji,  $f_0$ , izvora napajanja za parametre sustava rezonantnog WPT topologije S-S iz prethodnog potpoglavlja.

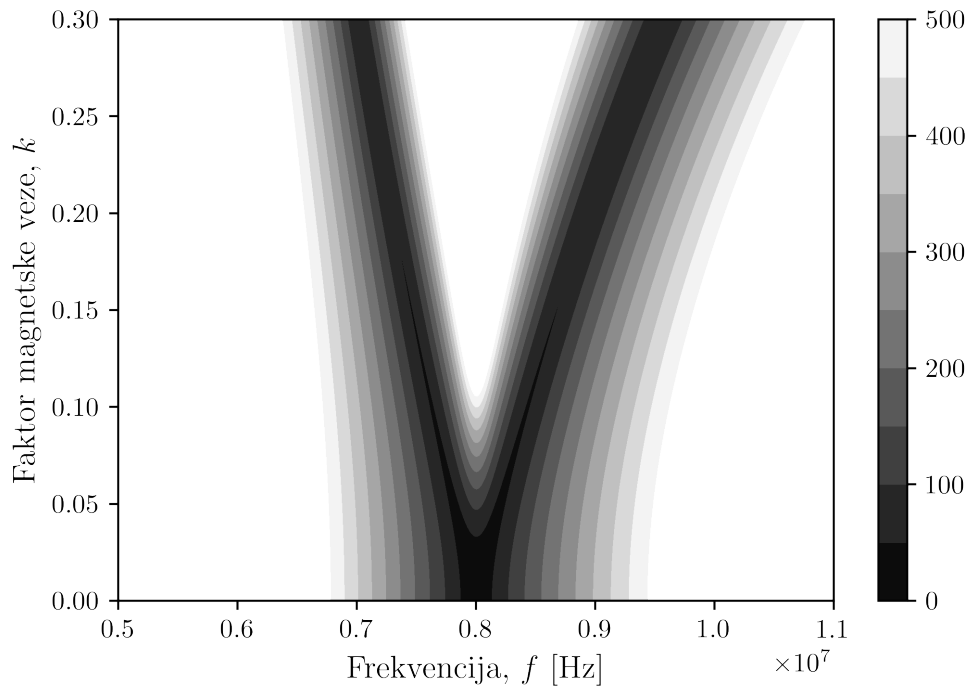


**Slika 2.11:** Modul ulazne impedancije sustava rezonantnog WPT pri osnovnoj rezonantnoj frekvenciji

Za područje bez razdvajanja frekvencije,  $k < k_c$ , ulazna impedancija je manja od otpora izvora napajanja odnosno impedancija izvora nije usklađena s impedancijom trošila,  $|Z_{in}| < R_S = 50 \Omega$ . Zbog toga je, prema te-



oremu o maksimalnoj snazi, snaga trošila manja od maksimalne moguće,  $P_{2,max}$ . Porastom faktora magnetske veze povećava se i ulazna impedancija, odnosno samo realni dio ulazne impedancije jer je sustav u rezonanciji (frekvencija izvora napajanja jednaka je osnovnoj rezonantnoj frekvenciji sustava). Također, u tom području, porastom faktora magnetske veze povećava se učinkovitost prijenosa sustava, slika 2.8, i snaga trošila, slika 2.9. Daljnjim porastom faktora magnetske veze dolazi se do kritičnog vezivanja,  $k = k_c$ . Tada je modul ulazne impedancije jednak otporu izvora napajanja, tj. postignuta je usklađenost impedancija,  $|Z_{in}| = R_S$ , i ostvaruje se maksimalna moguća snaga na trošilu pri osnovnoj rezonantnoj frekvenciji sustava uz učinkovitost koja je veća od učinkovitosti koje se mogu ostvariti u području bez razdvajanja frekvencije. U području razdvajanja frekvencije,  $k > k_c$ , dolazi do izraženijeg porasta modula ulazne impedancije,  $|Z_{in}| \gg R_S$ . Dakle, ponovo dolazi do neusklađenosti impedancija te se povećanjem faktora magnetske veze smanjuje snaga na trošilu pri osnovnoj rezonantnoj frekvenciji sustava, slika 2.9. U području razdvajanja frekvencije osnovna rezonantna frekvencija više nije rezonantna frekvencija sustava rezonantnog WPT. Za isti sustav rezonantnog WPT topologije S-S, modul ulazne impedancije u ovisnosti o faktoru magnetske veze uz raspon frekvencije izvora napajanja od 5 MHz do 11 MHz, prikazan je na slici 2.12. Najtamnijom su bojom označene najmanje vrijednosti modula ulazne impedancije,  $|Z_{in}| \leq 50 \Omega$ , dok svaka svjetlija nijansa označava veću vrijednost sve do bijele boje koja predstavlja vrijednosti modula ulazne impedancije veće od  $500 \Omega$ . Razdvajanje osnovne rezonantne frekvencije, u ovom slučaju  $f_0 \approx 8$  MHz, u dvije razdvojene rezonantne frekvencije, neparnu i parnu, jasno se uočava po vrijednostima modula ulazne impedancije sustava rezonantnog WPT. Naime, pri rezonanciji ulazna



**Slika 2.12:** Modul ulazne impedancije sustava rezonantnog WPT u ovisnosti o faktoru magnetske veze uz raspon frekvencije od 5 MHz do 11 MHz

se impedancija sastoji samo od realnog dijela pa vrijedi da je  $Z_{in} \leq 50 \Omega$ .

Za razliku od modula ulazne impedancije pri osnovnoj rezonantnoj frekvenciji u području razdvajanja frekvencije,  $|Z_{in}|_{f=f_0} \gg R_S$ , modul ulazne impedancije pri parnoj i neparnoj frekvenciji je usklađen s impedancijom izvora napajanja,  $|Z_{in}|_{f=f_{o,e}} = R_S$ . Stoga je praćenje frekvencije i podešavanje frekvencije sustava rezonantnog WPT na neparnu ili parnu frekvenciju u području razdvajanja frekvencije zapravo usklađivanje impedancija izvora napajanja i trošila.

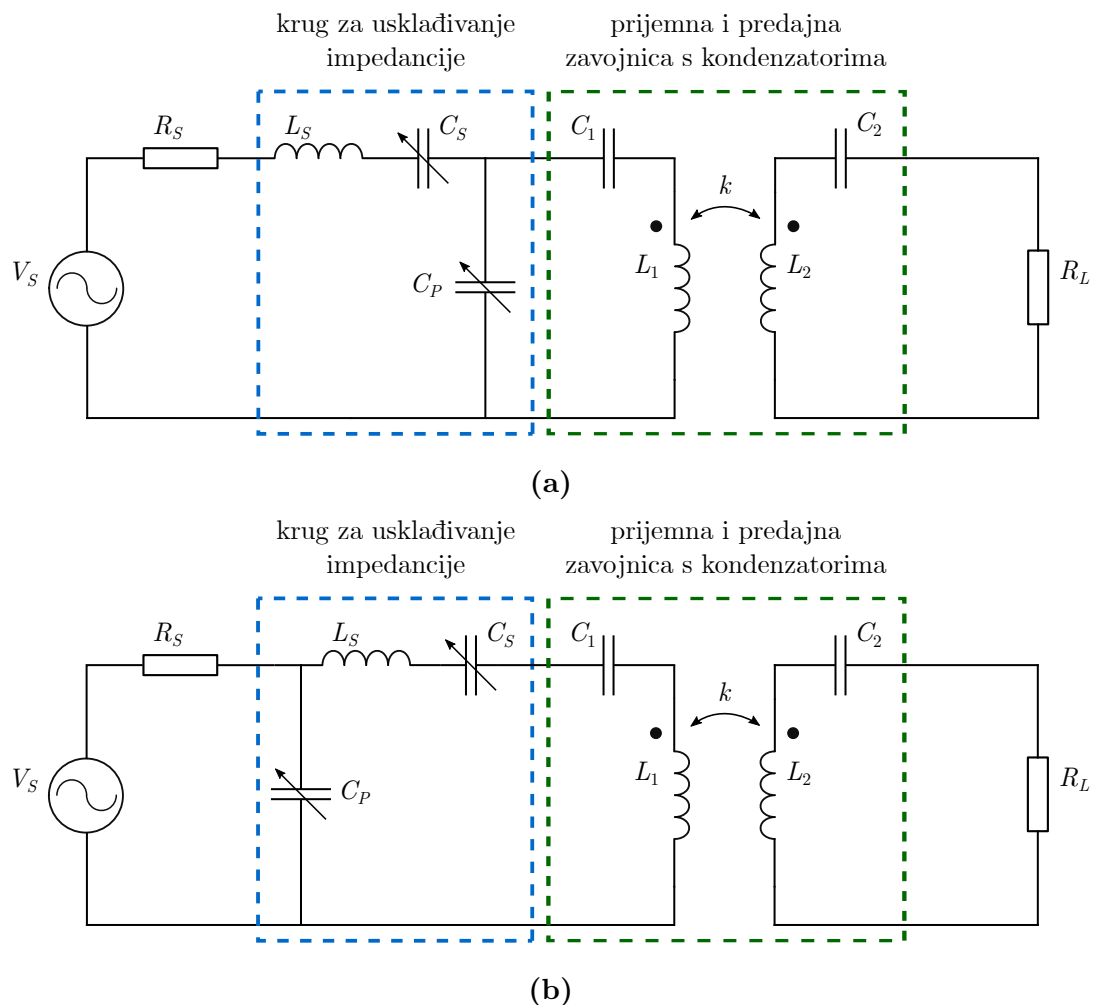
Iako su pri parnoj i neparnoj rezonantnoj frekvenciji zadovoljena oba uvjeta za ostvarivanje maksimalne snage trošila, predlaže se alternativa. Prema [23], za frekvencije u MHz području, raspon je frekvencija koje su propisane industrijskim, znanstvenim i medicinskim frekvencijskim rasponom (engl. *Industrial, Scientific and Medical Band, ISM*) vrlo uzak. Primjerice, raspon

frekvencija koje su dopuštene pri frekvenciji od 13.56 MHz je  $\pm 7$  kHz, [23]. Stoga je potrebno, umjesto prilagodbe frekvencije izvora napajanja na neparnu ili parnu rezonantnu frekvenciju, prilagoditi rezonantnu frekvenciju sustava rezonantnog WPT na frekvenciju izvora napajanja. U tom se slučaju frekvencija izvora napajanja postavlja na osnovnu rezonantnu frekvenciju sustava rezonantnog WPT. Za postizanje rezonancije i maksimalne snage trošila pri fiksnoj frekvenciji izvora napajanja potrebno je ostvariti kritično vezivanje jer je tada ulazna impedancija sustava,  $Z_{in}$ , jednaka otporu izvora napajanja,  $R_S$ .

Autori rada [3] predlažu usklađivanje impedancija pri korištenju fiksne frekvencije izvora napajanja. Ručnim podešavanjem faktora magnetske veze između zavojnice 1 i zavojnice 2, slika 2.3, odnosno promjenom međusobne udaljenosti ugađa se faktor magnetske veze kritičnog vezivanja,  $k_c$ , sve dok ne postane jednak faktoru magnetske veze između zavojnice 2 i zavojnice 3, slika 2.3,  $k_c = k_{23}$ . Na taj način osigurana je rezonancija i maksimalna snaga trošila pri  $f_0$ . Postavljanje je takvog sustava u kritično vezivanje zapravo usklađivanje ulazne impedancije s otporom izvora napajanja. U radu [25], ističe se da u području razdvajanja frekvencije metoda usklađivanja impedancija i metoda praćenja te podešavanja frekvencije sustava na neparnu rezonantnu frekvenciju pružaju maksimalni prijenos snage. Prednost metode praćenja frekvencije nad metodom usklađivanja impedancija je jednostavnost u smislu podešavanja samo jedog parametra sustava, a to je frekvencija izvora napajanja. Međutim, metoda podešavanja frekvencije izvora napajanja nije prikladna za područje bez razdvajanja frekvencije jer je u tom području sustav u rezonanciji pri osnovnoj rezonantnoj frekvenciji pa nije potrebno podešavati frekvenciju izvora napajanja. Ipak, u tom području, ulazna im-

pedancija sustava rezonantnog WPT nije usklađena s otporom izvora napajanja, slika 2.11. Stoga je u istom radu predložena metoda usklađivanja impedancija u području bez razdvajanja frekvencije. Ipak, realizacija je takvog sustava za usklađivanje impedancija vrlo zahtjevna, [25]. Kako je praćenje i podešavanje rezonantne frekvencije pogodno samo u području razdvajanja frekvencije, u radu [25] predlaže se smanjenje vrijednosti faktora magnetske veze pri kritičnom vezivanju. Drugim riječima, povećava se područje razdvajanja frekvencije. Na taj se način osigurava povećanje udaljenosti prijenosa uz praćenje i podešavanje na rezonantnu frekvenciju. Ista je ideja o usklađivanju impedancija predstavljena u radovima [26,27] gdje se koristi fiksna frekvencija sustava rezonantnog WPT. Predložen je sustav za usklađivanje impedancije koji se implementira u predajnom podsustavu između izvora napajanja i predajnog rezonantnog kruga. Sustav za usklađivanje impedancije sastoji se od diskretnih elemenata, zavojnice,  $L_S$ , i dva kondenzatora,  $C_S$  i  $C_P$ , slika 2.13.

Uloga kruga za usklađivanje impedancije je usklađivanje rezonantne frekvencije sustava rezonantnog WPT s fiksnom frekvencijom izvora napajanja  $V_S$ . U sustavu rezonantnog WPT bez kruga za prilagodbu impedancije rezonantna se frekvencija mijenja s promjenom faktora magnetske veze (slika 2.12). Simulacijama i eksperimentima je potvrđeno da oba tipa kruga za usklađivanje impedancije uspješno prilagođavaju rezonantnu frekvenciju sustava na frekvenciju izvora napajanja, [26,27], za različite udaljenosti prijenosa odnosno za različite faktore magnetske veze. Mjerenja uređaja za mjerenje reflektirane i prenešene snage (engl. *Directional Coupler*), koji se implementira na predajnoj strani sustava rezonantnog WPT, ulazni su podaci računalu koje podešava vrijednosti kapaciteta kondenzatora  $C_S$  i  $C_P$  sve dok se ne minimizira reflektirana snaga. Pri rezonanciji opaža se minimalna reflektirana



**Slika 2.13:** Shema sustava rezonantnog WPT (topologija S-S) s krugom za usklađivanje impedancije: (a) L-tip, (b) invertirani L-tip

snaga sustava. Mjerenjima je potvrđeno da je zračna zavojnica  $L_S$  pogodnija u krugu za prilagodbu impedancije jer je tada sustav učinkovitiji u odnosu na primjenu zavojnice sa željeznom jezgrom u krugu za prilagodbu impedancije. Optimalne vrijednosti kapaciteta kondenzatora  $C_S$  i  $C_P$  određuju se gradijentnom metodom pretraživanja minimalne vrijednosti reflektirane snage, [26,27]. Opravdanost primjene gradijentne metode je globalni minimum reflektirane snage uz nepostojanje lokalnih ekstrema. Na kraju, potrebno je napomenuti da je L-tip kruga za usklađivanje impedancije pogodan samo za veće vrijednosti faktora magnetske veze (manje udaljenosti prijenosa). Nasuprot tome, inverzni L-tip kruga za usklađivanje impedancije prikladan je za ma-

nje faktore magnetske veze (veće udaljenosti prijenosa) pri kojima se uspješno usklađuju impedancije.

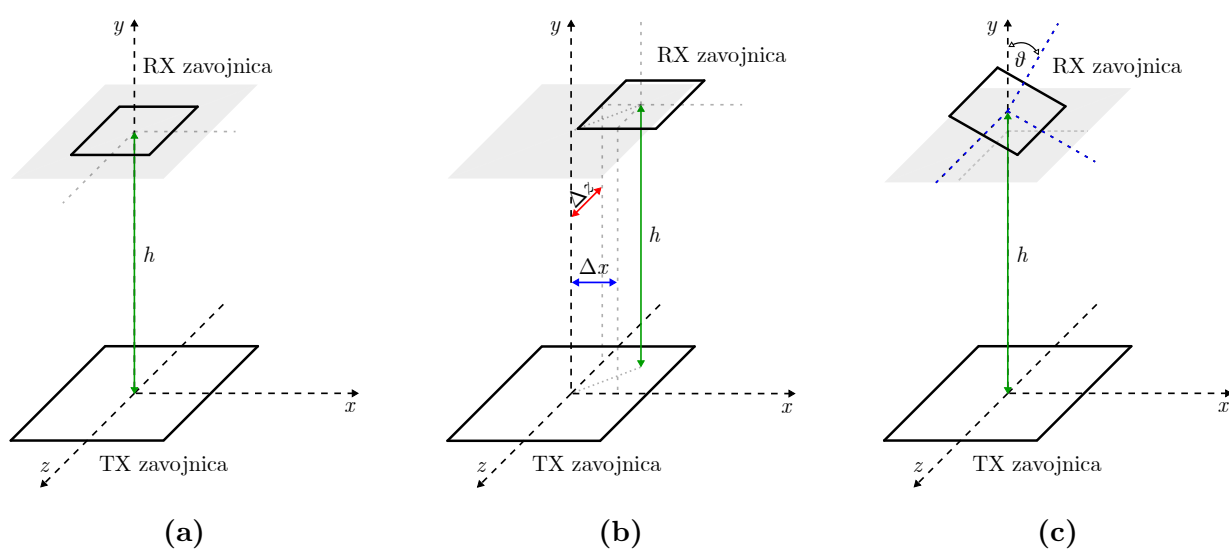
Iz prethodnih se razmatranja može izvesti zaključak da je glavni uzrok razdvajanja frekvencije i neusklađenosti impedancija u sustavu rezonantnog WPT zapravo promjenjivi faktor magnetske veze,  $k$ . Pod pretpostavkom da se osigura nepromjenjivi faktor magnetske veze, sustav rezonantnog WPT mogao bi učinkovito funkcionirati bez dodatnih podsustava koji prate i prilagođavaju frekvenciju te usklađuju impedancije. Kako bi se osigurao konstantan faktor magnetske veze potrebno je generirati homogeno magnetsko polje predajne zavojnice.

#### 2.2.4. Homogeno magnetsko polje predajne zavojnice

U prethodnim poglavljima navedeno je da promjena faktora magnetske veze utječe na učinkovitost prijenosa i snagu na prijemnoj strani sustava rezonantnog WPT. Promjena se faktora magnetske veze povezivala isključivo s promjenom udaljenosti prijenosa energije,  $h$ , između predajne i prijemne zavojnice koje su postavljene koaksijalno, slika 2.14a. Međutim, promjena faktora magnetske veze u konvencionalnom sustavu rezonantnog WPT može nastupiti i uslijed lateralne neusklađenosti (engl. *Lateral Misalignment*), slika 2.14b, i kutne neusklađenosti (engl. *Angular Misalignment*), slika 2.14c, RX zavojnice u odnosu na TX zavojnicu. Pri lateralnoj su neusklađenosti RX i TX zavojnica smještene u paralelnim ravninama koje su odvojene udaljnošću  $h$  i centar RX zavojnice je udaljen za  $\Delta x$  i  $\Delta z$  od centra TX zavojnice. Pri kutnoj neusklađenosti zavojnice više nisu u paralelnim ravninama, nego je ravnina koju čini RX zavojnica pod kutem  $\vartheta$  u odnosu na ravninu koju čini TX zavojnica, [28]. Ravnina iznad TX zavojnice na slici 2.14 označena si-

vom bojom čija površina odgovara površini TX zavojnice predstavlja ravninu napajanja (engl. *Charging Surface*).

Općenito se na ravninu napajanja, koja je za neku vrijednost  $h$  udaljena od TX zavojnice, postavlja jedna ili više RX zavojnica. Da bi se ostvarila visoka učinkovitost prijenosa energije i da bi se prenijela maksimalna snaga, najčešće je potrebno postaviti RX zavojnicu u centralni položaj (koaksijalno s TX zavojnicom) uz optimalnu udaljenost prijenosa,  $h$ , kao na slici 2.14a. Tada se u konvencionalnim sustavima rezonantnog WPT ostvaruje kritično vezivanje, [29]. Pomakom RX zavojnice u lateralni položaj na ravnini napajanja, slika 2.14b, u konvencionalnim sustavima rezonantnog WPT dolazi do opadanja učinkovitosti prijenosa i snage na prijemu. Također, kutno odstupanje RX zavojnice uzrokuje smanjenje učinkovitosti i snage na prijemu u odnosu na performanse sustava rezonantnog WPT s RX zavojnicom u centralnoj poziciji. Glavni uzrok zbog kojeg se pogoršavaju performanse sustava rezonantnog WPT s obzirom na međusobni položaj TX i RX zavojnice je promjena faktora magnetske veze. Nestabilan faktor magnetske veze



**Slika 2.14:** Položaj RX zavojnice u odnosu na TX zavojnicu: (a) centralni položaj, (b) lateralni položaj i (c) centralni položaj s kutnim odstupanjem

je posljedica nehomogenog magnetskog polja predajne zavojnice u ravnini napajanja.

Homogeno magnetsko polje u ravnini napajanja osigurava stabilan iznos faktora magnetske veze što podrazumijeva stabilnu učinkovitost i konstantu snagu koja se prenosi u sustavu rezonantnog WPT bez obzira na lateralno odstupanje RX zavojnice od centralne pozicije. Ostvarivanjem homogenog magnetskog polja u ravnini napajanja povećava se tolerancija na neusklađenost (engl. *Misalignment Tolerance*) položaja RX zavojnice u ravnini napajanja. Drugim riječima, uz prisutnost homogenog magnetskog polja u ravnini napajanja omogućava se sloboda postavljanja RX zavojnice u lateralni položaj na ravnini napajanja. Ideja homogenog polja prikladno je rješenje za problem lateralne neusklađenosti uz nepostojanje kutne neusklađenosti ( $\vartheta = 0^\circ$ ), slika 2.14b. Stoga se u nastavku podrazumijeva samo lateralna neusklađenost RX i TX zavojnice.

Postoje praktični razlozi zbog kojih je potreban sustav rezonantnog WPT s tolerancijom na lateralni položaj RX zavojnice. Sustavi rezonantnog WPT se koriste za napajanje trošila ili za punjenje njihovih punjivih baterija. U slučaju prijemne zavojnice koja je integrirana u medicinski implantant unutar živog organizma, potrebno je osigurati veću toleranciju na lateralni položaj zbog realnih poteškoća u ostvarivanju centralnog položaja pri kojem su predajna i prijemna zavojnica koaksijalne, [30]. Također je za sustav rezonantnog WPT s primjenom u punjenju baterija električnih vozila potrebno osigurati veću toleranciju na neusklađenost položaja prijemne zavojnice. Naime, uobičajen je slučaj da prijemna zavojnica integrirana unutar električnog vozila nije u centralnom položaju odnosno lateralno je pomaknuta s obzirom na centar predajne zavojnice instalirane pod površinom parkirnog mjesta.



Stoga je homogeno magnetsko polje u ravnini napajanja poželjna karakteristika sustava rezonantnog WPT koji se upotrebljavaju za punjenje baterija medicinskih implantata i električnih vozila. Osim toga, ostvarivanjem homogenog magnetskog polja u ravnini napajanja omogućava se istovremeni i učinkoviti prijenos energije prema više prijemnih zavojnica (trošila) bez obzira na neusklađenost njihovih položaja u odnosu na centar predajne zavojnice. U tom slučaju podrazumijeva se veća površina predajne zavojnice odnosno ravnine napajanja na kojoj se nalazi više prijemnih zavojnica manjih dimenzija od predajne zavojnice. U takvom je višekorisničkom okruženju nužno obratiti pozornost na međusobne dimenzije pojedine prijemne zavojnice i predajne zavojnice zbog faktora magnetske veze. Smanjenjem dimenzija prijemne zavojnice smanjuje se i faktor magnetske veze između prijemne i predajne zavojnice koji određuje učinkovitost prijenosa energije, slika 2.8. Predajna zavojnica ima dominantnu ulogu u distribuciji jakosti magnetskog polja,  $H$ , u ravnini napajanja sustava rezonantnog WPT. Stoga se u literaturi predlažu različiti dizajni planarnih (2D) i 3D predajnih zavojnica koje generiraju homogeno magnetsko polje u ravnini napajanja. Potrebno je napomenuti da je pri planarnom bežičnom prijenosu energije relevantna komponenta jakosti magnetskog polja u ravnini napajanja vertikalna s obzirom na ravninu napajanja. U trodimenzionalnom Kartezijevom koordinatnom sustavu koji je prikazan na slici 2.14 vertikalna komponenta jakosti magnetskog polja bila bi u smjeru  $y$  osi,  $\vec{H}_y$ . Preostale dvije komponente jakosti magnetskog polja,  $\vec{H}_x$  i  $\vec{H}_z$ , ne doprinose induciranju napona  $e$ , jednačba (2-1), u prijemnoj zavojnici odnosno ne doprinose bežičnom prijenosu energije. Točnije, isključivo komponenta gustoće magnetskog toka koja je vertikalna s obzirom na ravninu

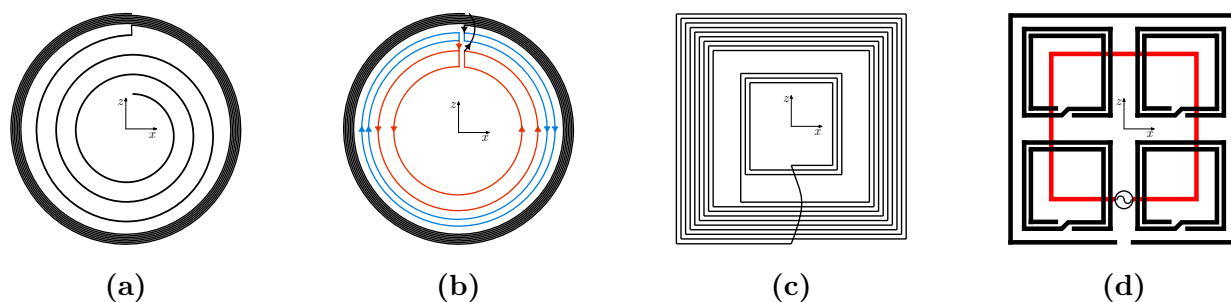
napajanja  $\vec{B}_y$  doprinosi bežičnom prijenosu energije:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A} = |\vec{B}| \cdot |\vec{A}| \cdot \cos(\alpha) = |\vec{B}_y| \cdot |\vec{A}|, \quad (2-41)$$

gdje je  $\Phi$  magnetski tok koji se pojavljuje i u jednadžbi (2-1). Magnetski tok je skalarni produkt vektora gustoće magnetskog toka  $\vec{B}$  i vektora normale  $\vec{A}$  koji predstavlja površinu kroz koju se promatra magnetski tok. U jednadžbi (2-41),  $\alpha$  je kut između  $\vec{B}$  i  $\vec{A}$ . Iz jednadžbe (2-41) se može zaključiti da se jedino vertikalna komponenta gustoće magnetskog toka (u ovom slučaju  $\vec{B}_y$ ) uzima u obzir pri računanju magnetskog toka. Jakost magnetskog polja  $\vec{H}$  je proporcionalna gustoći magnetskog toka  $\vec{B}$  pa se u ovoj disertaciji obje navedene fizikalne veličine promatraju u ravnini napajanja. Stoga se u nastavku ove disertacije u obzir uzima samo komponenta magnetske indukcije i jakosti magnetskog polja vertikalna na ravninu napajanja.

U literaturi se najvećim dijelom predlažu različiti dizajni predajnih zavojnica koje generiraju homogeno magnetsko polje u ravnini napajanja. Nasuprot tome, rijetko se dizajniraju prijemne zavojnice što je u skladu s dominantnom ulogom predajnih zavojnica u generiranju magnetskog polja u ravnini napajanja. Predajne se zavojnice najčešće izrađuju u PCB (engl. *Printed Circuit Board, PCB*) tehnologiji ili uz pomoć Litz vodiča. Općenito se predajne zavojnice manjih dimenzija izrađuju u PCB tehnologiji dok je za predajne zavojnice većih dimenzija prikladnija izrada Litz vodičem.

Inicijalni rad, [31], koji se bavi dizajnom predajne zavojnice s ciljem poboljšanja performansi sustava rezonantnog WPT uslijed homogenijeg magnetskog polja objavljen je 2008. godine. Predlaže se hibridna predajna zavojnica kružnog ili pravokutnog oblika koja je kombinacija spiralne zavojnice i prstenaste zavojnice čiji su svi vodiči koncentrirani na vanjskom



**Slika 2.15:** Hibridne predajne zavojnice: (a) [31], (b) [32], (c) [33] i (d) [30]

rubu zavojnice, slika 2.15a. Serijski spojene spiralna i prstenasta zavojnica su koaksijalne. Ideja o kombinaciji spiralne i prstenaste zavojnice potječe iz činjenica da pojedinačno spiralna zavojnica generira magnetsko polje konveksnog oblika dok prstenasta zavojnica generira magnetsko polje konkavnog oblika u ravnini napajanja. Međutim, njihovom se kombinacijom postiže homogenije magnetsko polje u ravnini napajanja jer se superponiraju konveksno magnetsko polje spiralne zavojnice i konkavno magnetsko polje prstenaste zavojnice. Za zadane dimenzije i broj namotaja prstenaste zavojnice podešavaju se parametri spiralne zavojnice: broj namotaja, radijus spiralnog namota koji je najbliži prstenastoj zavojnici i razmak između uniformno udaljenih susjednih namotaja spiralne zavojnice. Dakle, za postizanje što homogenijeg magnetskog polja u ravnini napajanja podešavaju se geometrijski parametri spiralne zavojnice. Osim što homogenijeg magnetskog polja, cilj dizajniranja predajne zavojnice je ostvariti takvo homogeno magnetsko polje u što većem dijelu površine ravnine napajanja koji se tada naziva homogena regija (engl. *Effective Charging Region*). Pretražen je čitav prostor rješenja (dizajni s različitim geometrijskim parametrima) koja su uspoređena na temelju međuinduktiviteta između predajne i prijemne zavojnice. Konstantan iznos međuinduktiviteta, bez obzira na položaj prijemne zavojnice u ravnini napajanja, predstavlja homogeno magnetsko polje odnosno konstantan iz-

nos faktora magnetske veze. Mjerenja su na prototipu hibridne zavojnice, izrađenom s Litz vodičem, potvrdila izračune prema kojima je postignuto homogenije magnetsko polje u odnosu na konvencionalnu predajnu zavojnicu. U eksperimentu je provedeno istovremeno napajanje četiri trošila uz učinkovitost od 80%. Udaljenost prijenosa u eksperimentima iznosi 2.5 mm.

Ideja hibridne zavojnice dalje se u literaturi [30, 32–35] pojavljuje kao rješenje koje uz pomoć homogenog magnetskog polja u ravnini napajanja pruža stabilne performanse sustava rezonantnog WPT. U [32], vanjski dio hibridne predajne zavojnice sastoji se od spiralnih namotaja koji su koncentrirani po obodu predajne zavojnice. Unutarnji namotaji hibridne zavojnice spojeni su serijski s vanjskim spiralnim namotajima, slika 2.15b. Unutarnji namotaj bliži vanjskoj spiralnoj zavojnici čine dva paralelno spojena namotaja u obliku koncentričnih kružnica. Također, unutarnji namotaj bliži centru zavojnice čine dva paralelno spojena namotaja u obliku koncentričnih kružnica. Smjer struje u vanjskim spiralnim namotajima i unutarnjem namotu bliže centru zavojnice se podudara. Suprotnim namatanjem unutarnjeg namotaja koji je bliži vanjskim spiralnim namotajima ostvaruje se suprotan smjer struje. Na taj se način podešava ravnomjernija raspodjela jakosti magnetskog polja u ravnini napajanja. Novitet ove hibridne zavojnice je raspodjela struje u unutarnjim namotajima uslijed paralelnog spoja namotaja. Odgovarajućim razmakom između koncentričnih namotaja unutarnjih namotaja, raspodjelom struje i djelovanjem magnetskih polja suprotnih smjerova (suprotan smjer namatanja namotaja) postiže se stabilniji međuinduktivitet između predajne i prijemne zavojnice odnosno homogenije magnetsko polje u ravnini napajanja.

Autori rada [33] predlažu dodavanje manje kvadratne spiralne zavojnice

unutar planarne kvadratne spiralne zavojnice kako bi se nadomjestila manja jakost polja u centru ravnine napajanja veće spiralne zavojnice, slika 2.15c. Razmak između namotaja, vanjske dimenzije i broj namotaja su geometrijski parametri unutarnje i manje spiralne zavojnice koji su odabrani kako bi se ujednačila jakost magnetskog polja uz očuvanje faktora dobrote hibridne zavojnice u usporedbi s konvencionalnom spiralnom predajnom zavojnicom. Četiri serijski vezane koncentrične kvadratne spiralne zavojnice sa suprotnim smjerom namatanja susjednih spirala čine hibridnu zavojnicu predloženu u radu [35]. Za različite se geometrijske parametre (vanjske dimenzije, broj namotaja i razmak između namotaja) svake spirale promatra distribucija magnetskog polja u ravnini napajanja uz pomoć numeričkih simulacija. Prema eksperimentima, ostvarena je homogena regija koja čini 51.8% površine ravnine napajanja. Kriterij za određivanje homogene regije u kojoj vlada homogeno magnetsko polje postavljen je s obzirom na  $B_{y,centar}$ , tj. vrijednost magnetske indukcije u centru ravnine napajanja:  $0.9B_{y,centar} < B_y < 1.1B_{y,centar}$ . Dakle, u navedenom se radu definira homogeno magnetsko polje uz valovitost (engl. *Ripple*) od 20%. Udio koji homogena regija čini u ravnini napajanja relevantna je karakteristika sustava rezonantnog WPT koja se nastoji maksimizirati uz što manju valovitost. U nastavku ove disertacije navest će se i za ostale predložene predajne zavojnice, ako je to moguće odrediti iz rezultata eksperimenata, udio homogene regije uz pripadajuću valovitost. Hibridna zavojnica u [35] usporediva je s onom u [33], jedina razlika je u tome što se hibridna zavojnica u [35] sastoji od četiri spiralne zavojnice i suprotan je smjer namatanja susjednih spiralnih zavojnica dok hibridnu zavojnicu u [33] čine dvije spiralne zavojnice s istim smjerom namatanja. Stoga je na slici 2.15 prikazana samo zavojnica predložena u [33].

Sljedeća je predložena hibridna predajna zavojnica kvadratnog oblika i sastoji se od serijski vezane kvadratne zavojnice kojoj su namotaji koncentrirani na vanjskom rubu i kvadratne spiralne zavojnice s nejednolikom udaljenošću između susjednih namotaja, [34]. Autori su na temelju simulacija elektromagnetskih polja u ravnini napajanja odabrali određeni broj namotaja i prikladan razmak između susjednih namotaja spiralne zavojnice pri kojem je međuinduktivitet između predajne i prijemne zavojnice približno konstantan. Prema gore navedenoj strukturi, hibridna zavojnica predložena u [34], a koja se sastoji od dvije serijski vezane zavojnice (kvadratne koncentrirane zavojnice i kvadratne spiralne zavojnice s nejednakim razmakom između susjednih namotaja) je usporediva s onom iz rada [31], koja se sastoji od dvije serijski vezane zavojnice (kružna koncentrirana zavojnica i kružna spiralna zavojnica s jednakim razmakom između namotaja), slika 2.15a. Zbog toga zavojnica predložena u [34] nije prikazana na slici 2.15. Prototip hibridne predajne zavojnice izveden u PCB tehnologiji namijenjen za napajanje medicinskih implantata sastoji se od četiri identične kvadratne spiralne zavojnice koje su pravilno raspoređene unutar jedne veće kvadratne zavojnice, [30]. Geometrija zavojnice koja se predlaže u [30] prikazana je na slici 2.15d. Kako se radi o sustavu rezonantnog WPT s četiri zavojnice, na slici 2.15d prikazane su dvije magnetski vezane zavojnice predajnog podsustava. Uzbudna zavojnica obilježena je crvenom bojom dok je crnom bojom označena predajna zavojnica. U usporedbi s konvencionalnom kvadratnom spiralnom zavojnicom povećana je tolerancija na neusklađenost prijemne zavojnice u odnosu na predajnu zavojnicu uslijed homogenijeg magnetskog polja predložene hibridne zavojnice. Iako navedene hibridne zavojnice poboljšavaju stabilnost učinkovitosti prijenosa bez obzira na položaj prijemne zavojnice, jakost magnetskog polja

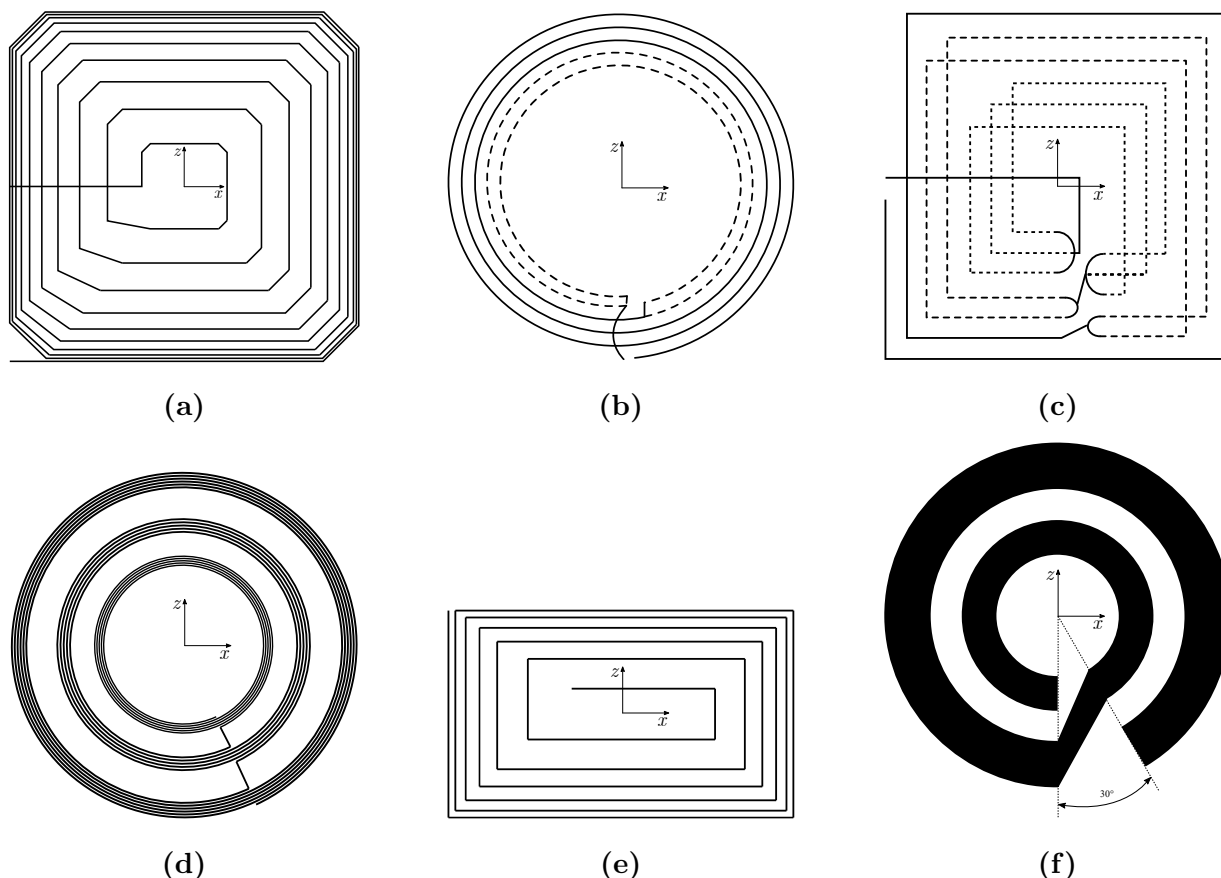
u ravnini napajanja nije dovoljno homogena pa se mogu očekivati oscilacije učinkovitosti prijenosa. Navedeni dizajni hibridnih zavojnica izrađeni su na temelju poznavanja oblika polja kojeg generiraju koncentrirane i spiralne zavojnice. Kako bi se utvrdili geometrijski parametri hibridnih zavojnica potrebno je pretražiti čitav prostor rješenja što je dugotrajan postupak. Srednja vrijednost jakosti magnetskog polja (u ravnini napajanja) hibridne zavojnice koja ima suprotne smjerove namatanja namotaja manja je u odnosu na srednju vrijednost jakosti magnetskog polja konvencionalne predajne zavojnice pa je i učinkovitost prijenosa hibridne zavojnice manja u odnosu na učinkovitost prijenosa konvencionalne zavojnice.

Osim hibridnih zavojnica, u literaturi se za postizanje homogenog magnetskog polja predlažu pojedinačne spiralne predajne zavojnice, [36–44]. Kvadratne spiralne zavojnice sa zatupljenim kutevima koje imaju nejednak razmak između susjednih spiralnih namotaja predlažu se u [36, 37], slika 2.16a. Za različite kombinacije geometrijskih parametara zavojnice (broj namotaja, zatupljenost kuta, udaljenost između susjednih namotaja), simulacijama se određuje jakost magnetskog polja u ravnini napajanja. Vrednovanje pojedinog dizajna s određenim geometrijskim parametrima obavlja se na temelju koeficijenta varijacije (omjer standardne devijacije i srednje vrijednosti) jakosti magnetskog polja, [36]. Dizajn s minimalnim koeficijentom varijacije se na kraju odabire kao optimalno rješenje. U radu [37] predlaže se, za razliku od jedne zavojnice u [36], istovremeno korištenje dvije spiralne kvadratne zavojnice. Geometrijski parametri obje zavojnice optimizirani su tako da zavojnice zajedno generiraju veći udio homogene regije u ravnini napajanja u odnosu na dvije zavojnice izrađene prema [36]. Spiralne zavojnice čiji su unutarnji namotaji međusobno paralelno povezani kako bi se

u konačnici ostvarilo homogeno polje predloženi su u [38, 39], slika 2.16b i 2.16c. Naime, na temelju prethodno utvrđene distribucije magnetskog polja iznad konvencionalne spiralne zavojnice (konveksna distribucija) predlaže se smanjenje struje unutarnjih namotaja spiralne zavojnice. Unutarnji namotaji se granaju i povezani su paralelno te njima pojedinačno teče manja struja u odnosu na vanjske serijske namotaje spiralne zavojnice. Za razliku od prethodnih metoda određivanja dizajna predajne zavojnice gdje se pretražuje čitav prostor rješenja za različite geometrijske parametre zavojnice, autori radova [40, 42–44] koriste inteligentno pretraživanje prostora rješenja. Inteligentni optimizacijski algoritmi, poput genetskog algoritma (engl. *Genetic Algorithm, GA*), učinkoviti su za rješavanje optimizacijskih problema čije je pretraživanje cjelokupnog prostora rješenja dugotrajno. Naime, po načinu djelovanja, GA je metoda usmjerenog slučajnog pretraživanja prostora rješenja (engl. *Guided Random Search Techniques*), [45]. Dizajn predajne zavojnice koja generira homogeno polje u ravnini napajanja tada predstavlja parametarski optimizacijski problem, [40]. Rješenja (u ovom slučaju dizajn predajne zavojnice s određenim geometrijskim parametrima) koja se u genetskom algoritmu nazivaju jedinkama vrednuju se s obzirom na funkciju cilja (engl. *Objective Function*) ili funkciju dobrote (engl. *Fitness Function*). Detaljnije o GA navedeno je u 4. poglavlju disertacije. Upotrebom GA određen je optimalni dizajn kružnih spiralnih zavojnica, [40, 44], slika 2.16d i 2.16f, i pravokutnih spiralnih zavojnica [42, 43], slika 2.16e.

Kako bi se proširila površina na kojoj vlada homogeno magnetsko polje, više predajnih zavojnica se gusto postavlja u redove i stupce (engl. *Array Of Coils*). Šest kružnih spiralnih predajnih zavojnica iz [41], slika 2.16d, slaže se u modul pa se proizvoljno velika predajna zavojnica po potrebi povećava

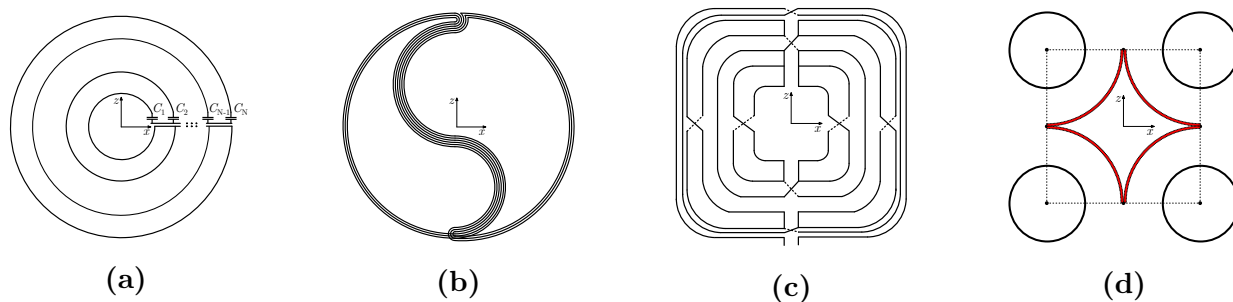




**Slika 2.16:** Spiralne predajne zavojnice: (a) [36, 37], (b) [38], (c) [39], (d) [40, 41], (e) [42, 43] i (f) [44]

mehaničkim i električkim vezivanjem više modula [46]. Za učinkoviti bežični prijenos predlaže se sklop za detekciju položaja prijemne zavojnice kako bi se aktivirala samo ona predajna zavojnica unutar modula iznad koje se nalazi prijemna zavojnica. Spiralne zavojnice posložene u redove i stupce također se predlažu u radovima [47, 48].

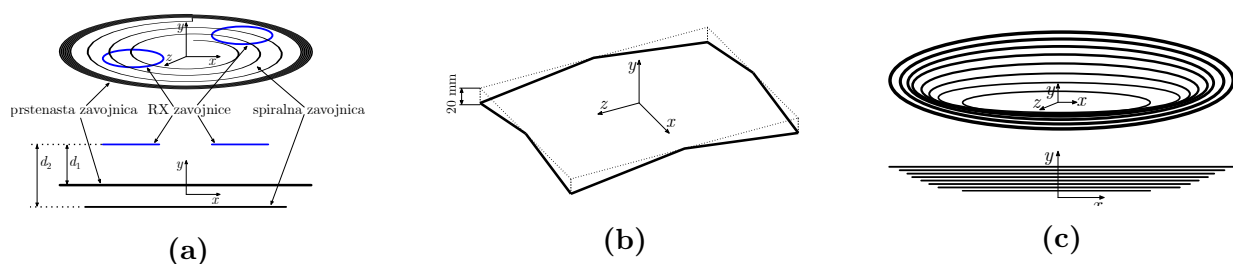
Osim hibridnih, spiralnih i zavojnica koje se slažu u redove i stupce, u literaturi se predlažu i zavojnice specifičnog dizajna koje generiraju homogeno magnetsko polje u ravnini napajanja. Autori rada [49] predlažu paralelno vezivanje namotaja koji su koncentrične kružnice, 2.17a. Dodavanjem kondenzatora određenog kapaciteta, čija je reaktancija značajno veća od otpora tog namotaja i induktivne reaktancije namotaja, svakom namotu podešava se struja koja teče kroz namotaj. Diskretna distribucija struje između namo-



**Slika 2.17:** Predajne zavojnice specifičnog oblika: (a) zavojnica koncentričnih kružnica [49], (b) zavojnica u obliku simbola Tao [50], (c) zavojnica s isprepletenim namotajima [51] i (d) pomoćna zavojnica (crvena boja) između gusto raspoređenih kružnih zavojnica (crna boja) [52]

taja radi se po uzoru na kontinuiranu raspodjelu struje u disku iznad kojeg je homogeno magnetsko polje. Zavojnica u obliku simbola Tao (engl. *Taichi Coil*) predložena je u radu [50], slika 2.17b. Prototip kvadratne zavojnice s isprepletenim namotajima, slika 2.17c, pokazao se prikladnim za povećanje tolerancije na neusklađenost prijemne zavojnice u odnosu na predajnu zavojnicu, [51]. Autori rada [52] kompenziraju nehomogeno magnetsko polje između kružnih zavojnica u redovima i stupcima postavljanjem pomoćne zavojnice između četiri kružne zavojnice, slika 2.17d.

Na kraju pregleda literature potrebno je razmotriti 3D predajne zavojnice dizajnirane za generiranje homogenog magnetskog polja u ravnini napajanja. Iako u dizajniranju predajnih zavojnica dominiraju planarne strukture (2D zavojnice), pojavljuju se i 3D strukture čija se upotreba predviđa za sustave rezonantnog WPT gdje vertikalna dimenzija predajne zavojnice ne predstav-



**Slika 2.18:** 3D predajne zavojnice: (a) hibridna [31], (b) pravokutna [53] i (c) u obliku lijevka [54]

lja problem. 3D predajna zavojnica prikladna je za ugradnju ispod parkirnog mjesta za bežično napajanje električnog vozila. Također se 3D predajna zavojnica može integrirati u namještaj poput uredskog stola uz uvjet da zavojnica svojim oblikom prati plohe koje čine taj namještaj. Hibridna zavojnica iz [31] zapravo je 3D zavojnica čija je spiralna zavojnica smještena vertikalno 1 mm ispod prstenaste zavojnice, slika 2.18a. 2012. godine predložena je 3D predajna zavojnica pravokutnog oblika [53], slika 2.18b. Izrađena je u PCB tehnologiji te je njezina dubina (vertikalna dimenzija) 20 mm. Algoritam za određivanje optimalne horizontalne distribucije namotaja predajne zavojnice u obliku lijevka, slika 2.18c, koja generira homogeno magnetsko polje u ravnini napajanja predstavljen je u [54]. Vertikalna distribucija namotaja je uniformna (jednaka vertikalna udaljenost između susjednih namotaja) i dubina predložene zavojnice je 20 cm. Rezultati simulacija potvrđuju homogenu regiju koja zauzima 71% površine predajne zavojnice (ravnine napajanja) uz definiranu homogenost:  $H_y > 0.9H_{ymax}$ . Unatoč visokom udjelu homogene regije u ukupnoj površini ravnine napajanja (71%), prototip zavojnice nije izrađen pa nisu provedena mjerenja jakosti magnetskog polja u ravnini napajanja. Usporedbom rezultata simulacija i mjerenja u navedenom pregledu literature može se primjetiti pravilo da je homogena regija zavojnice koja je utvrđena mjerenjem na prototipu zavojnice redovito manja u odnosu na onu koja je utvrđena simulacijama. Zbog činjenice da se mjerenja provode na realnoj i izrađenoj zavojnici, a simulacije na idealnom modelu predajne zavojnice, pri usporedbi različitih dizajna zavojnica odnosno njihovih udjela homogenih regija u ravnini napajanja, odabiru se rezultati mjerenja.

U sljedeća se dva poglavlja optimira 3D predajna zavojnica za generiranje homogenog magnetskog polja u ravnini napajanja. U 3. se poglavlju koristi

iscrpno pretraživanje za određivanje temeljne i specifične strukture 3D predajne zavojnice. U 4. se poglavlju koriste populacijski algoritam i algoritmi iz skupine evolucijskog računanja uz razdiobu struje po slojevima zavojnice za pronalaženje optimalnog rješenja varijabli koje opisuju 3D predajnu zavojnicu.

### 3. Postupak određivanja geometrije dvoslojne 3D predajne zavojnice s homogenom razdiobom magnetskog polja u ravnini napajanja

U ovom je poglavlju opisano istraživanje na temelju kojeg je napisan znanstveni rad [55] objavljen u znanstvenom časopisu *Wireless Power Transfer* izdavača *Hindawi*. Znanstveni je doprinos ovog rada:

- postupak određivanja geometrije pravokutne 3D zavojnice za bežični prijenos energije kojom se postiže homogena razdioba magnetskog polja.

Proces određivanja geometrijskih parametara 3D predajne zavojnice provodi se s pomoću proračuna jakosti magnetskog polja u ravnini napajanja. Umjesto računalnih programa namijenjenih za simulacije elektromagnetskih polja poput *Ansys Maxwell*-a ili *FEMM*-a (engl. *Finite Element Method Magnetics, FEMM*), koristi se *MATLAB*. Opravdanost korištenja *MATLAB*-a je matematičko opisivanje vodiča zavojnice umjesto crtanja modela zavojnice i brži proračun u odnosu na navedene specijalizirane programe.

Za potrebe proračuna jakosti magnetskog polja u ravnini punjenja (napajanja), predajna zavojnica definirana je kao struktura koja se sastoji od određenog broja linearnih segmenata. Svaki linearni segment zavojnice doprinosi jakosti magnetskog polja u ravnini napajanja pa prema tome vrijedi da je jakost magnetskog polja u nekoj točki ravnine napajanja vektorski zbroj svih vektora jakosti magnetskog polja koje pojedinačno generira svaki line-

arni segment te zavojnice. Svaki linearni segment definiran je s dvije točke,  $P_1$  i  $P_2$ , u trodimenzionalnom Kartezijevom koordinatnom sustavu, slika 3.1. Kada postoji tok struje od  $P_1$  do  $P_2$ , linearni segment  $P_1$ - $P_2$  generira magnetsko polje. Na slici 3.1 prikazano je magnetsko polje koje generira linearni segment  $P_1$ - $P_2$  u točki  $P_0$  koja se nalazi u referentnoj  $xz$  ravnini. Amplituda jakosti magnetskog polja u točki  $P_0$  može se izračunati prema sljedećem izrazu:

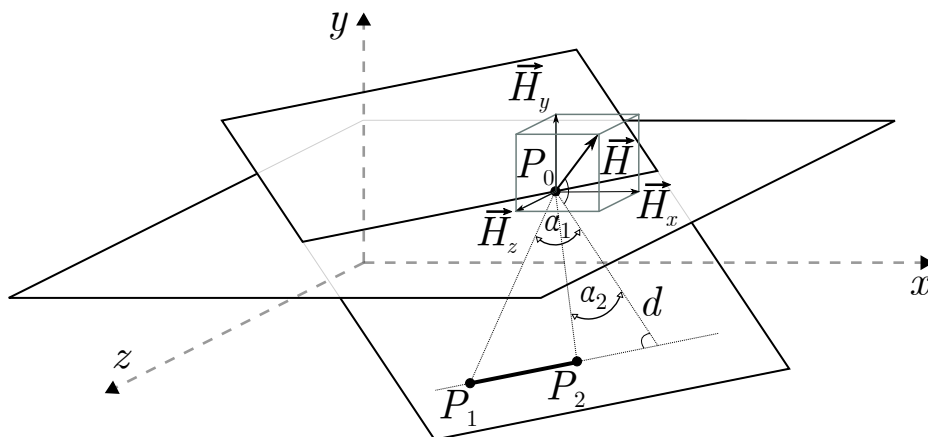
$$|\vec{H}| = \frac{I}{4\pi d}(\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2). \quad (3-1)$$

Najkraća udaljenost između točke  $P_0$  i pravca koji prolazi kroz linearni segment  $P_1$ - $P_2$  definira se kao

$$d = \frac{|\vec{P_1P_2} \times \vec{P_1P_0}|}{|\vec{P_1P_2}|}, \quad (3-2)$$

dok se kutevi  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  definiraju na ovaj način:

$$\alpha_1 = 90^\circ - \arccos \left( \frac{|\vec{P_1P_2} \cdot \vec{P_0P_1}|}{|\vec{P_1P_2}| \cdot |\vec{P_0P_1}|} \right), \quad (3-3)$$



Slika 3.1: Jakost magnetskog polja u točki  $P_0$  koje generira linearni segment  $P_1$ - $P_2$

$$\alpha_2 = 90^\circ - \arccos \left( \frac{\overrightarrow{P_1P_2} \cdot \overrightarrow{P_0P_2}}{|\overrightarrow{P_1P_2}| \cdot |\overrightarrow{P_0P_2}|} \right). \quad (3-4)$$

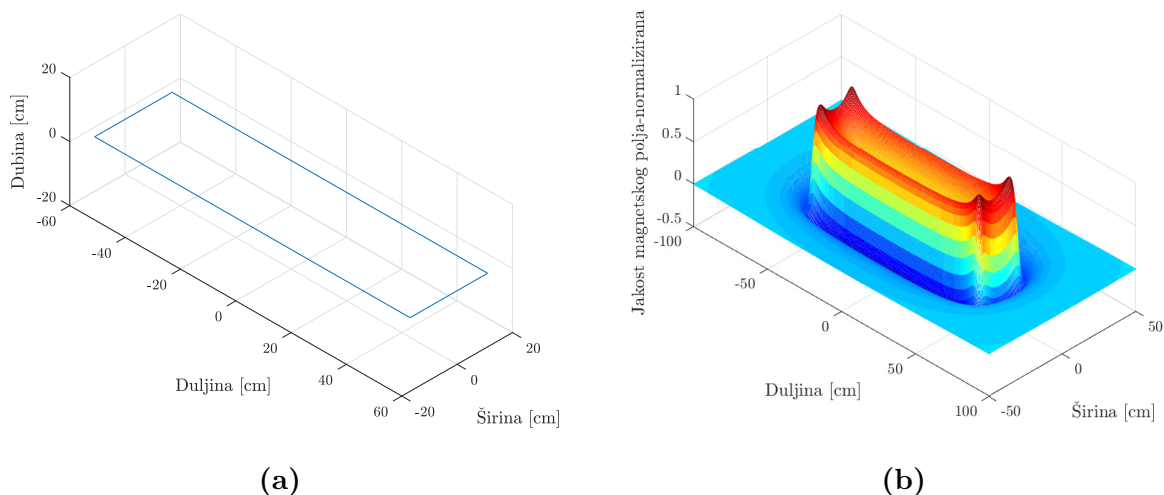
Ako struja  $I$  teče kroz linearni segment od  $P_1$  do  $P_2$ , vektor magnetskog polja  $\vec{H}$  u točki  $P_0$  je okomit na ravninu koja je određena točkama  $P_0$ ,  $P_1$  i  $P_2$ , slika 3.1. Jednadžbom (3-1) određena je jedino amplituda vektora jakosti magnetskog polja. Uz amplitudu, potrebno je odrediti i smjer vektora jakosti magnetskog polja koji se računa na sljedeći način:

$$\hat{H} = \frac{\overrightarrow{P_1P_2} \times \overrightarrow{P_1P_0}}{|\overrightarrow{P_1P_2} \times \overrightarrow{P_1P_0}|}. \quad (3-5)$$

U skladu s ranije navednim tvrdnjama, pri određivanju geometrije predajne zavojnice u obzir se uzima samo homogenost  $y$  komponente vektora jakosti magnetskog polja. Zavojnica je u *MATLAB*-u definirana kao *array* čiji svaki redak predstavlja jedan linearni segment predajne zavojnice. Prve tri vrijednosti prvog retka *array*-a određuju položaj točke  $P_1$ , sljedeće tri vrijednosti položaj točke  $P_2$ , a posljednja vrijednost u retku predstavlja struju  $I$  koja teče od  $P_1$  do  $P_2$ . Ostali su linearni segmenti, koji čine zavojnicu, redom definirani na sljedeći način:

$$\text{coil} = \begin{bmatrix} P_{1x} & P_{1y} & P_{1z} & P_{2x} & P_{2y} & P_{2z} & I_{12}; \\ P_{2x} & P_{2y} & P_{2z} & P_{3x} & P_{3y} & P_{3z} & I_{23}; \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{(n-1)x} & P_{(n-1)y} & P_{(n-1)z} & P_{nx} & P_{ny} & P_{nz} & I_{(n-1)n}; \end{bmatrix}. \quad (3-6)$$

Nakon što se struktura zavojnice i struje definiraju po uzoru na jednadžbu (3-6), moguće je izračunati jakost magnetskog polja u svakoj točki neke ravnine iznad takve zavojnice. Slika 3.2 prikazuje planarnu pravokutnu zavojnicu (114x28 cm) i distribuciju magnetskog polja takve zavojnice u ravnini



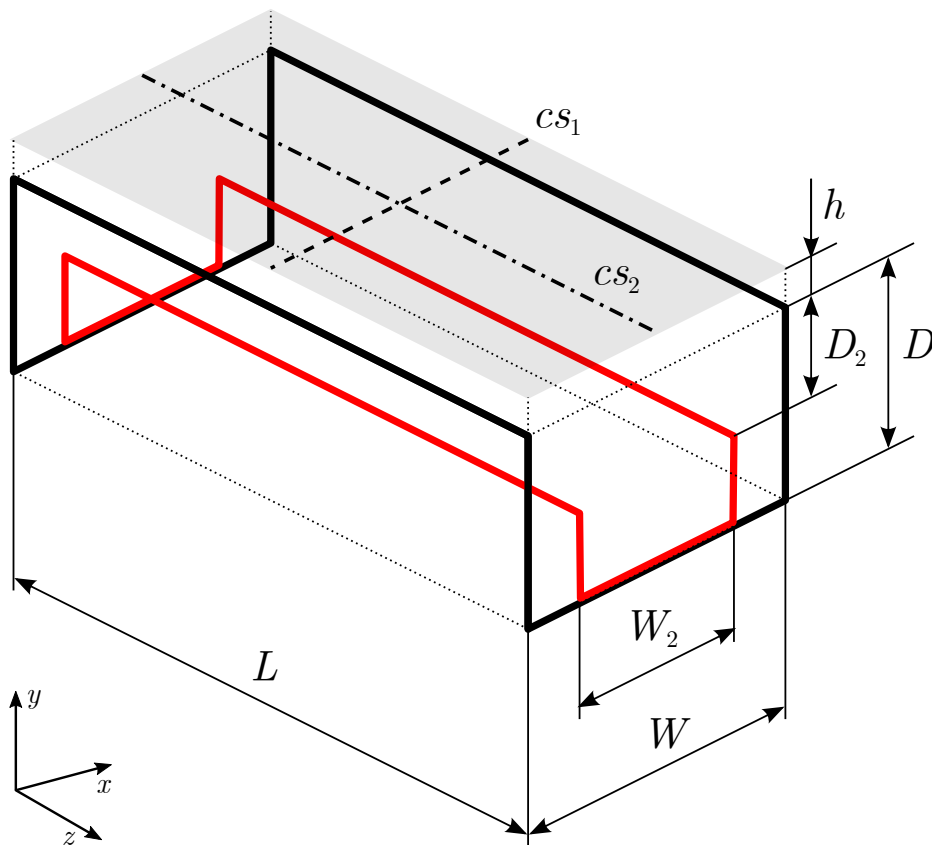
**Slika 3.2:** (a) pravokutna zavojnica, (b) distribucija jakosti magnetskog polja u ravini (200x100 cm) smještena 30 mm iznad zavojnice

(200x100 cm) koja je vertikalno udaljena 30 mm od zavojnice. Ako se promatra distribucija polja u ravnini napajanja čija površina odgovara površini predajne zavojnice, (114x28 cm), distribucija magnetskog polja je nehomogena i konkavnog oblika. Prema tome, najmanje vrijednosti jakosti magnetskog polja su u centralnom dijelu ravnine napajanja dok se najviše vrijednosti jakosti magnetskog polja pojavljuju u kutevima ravnine napajanja. Zbog toga se predlaže dvoslojna 3D pravokutna predajna zavojnica s homogenom razdiobom jakosti magnetskog polja u ravnini punjenja i postupak određivanja njezinih geometrijskih parametara opisan je u nastavku.

### 3.1. Postupak određivanja strukture 3D predajne zavojnice

Na slici 3.3 prikazana je općenita struktura 3D predajne zavojnice koja se sastoji od dva sloja. Da bi se lakše razlikovali, slojevi zavojnice prikazani su različitim bojama na slici 3.3. Crnom bojom označen je prvi sloj te je crvenom bojom označen drugi sloj zavojnice. Drugi sloj zavojnice postavljen je na dubini  $D_2$  u odnosu na prvi sloj zavojnice. Također, širina je drugog sloja zavojnice,  $W_2$ , manja u odnosu na širinu prvog sloja zavojnice,  $W$ . Oba sloja



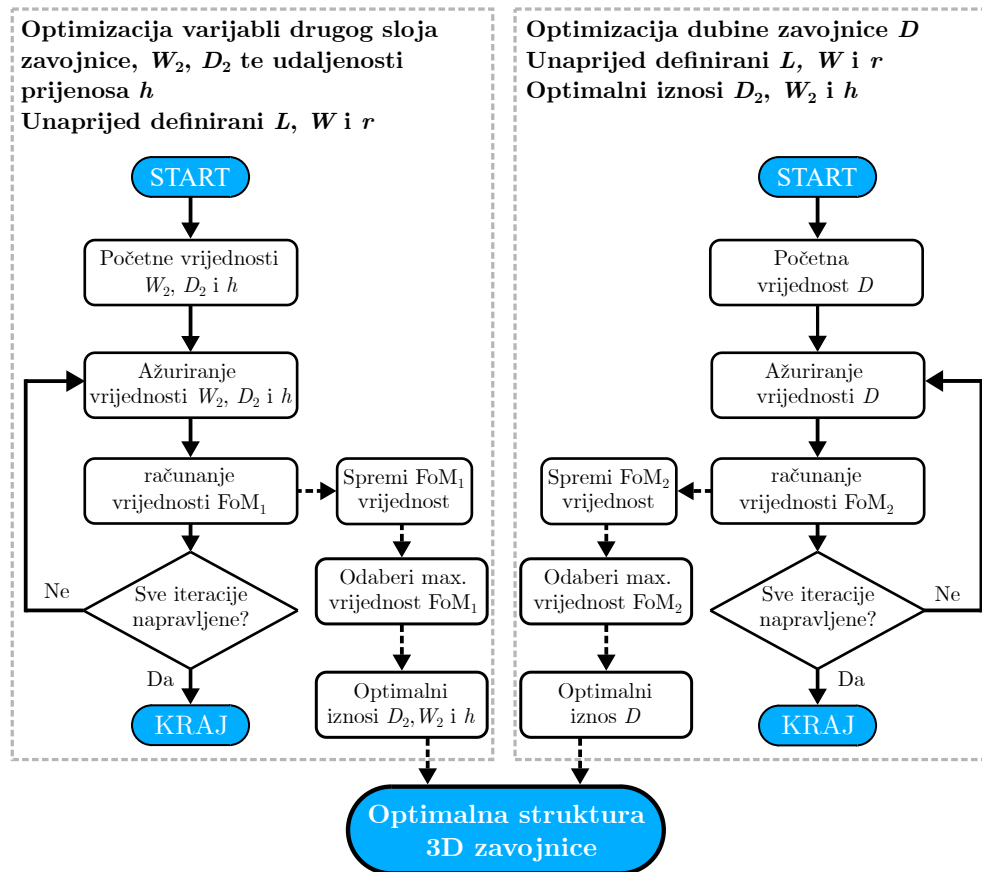


Slika 3.3: Struktura dvoslojne 3D predajne zavojnice

imaju istu duljinu  $L$ , a kraće stranice oba pravokutna sloja savijene su prema dolje do dubine  $D$ . Siva površina iznad zavojnice na slici 3.3 predstavlja ravninu napajanja koja je za  $h$  vertikalno udaljena od zavojnice.

Postupak je određivanja geometrijskih parametara 3D predajne zavojnice dvostruk. Cilj prvog procesa je osigurati homogeno magnetsko polje širom ravnine napajanja odnosno na poprečnom pravcu ravnine napajanja  $cs_1$  sa slike 3.3. Također, cilj je drugog procesa postizanje homogenog magnetskog polja, ali po duljini ravnine napajanja odnosno po uzdužnom pravcu  $cs_2$  sa slike 3.3.

Tijek postupka određivanja geometrijskih parametara 3D predajne zavojnice prikazan je radnim okvirom na slici 3.4. Maksimalna dopuštena valovitost jakosti magnetskog polja  $r$  i dimenzije prvog sloja zavojnice,  $L$  i  $W$ , se smatraju ulaznim veličinama postupka određivanja geometrije 3D predajne



Slika 3.4: Radni okvir postupka određivanja geometrije 3D predajne zavojnice

zavojnice. Izlazne su veličine prvog procesa (lijevi okvir na slici 3.4) optimalna udaljenost prijenosa,  $h$ , optimalne vrijednosti varijabli drugog sloja zavojnice,  $W_2$  i  $D_2$ , koje su ujedno i dio ulaznih veličina drugog procesa (desni okvir na slici 3.4). Izlazna veličina drugog procesa je dubina zavojnice  $D$ . Izlazne veličine procesa pružaju maksimalnu srednju vrijednost jakosti magnetskog polja i maksimalni udio homogene regije u ravnini napajanja. U nastavku je ovog poglavlja detaljno opisan postupak određivanja geometrijskih parametara 3D predajne zavojnice.

### 3.1.1. Postupak određivanja varijabli drugog sloja zavojnice, $W_2$ i $D_2$

Kako bi se osigurala homogena distribucija jakosti magnetskog polja po poprečnom pravcu  $cs_1$  odnosno po širini ravnine napajanja, potrebno je podesiti geometrijske parametre drugog sloja zavojnice. Budući da nije moguće

ostvariti idealnu homogenu distribuciju jakosti magnetskog polja po pravcu  $cs_1$ , uvodi se maksimalna dopuštena valovitost jakosti magnetskog polja. Uz valovitost se povezuje udaljenost prijenosa energije,  $h$ . Za različite udaljenosti različite vrijednosti geometrijskih parametara  $W_2$  i  $D_2$  pružaju najhomogeniju raspodjelu jakosti magnetskog polja. Slično tome, različite vrijednosti maksimalno dopuštene valovitosti jakosti magnetskog polja i različite vrijednosti parametara  $W_2$  i  $D_2$  rezultiraju najkraćom udaljenošću prijenosa.

Cilj postupka određivanja varijabli drugog sloja zavojnice je sljedeći: pronalaženje vrijednosti varijabli drugog sloja zavojnice koje pružaju maksimalno homogeno magnetsko polje na što kraćoj udaljenosti prijenosa energije. Međutim, takav cilj ne uzima u obzir neke relevantne aspekte. Naime, karakteristične su visoke vrijednosti jakosti magnetskog polja pri bliskim udaljenostima prijenosa. Ipak, određene vrijednosti varijabli drugog sloja zavojnice osiguravaju homogeno magnetsko polje u ravnini napajanja pri bliskim udaljenostima, ali po cijenu slabijeg magnetskog polja. Posljedica toga su slabije performanse sustava rezonantnog WPT odnosno smanjenje učinkovitosti prijenosa i snage prijemnika, uslijed manjeg faktora magnetske veze. Drugi relevantni aspekt je dio odnosno postotak poprečnog presjeka ravnine napajanja (pravca  $cs_1$ ) u kojem je ostvareno homogeno magnetsko polje. Naime, jednostavno je ostvariti homogeno magnetsko polje s visokom jakosti magnetskog polja pri kratkim udaljenostima, ali samo na malom dijelu ukupne širine ravnine napajanja.

Dakle, prvi dio postupka je određivanje geometrijskih parametara drugog sloja zavojnice pri kojima se ostvaruje maksimalna širina ravnine napajanja gdje postoji homogeno magnetsko polje. Stoga se, kao mjera kvalitete (engl. *Figure of Merit, FoM*), uvodi  $FoM_1$  koja je umnožak srednje vrijednosti mag-

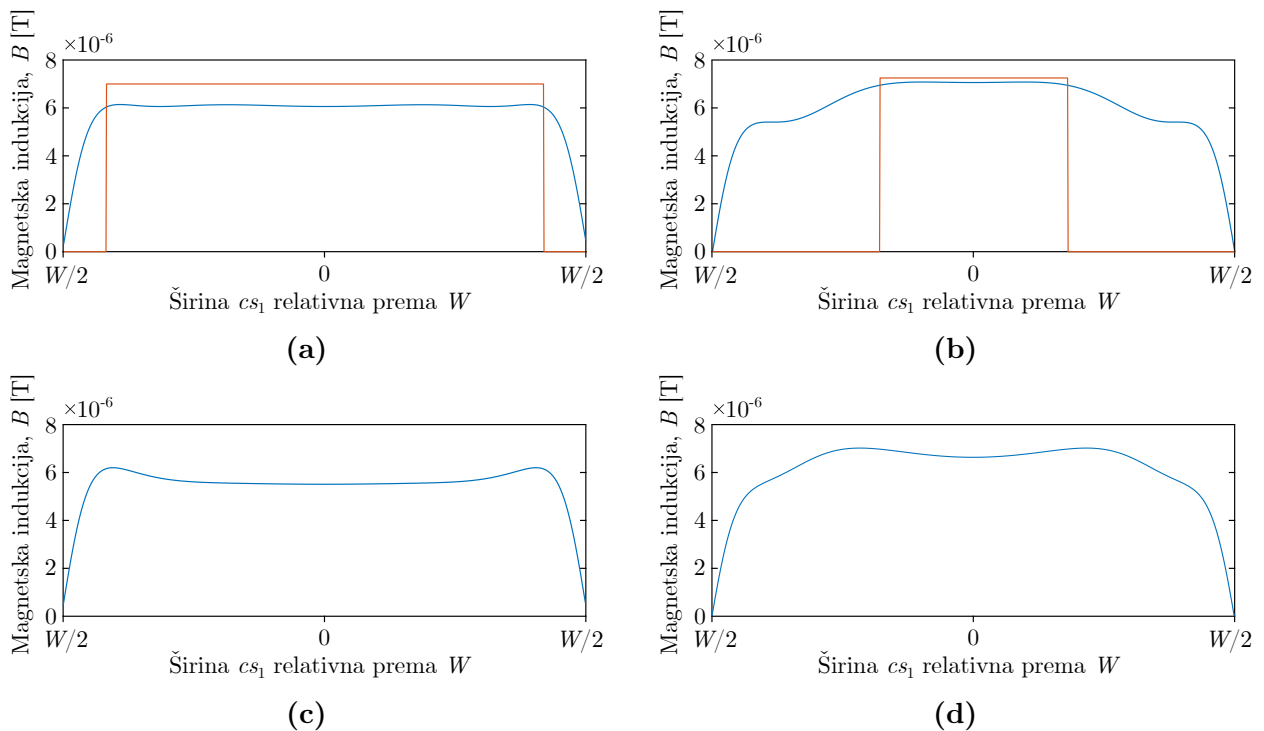
netskog toka  $B$  ( $B$  se računa samo za dio pravca  $cs_1$  gdje je homogeno magnetsko polje koje je definirano maksimalnim dopuštenom valovitošću) i postotka poprečnog presjeka gdje je prisutno homogeno magnetsko polje.

Prvi je korak u postupku određivanja geometrijskih parametara drugog sloja zavojnice analiza vrijednosti  $FoM_1$ . Iznos  $FoM_1$  ovisi o: udaljenosti prijenosa  $h$ , maksimalnoj dopuštenoj valovitosti magnetskog polja  $r$ , te o varijablama drugog sloja zavojnice  $W_2$  i  $D_2$ . S obzirom da je nužno da se udaljenost prijenosa promatra s obzirom na širinu zavojnice  $W$ , njihov kvocijent se upotrebljava u analizi vrijednosti  $FoM_1$ . Struja koja teče zavojnicom je istog iznosa kroz svaki linearni segment i smjer struje u prvom sloju se podudara sa smjerom struje u drugom sloju zavojnice.

Četiri se parametra mijenjaju u sljedećim rasponima:  $h/W$  varira od 1% do 20% (u 20 koraka), valovitost varira od od 1% do 20% (u 6 koraka), širina drugog sloja zavojnice varira od nule do širine zavojnice  $W$  (u 50 koraka) i dubina drugog sloja zavojnice varira od nule do polovine vrijednosti širine zavojnice,  $W/2$ , (u 50 koraka). Dakle, provodi se  $3 \cdot 10^5$  evaluacija magnetskog polja po pravcu  $cs_1$ , ( $20 \cdot 6 \cdot 50 \cdot 50 = 3 \cdot 10^5$ ).

U nastavku se navodi metodologija koja se upotrebljava. Za konstantne vrijednosti  $h/W$  i valovitosti  $r$ , jakost magnetskog polja se računa za svaku moguću vrijednost varijabli drugog sloja zavojnice. Drugim riječima, jakost magnetskog polja se za svaku vrijednost  $D_2$  i  $W_2$  računa po pravcu  $cs_1$  te se analizira izračunato magnetsko polje. U ovom dijelu procesa postavljeno je da je duljina zavojnice  $L$  barem 10 puta veća od širine zavojnice  $W$ . Osim toga, kraći krajevi zavojnice nisu presavijeni na dubinu  $D$ . Na slici 3.5 prikazana je distribucija magnetskog toka po pravcu  $cs_1$  za četiri različite kombinacije vrijednosti varijabli  $W_2$  i  $D_2$ .

Valovitost magnetskog polja je ulazni parametar u postupku određivanja geometrijskih parametara drugog sloja zavojnice. Uz pomoć maksimalne dopuštene valovitosti određuje se dio pravca  $cs_1$  gdje postoji homogeno magnetsko polje. U dijelu pravca  $cs_1$  gdje je homogeno magnetsko polje ne dolazi do odstupanja u vrijednosti magnetskog polja većeg od definirane valovitosti. Analiza magnetskog polja započinje u centru pravca  $cs_1$  odakle se dalje nastavlja prema oba kraja tog pravca. Magnetska indukcija u centru se koristi kao početna srednja vrijednost magnetske indukcije. Dvije susjedne vrijednosti centralne vrijednosti se uspoređuju s početnom i centralnom vrijednošću magnetske indukcije. Ako susjedne vrijednosti ne odstupaju od centralne za više od definirane valovitosti, onda se smatraju dijelom pravca  $cs_1$  s homogenim magnetskim poljem. Nakon toga se računa nova srednja vrijednost magnetske indukcije u dijelu pravca  $cs_1$  s homogenim magnetskim poljem. Slijedi



**Slika 3.5:** Primjeri razdiobe i analize magnetskog polja: (a) valovitost=1%,  $h/W=0.08$ ,  $D_2/W=0.18$ ,  $W_2/W=0.7$ , (b) valovitost=1%,  $h/W=0.08$ ,  $D_2/W=0.12$ ,  $W_2/W=0.6$ , (c) valovitost=1%,  $h/W=0.08$ ,  $D_2/W=0.24$ ,  $W_2/W=0.7$ , (d) valovitost=1%,  $h/W=0.08$ ,  $D_2/W=0.1$ ,  $W_2/W=0.7$

računanje magnetske indukcije u sljedeće dvije susjedne točke na pravcu  $cs_1$  i usporedba s obzirom na srednju vrijednost magnetske indukcije i definiranu valovitost. Kako magnetsko polje nije idealno homogeno, udaljavanjem od centra pravca  $cs_1$  u nekim pozicijama odnosno u nekim točkama pravca će doći do odstupanja magnetske indukcije koje premašuje definiranu valovitost. Stoga se tu proglašava završetak dijela pravca  $cs_1$  s homogenim magnetskim poljem. To je i prikazano na slici 3.5a i 3.5b. Na istim slikama, dio pravca  $cs_1$  s homogenim magnetskim poljem (s obzirom na definiranu valovitost) odgovara širini pravokutnog valnog oblika crvene boje.

Na slikama 3.5c i 3.5d prikazana je razdioba magnetskog polja po pravcu  $cs_1$  koja odgovara određenim vrijednostima varijabli  $W_2$  i  $D_2$ . Magnetska polja prikazana tim slikama nisu homogena jer sadrže po dvije istaknute vrijednosti magnetske indukcije na dijelu pravca  $cs_1$  koji je bliži rubu ravnine napajanja. Iako centralni dio pravca  $cs_1$  na slici 3.5c posjeduje homogenu razdiobu, u cjelini se smatra da je magnetsko polje za tu kombinaciju varijabli  $W_2$  i  $D_2$  nehomogeno. Područja pravca  $cs_1$  u kojima se bilježi da magnetska indukcija premašuje maksimalnu dopuštenu vrijednost (srednja vrijednost + maksimalno dopuštena valovitost) mogu potencijalno ugrožavati prijemni podsustav koji je dizajniran za homogeno magnetsko polje (stabilne performanse). Iz tih razloga na slikama 3.5c i 3.5d nije prikazan pravokutni valni oblik koji predstavlja područje homogenog magnetskog polja.

Rezime analize magnetskog polja je da se pojavljuju dvije mogućnosti: identificira se homogeno magnetsko polje ili nehomogeno magnetsko polje za određene vrijednosti varijabli  $W_2$  i  $D_2$ . Ako se pojavljuje homogeno magnet-

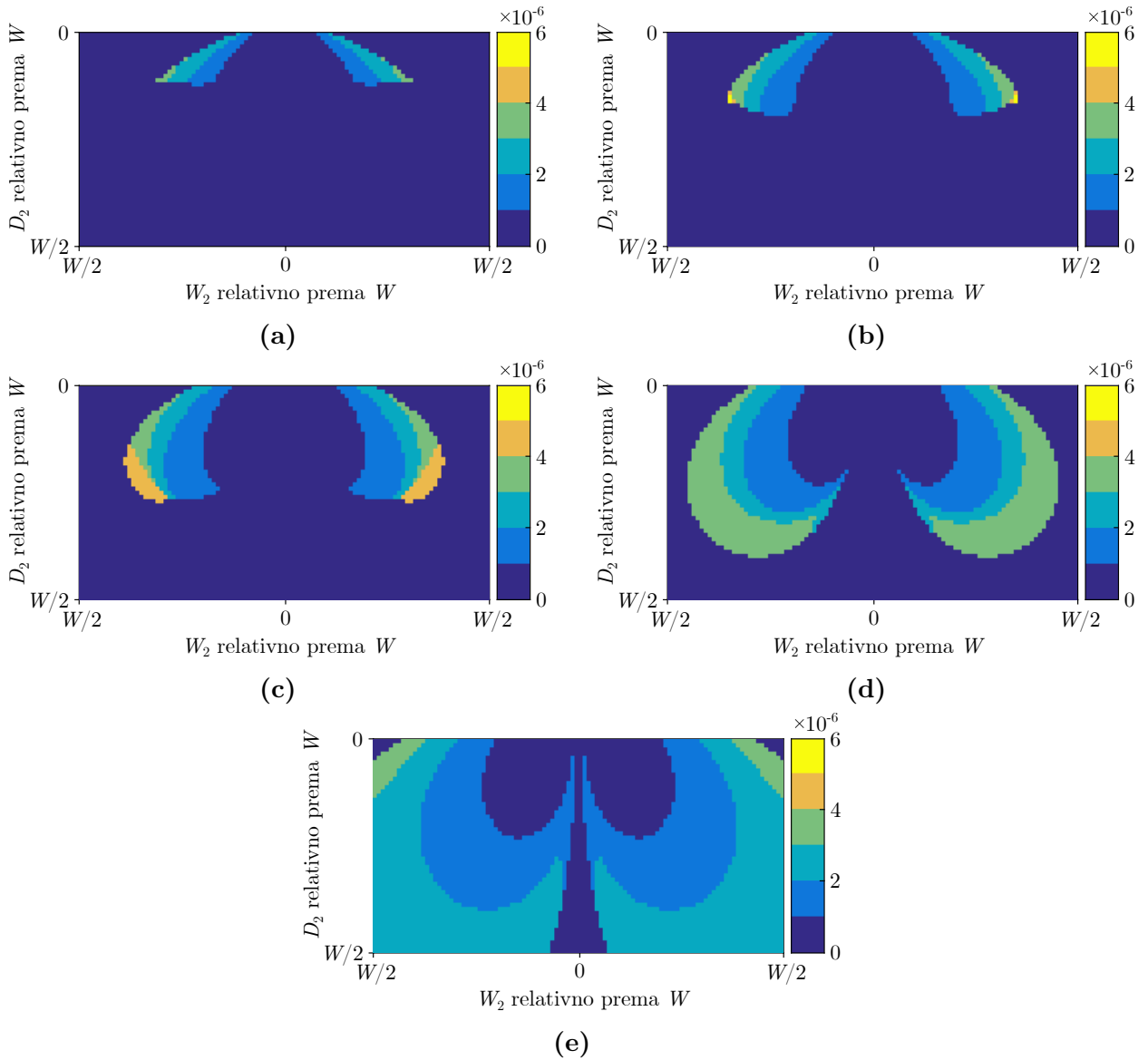
sko polje, računa se FoM<sub>1</sub>:

$$\text{FoM}_1 = B_{sr} \cdot \frac{\text{duljina pravca } cs_1 \text{ s homogenim magnetskim poljem}}{W}, \quad (3-7)$$

gdje je  $B_{sr}$  srednja vrijednost magnetske indukcije koja se računa samo za dio pravca  $cs_1$  gdje je homogeno magnetsko polje.

Postupak koji je opisan prethodno primjenio se za sve moguće kombinacije varijabli drugog sloja zavojnice,  $W_2$  i  $D_2$ . Drugim riječima, primjenjuje se iscrpno pretraživanje. Dakle, za svaku kombinaciju određena je vrijednost FoM<sub>1</sub>. Na slici 3.6 grafički je prikazana vrijednost FoM<sub>1</sub> za različite  $h/W$  i fiksni iznos valovitosti. Za niske vrijednosti  $h/W$ , većina kombinacija varijabli  $W_2$  i  $D_2$  rezultira nehomogenim magnetskim poljem (tamno plava područja na slici 3.6). U slučaju većih vrijednosti  $h/W$  omjera više kombinacija varijabli drugog sloja zavojnice  $W_2$  i  $D_2$  generira homogeno magnetsko polje. Nadalje, za svaku kombinaciju  $h/W$  i valovitosti  $r$  postoji optimalna kombinacija varijabli drugog sloja zavojnice pri kojoj se računa maksimalna vrijednost FoM<sub>1</sub>. Maksimalne su izračunate vrijednosti FoM<sub>1</sub> za sve kombinacije  $h/W$  i valovitosti prikazane točkama na slici 3.7.

Prema slici 3.7 može se primjetiti da se za veću maksimalnu dopuštenu valovitost postiže veća vrijednost FoM<sub>1</sub>. Za svaku pojedinu maksimalnu dopuštenu valovitost postiže se maksimalna vrijednost FoM<sub>1</sub> pri različitom omjeru  $h/W$  (različita udaljenost prijenosa). Za više vrijednosti omjera  $h/W$  može se ostvariti homogeno magnetsko polje u visokom postotku pravca  $cs_1$ , ali je srednja vrijednost magnetske indukcije niskog iznosa. S druge strane, manji omjeri  $h/W$  pružaju veće srednje vrijednosti magnetske indukcije u relativno malom dijelu pravca gdje postoji homogeno magnetsko polje. Maksimalna vrijednost FoM<sub>1</sub> ostvaruje se pri optimalnoj udaljenosti prijenosa

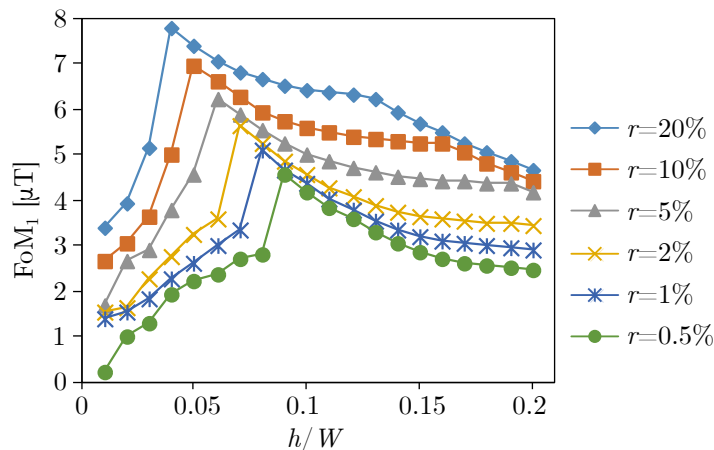


**Slika 3.6:**  $FoM_1$  vrijednosti za različite kombinacije  $h/W$  i valovitost od 2%: (a) valovitost=2%,  $h/W=0.05$ ; (b) valovitost=2%,  $h/W=0.07$ ; (c) valovitost=2%,  $h/W=0.10$ ; (d) valovitost=2%,  $h/W=0.14$ ; (e) valovitost=2%,  $h/W=0.20$

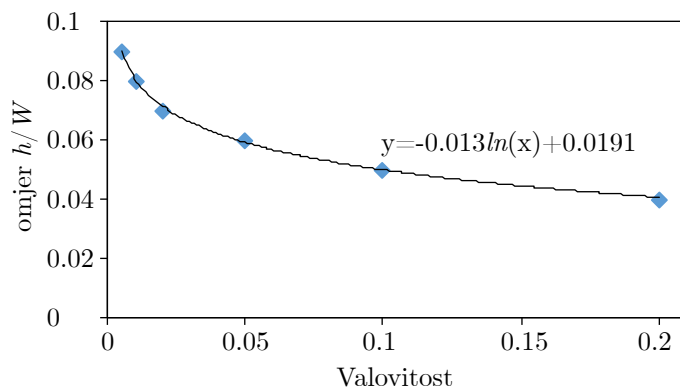
odnosno pri određenom omjeru  $h/W$  uz visoki udio u duljini pravca  $cs_1$  gdje postoji homogeno magnetsko polje koje karakterizira visoka srednja vrijednost magnetske indukcije. Takvi su optimalni omjeri  $h/W$  prikazani na slici 3.8.

Uz zadanu maksimalnu dopuštenu valovitost,  $r$ , i poznatu širinu zavojnice,  $W$ , optimalna udaljenost prijenosa,  $h$ , može se izračunati prema sljedećem





Slika 3.7: Izračunate vrijednosti  $FoM_1$  za različite kombinacije  $h/W$  i  $r$



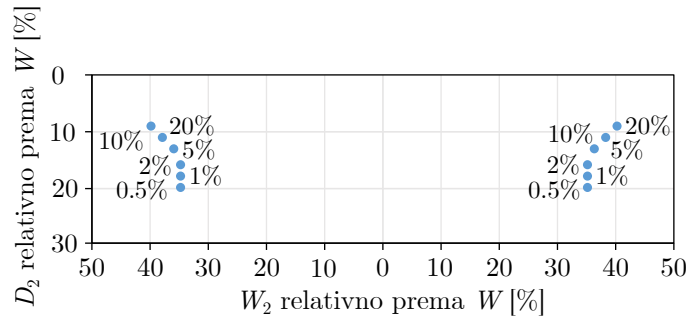
Slika 3.8: Optimalni omjeri  $h/W$  za različite vrijednosti maksimalne dopuštene valovitosti - rezultati simulacija označeni su plavim točkama koje su povezane krivuljom uz navedeni matematički zapis te krivulje

izrazu koji je dobiven s pomoću opcije *fit curve to data* u *MATLAB*-u:

$$h = W [0.0191 - 0.013 \cdot \ln(r)]. \quad (3-8)$$

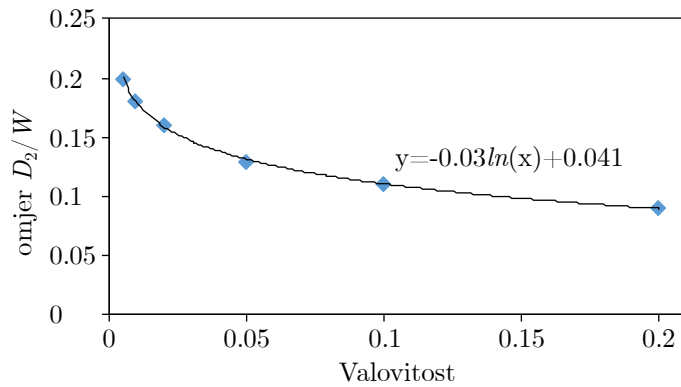
Nakon što se odabere optimalna udaljenost prijenosa, mogu se odrediti varijable drugog sloja zavojnice. Slika 3.9 prikazuje različite pozicije drugog sloja zavojnice koje ostvaruju maksimalnu vrijednost  $FoM_1$  za različite vrijednosti maksimalne dopuštene valovitosti (pri optimalnoj udaljenosti prijenosa).

Za najmanje dopuštene maksimalne vrijednosti valovitosti (0.5% - 2%), optimalna širina drugog sloja zavojnice,  $W_2$ , iznosi 70% širine zavojnice,  $W$ .



**Slika 3.9:** Geometrijski smještaj drugog sloja zavojnice koji pruža maksimalnu vrijednost  $FoM_1$  za različite vrijednosti maksimalne dopuštene valovitosti uz optimalnu udaljenost prijenosa

Za veće vrijednosti maksimalno dopuštene valovitosti širina drugog sloja zavojnice se povećava. Dubina drugog sloja zavojnice,  $D_2$ , pokazuje izravnu korelaciju s maksimalno dopuštenom valovitošću, slika 3.10.



**Slika 3.10:** Optimalni omjeri  $D_2/W$  za različite vrijednosti maksimalne dopuštene valovitosti - rezultati simulacija označeni su plavim točkama koje su povezane krivuljom uz navedeni matematički zapis te krivulje

Za zadanu maksimalnu dopuštenu valovitost i poznatu širinu zavojnice, uz optimalnu udaljenost prijenosa, dubina drugog sloja zavojnice može se izračunati prema sljedećem izrazu koji je također dobiven s pomoću opcije *fit curve to data* u *MATLAB*-u:

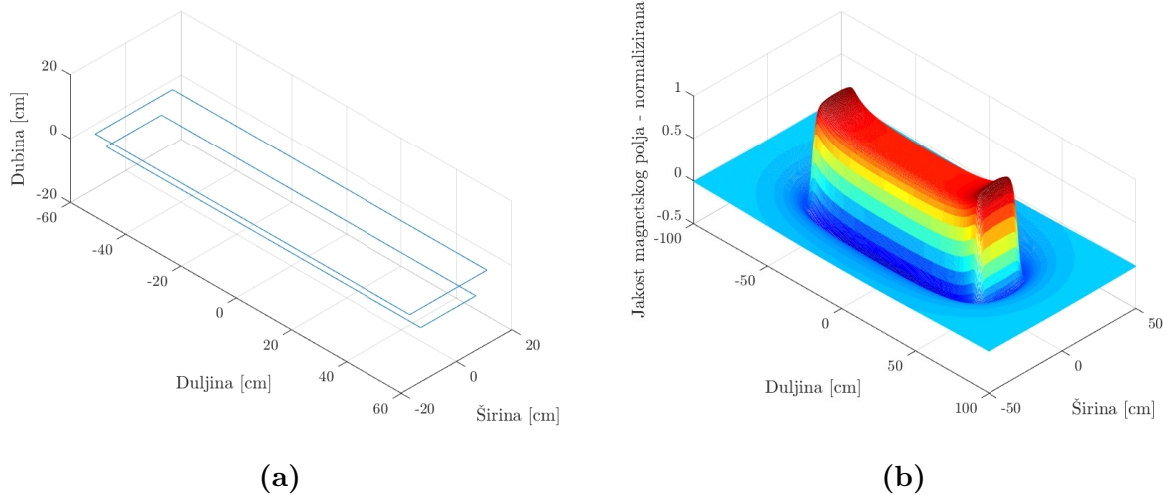
$$D_2 = W [0.041 - 0.03 \cdot \ln(r)]. \quad (3-9)$$

Na slici 3.11a prikazana je struktura zavojnice s optimalnim vrijednostima varijabli  $W_2$ ,  $D_2$  i  $h$ . Distribucija jakosti magnetskog polja u ravnini

3. Postupak određivanja geometrije dvoslojne 3D predajne zavojnice s homogenom razdiobom magnetskog polja u ravnini napajanja

---

(200x100 cm) koja se nalazi 30 mm vertikalno iznad takve zavojnice uz maksimalnu dopuštenu valovitost jakosti magnetskog polja po pravcu  $cs_1$  od 0.5% prikazana je na slici 3.11b.

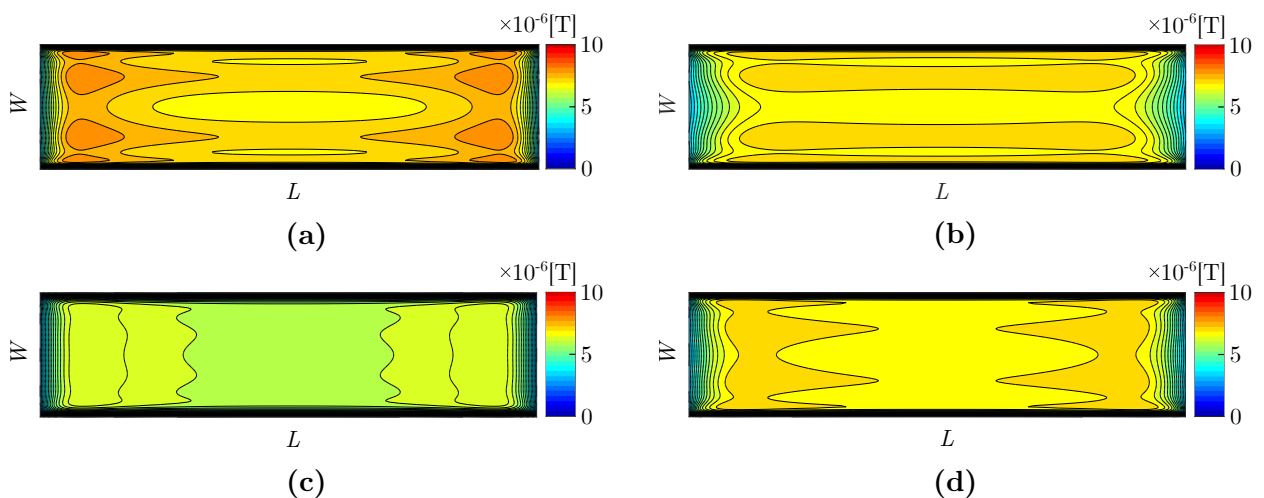


**Slika 3.11:** (a) pravokutna zavojnica s dva sloja-optimalne vrijednosti varijabli  $W_2$  i  $D_2$ , (b) distribucija jakosti magnetskog polja u ravini (200x100 cm) iznad zavojnice sa slike lijevo, optimalna udaljenost prijenosa,  $h$ , za dopuštenu valovitost,  $r$ , od 0.5% (jednadžba (3-8))

### 3.1.2. Optimizacija dubine zavojnice $D$

Da bi se postiglo homogeno magnetsko polje po pravcu  $cs_2$ , slika 3.3, kraće stranice pravokutnih zavojnica, slika 3.11a, su savijene okomito prema dolje do dubine  $D$ . Cilj je postići distribuciju magnetskog polja po pravcu  $cs_2$  koja odgovara distribuciji magnetskog polja po pravcu  $cs_1$  koja se postiže optimalnim vrijednostima varijabli  $W_2$  i  $D_2$ . Ako slojevi zavojnice nisu savijeni prema dolje postoji značajni porast jakosti magnetskog polja uz krajeve ravnine napajanja, slika 3.11b.

Ovaj dio postupka određivanja strukture 3D predajne zavojnice odgovara onom s desne strane slike 3.4 u kojem se određuje dubina  $D$  do koje se okomito prema dolje pružaju slojevi zavojnice. Primjenjuje se metodologija koja odgovara onoj u prvom dijelu postupka određivanja strukture zavojnice uz jednu bitnu razliku. Naime, magnetsko polje duž pravca  $cs_2$  treba biti nepromjenjivo. Ako bi se prilikom optimizacije dubine  $D$  koristila ista vrijednost valovitosti  $r$  koja se koristila u postupku optimizacije varijabli  $W_2$  i  $D_2$ , došlo bi do neželjenog porasta magnetskog polja uz rubove ravnine napajanja, slika



**Slika 3.12:** Magnetska indukcija (pogled odozgo) za različite vrijednosti valovitosti: (a)  $cs_1$  5%,  $cs_2$  5%, ( $D/W=0.19$ ); (b)  $cs_1$  5%,  $cs_2$  0.5%, ( $D/W=0.43$ ); (c)  $cs_1$  0.5%,  $cs_2$  5%, ( $D/W=0.19$ ); (d)  $cs_1$  2.5%,  $cs_2$  2.5%, ( $D/W=0.26$ )

**3.12a.** Tako površina obuhvaćena širinom zavojnice,  $W$ , i duljinom zavojnice,  $L$ , odnosno ravnina napajanja ima manjinski dio svoje površine koju čini homogena regija, slika **3.13a**. U ovoj fazi procesa određivanja strukture 3D predajne zavojnice uvodi se izmijenjena mjera kvalitete, FoM<sub>2</sub>:

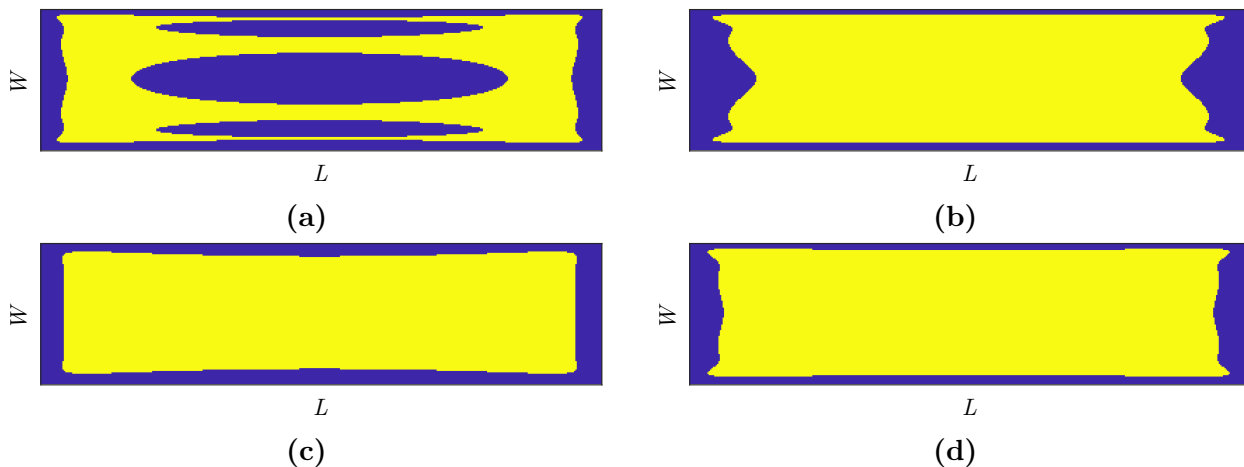
$$\text{FoM}_2 = B_{sr} \cdot \frac{\text{površina homogene regije}}{\text{površina ravnine napajanja}} \quad (3-10)$$

Zbog nepraktičnosti (nije moguće postići idealnu homogenost s valovitošću od 0%) ne koristi se valovitost od 0% po pravcu  $cs_2$  nego se koristi valovitost koja je 10 puta manja od one po pravcu  $cs_1$  i tada se dobivaju zadovoljavajući rezultati.

Uslijed visoke vrijednosti omjera  $D/W = 0.43$ , homogena regija poprima nepravilan oblik na krajevima ravnine napajanja, slika **3.13b**. Takav je oblik homogene regije dobiven uz valovitost od 5% po pravcu  $cs_1$  i 0.5% po pravcu  $cs_2$ . Odgovarajuća je distribucija magnetske indukcije u ravnini napajanja prikazana na slici **3.12b**.

Alternativa tome je da se prvo odrede  $W_2$  i  $D_2$  za valovitost od 0.5% po pravcu  $cs_1$  te se nakon toga određuje  $D$  za valovitost od 5% po pravcu  $cs_2$ . Rezultati takvog procesa su prikazani na slici **3.12c** i **3.13c**. Homogena regija sa slike **3.13c** je 0.14% veća (u odnosu na onu sa slike **3.13b**) i vrijednost FoM<sub>2</sub> je 10% manja, ali je oblik homogene regije značajno više nalik pravokutnom, kako je prikazano na slici **3.13c**.

Postoji kompromis između vrijednosti FoM<sub>2</sub> i oblika homogene regije u ravnini napajanja. Najbolji se rezultati postižu kada se u postupku određivanja strukture 3D predajne zavojnice postave valovitosti po pravcima  $cs_1$  i  $cs_2$  koje su dvostruko manje od željenih. Na slici **3.13d** prikazana je homogena regija u ravnini napajanja kada su dopuštene valovitosti po pravcima  $cs_1$  i  $cs_2$



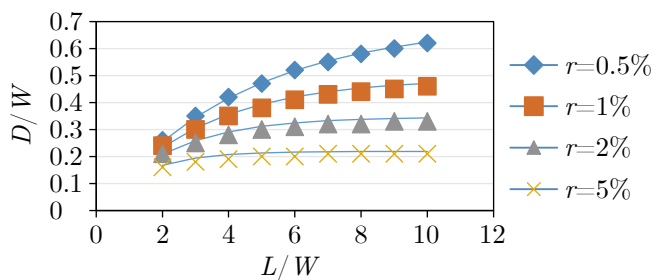
**Slika 3.13:** Homogena regija (pogled odozgo) za različite kombinacije valovitosti za  $cs_1$  i  $cs_2$ : (a) Homogena regija (49.81%) za distribuciju sa slike 3.12a,  $FoM_2=0.0015$  T; (b) Homogena regija (75.78%) za distribuciju sa slike 3.12b,  $FoM_2=0.0021$  T; (c) Homogena regija (75.92%) za distribuciju sa slike 3.12c,  $FoM_2=0.0019$  T; (d) Homogena regija (79.85%) za distribuciju sa slike 3.12d,  $FoM_2=0.0021$  T

jednake i iznose 2.5%. Homogena regija na slici 3.13d je definirana za  $r = 5\%$ . Homogena regija sa slike 3.13d izvedena je iz slike 3.12d koja prikazuje distribuciju magnetske indukcije u ravnini napajanja pri  $r = 2.5\%$  za pravce,  $cs_1$  i  $cs_2$ . U usporedbi s prethodnim pristupima, rezultati ovakvog pristupa su najpovoljniji u smislu najvećeg udjela homogene regije u ravnini napajanja i najveće vrijednosti  $FoM_2$ . Stoga se ovaj pristup smatra optimalnim.

Dubina,  $D$ , do koje se okomito pružaju kraći krajevi predajne zavojnice je funkcija valovitosti,  $r$ , i omjera duljine i širine zavojnice,  $L/W$ . Na slici 3.14 je prikazana dubina zavojnice za različite vrijednosti valovitosti i omjera  $L/W$ . Dubina zavojnice raste s povećanjem omjera  $L/W$  i smanjenjem maksimalne dopuštene valovitosti.

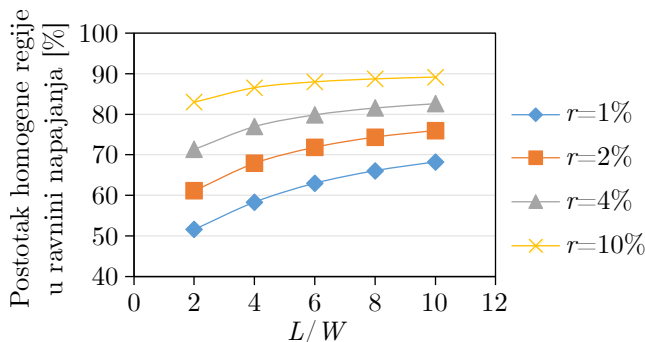
Rezultati postupka određivanja dubine zavojnice,  $D$ , prikazani su točkama na slici 3.14 dok linije koje povezuju te točke predstavljaju matematički model (3-8) koji se može iskorisiti za izračun potrebne dubine zavojnice:

$$D = W \cdot \frac{1}{20.4 \cdot \sqrt{r}} \left( 1 - e^{-3.25\sqrt{r}(L/W)} \right) \quad (3-11)$$



Slika 3.14: Potrebna dubina zavojnice,  $D$ , za različite maksimalno dopuštene valovitosti i različite omjere  $L/W$

Postupak određivanja strukture 3D predajne zavojnice je razrađen za pravokutnu zavojnicu gdje se udio homogene regije u ravnini napajanja povećava s povećanjem omjera  $L/W$ , slika 3.15.



Slika 3.15: Postotak homogene regije u ravnini napajanja za različite omjere  $L/W$

## 3.2. Mjerenja

Validacija postupka određivanja strukture 3D predajne zavojnice obavlja se mjerenjima magnetskog polja u ravnini napajanja kojeg generiraju izrađene zavojnice (konvencionalna i predložena). Vanjske dimenzije predložene zavojnice su:  $L = 114$  cm i  $W = 28$  cm. Varijable drugog sloja zavojnice određene su uz maksimalnu dopuštenu valovitost od 1%. Prema ranije utvrđenom optimalnom pristupu, postupak određivanja varijabli  $W_2$ ,  $D_2$ ,  $h$  i  $D$  provodi se uz valovitost od 0.5% (polovina željene vrijednosti valovitosti). Prema jednadžbi (3-8), optimalna udaljenost prijenosa  $h$  iznosi: 2.46 cm. Izračunate

vrijednosti varijabli  $W_2$  i  $D_2$  su redom: 19.6 cm i 5.6 cm. Izračunata vrijednost dubine zavojnice  $D$  iznosi 11.8 cm. Izrađena zavojnica s optimalnom 3D strukturom prikazana je na slici 3.16. Zbog ograničene preciznosti izrade, vrijednosti varijabli izrađene predložene zavojnice zapravo su:  $W_2 = 20$  cm,  $D_2 = 6$  cm i  $D = 12$  cm. Žica kojom su izrađeni slojevi zavojnice nalazi se u bijelim vodilicama. Nadalje, prototip predložene zavojnice izrađen je s pomoću drvenog okvira na kojem su smještene vodilice i koji pruža paralelnu ravninu iznad predložene zavojnice koja predstavlja ravninu napajanja u kojoj će se provoditi mjerenja magnetskog polja. Oba se sloja zavojnice pojedinačno sastoje od 4 namotaja Litz žice te je induktivitet izrađene predložene zavojnice 103  $\mu\text{H}$ .



**Slika 3.16:** Izrađeni prototip predložene zavojnice (pogled odozdo)



**Slika 3.17:** Izrađeni prototip konvencionalne zavojnice (pogled odozdo)

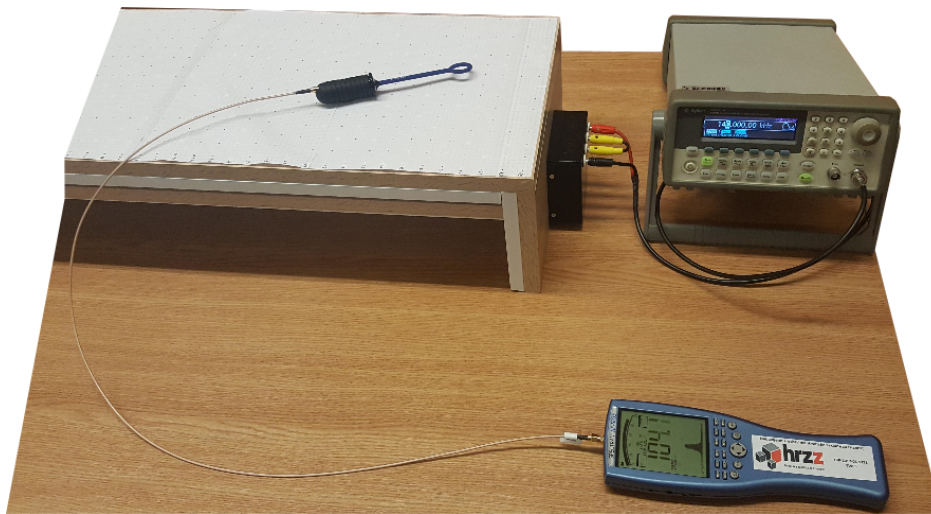
Konvencionalna pravokutna zavojnica (114×28 cm) također je izrađena od Litz žice koja je smještena u vodilicama pričvršćenim za drvenu plohu, slika 3.17. Prototip konvencionalne zavojnice ima 6 namotaja i induktivitet od 116  $\mu\text{H}$ .

Mjerenja magnetskog polja provedena su sljedećom mjernom opremom: spektralni analizator Spectran NF-5035, PBS-H3 sonda (25 mm sonda za



mjerenje magnetskog polja s 50  $\Omega$  SMB M ulazom) te SMA kabel. Tijekom mjerenja, zavojnica je spojena na funkcijski generator Agilent 33250A pri frekvenciji od 150 kHz.

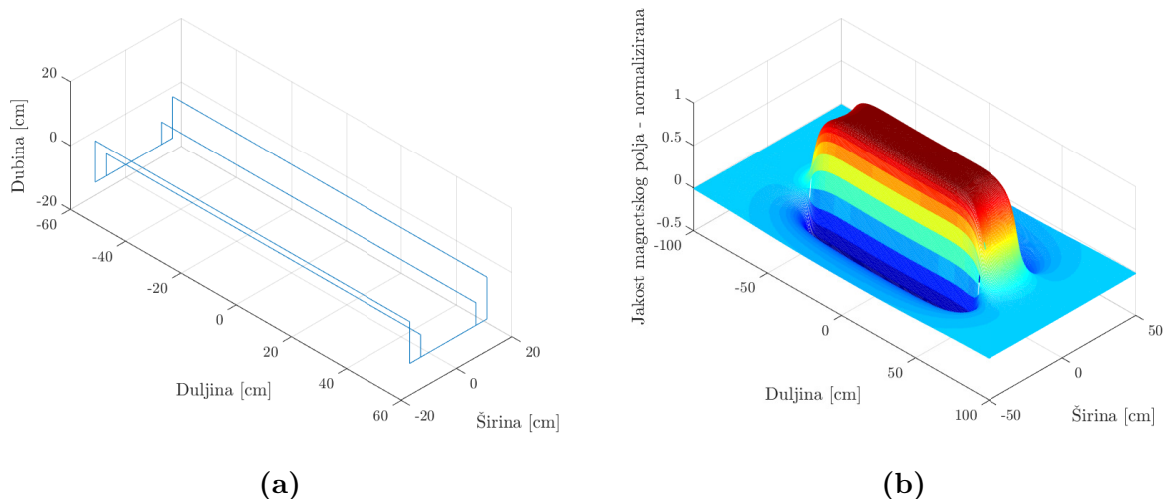
Mjerenja magnetskog polja oba prototipa zavojnica izvršeno je u 900 točaka ravnine napajanja koja se nalazi 30 mm iznad zavojnice ( $h = 30$  mm). Spektralni analizator omogućuje neizravno mjerenje promjenjivog magnetskog polja na način da se mjeri inducirani napon u sondi maksimalno do 0.2 V. Odabire se *hold mode* način rada analizatora gdje se prikazuje maksimalna izmjerena vrijednost inducirano napona koji je proporcionalan gustoći magnetskog toka. Mjerna oprema prikazana je na slici 3.18, a rezultati mjerenja zajedno s rezultatima simulacija su prikazani na slici 3.19.



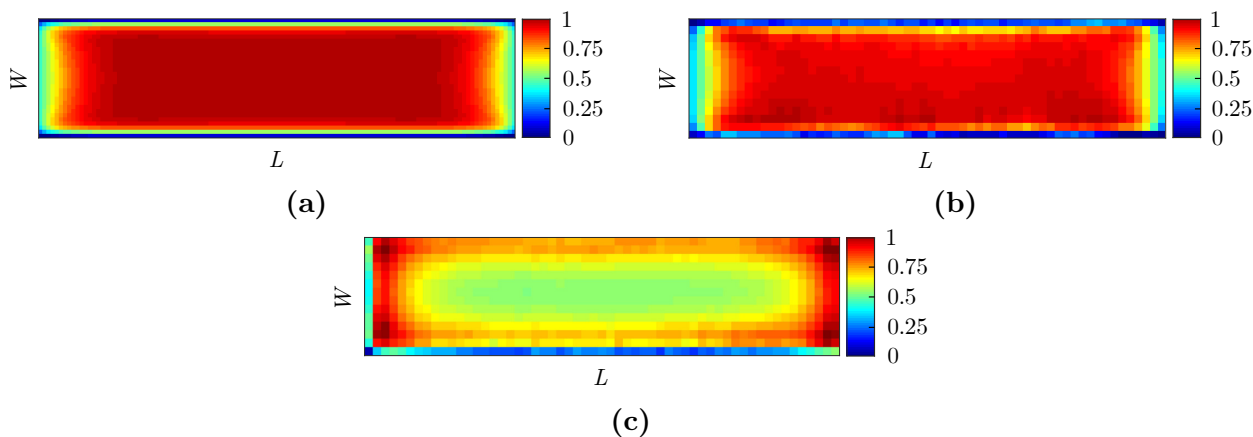
Slika 3.18: Mjerna oprema

Predložena 3D zavojnica i njezino magnetsko polje su prikazani na slikama 3.19a, 3.19b i 3.20a (rezultati simulacije). Mjerenja magnetskog polja u ravnini napajanja provedena za obje zavojnice (konvencionalna, slika 3.20b i predložena, slika 3.20c) su potvrdila da predložena 3D predajna zavojnica pruža značajno veći udio homogene regije u ravnini napajanja u usporedbi s konvencionalnom zavojnicom. Na slikama 3.20b i 3.20c koje prikazuju re-

3. Postupak određivanja geometrije dvoslojne 3D predajne zavojnice s homogenom razdiobom magnetskog polja u ravnini napajanja



**Slika 3.19:** (a) struktura predložene 3D zavojnice, (b) distribucija jakosti magnetskog polja u ravnini (200x100 cm) smještena 30 mm iznad zavojnice



**Slika 3.20:** Rezultati simulacije i mjerenja: (a) simulacija-normalizirano magnetsko polje predložene zavojnice u ravnini napajanja (pogled odozgo), (b) mjerenje-normalizirano magnetsko polje predložene zavojnice u ravnini napajanja (pogled odozgo), (c) mjerenje-normalizirano magnetsko polje konvencionalne zavojnice u ravnini napajanja (pogled odozgo)

zultate mjerenja uočava se veći intenzitet magnetskog polja s jedne strane ravnine napajanja (nesimetrija magnetskog polja) u odnosu na drugu. Smatra se da je uzrok tome nesavršenost izrade prototipa obje zavojnice uslijed ručne izrade žicom i drvenim okvirom.

Iz rezultata mjerenja utvrđuje se da homogena regija zauzima 55.3% površine ravnine napajanja uz maksimalno dopuštenu valovitost od 10%. Prema tome, usporedbom rezultata simulacija i mjerenja primjećuje se odstupanje

u veličini homogene regije. Tako je homogena regija (optimalne zavojnice) izračunata uz pomoć mjerenja, pri  $r = 10\%$ , manja za 24.55% u odnosu na homogenu regiju, slika 3.13d, koja je izračunata pomoću izraza (3-1) u *MATLAB*-u pri  $r = 5\%$ . Pretpostavlja se da je uzrok takvoj razlici aproksimacija vodiča zavojnice, koji u realnosti imaju poprečni presjek, s linearnim segmentima. Zbog toga se, u svrhu dobivanja realističnijih vrijednosti jakosti magnetskog polja, u nastavku koriste programi namijenjeni za proračun elektromagnetskih polja.

## 4. Optimizacija 3D predajne zavojnice s homogenom razdiobom magnetskog polja u ravnini napajanja uz pomoć populacijskog algoritma i algoritama iz skupine evolucijskog računanja

Ovo se poglavlje bavi primjenom metaheurističkih procedura odnosno populacijskih algoritama i algoritama iz skupine evolucijskog računanja u svrhu optimizacije 3D predajne zavojnice. Smisao korištenja algoritama iz ovog poglavlja je pronalaženje optimalnih rješenja s pomoću manjeg broja evaluacija u usporedbi s ranije navedenim i korištenim iscrpnim pretraživanjem. Glavna je ideja pojednostavljenje 3D predajne zavojnice na 2D model zavojnice koji prema rezultatima simulacija i mjerenja dovoljno precizno predstavlja 3D predajnu zavojnicu. Dio istraživanja u nastavku ovog poglavlja koji se odnosi na optimizaciju 3D predajne zavojnice genetskim algoritmom u *Ansys Maxwell*-u objavljen je u znanstvenom časopisu *Energies* izdavača *MDPI*, [56]. Znanstveni doprinosi ostvareni tijekom istraživanja koja su opisana u ovom poglavlju su sljedeći:

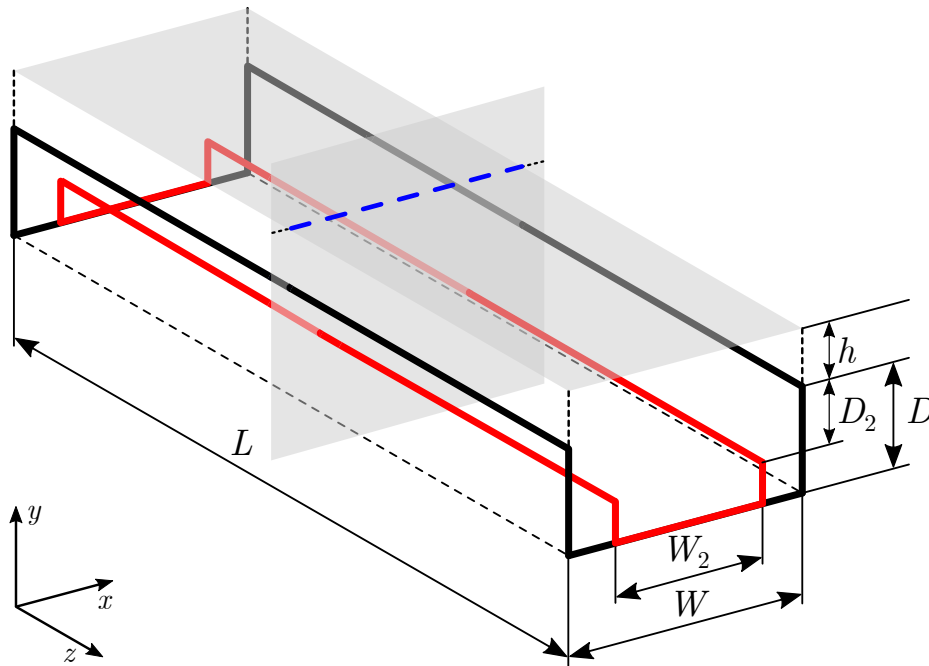
- Metoda optimizacije 3D zavojnice u dva koraka (optimizacija 2D i 3D modela zavojnice) za skraćivanje trajanja optimizacije,
- Metoda optimizacije algoritmom zasnovanim na evolucijskom računanju uz cjelobrojnu raspodjelu struja između slojeva zavojnice s ciljem pos-

tizanja homogenog magnetskog polja u ravnini napajanja uz što veću prosječnu vrijednost jakosti magnetskog polja.

Cilj je istraživanja u ovom poglavlju poboljšanje performansi TX zavojnice iz prethodnog poglavlja odnosno znanstvenog rada [55] u smislu povećanja udjela homogene regije u ravnini napajanja, povećanja srednje vrijednosti jakosti magnetskog polja unutar homogene regije, ali i smanjenje dubine TX zavojnice. Na temelju znanstvenih radova koji predlažu različitu raspodjelu struja između namotaja zavojnice [33, 38, 39, 49], ovdje je uvedena pretpostavka da će drugačija raspodjela struje između slojeva zavojnice iz rada [55] pružiti bolje performanse zavojnice.

Nadalje, umjesto pretraživanja cijelog prostora rješenja (sve moguće kombinacije varijabli koje opisuju zavojnicu uz određeni korak promjene tih varijabli) u istraživanjima se koriste vremenski manje zahtjevni algoritam kolonije mrava (engl. *Ant Colony Optimization, ACO*) te GA i diferencijalna evolucija (engl. *Differential Evolution, DE*) iz skupine evolucijskog računanja za pretraživanje prostora rješenja.

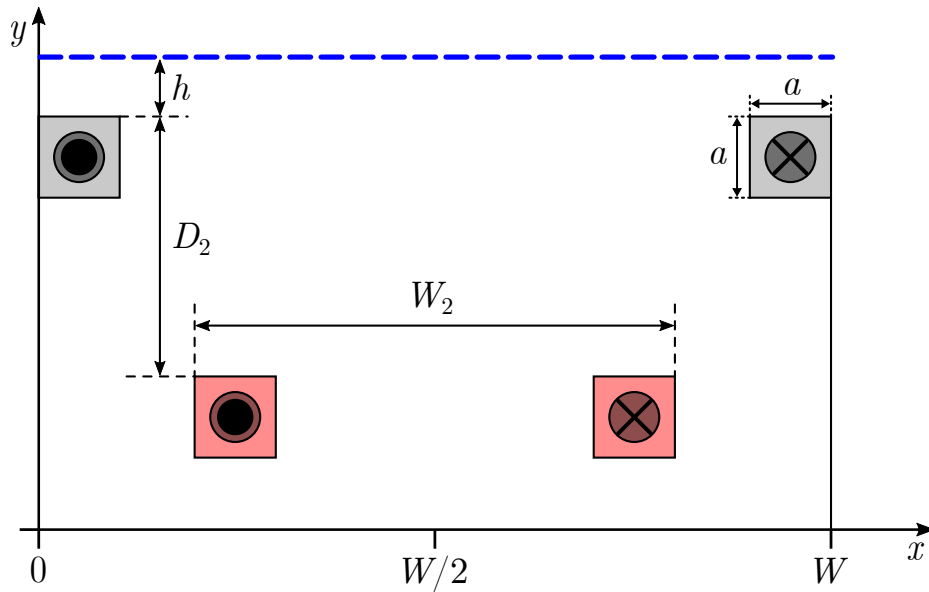
Osnovna struktura 3D predajne zavojnice koja se optimizira u ovom poglavlju prikazana je na slici 4.1. Zavojnica se sastoji od dva sloja (istog oblika) koji se mogu razlikovati uz pomoć boja. Na slici 4.1, crnom je bojom označen prvi sloj dok je crvenom označen drugi sloj zavojnice. Duljina je zavojnice označena s  $L$ , a širina zavojnice je  $W$  što je ujedno i širina prvog sloja zavojnice. Širina je drugog sloja zavojnice  $W_2$ , a vertikalni je razmak između prvog i drugog sloja zavojnice  $D_2$ . Prvi sloj zavojnice se vertikalno pruža prema dolje do dubine  $D$ , a drugi se sloj zavojnice pruža vertikalno dolje za  $D - D_2$ . Udaljenost je prijenosa označena s  $h$ . Siva površina u  $xz$  ravnini koja je za  $h$  vertikalno udaljena od zavojnice i postavljena je paralelno



Slika 4.1: Osnovna struktura 3D predajne zavojnice

sa zavojnicom predstavlja ravninu napajanja.

Presjek 3D predajne zavojnice i  $xy$  ravnine (vertikalni kvadrat sive boje) na slici 4.1 formira četiri poprečna presjeka koji predstavljaju slojeve odnosno vodiče zavojnice. Nadalje, presjek ravnine napajanja i  $xy$  ravnine na slici 4.1 je transverzalni pravac koji je na istoj slici označen plavim isprekidanim pravcem. Taj se transverzalni pravac naziva pravcem napajanja jer se nalazi u ravnini napajanja. Dvodimenzionalni prikaz slojeva zavojnice i pravca napajanja u  $xy$  ravnini prikazani su slikom 4.2. Poprečni presjeci slojeva zavojnice pojednostavljeni su u kvadratne poprečne presjeke. Dva gornja kvadrata na slici 4.2 predstavljaju prvi sloj zavojnice dok dva donja kvadrata predstavljaju drugi sloj zavojnice. Smjer je struje svakog kvadrata na slici 4.2 označen točkom ili simbolom  $x$ . Slika 4.2 ujedno predstavlja i 2D model zavojnice koji se dalje u istraživanjima opisanim u ovom poglavlju modelira u programima za simulacije magnetskih polja, *FEMM* i *Ansys Maxwell*.



Slika 4.2: Dvodimenzionalni prikaz 3D predajne zavojnice

Pretpostavka koja opravdava korištenje 2D modela predajne zavojnice je da dijelovi 3D predajne zavojnice koji su vertikalno pomaknuti prema dolje za vrijednost  $D$  i udaljeni za  $L/2$  od centra ravnine napajanja po  $z$  osi, nemaju dominantan utjecaj na distribuciju jakosti magnetskog polja u većini površine ravnine napajanja uz uvjet da je duljina zavojnice,  $L$ , veća od širine zavojnice,  $W$ . Drugim riječima, očekuje se da se distribucija jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja ne mijenja znatno pomakom pravca napajanja u pozitivnom ili negativnom smjeru  $z$  osi, sve dok je pravac napajanja bliže centru ravnine napajanja nego kraćim krajevima 3D predajne zavojnice. Očekuje se da će optimizacija dubine,  $D$ , 3D modela zajedno s optimalnim vrijednostima varijabli iz optimizacije 2D modela osigurati bolje performanse 3D predajne zavojnice u usporedbi s onom iz prethodnog poglavlja i znanstvenog rada [55].

#### 4.1. Kosimulacija *Python-FEMM* u svrhu optimizacije 2D modela zavojnice

*FEMM* je programski paket namijenjen za proračun elektromagnetskih polja niskih frekvencija. Omogućene su simulacije 2D modela i 2D osnosimetričnih modela koji rotacijom oko osi za  $360^\circ$  predstavljaju 3D model, [57]. Iako je tijekom istraživanja programski paket *Ansys Maxwell* također bio na raspolaganju za simulacije elektromagnetskih polja 2D modela, optimizacija 2D modela zavojnice izvršavala se u kosimulaciji programskog jezika *Python* i programskog paketa *FEMM*.

Na početku istraživanja bilo je potrebno utvrditi koje optimizacijske tehnike koristiti za optimizaciju predajne zavojnice čiji je 3D model prikazan na slici 4.1. Ranije navedena poboljšanja performansi zavojnice su cilj optimizacije predajne zavojnice koji se može se opisati s pomoću matematičke funkcije:

$$f(\mathbf{x}) = -(hr(\mathbf{x}) \cdot H_{ysr}(\mathbf{x})) \rightarrow \text{minimizirati}, \quad (4-1)$$

gdje je  $\mathbf{x}$  vektor  $n$  varijabli odluke:

$$\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_n]. \quad (4-2)$$

U jednadžbi (4-1),  $hr(\mathbf{x})$  predstavlja homogenu regiju pravca napajanja odnosno dio pravca napajanja gdje vrijedi da je  $y$  komponenta jakosti magnetskog polja jednaka ili veća od 90% maksimalne vrijednosti jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja za neki vektor varijabli odluke  $\mathbf{x}$ . U istoj se jednadžbi pojavljuje  $H_{ysr}(\mathbf{x})$  koji predstavlja srednju vrijednost  $y$  komponente jakosti magnetskog polja za neke vrijednosti varijabli odluke odnosno za neki vektor  $\mathbf{x}$ , u pravcu napajanja sa slike 4.2. Dakle, minimalna vrijednost funk-



cije iz izraza (4-1) bit će postignuta kada je maksimizirana duljina pravca gdje je magnetsko polje homogeno te kada je srednja vrijednost jakosti magnetskog polja maksimizirana. Homogeni se dio pravca napajanja u *Python*-u računa uz pomoć funkcije `len()` odnosno `len(Hy_n_09)/RNG`, gdje je `len(Hy_n_09)` broj točaka na pravcu napajanja u kojima je jakost magnetskog polja jednaka ili veća od 90%  $H_{y_{maks}}$  (duljina liste `Hy_n_09`), detaljnije u prilogu A.1. RNG je ukupan broj točaka na pravcu napajanja u kojima se računa jakost magnetskog polja.

Pri optimizaciji 2D modela zavojnice, vektor varijabli odluka iz jednadžbe (4-2) sastoji se od četiri varijable odluke, stoga vrijedi  $n = 4$ :

$$\mathbf{x} = [D_2, W_2, h, o], \quad (4-3)$$

gdje su  $D_2$  i  $W_2$  varijable koje predstavljaju položaj donjih vodiča zavojnice (crveni kvadrati sa slike 4.2). Varijabla  $h$  je također prikazana na slici 4.2 te predstavlja udaljenost bežičnog prijenosa energije. Posljednja varijabla vektora  $\mathbf{x}$  je omjer struja prvog i drugog sloja zavojnice,

$$o = \frac{I_1}{I_2} \quad (4-4)$$

Neka je zbroj struje prvog sloja zavojnice  $I_1$ , i struje drugog sloja zavojnice  $I_2$  konstantan (u simulacijama vrijedi  $I = I_1 + I_2 = 20$ ). Tada se te struje mogu definirati na sljedeći način:

$$I_1 = \frac{(I_1 + I_2) \cdot o}{o + 1}, \quad (4-5)$$

$$I_2 = \frac{(I_1 + I_2)}{o + 1}. \quad (4-6)$$

Varijable  $D_2$  i  $W_2$  su realni brojevi dok varijable  $h$  i  $o$  mogu poprimiti

isključivo cjelobrojnu vrijednost. Iako je položaj donjih vodiča zavojnice opisan realnim brojevima pa se uslijed toga prototip 3D zavojnice treba precizno izraditi, ipak su zbog praktičnih razloga (lakša izrada prototipa 3D zavojnice) varijable  $h$  i  $o$  cijeli brojevi. Naime, prije optimizacije 2D modela zavojnice odabrano je da varijabla  $o$  može poprimiti samo pozitivnu cjelobrojnu vrijednost jer je tada omjer  $o$  izvediv u praktičnim slučajevima izrađene zavojnice. U praksi, omjer broja namotaja prvog sloja zavojnice i broja namotaja drugog sloja zavojnice ekvivalentan je raspodjeli struje iz izraza (4-28). Stoga se brojem namotaja pojedinog sloja zavojnice može podesiti odgovarajuća raspodjela struje. Na kraju je važno spomenuti da su gornji vodiči (kvadrati sive boje) na slici 4.2 fiksno položaja i njihov se položaj ne optimira.

Jednostavna interpretacija optimizacije je traženje i pronalazak optimalnih vrijednosti ulaznih podataka (varijabli) neke funkcije koji rezultiraju maksimalnom ili minimalnom vrijednošću te iste funkcije, [58]. Obično se funkcija kojoj se određuje maksimum ili minimum u optimizaciji naziva funkcija cilja ili fitnes funkcija, tj. funkcija dobrote. Osnovna klasifikacija optimizacijskih tehnika može se učiniti s obzirom na način s pomoću kojeg se utvrđuje maksimum ili minimum funkcije. Klasične optimizacijske tehnike za pronalazak optimalnih vrijednosti ulaznih varijabli koriste prvu i/ili drugu derivaciju funkcije. Nasuprot tome, tzv. *black-box* optimizacijski algoritmi koriste se kada nije moguće odrediti derivaciju funkcije kojoj se nastoji pronaći maksimum ili minimum. Kako nije poznat analitički izraz funkcije (4-1) koja se nastoji minimizirati pri optimizaciji 2D modela zavojnice, tj. nije moguće odrediti derivaciju te funkcije slijedi da u ovom slučaju nije moguće koristiti klasične optimizacijske metode koje se oslanjaju na vrijednost derivacije funkcije. Pozadina je nepoznavanja analitičkog izraza funkcije (4-1) nepovezanost

vektora varijabli odluka  $\mathbf{x}$  s magnetskim poljem, odnosno s  $H_{y_{maks}}$  i  $H_{y_{sr}}$ . Optimizacijski se problem 2D modela zavojnice smatra *black-box* problemom upravo zbog tog nepoznavanja povezanosti varijabli  $D_2$ ,  $W_2$ ,  $h$  i  $o$  s  $H_{y_{maks}}$  i  $H_{y_{sr}}$ . *Black-box* optimizacijske algoritme karakterizira stohastičnost i populacija jedinki. Za optimizaciju 2D modela zavojnice u ovom se istraživanju koriste *black-box* optimizacijski algoritmi: ACO, GA i DE. Navedeni optimizacijski algoritmi se uspoređuju te se nakon toga predlaže najprikladniji za ovaj optimizacijski problem. U literaturi [40, 42–44, 59] se za optimizaciju zavojnica u sustavima WPT primjenjuje isključivo GA koji pripada skupini evolucijskih algoritama (engl. *Evolutionary Algorithms, EAs*) koji su pak dio evolucijskog računanja.

Općenito, *Ansys Maxwell* pruža simulacije i proračun elektromagnetskih polja 2D i 3D modela. Optimizacijski alat (engl. *Optimetrics Tool*) je sastavni dio *Ansys Maxwell*-a koji između ostaloga omogućuje i optimizaciju genetskim algoritmom koji je odgovarajući s obzirom na problem kojim se bavi ovo istraživanje. Međutim, varijable odluke su isključivo realni brojevi i ne mogu poprimiti cjelobrojne vrijednosti. Stoga se za optimizaciju upotrebljava *FEMM* programski paket zajedno s *Python* programskim jezikom odnosno *Spyder* (v5.3.2) okruženjem, [60]. Kako sam programski paket *FEMM* nema optimizacijski alat, smisao je povezivanja *FEMM*-a i *Python*-a korištenje optimizacijskih algoritama koji se mogu primjenjivati u *Python*-u. Optimizacijski algoritmi koji se koriste za optimizaciju u kosimulaciji *Python-FEMM* pružaju odabir vrijednosti varijabli odluke različitog tipa, tj. varijable odluke mogu biti realni i cijeli brojevi (engl. *Mixed-Integer*). Ipak, nakon optimizacije 2D modela predajne zavojnice, optimizacija 3D modela se radi u *Ansys Maxwell* programskom paketu zbog mogućnosti simulacija 3D modela.

#### 4.1.1. Optimizacija četiri varijable odluke 2D modela zavojnice *MIDACO* alatom

*MIDACO* (*Mixed Integer Distributed Ant Colony Optimization*) alat namijenjen je za optimizaciju varijabli odluka koje mogu biti: realni brojevi (engl. *Continuous*), cijeli brojevi (engl. *Discrete/Combinatorial*) ili kombinacija realnih i cijelih brojeva (engl. *Mixed-Integer*). U istom alatu, optimizacija može biti jednociljna ili višeciljna, a funkcija cilja može, ali i ne mora biti ograničena funkcijama jednakosti i/ili nejednakosti. Osim toga, funkcija cilja ne mora biti poznata odnosno nije potrebno znati njezin matematički zapis, [61]. Općenito su sve funkcije cilja koje se optimiziraju *MIDACO* alatom podvrgnute minimizaciji.

*MIDACO* se temelji na optimizacijskom algoritmu kolonije mrava, [61]. ACO algoritam modelira kolektivno ponašanje kolonije mrava u potrazi za hranom. Naime, mravi u potrazi za hranom s vremenom pronalaze i formiraju put koji predstavlja najkraću udaljenost od lokacije hrane do njihovog gnijezda. Proučavanjem ponašanja mrava utvrđeno je da pri početku potrage za hranom mravi nasumično (kaotično) biraju neki put. Nakon što je hrana pronađena, sve više i više mrava organizirano slijedi put kojim se dolazi do hrane koja se nosi u gnijezdo. Na kraju se uspostavlja put kojim se kreću svi mravi zaduženi za potragu i nabavu hrane. Taj put je ujedno i najkraća udaljenost između hrane i gnijezda. Ovakvo je kolektivno ponašanje posljedica utjecaja mrava koji su pronašli hranu na one koji su u potrazi za istom. U takvom mehanizmu formiranja najkraćeg puta, većina vrsta mrava neizravno utječe na druge mrave posredstvom feromona odnosno ostavljanjem traga feromona na svom putu do hrane i nazad u gnijezdo. Nakon što pronađe hranu, mrav pri povratku u gnijezdo izlučuje feromon. Ostali mravi koji su također

u potrazi za hranom odlučuju se za određeni put na temelju koncentracije feromona. Putevi s većom koncentracijom feromona imaju veću vjerojatnost odabira. Tako se formira najkraći put na relaciji hrana-gnijezdo. Takav neizravni oblik komunikacije između mrava gdje se mijenja okolina (izlučivanje feromona) kako bi se utjecalo na ponašanje drugih jedinki naziva se stigmergija (engl. *Stigmergy*), [62].

Umjetna je stigmergija koncept na kojem se zasniva ACO algoritam koji modelira ponašanje mrava tijekom potrage za hranom. Glavni je dio takvog modela definiranje stigmergijske varijable koja sadržava informacije za mrave koje su potrebne u takvoj neizravnoj komunikaciji. U kontekstu potrage za hranom, stigmergijska varijabla u ACO algoritmu je umjetni feromon. Kako je ranije navedeno, mravi pronalaze najkraći put na relaciji hrana-gnijezdo. Mravi odlažu feromon dok se kreću po tom putu i koncentracija feromona na najkraćem putu je najviša (u usporedbi s drugim dužim putem) uslijed visoke frekvencije mrava koji tu prolaze i ostavljaju za sobom feromon. Tijekom vremena feromon isparava pa je posljedica toga da je koncentracija viša na kraćem putu u odnosu na duži put do hrane. Na taj način povećava se vjerojatnost odabira kraćeg puta u potrazi za hranom, [62].

Jednostavni algoritam kolonije mrava (engl. *Simple Ant Colony Optimization, SACO*) modelira gore navedeno kolektivno ponašanje mrava u potrazi za hranom. Inicijalni korak u algoritmu, ( $t = 0$ ), je postavljanje broja mrava  $n_k$ , gdje  $k$  označava određenog mrava i vrijedi:  $k \in [1, 2, \dots, n_k]$ . Algoritam je iterativan. Zbog nepostojanja feromona u inicijalnom koraku mravi se kreću kaotično. Međutim, u svakoj sljedećoj iteraciji algoritma proces odluke

mrava  $k$  o sljedećem smjeru kretanja opisuje vjerojatnost, [62]:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t)}{\sum_{j \in \mathcal{N}_i^k} \tau_{ij}^\alpha(t)} & \text{ako } j \in \mathcal{N}_i^k \\ 0 & \text{ako } j \notin \mathcal{N}_i^k \end{cases} \quad (4-7)$$

gdje  $i$  označava trenutni položaj mrava, a  $j$  je sljedeći potencijalni položaj mrava.  $\mathcal{N}_i^k$  je skup mogućih položaja koji su povezani s trenutnim položajem,  $i$ . U jednadžbi (4-7),  $\alpha$  je pozitivna konstanta koja pojačava utjecaj koncentracije feromona na vjerojatnost odabira nekog budućeg položaja mrava. Koncentracija feromona na putu od položaja  $i$  do položaja  $j$  je izražena kao  $\tau_{ij}(t)$ . Kroz ovakav proces prolazi svaki mrav sve dok ne dođe do destinacije. Nakon toga, za svakog mrava postoji pojedinačno rješenje,  $x^k(t)$ . Kvaliteta pojedinog rješenja,  $f(x^k(t))$ , predstavlja duljinu puta. Sada se svaki mrav,  $k$ , vraća nazad u početni položaj istim putem i odlaže količinu feromona,  $\Delta\tau_{ij}^k$ , koja je obrnuto proporcionalna duljini puta,  $L^k$ :

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) \propto \frac{1}{L^k(t)}. \quad (4-8)$$

U sljedećem koraku algoritma,  $t + 1$ , količina feromona između položaja  $i$  i  $j$  je:

$$\tau_{ij}(t+1) = \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^{n_k} \Delta\tau_{ij}^k(t), \quad (4-9)$$

uz  $n_k$  koji je broj mrava u SACO algoritmu. Iz jednadžbe 4-8 uočava se da je količina feromona koji se izlučuje veća što je put između neka dva položaja kraći. Na taj način osigurava se veća vjerojatnost odabira kraćih puteva u SACO algoritmu. Prema prethodno navednim karakteristikama SACO algoritma, duljina puta odgovara kvaliteti rješenja pa je optimalno rješenje ono koje ima najmanji iznos kvalitete,  $f(x^k(t))$ . To je u skladu s

minimizacijom duljine puta u SACO algoritmu, [62].

Kako bi se modeliralo proširenije istraživanje prostora rješenja i kako bi se izbjegla prerana konvergencija SACO algoritma, uvodi se evaporacija feromona na kraju svakog koraka SACO algoritma. Tako se za svaku vezu između neka dva položaja  $i$  i  $j$  definira:

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - \rho) \tau_{ij}(t), \quad \rho \in [0, 1]. \quad (4-10)$$

U jednadžbi (4-10),  $\rho$  je konstanta koja opisuje brzinu evaporacije feromona. Što je vrijednost konstante  $\rho$  veća to je brža evaporacija feromona i obrnuto. Veća brzina evaporacije podrazumijeva veću vjerojatnost odabira puteva koji imaju manju koncentraciju feromona čime se postiže opsežnije pretraživanje prostora rješenja. Na kraju je potrebno spomenuti da je konačno rješenje rezultat zajedničkog ponašanja: svaki mrav bira svoj sljedeći položaj na relaciji hrana-gnijezdo na temelju informacija (feromona) koje su ostavili drugi mravi, [62].

Prvotna je namjena ACO algoritama bila rješavanje kombinatoričkih optimizacijskih problema (varijable odluke su cijeli brojevi). *MIDACO* alat koristi prošireni ACO algoritam, [61], koji je opisan u radu [63] i koji omogućuje rješavanje optimizacijskih problema čije su varijable odluke cjelobrojne i/ili kontinuirane.

Prije upotrebe *MIDACO* alata za optimizaciju 2D modela zavojnice, potrebno je povezati *FEMM* i *Python*. Paket *pyFEMM* omogućuje korištenje *FEMM*-a s pomoću biblioteke (engl. *Library*) *Python* funkcija, [64]. Početak povezivanja *FEMM*-a i *Python*-a je učitavanje *pyFEMM* modula u *Pythonu* koje se obavlja uz pomoć naredbe `import femm`. Nakon toga se koristi naredba `femm.openfemm()` za pokretanje odnosno otvaranje programskog



paketa *FEMM*, a za zatvaranje se koristi naredba `femm.closefemm()`.

Nakon pokretanja *FEMM*-a, potrebno je stvoriti novi dokument naredbom `femm.newdocument(0)`. Tip novog dokumenta definira se brojem u zagradi. U ovom slučaju unutar zagrade je upisana nula jer se na taj način definira problem u kojem se računaju magnetske fizikalne veličine. Nadalje se naredbom `femm.mi_probdef(freq, unit, type, precision, depth, minangle, (acsolver))` i vrijednostima unutar zagrade redom definira frekvencija, mjerna jedinica, tip modela (planarni ili osnosimetrični), preciznost proračuna, dubina modela (1 za planarne modele) te minimalni kut geometrijskog elementa kojeg stvara generator mreže u metodi konačnih elemenata.

Crtanje 2D modela zavojnice sa slike 4.2 izvodi se dvjema naredbama `femm.mi_drawrectangle(x1, y1, x2, y2)` i `femm.mi_drawline(x1, y1, x2, y2)`. Prvom naredbom crtaju se gornji (siva boja) vodiči zavojnice koji su zapravo kvadrati, čija je duljina stranice  $a = 2$  mm, slika 4.2. Drugom se naredbom za crtanje crtaju četiri pravca koji omeđuju područje (pravokutnik) u kojem se promatra magnetsko polje. Nakon naredbi za iscrtavanje pravca definira se rubno svojstvo `femm.mi_addboundprop('Boundary_1', 0, 0, 0, 0)` i pravcima se dodjeljuje rubno svojstvo naredbom `femm.mi_setsegmentprop('Boundary_1', 1, 0, 0, 0)`. Drugim riječima, smatra se da izvan pravokutnika kojeg čine četiri ranije nacrtana pravca nema magnetskog polja. Pravokutnik u kojem se računa magnetsko polje još se naziva i regija promatranja.

Iz biblioteke materijala u *FEMM*-u pozivaju se bakar i zrak, redom ovim naredbama, `femm.mi_getmaterial('Copper')` pa `femm.mi_getmaterial('Air')`. Nakon toga se bakar kao materijal dodjeljuje gornjim



vodičima zavojnice, a zrak čini preostalo područje unutar regije promatranja. Na kraju je potrebno definirati struje naredbom `femm.mi_addcircprop('circuitname', i, circuittype)`. Prije dodjeljivanja svojstava vodičima i regiji promatranja definiraju im se oznake: `femm.mi_addblocklabel(x1, y1)`. Koordinate `x1` i `y1` unutar zagrade prethodne naredbe su položaji točkica koja se nalaze unutar vodiča i regije promatranja. Zatim se kvadratima koji predstavljaju vodiče dodjeljuju svojstva. Prvo se selektira oznaka vodiča, npr. lijevog gornjeg vodiča, `femm.mi_selectlabel(1, 139)` pa se zadaje `femm.mi_setblockprop('Copper', 0, 1, 'circuitname', 0, 0, 1)`. Onda se zadaje naredba `femm.mi_clearselected()` kako bi se mogla definirati svojstva i ostalim vodičima i regiji promatranja. Zadaje se struja kroz lijevi gornji vodič sa slike 4.2 pod imenom `current_1` i suprotnog je smjera u odnosu na struju kroz desni gornji vodič, `current_2`, sa slike 4.2. Iznosi tih struja u skladu su s jednadžbom (4-29) i navedeni su u tablici 4.1. Na isti se način dodjeljuju svojstva regiji promatranja, `femm.mi_setblockprop('Air', 0, 1, '<None>', 0, 0, 0)`.

Naredbom `femm.mi_saveas(document name.fem)` zadaje se spremanje izrađenog dokumenta. Nakon toga se pokreće analiza (simulacija) modela naredbom `femm.mi_analyze()` i opcionalno se učitavaju rezultati simulacije naredbom `femm.mi_loadsolution()`. Ovdje je potrebno napomenuti da do sada napravljeni model 2D zavojnice ima samo gornje vodiče (kvadrati sive boje) sa slike 4.2.

Sada slijedi definiranje varijabli koje opisuju položaj donjih vodiča (kvadrati crvene boje) sa slike 4.2. Osim varijabli koje opisuju položaj donjih vodiča, potrebno je definirati i varijablu koja predstavlja omjer struje (broja namotaja) između gornjeg i donjeg sloja zavojnice, (4-28), te varijablu koja

predstavlja udaljenost prijenosa energije, na slici 4.2 to je varijabla  $h$ .

Definirane su konstante  $X_s=140$ ,  $Y_s=138$ ,  $a=2$ ,  $RNG=281$  i  $I=20$ . Nakon toga se poziva funkcija za definiranje optimizacijskog problema: `def problem_function(x)`, vidi prilog A.2. Na kraju funkcije u kojoj se definira optimizacijski problem je linija `return f,g`. Na početku funkcije definira se više varijabli tipa *array*. Potrebno je inicijalizirati *array* u kojem će se pohranjivati vrijednost fitnes funkcije,  $f=[0.0]*1$ . S obzirom na to da fitnes funkcija nema ograničenja jednakosti i nejednakosti, vrijednost funkcije koja predstavlja ograničenja jednakosti i nejednakosti je uvijek prazan *array*,  $g=[]$ . Nakon toga se definiraju varijable vektora  $x$ . Vektor  $x$  sastoji se od četiri varijable,  $X1$ ,  $Y1$ ,  $h$  i  $o$ . Prema *MIDACO* dokumentaciji, prvo se definiraju varijable koje su realni brojevi, a zatim se definiraju varijable koje su cijeli brojevi, [61]. Stoga varijabla  $X1$  ima indeks 0, varijabla  $Y1$  ima indeks 1, a varijable  $h$  i  $o$  imaju redom indeks 2 i 3 vektora  $x$ . U *Python*-u je to definirano na sljedeći način:  $X1=x[0]$ ,  $Y1=x[1]$ ,  $h=x[2]$  i  $o=x[3]$ .

Nastavak izrade kompletnog modela 2D zavojnice sa slike 4.2 uz pomoć naredbi u *Python*-u je crtanje donjih vodiča zavojnice čiji se položaj optimizira. Donji vodiči zavojnice prikazani su na slici 4.2 i označeni su crvenom bojom. Ponovo se za crtanje vodiča koristi naredba `femm.mi_drawrectangle()`. Za donji lijevi vodič unose se sljedeće vrijednosti unutar zagrade prethodne naredbe:  $X_s-x[0]$ ,  $Y1$ ,  $X_s-x[0]+a$ ,  $Y1+a$ . Ista naredba i vrijednosti u zagradi:  $X_s+x[0]$ ,  $Y1$ ,  $X_s+x[0]-a$ ,  $Y1+a$ , definiraju položaj donjeg desnog vodiča zavojnice. Nazivi i iznosi struja koji će se kasnije dodijeliti donjim vodičima definiraju se opet naredbom `femm.mi_addcircprop()`. Za donji lijevi vodič, unutar zagrade prethodne naredbe su: `current_3`,  $I/(o+1)$ , 0, gdje je `current_3` naziv za struju koja teče donjim lijevim vodičem,

$I / (o+1)$  je iznos struje kroz donji lijevi vodič, a zadnja vrijednost u zagradi označava paralelni spoj. Ovdje je potrebno napomenuti da paralelni i serijski spoj daju iste rezultate simulacija pa se umjesto paralelnog spoja mogao odabrati i serijski spoj postavljenjem broja 1 umjesto 0. Struja koja se naknadno dodjeljuje donjem desnom vodiču definira se opet naredbom `femm.mi_addcircprop()`, a vrijednosti unutar zagrade su: `current_4, -I / (o+1), 0`. Dodijeljivanje struje kroz donje vodiče te bakar kao materijal vodiča definira se naredbom `femm.mi_setblockprop()`. U tablici 4.1 sumirana su ranije navedena svojstva vodiča i regije promatranja.

Dalje se dokument ponovo sprema naredbom `femm.mi_saveas(document_name.fem)`. Simulacija se opet pokreće naredbom `femm.mi_analyze()` i rješenja se pohranjuju naredbom `femm.mi_loadsolution()`. Unutar funkcije `def problem_function(x)` definira se `for` petlja kojom se definira računanje  $y$  komponente jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja u 281 ravnomjerno raspoređenih točaka ( $RNG=281$ ). Duljina pravca napajanja je 280 mm pa se prva točka gdje se računa jakost magnetskog polja nalazi na samom početku pravca napajanja (0 mm, s lijeva na desno). Posljednja točka nalazi se na 280 mm udaljenosti od početne. Kako se radi o 2D modelu, postoji  $x$  i  $y$  komponenta polja. Selektiranje samo  $y$  komponente polja odabire se uz pomoć indeksa vektora  $h$ . Odabirom `h[0]` prikazuje se  $x$  komponenta jakosti magnetskog polja dok se odabirom `h[1]` prikazuje  $y$  komponenta jakosti magnetskog polja. Prije linije `return f, g` još je potrebno definirati fitnes funkciju. Fitnes funkcija definirana unutar funkcije `def problem_function(x)` odgovara onoj iz jednadžbe (4-1).

U nastavku se definiraju svojstva optimizacijskog problema i postavljaju se parametri *MIDACO* solvera. Prvi je dio definiranja svojstava optimiza-

4. Optimizacija 3D predajne zavojnice s homogenom razdiobom magnetskog polja u ravnini napajanja uz pomoć populacijskog algoritma i algoritama iz skupine evolucijskog računanja

**Tablica 4.1:** Svojstva 2D modela zavojnice u FEMM-u

	x1, [mm]	y1, [mm]	x2, [mm]	y2, [mm]	Materijal	Struja, [A]
<b>Vodiči</b>						
Gornji lijevi vodič	0	138	2	140	bakar	current_1= (I/(o+1))*o
Gornji desni vodič	278	138	280	140	bakar	current_2= -(I/(o+1))*o
Donji lijevi vodič	Xs-x[0]	Y1=x[1]	Xs-x[0]+a	Y1+a	bakar	current_3= I/(o+1)
Donji desni vodič	Xs+x[0]	Y1=x[1]	Xs+x[0]-a	Y1+a	bakar	current_4= -I/(o+1)
<b>Regija promatranja</b>						
pravac_1	-70	0	350	0	/	/
pravac_2	350	0	350	300	/	/
pravac_3	350	300	-70	300	/	/
pravac_4	-70	300	-70	0	/	/

cijskog problema postavljanje dimenzije problema. Definiraju se: broj fitnes funkcija, broj varijabli odluke, broj varijabli odluke cjelobrojnog tipa, broj ograničenja fitnes funkcije, broj ograničenja jednakosti. Kako se koristi jedna fitnes funkcija, (4-1), optimizacija je jednociljna. Optimiziraju se ukupno četiri varijable odluke,  $D_2$ ,  $W_2$ ,  $h$  sa slike 4.2, i  $o$  iz jednadžbe (4-28). Definirano je da su dvije varijable odluke cjelobrojnog tipa, za ostale se varijable odluke podrazumijeva da su kontinuiranog tipa (realni brojevi). Ukupan broj ograničenja fitnes funkcije je nula pa su zadnja dva svojstva, broj ograničenja fitnes funkcije i broj ograničenja jednakosti također jednaki nuli.

Drugi je dio definiranja svojstava optimizacijskog problema postavljanje donjih (engl. *Lower*) i gornjih (engl. *Upper*) ograničenja varijabli odluke (engl. *Boundary Constraints*) koje definiraju prostor pretraživanja, [62]. Optimalna rješenja nalaze se unutar tako definiranog prostora pretraživanja. Varijabla  $W_2$  sa slike 4.2 odgovara dvostrukoj vrijednosti varijable  $X1=x[0]$  čija se vrijednost optimizira. Ograničenje varijable  $X1$  može se matematički zapisati kao:

$$3 \leq X1 \leq Xs - 1, \quad X1 \in \mathbb{R}. \quad (4-11)$$

Varijabla  $D_2$  sa slike 4.2 odgovara razlici između vrijednosti konstante  $Y_{s+a}$  i vrijednosti varijable  $Y_{1+a}$ . Ograničenje se postavlja s obzirom na varijablu  $Y_{1+x[1]}$ :

$$0 \leq Y_1 \leq Y_s - 3, \quad Y_1 \in \mathbb{R}. \quad (4-12)$$

Optimalna vrijednost varijable  $D_2$  tada se odredi zbrojem optimalne vrijednosti varijable  $Y_1$  i konstante  $a$ , prema izrazu:

$$D_2 = (Y_{s+a}) - (Y_{1+a}) = Y_s - Y_1. \quad (4-13)$$

Sljedeća se ograničenja odnose na cjelobrojne varijable  $h=x[2]$  i  $o=x[3]$ . Donja je granica udaljenosti prijenosa,  $h$ , postavljena na 1 mm udaljenosti od gonjih vodiča zavojnice. Gornja je granica udaljenosti prijenosa postavljena na 40 mm. Matematički opis donje i gornje granice udaljenosti prijenosa je:

$$1 \leq h \leq 40, \quad h \in \mathbb{N}. \quad (4-14)$$

Matematički je zapis donje i gornje granice varijable  $o$ , 4-28, koja predstavlja omjer struje prvog sloja i drugog sloja zavojnice:

$$1 \leq o \leq 10, \quad o \in \mathbb{N}. \quad (4-15)$$

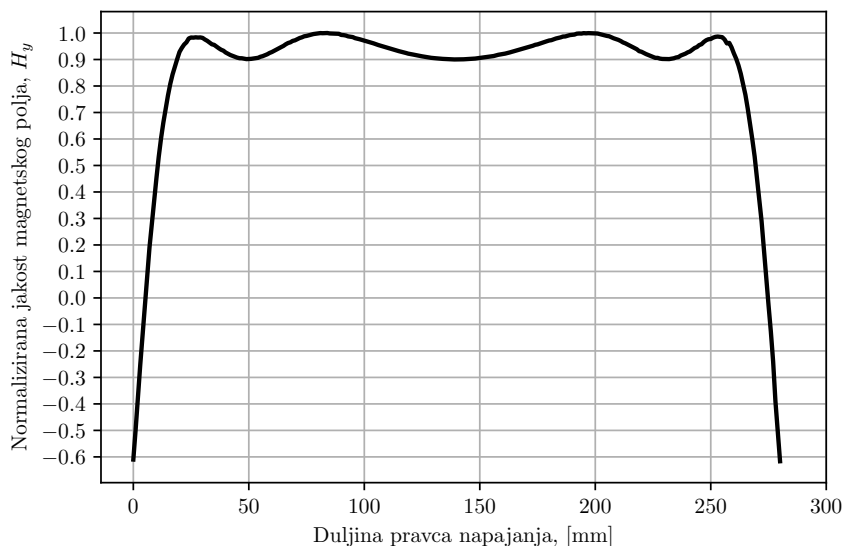
Kombiniraju se dva kriterija za završetak optimizacije: maksimalan broj evaluacija fitnes funkcije,  $\max_{eval}$  i maksimalno vrijeme optimizacije,  $\max_{time}$ . Optimizacija se zaustavlja kada je jedan od kriterija zadovoljen. Maksimalan broj evaluacija fitnes funkcije iznosi 2500, a maksimalno vrijeme optimizacije je 86400 sekundi (24 h). Zadana vrijednost svih *MIDACO* parametara (PARAM(1)-PARAM(13)) je nula, [61], međutim u ovom slučaju su izmijenjena dva parametra: PARAM(7)-ANTS i PARAM(8)-KERNEL.

ANTS parametar je podešen na 30 dok je KERNEL parametar postavljen na vrijednost 5. To je u skladu s preporukama iz [61], gdje se predlaže takva kombinacija vrijednosti ANTS i KERNEL parametara za vremenski zahtjevne probleme.

Na slici 4.3, prikazana je distribucija  $y$  komponente normalizirane jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja za optimalne vrijednosti varijabli odluke koje su dobivene MIDACO alatom. Ukupno 85.05% duljine pravca napajanja karakterizira neprekidno homogeno magnetsko polje. U sljedećoj su tablici, 4.2, navedene optimalne vrijednosti varijabli odluke dobivene MIDACO alatom:

**Tablica 4.2:** Optimalne vrijednosti varijabli odluke, MIDACO alat

Varijabla odluke	$W_2$ , [mm]	$D_2$ , [mm]	$h$ , [mm]	$o$
Optimalna vrijednost	163.24	16.39	23	3



**Slika 4.3:** Distribucija normalizirane jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja pri optimalnim vrijednostima varijabli odluke (MIDACO alat)

#### 4.1.2. Optimizacija četiri varijable odluke 2D modela zavojnice jednostavnim genetskim algoritmom iz *pygmo* biblioteke

Biblioteka *pygmo* je znanstvena biblioteka programskog jezika *Python*, [65]. Može se koristiti za jednociljnu ili višeciljnu optimizaciju ograničenih ili neograničenih problema čije varijable odluke mogu biti cjelobrojne i/ili kontinuirane, [66].

U *pygmo* biblioteci na raspolaganju je mnoštvo optimizacijskih algoritama od kojih je za optimizacijski problem u ovom istraživanju pogodan jednostavni genetski algoritam (engl. *Simple Genetic Algorithm, SGA*) jer je namijenjen za jednociljnu optimizaciju problema bez ograničenja, ali s varijablama odluke koje su cjelobrojne i/ili kontinuirane.

Odlika je svih algoritama iz EC skupine da modeliraju odnosno oponašaju proces evolucije, [62]. Tako i SGA iz *pygmo* biblioteke karakterizira neka populacija jedinki i procesi koji se nazivaju genetskim operatorima: selekcija, križanje i mutacija. U nastavku je napisan pseudokod SGA iz *pygmo* biblioteke, [66]:

```
> Započni s populacijom (pop) dimenzije N
> while i < gen
> > Selekcija: generiraj novu populaciju (pop2) s N
    individua selektiranih iz pop (dopušten ponovni izbor)
> > Križanje: generiraj novu populaciju (pop3) s N
    individua primjenom operatora križanja nad pop2
> > Mutacija: generiraj novu populaciju (pop4) s N
    individua primjenom operatora mutacije nad pop3
> > Izračunaj kvalitetu jedinki iz pop4 s obzirom na
    fitnes funkciju
> > Postavi novu populaciju s najboljim individuama iz
    pop i pop4
```

Prvi korak u SGA *pygmo* biblioteke je stvaranje početne (inicijalne) populacije. Uobičajeno je da se početna populacija generira slučajnim oda-

birom jedinki iz prostora rješenja. Uloga je slučajnog odabira jedinki koje čine početnu populaciju da predstavljaju čitav prostor rješenja odnosno da *dobro pokrivaju* prostor rješenja, [62]. Ako neka područja prostora rješenja nisu pokrivena početnom populacijom, postoje izgledi da će to područje biti zanemareno tijekom optimizacije. Broj jedinki početne populacije utječe na vrijeme potrebno za rješavanje optimizacijskog problema i na sposobnost pretraživanja prostora rješenja. Veći broj jedinki povećava raznolikost populacije pa se time povećava i sposobnost pretraživanja prostora rješenja, ali istovremeno je algoritam vremenski zahtjevniji u odnosu na algoritam s manjom populacijom (više puta se računa fitnes funkcija). S druge strane, manji broj jedinki populacije predstavlja kraće vrijeme izračuna fitnes funkcije tijekom jedne generacije, ali istovremeno manji broj jedinki populacije može predstavljati samo određeni dio prostora rješenja (smanjena sposobnost istraživanja). U slučaju manjeg broja jedinki populacije, povećanje sposobnosti istraživanja prostora rješenja može se poboljšati povećanjem vjerojatnosti mutacije jedinki. Ovdje je potrebno napomenuti da je broj jedinki u populaciji ( $pop$ ) za svaku generaciju konstantan,  $N$ . SGA se ponavlja sve dok nije ispunjen kriterij za završetak, a to je u ovom slučaju broj generacija, 80. Postavljeno je da 32 jedinke čine populaciju u SGA. Prema tome, obavlja se 2560 evaluacija fitnes funkcije.

Na raspolaganju su dvije vrste selekcije u SGA, turnirska (engl. *Tournament*) i krnja (engl. *Truncated*), [66]. Selekcijom jedinki iz populacije  $pop$  odabiru se jedinke koje čine novu populaciju  $pop2$  i nazivaju se potomci (engl. *Offsprings*). Glavna uloga operatora selekcije je odabir kvalitetnih jedinki u smislu vrijednosti fitnes funkcije. U ovom slučaju, kako se minimizira vrijednost fitnes funkcije, jedinka je kvalitetnija što joj je vrijednost



fitnes funkcije manja. Turnirskom selekcijom obavlja se odabir jednog potomka iz slučajnim odabirom dodijeljenih jedinki iz populacije `pop` u grupu koja se sastoji od `param_s` jedinki. Druga vrsta selekcije, krnja, odabire `param_s` najboljih jedinki iz populacije `pop` s obzirom na vrijednost fitnes funkcije, [66]. Na kraju se za optimizaciju 2D modela zavojnice odabire turnirska selekcija koja zbog slučajnog odabira jedinki iz populacije `pop` pretražuje veći dio prostora rješenja u usporedbi s krnjom selekcijom.

Nakon selekcije i stvaranja populacije `pop2` upotrebljavaju se reprodukcijски operatori, križanje i mutacija. Križanje je proces stvaranja nove jedinke ili više jedinki kombiniranjem nasumično odabranih gena dva ili više roditelja, [62]. U SGA odabire se *exponential* tip križanja koji slučajnim odabirom na nekom položaju u roditeljskom kromosomu započinje s izmjenom (umetanjem) genetskog materijala drugog roditelja. Od tog položaja pa do kraja kromosoma jednog roditelja umeće se genetski materijal drugog roditelja s vjerojatnošću `cr`. Na taj način dolazi se do populacije `pop3`. Dalje se mutacijom iz populacije `pop3` stvara populacija `pop4`. Prema [62], mutacija je proces koji se događa s nekom vjerojatnošću i označava promjenu vrijednosti gena u kromosomu. Glavna uloga mutacije je povećanje genetske raznolikosti populacije. Vjerojatnost događanja mutacije je obično vrlo mala kako se ne bi značajno izmjenio genetski materijal kvalitetnih jedinki koje bi tada postale manje kvalitetne s obzirom na vrijednost fitnes funkcije, [62]. Za optimizaciju 2D modela zavojnice s pomoću SGA odabire se i koristi mutacija tipa *polynomial*. Nakon primjene oba reprodukcijски operatora SGA raspolaže s populacijom `pop4`.

Za svaku jedinku  $\mathbf{x}$  iz `pop4` računa se vrijednost fitnes funkcije, (4-1). Sada se svi roditelji (dobiveni selekcijom) i svi potomci (dobiveni reproduk-

4. *Optimizacija 3D predajne zavojnice s homogenom razdiobom magnetskog polja u ravnini napajanja uz pomoć populacijskog algoritma i algoritama iz skupine evolucijskog računanja*

cijskim operatorima) promatraju kao jedna cjelina iz koje se generira nova populacija pop. Generiranje te nove populacije obavlja se selekcijom koja se naziva elitizam. Najkvalitetnije jedinke su selektirane i predstavljaju novu populaciju pop za sljedeću generaciju SGA. Ograničenja varijabli odluke u SGA identična su onima iz optimizacije *MIDACO* alatom.

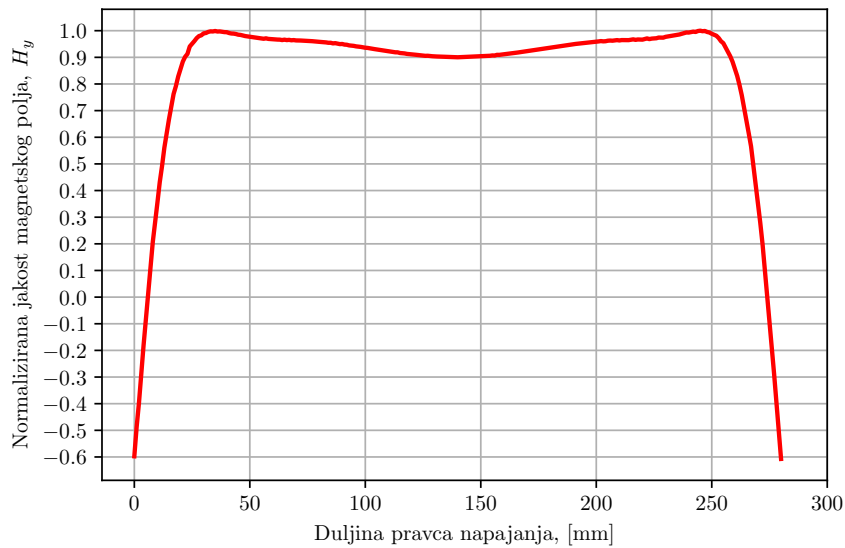
Parametri SGA za optimizaciju vrijednosti četiri varijabli odluke 2D modela zavojnice navedeni su u tablici 4.3. Na slici 4.5 prikazana je distribucija normalizirane jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja za optimalne vrijednosti varijabli odluke koje su navedene u tablici 4.4. Homogeno magnetsko polje odnosno homogena regija je ostvarena u 84.34% duljine pravca napajanja.

**Tablica 4.3:** *Parametri SGA iz pygmo biblioteke za optimizaciju četiri varijable odluke 2D modela zavojnice*

Parametri SGA	Opis	Dodatna ograničenja	Postavljena vrijednost ili tip
gen	broj generacija	prirodni broj	80
pop	broj jedinki jedne generacije	prirodni broj	32
cr	vjerojatnost križanja	realni broj, $\in [0,1]$	0.9
m	vjerojatnost mutacije	realni broj, $\in [0,1]$	0.07
param.m	indeks distribucije	realni broj, $\in [0,1]$	1.0
param.s	broj jedinki u grupi turnirske selekcije	prirodni broj, $\in [1, \text{pop}]$	3
crossover	tip križanja	single, exponential, binomial, sbx.	exponential
mutation	tip mutacije	uniform, gaussian, polynomial.	polynomial
selection	tip selekcije	tournament, truncated.	tournament
seed	seed za generator nasumičnih brojeva	/	nasumičan broj

**Tablica 4.4:** *Optimalne vrijednosti varijabli odluke, pygmo biblioteka, SGA*

Varijabla odluke	$W_2$ , [mm]	$D_2$ , [mm]	$h$ , [mm]	$o$
<b>Optimalna vrijednost</b>	180.5	37.03	25	2



**Slika 4.4:** Distribucija normalizirane jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja pri optimalnim vrijednostima varijabli odluke (*pygmo* biblioteka, SGA)

#### 4.1.3. Optimizacija četiri varijable odluke 2D modela zavojnice diferencijalnom evolucijom iz *pygmo* biblioteke

Diferencijalna evolucija je stohastična strategija pronalaženja optimalnog rješenja koja također primjenjuje koncept evolucije populacije jedinki. Bitna razlika DE u odnosu na druge evolucijske algoritme je korištenje informacija o smjeru i udaljenosti iz trenutne populacije za upravljanje procesom pronalaženja optimalnog rješenja, [62].

Za razliku od SGA, DE prvo primjenjuje operator mutacije nad jedinkom pa se nakon toga koristi operator križanja da bi se generirao novi potomak. Mutacija se koristi kako bi se generirao *trial* vector koji se koristi pri korištenju operatora križanja. Osim toga, DE umjesto funkcije distribucije vjerojatnosti za korak mutacije odnosno varijancu koristi razliku između jedinki trenutne populacije, [62], [67].

Iz inicijalne populacije jedinki u DE mogu se dobiti korisne informacije o vrijednosti fitnes funkcije. Ako se za generiranje inicijalne populacije je-

dinki koristi uniformna distribucija, jedinke bi trebale reprezentirati čitavo područje prostora rješenja. Tada se podrazumijeva da su udaljenosti između jedinki velike, [62]. Tijekom uzastopnih generacija DE udaljenosti između jedinki postaju sve manje i sve jedinke konvergiraju prema istom rješenju.

Kako je ranije navedeno, operator mutacije generira *trial* vektor,  $\mathbf{u}_i(t)$ , za svaku jedinku,  $\mathbf{x}_i(t)$ , odnosno roditelja iz populacije trenutne generacije. Generiranje *trial* vektora se ostvaruje na sljedeći način: odabire se *target* vektor,  $\mathbf{x}_{i_1}(t)$ , iz trenutne populacije takav da vrijedi  $i \neq i_1$ . Nakon toga se nasumično iz trenutne populacije odabiru dvije jedinke,  $\mathbf{x}_{i_2}$  i  $\mathbf{x}_{i_3}$ , takve da vrijedi  $i \neq i_1 \neq i_2 \neq i_3$  i  $i_2, i_3 \sim U(1, N)$ , gdje je  $N$  ukupan broj jedinki populacije u jednoj generaciji, [62]. *Trial* vektor se računa prema sljedećem izrazu:

$$\mathbf{u}_i(t) = \mathbf{x}_{i_1}(t) + \beta (\mathbf{x}_{i_2}(t) - \mathbf{x}_{i_3}(t)), \quad (4-16)$$

gdje je  $\beta \in (0, \infty)$  faktor proporcionalnosti kojim se kontrolira pojačanje razlike vektora.

Operator križanja u DE primjenjuje diskretnu rekombinaciju *trial* vektora,  $\mathbf{u}_i(t)$ , i roditeljskog vektora,  $\mathbf{x}_i(t)$  za stvaranje potomka,  $\mathbf{x}'_i(t)$ . Križanje se matematički opisuje na sljedeći način:

$$x'_{ij}(t) = \begin{cases} u_{ij}(t) & \text{ako } j \in \mathcal{J} \\ x_{ij}(t) & \text{inače} \end{cases} \quad (4-17)$$

gdje  $x_{ij}(t)$  označava  $j$ -ti element vektora  $\mathbf{x}_i(t)$  te  $\mathcal{J}$  označava skup točaka u kojima dolazi do križanja.

Operator selekcije se koristi: za odabir jedinki koje se koriste u operatoru mutacije za generiranje *trial* vektora i za odabir roditelja i potomaka koji

preživljavaju i formiraju sljedeću generaciju. S obzirom na operator mutacije, obično se koristi slučajan odabir jedinki za izračun vektora razlike dok se *target* vektor najčešće odabire slučajnim odabirom ili se odabire jedinka s najkvalitetnijom vrijednošću fitnes funkcije. Za stvaranje sljedeće generacije jedinki ne koristi se slučajan odabir nego se uspoređuju vrijednosti fitnes funkcije roditelja i njegovog potomka te se odabire onaj s kvalitetnijom vrijednošću fitnes funkcije. Na taj način osigurava se da se ne smanjuje srednja vrijednost fitnes funkcije populacije, [62]. U nastavku je prikazan pseudokod DE.

```
> Generiraj populaciju (pop) dimenzije N
> while i < gen
>   > for svaka jedinka  $x_i \in \text{pop}$  do
>   >   > Izračunaj vrijednost fitnes funkcije,  $f(x_i)$ 
>   >   > Mutacija: napravi trial vektor primjenom operatora
>   >   > mutacije
>   >   > Križanje: generiraj potomka  $x_i'$  primjenom operatora
>   >   > križanje
>   >   > if  $f(x_i')$  kvalitetnija od  $f(x_i)$  then
>   >   >   Dodaj  $x_i'$  u novu pop
>   >   > end
>   >   > else
>   >   >   Dodaj  $x_i$  u novu pop
>   >   > else
>   > end
> end
> Rješenje je jedinka s najmanjom vrijednosti f
```

U tablici 4.5 prikazani su parametri DE iz *pygmo* biblioteke primjenjeni za optimizaciju četiri varijable odluke 2D modela zavojnice. U sljedećoj tablici, 4.6, ispisane su optimalne vrijednosti varijabli odluke koje su dobivene s pomoću DE. Nakon toga je, na slici 4.5, prikazana distribucija normalizirane jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja za optimalne vrijednosti varijabli odluke iz tablice 4.6. Dio pravca napajanja u kojem postoji homogeno magnetsko polje zauzima 87.90% ukupne duljine pravca napajanja.

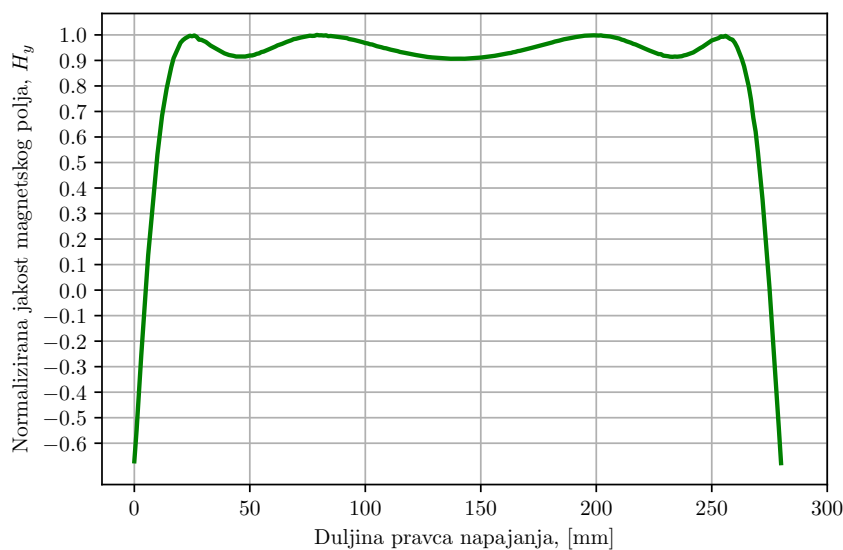
4. Optimizacija 3D predajne zavojnice s homogenom razdiobom magnetskog polja u ravnini napajanja uz pomoć populacijskog algoritma i algoritama iz skupine evolucijskog računanja

**Tablica 4.5:** Parametri DE iz pygmo biblioteke za optimizaciju četiri varijable odluke 2D modela zavojnice

Parametri DE	Opis	Dodatna ograničenja	Postavljena vrijednost ili tip
gen	broj generacija	prirodni broj	80
pop	broj jedinki jedne generacije	prirodni broj	32
F	težinski koeficijent	realni broj, $\in [0,1]$	0.8
CR	vjerojatnost križanja	realni broj, $\in [0,1]$	0.9
variant	varijanca mutacije	prirodni broj, $\in [0,10]$	2
ftol	kriterij završetka s obzirom na toleranciju f	/	$1 \times 10^{-6}$
xtol	kriterij završetka s obzirom na toleranciju x	/	$1 \times 10^{-6}$
seed	seed za generator nasumičnih brojeva	/	nasumičan broj

**Tablica 4.6:** Optimalne vrijednosti varijabli odluke, pygmo biblioteka, DE

Varijabla odluke	$W_2$ , [mm]	$D_2$ , [mm]	$h$ , [mm]	$o$
<b>Optimalna vrijednost</b>	175.32	24.98	20	2



**Slika 4.5:** Distribucija normalizirane jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja pri optimalnim vrijednostima varijabli odluke (pygmo biblioteka, SGA)

Na kraju su ovog potpoglavlja uspoređeni korišteni algoritmi i metoda iz rada [55] s obzirom na postignute normalizirane apsolutne vrijednosti fitnes funkcije iz jednadžbe (4-1). Najkvalitetnija vrijednost fitnes funkcije postignuta je korištenjem DE, MIDACO alat ostvaruje, za 4.3%, manju vrijednost

4. *Optimizacija 3D predajne zavojnice s homogenom razdiobom magnetskog polja u ravnini napajanja uz pomoć populacijskog algoritma i algoritama iz skupine evolucijskog računanja*

fitnes funkcije relativno prema vrijednosti fitnes funkcije iz DE dok je SGA pružio za 16.6% manju vrijednost fitnes funkcije u odnosu na onu iz DE. Uvidom u vrijednost fitnes funkcije uz optimalne vrijednosti varijabli odluke iz rada [55], gdje je  $o = 1$ , potvrđuje se pretpostavka da omjer struja  $o > 1$  pruža bolje performanse s obzirom na 2D model zavojnice.

**Tablica 4.7:** *Vrijednosti fitnes funkcije (pri optimalnim vrijednostima varijabli odluke) za primijenjene optimizacijske algoritme*

Algoritam	MIDACO	SGA	DE	iscrpno pretraživanje iz rada [55]
Normalizirana apsolutna vrijednost fitnes funkcije	0.957	0.834	1	0.678

4.1.4. **Optimizacija tri varijable odluke 2D modela zavojnice uz korištenje MIDACO, SGA i DE za  $h=30$  mm**

Iako su u prethodnim optimizacijama 2D modela određene optimalne vrijednosti četiri varijable odluke postoji potreba da se varijable odluke optimiraju za neku određenu vrijednost udaljenosti prijenosa energije,  $h$ , koja ima konstantan iznos. Naime, postoji mogućnost da udaljenost prijenosa treba biti različita (veća ili manja) u odnosu na optimalne vrijednosti koje su dobivene u prethodnim optimizacijama ( $h_{MIDACO} = 23$  mm,  $h_{SGA} = 25$  mm i  $h_{DE} = 20$  mm). Na primjer, prije ugradnje 3D predajne zavojnice ispod gornje površine radnog stola zahtjeva se definiranje udaljenosti prijenosa energije u ovisnosti o debljini gornje plohe takvog radnog stola. Stoga je u optimizacijama koje slijede odabrana udaljenost prijenosa od 30 mm.

Koristi se ista fitnes funkcija, (4-1), a vektor varijabli odluke je:

$$\mathbf{x} = [D_2, W_2, o]. \quad (4-18)$$

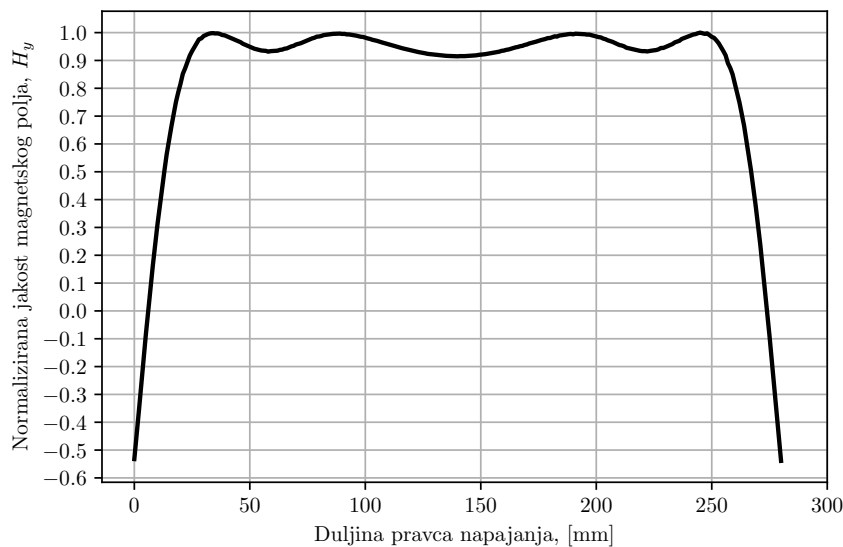
Ograničenja varijabli odluke odgovaraju onima iz izraza (4-11), (4-12) i (4-15)

4. Optimizacija 3D predajne zavojnice s homogenom razdiobom magnetskog polja u ravnini napajanja uz pomoć populacijskog algoritma i algoritama iz skupine evolucijskog računanja

redom za varijable odluke  $W_2$ ,  $D_2$  i  $o$ . Kriterij završetka svih provedenih optimizacija tri varijable odluke 2D modela zavojnice je broj evaluacija (`maxeval`) odnosno generacija (`gen`) algoritma. Ponovo se koristi kosi simulacija *Python-FEMM* zajedno s *MIDACO* alatom te sa SGA i s DE iz *pygmo* biblioteke. Parametri *MIDACO* alata za optimizaciju tri varijable odluke 2D modela zavojnice ostali su nepromijenjeni u odnosu na optimizaciju četiri varijable odluke 2D modela zavojnice, tj. ANTS=30 i KERNEL=5. U sljedećoj tablici, 4.8 prikazane su optimalne vrijednosti varijabli odluke koje su dobivene *MIDACO* alatom.

**Tablica 4.8:** Optimalne vrijednosti varijabli odluke pri  $h=30$  mm, *MIDACO* alat

Varijabla odluke	$W_2$ , [mm]	$D_2$ , [mm]	$o$
Optimalna vrijednost	144.14	5.87	6



**Slika 4.6:** Distribucija normalizirane jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja pri optimalnim vrijednostima varijabli odluke pri  $h=30$  mm, *MIDACO* alat

Na slici 4.6 prikazana je distribucija normalizirane jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja pri  $h = 30$  mm uz optimalne vrijednosti varijabli odluke iz tablice 4.8. Dio pravca s neprekinutim homogenim magnetskim



4. *Optimizacija 3D predajne zavojnice s homogenom razdiobom magnetskog polja u ravni napajanja uz pomoć populacijskog algoritma i algoritama iz skupine evolucijskog računanja*

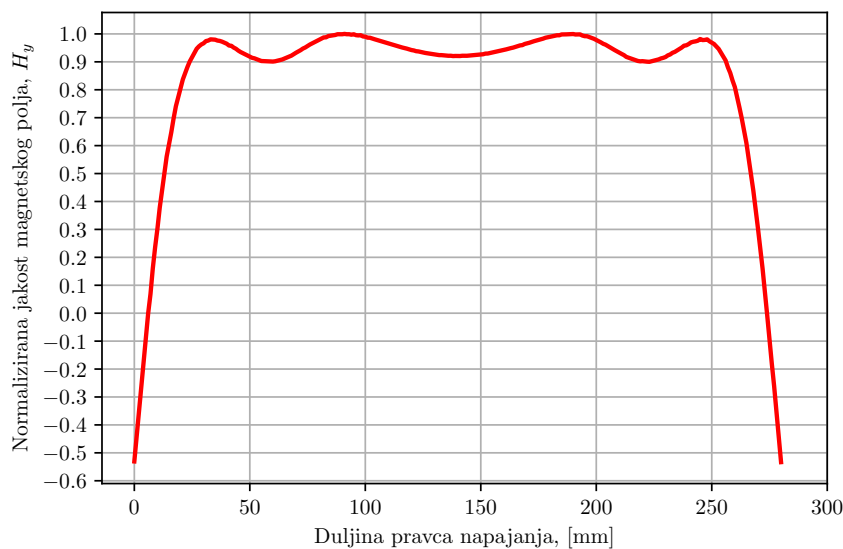
poljem zauzima 82.92% duljine pravca napajanja.

Dalje je provedena optimizacija tri varijable odluke 2D modela zavojnice sa SGA. Postavljeno je da SGA kroz 40 generacija sa 25 jedinki u populaciji evoluira prema optimalnom rješenju. Drugim riječima, kriterij završetka SGA je 1000 evaluacija fitnes funkcije. Ostali parametri SGA odgovaraju onima iz tablice 4.3. U sljedećoj su tablici prikazane optimalne vrijednosti tri varijable odluke koje su dobivene s pomoću SGA:

**Tablica 4.9:** *Optimalne vrijednosti varijabli odluke pri  $h=30$  mm, SGA*

Varijabla odluke	$W_2$ , [mm]	$D_2$ , [mm]	$o$
Optimalna vrijednost	140.78	3.57	6

Distribucija jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja koji je za  $h = 30$  mm vertikalno udaljen od zavojnice pri optimalnim vrijednostima varijabli odluke iz tablice 4.9 prikazana je na slici 4.7. Dio pravca s neprekidnim homogenim magnetskim poljem čini 82.92% pravca napajanja.



**Slika 4.7:** *Distribucija normalizirane jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja pri optimalnim vrijednostima varijabli odluke pri  $h=30$  mm, SGA*

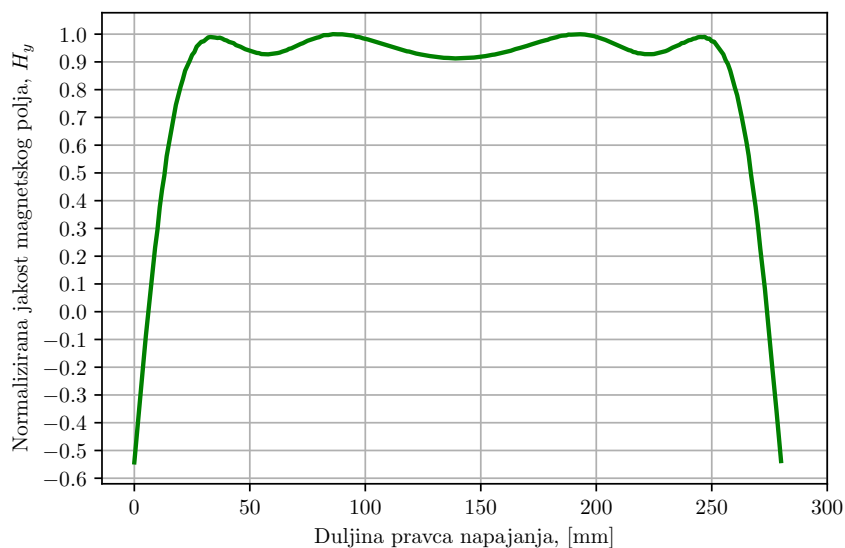
4. *Optimizacija 3D predajne zavojnice s homogenom razdiobom magnetskog polja u ravnini napajanja uz pomoć populacijskog algoritma i algoritama iz skupine evolucijskog računanja*

Na kraju je provedena optimizacija tri varijable odluke 2D modela zavojnice s DE algoritmom. Postavljeno je da DE ima 40 generacija i da svaka generacije ima 25 jedinki pa je učinjeno 1000 evaluacija vrijednosti fitnes funkcije. Parametri DE za optimizaciju tri varijable odluke 2D modela zavojnice odgovaraju onima iz tablice 4.5. Optimalne vrijednosti varijabli odluke koje su dobivene s pomoću DE navedene su u sljedećoj tablici:

**Tablica 4.10:** *Optimalne vrijednosti varijabli odluke pri  $h=30$  mm, DE*

Varijabla odluke	$W_2$ , [mm]	$D_2$ , [mm]	$o$
Optimalna vrijednost	145.02	4.91	6

Na slici 4.8 prikazana je distribucija normalizirane jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja pri  $h = 30$  mm uz optimalne vrijednosti varijabli odluke iz tablice 4.10. Dio pravca s neprekinutim homogenim magnetskim poljem zauzima 82.92% duljine pravca napajanja.



**Slika 4.8:** *Distribucija normalizirane jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja pri optimalnim vrijednostima varijabli odluke pri  $h=30$  mm, DE*

U tablici 4.11 ispisane su normalizirane apsolutne vrijednosti fitnes funkcije koje odgovaraju optimalnim vrijednostima tri varijable odluke iz MIDACO, SGA i DE. Vrijednosti fitnes funkcije su normalizirane s obzirom na vrijednost fitnes funkcije optimalnog rješenja iz DE. Sva tri algoritma pružaju približno jednako kvalitetno optimalno rješenje s obzirom na vrijednost fitnes funkcije. Ipak, kao i u optimizaciji četiri varijable odluke, najkvalitetnije rješenje pruža DE.

**Tablica 4.11:** Vrijednosti fitnes funkcije (pri optimalnim vrijednostima varijabli odluke) za primijenjene optimizacijske algoritme

Algoritam	MIDACO	SGA	DE
Normalizirana apsolutna vrijednost fitnes funkcije	0.999	0.998	1

## 4.2. Optimizacija varijabli odluke 2D i 3D modela zavojnice genetskim algoritmom u Ansys Maxwell-u

### 4.2.1. Optimizacija dvije varijable odluke 2D modela zavojnice

Za optimizaciju varijabli odluke  $W_2$  i  $D_2$  2D modela zavojnice, slika 4.2, koristi se GA koji je dio ugrađenog optimizacijskog alata *Optimetrics Tool* unutar *Ansys Maxwell*-a. Također se tijekom optimizacije, kao i u kosimulaciji *Python-FEMM*, promatra komponenta vektora jakosti magnetskog polja koja je okomita na pravac napajanja,  $H_y$ , koja se definira u *Fields Calculatoru* *Ansys Maxwell*-a kao:

$$H_y = \vec{H} \cdot \vec{n}, \quad (4-19)$$

gdje  $\vec{H}$  predstavlja vektor jakosti magnetskog polja (u 2D modelu zavojnice  $\vec{H}$  se sastoji od  $x$  i  $y$  komponente) i  $\vec{n}$  predstavlja jedinični vektor u smjeru

$y$  osi.

Dalje je u *Ansys Maxwell*-u potrebno nacrtati 2D model zavojnice sa slike 4.2. Položaj vodiča i veličina regije promatranja u *Ansys Maxwell*-u opisani su u tablici 4.1. Svaki poprečni presjek (kvadrat) sa slike 4.2 iste je površine uz duljinu stranice  $a$  koja iznosi 2 mm. Tijekom optimizacije, udaljenost je prijenosa  $h$  fiksna i postavljena na 30 mm. Širina prvog sloja zavojnice,  $W$ , postavljena je na 280 mm što je u skladu sa širinom dvoslojne zavojnice koja je predložena u [55]. Prvi sloj zavojnice odnosno gornja dva kvadrata sa slike 4.2 su fiksnog položaja tijekom optimizacije 2D modela zavojnice. Pozicije donja dva kvadrata u 2D modelu zavojnice opisuju se varijablama odluke  $W_2$  i  $D_2$ . Matematički zapis optimizacijskog problema 2D modela zavojnice zapisuje se na sljedeći način:

$$f(\mathbf{x}) = \frac{H_{ymaks}(\mathbf{x}) - H_{ysr}(\mathbf{x})}{H_{ysr}(\mathbf{x})} \rightarrow min., \quad (4-20)$$

uz ograničenja:

$$g_j(\mathbf{x}) = 0, \quad (4-21)$$

$$h_k(\mathbf{x}) \leq 0, \quad (4-22)$$

gdje je  $\mathbf{x}$  vektor varijabli odluka:

$$\mathbf{x} = [W_2, D_2]. \quad (4-23)$$

Cilj je optimizacije 2D modela zavojnice minimizirati razliku između maksimalne i srednje vrijednosti  $y$  komponente jakosti magnetskog polja iz brojnika izraza (4-20). Također, cilj je i maksimizacija srednje vrijednosti jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja u nazivniku izraza (4-20). Ovdje je potrebno napomenuti da se fitness funkcija koja se koristila pri optimizaciji

u *Python-FEMM* kosimulaciji, izraz (4-1), ne koristi pri optimizaciji modela u *Ansys Maxwell*-u jer se u *Fields Calculator*-u ne može definirati i računati duljina pravca u kojem je homogeno polje ( $H_y \geq 0.9 \cdot H_{y\text{maks}}$ ). Maksimalna vrijednost jakosti magnetskog polja računa se primjenom *Fields Calculator* naredbe `Max` nad  $y$  komponentom jakosti magnetskog polja iz izraza (4-19). Srednja vrijednost jakosti magnetskog polja definira se u *Fields Calculator*-u prema sljedećoj jednadžbi:

$$H_{ysr} = \frac{\int_0^W H_y dx}{W}. \quad (4-24)$$

Jakost magnetskog polja računa se u 1000 ravnomjerno raspoređenih točaka koje leže na pravcu napajanja.

Maksimalan je broj od 250 generacija postavljen kao kriterij za završetak optimizacije. Upotrebljava se proporcionalna selekcija (engl. *Proportional Selection*) koja usmjerava selekciju prema jedinkama s najkvalitetnijom vrijednošću fitnes funkcije. U proporcionalnoj se selekciji koristi distribucija vjerojatnosti odabira koja je proporcionalna vrijednosti fitnes funkcije jedinke, [62]:

$$p(\mathbf{x}_i) = \frac{f(\mathbf{x}_i)}{\sum_{l=1}^N f(\mathbf{x}_l)}, \quad (4-25)$$

gdje je  $N$  ukupan broj jedinki populacije. Metoda selekcije koja je dostupna u *Ansys Maxwell*-u je *roulette wheel* selekcija u kojoj se distribucija vjerojatnosti odabira jedinke može usporediti s kotačem u ruletu. Tada je rotirajući kotač iz ruleta podijeljen na  $N$  dijelova (engl. *Slices*) različitih veličina. Svaki dio od ukupno  $N$  dijelova kotača zasebno predstavlja vjerojatnost jedinke da će biti odabrana. Algoritam *roulette wheel* selekcije je zapisan u nastavku, [62].

```
> Neka je  $i=1$ , gdje  $i$  predstavlja indeks jedinice  
> Izračunaj  $p(\mathbf{x}_i)$  iz jednadžbe 4-25  
>  $sum = p(\mathbf{x}_i)$   
> Odaberi  $r \sim U(0,1)$   
> while  $sum < r$  do  
> >  $i = i + 1$ , tj. nastavi sa sljedećom jedinkom  
> >  $sum = sum + p(\mathbf{x}_i)$   
> end  
> Vрати  $\mathbf{x}_i$  kao odabranu jedinku
```

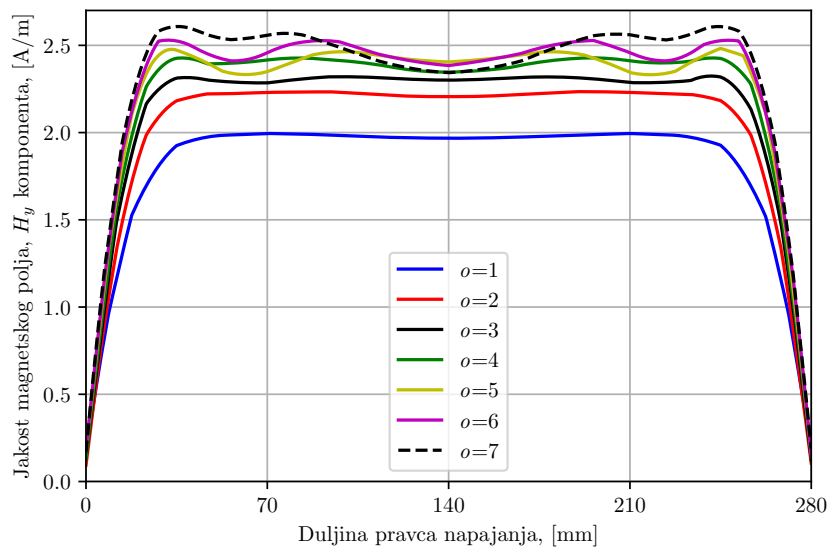
Omjer struja,  $o$ , između slojeva zavojnice u *Ansys Maxwell* simulacijama je prirodan broj što je definirano po uzoru na omjer  $o$  u *Python-FEMM* kosimulaciji. Zbroj je struje prvog sloja,  $I_1$ , i drugog sloja,  $I_2$ , zavojnice konstantan ( $I_1 + I_2 = 1A$ ), a iznosi struja definirani su izrazima (4-29) i (4-6). U usporedbi s *Python-FEMM* kosimulacijom gdje se optimizirao omjer  $o$ , ovdje, u *Ansys Maxwell* simulacijama, se manualno mijenja omjer struja,  $o \in [1, 7]$ . Dakle, provodi se ukupno sedam optimizacija 2D modela u kojima se optimiraju varijable odluke  $D_2$  i  $W_2$  uz  $h = 30$  mm te omjer struja u navedenom rasponu. Ograničenja varijabli odluke odgovaraju onima iz izraza (4-11) i (4-12), uz pravila za preračunavanje:  $W_2 = 2 \cdot X1$  i  $D_2 = Ys - Y1$ . Parametri GA u *Ansys Maxwell*-u prikazani su sljedećom tablicom.

Distribucije su jakosti magnetskog polja uz optimalne vrijednosti varijabli odluke za različite omjere struja prikazane na slici 4.9. Primjećuje se da s porastom omjera  $o$  dolazi do porasta jakosti magnetskog polja. Također, s povećanjem omjera  $o$  povećava se i valovitost jakosti magnetskog polja u dijelu pravca napajanja gdje postoji homogeno magnetsko polje. Ipak, u slučaju kada omjer  $o$  iznosi 7 (isprekidana crna krivulja na slici 4.9) magnetsko polje u pravcu napajanja nije homogeno jer je jakost magnetskog polja u centru pravca napajanja manja od 90% iznosa maksimalne jakosti magnet-

4. Optimizacija 3D predajne zavojnice s homogenom razdiobom magnetskog polja u ravnini napajanja uz pomoć populacijskog algoritma i algoritama iz skupine evolucijskog računanja

**Tablica 4.12:** Parametri GA za optimizaciju dvije varijable odluke 2D modela zavojnice, Ansys Maxwell

Parametri GA	Opis	Dodatna ograničenja	Postavljena vrijednost ili tip
gen	broj generacija	prirodni broj	25
pop	broj jedinki jedne generacije	prirodni broj	20
selekcija	tip selekcije	roulette wheel	roulette wheel
križanje	tip križanja	uniform, one point, two point, sbx.	uniform
cp	vjerojatnost križanja	realni broj, $\in [0,1]$	0.8
mutacija	tip mutacije	uniform gauss polynomial	gauss
mp	vjerojatnost mutacije	realni broj, $\in [0,1]$	0.1



**Slika 4.9:** Raspodjela jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja uz optimalne vrijednosti varijabli  $D_2$  i  $W_2$  za različite vrijednosti raspodjele struje

skog polja  $H_{y_{maks}}$ . Stoga se izvodi zaključak da optimizacija s omjerom  $o > 6$  ne ispunjava kriterij homogenosti.

Detaljnije o rješenjima optimizacije zavojnice je navedeno u tablici 4.13. Veći iznos omjera  $o$  rezultira manjom optimalnom vrijednošću varijable  $D_2$ , većim dijelom pravca u kojem postoji homogeno magnetsko polje i većom srednjom vrijednošću jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja,  $H_{y_{sr}}$ .

4. Optimizacija 3D predajne zavojnice s homogenom razdiobom magnetskog polja u ravnini napajanja uz pomoć populacijskog algoritma i algoritama iz skupine evolucijskog računanja

**Tablica 4.13:** Usporedba optimiranih 2D modela zavojnica za različite omjere struja

$o$	Algoritam	$D_2$ , [mm]	$W_2$ , [mm]	$H_{ysr}$ , [A/m]	Dio pravca s homogenim poljem, [%]	Udaljenost prijenosa, [mm]	FoM <sub>3</sub> , [A/m]	Vrijednost funkcije cilja, (4-20)
1	GA	58.71	212.42	1.817	80.43	30	1.46	0.0980
2	GA	38.14	174.29	2.043	82.62	30	1.69	0.0940
3	GA	27.14	150.98	2.140	84.32	30	1.80	0.0862
4	GA	16.83	154.44	2.23	84.69	30	1.89	0.0878
5	GA	8.82	135.76	2.26	85.39	30	1.93	0.0978
6	GA	3.62	143.93	2.31	85.20	30	1.97	0.0960
7	GA	3.62	154.55	2.34	/	30	/	0.1125

Varijabla  $W_2$  nije izravno povezana sa smanjenjem varijable  $D_2$  koja predstavlja dubinu drugog sloja zavojnice, ali je također bitna u optimizaciji da bi se ostvario potrebnii optimalni dizajn. Uvodi se mjera kvalitete, FoM<sub>3</sub>, kako bi se usporedila optimalna rješenja 2D modela u *Ansys Maxwell*-u za različite omjere  $o$ :

$$\text{FoM}_3(\mathbf{x}) = hr(\mathbf{x}) \cdot H_{ysr}(\mathbf{x}). \quad (4-26)$$

U jednadžbi (4-26),  $hr$  je omjer duljine pravca gdje je prisutno neprekinuto homogeno magnetsko polje i ukupne duljine pravca napajanja dok je  $H_{ysr}$  srednja vrijednost jakosti magnetskog polja koja se računa u pravcu napajanja. Jednadžba (4-26) zapravo je apsolutna vrijednost fitnes funkcije, 4-1, iz optimizacija u okviru *Python-FEMM* kosimulacije. Za svaku vrijednost omjera  $o$  izračunata je vrijednost FoM<sub>3</sub> i najveća je vrijednost ostvarena pri  $o = 6$ , tablica 4.13. Također je, usporedbom s ostalim optimalnim rješenjima, utvrđeno da je dubina drugog sloja zavojnice,  $D_2$ , najmanja u slučaju kada je  $o = 6$ . Optimizacijom varijabli odluke 2D modela zavojnice u *Ansys Maxwell*-u potvrđeno je da je za udaljenost prijenosa energije od 30 mm optimalan omjer struja,  $o$ , koji iznosi 6. Optimizacija u kosimulaciji *Python-FEMM* je učinkovitija u odnosu na optimizaciju u *Ansys Maxwell*-u jer nije potrebno manualno mijenjati iznos omjera struja. Nakon ovoga potrebno je optimirati treću dimenziju zavojnice jer je ona trodimenzionalni objekt. Jedini računalni



alat od svih koji se koriste u svrhu istraživanja u ovoj disertaciji za simulacije 3D modela je *Ansys Maxwell*. Zbog svega toga u nastavku se optimizacija 3D predajne zavojnice radi u *Ansys Maxwell*-u i upotrebljava se omjer struja između slojeva zavojnice koji je  $o = 6$ .

#### 4.2.2. Optimizacija 3D modela zavojnice

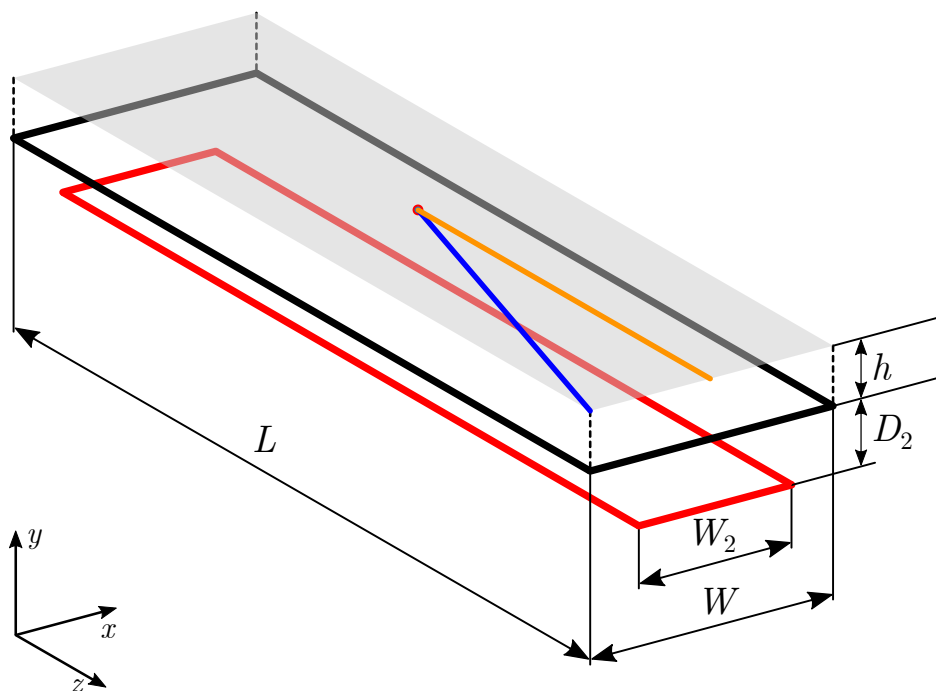
##### Optimizacija jedne varijable odluke 3D modela zavojnice genetskim algoritmom u *Ansys Maxwell*-u

Izrada i optimizacija 3D modela u *Ansys Maxwell*-u bila je nužna uslijed 3D strukture zavojnice iako je vremenski značajno zahtjevnija uspoređujući je s izradom i optimizacijom 2D modela zavojnice. Na temelju optimalnog rješenja (optimalne vrijednosti  $W_2$ ,  $D_2$  i  $o$ ) 2D modela, postavljena je struja prvog sloja koja je šest puta veća u odnosu na struju drugog sloja zavojnice. U ovom stupnju optimizacije, oba sloja zavojnice su planarne pravokutne zavojnice. Prvi sloj zavojnice ima dimenzije  $114 \times 28$  cm dok je koaksijalno i vertikalno ispod za vrijednost  $3.62$  mm,  $D_2$ , postavljen drugi sloj zavojnice čija je širina  $143.93$  mm,  $W_2$ . Te optimalne vrijednosti varijabli odgovaraju onima u tablici 4.13 za  $o = 6$ .

3D model zavojnice (optimalne vrijednosti varijabli  $W_2$  i  $D_2$ ) sa dva sloja koji su zapravo pravokutne zavojnice prikazan je na slici 4.10. Osnovna je ideja optimizacije 2D modela zavojnice bila da se homogena raspodjela jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja održava što duže u ravnini napajanja pomakom pravca napajanja prema rubu ravnine napajanja. Da bi se provjerila ova hipoteza, provedene su simulacije u kojima se računa jakost magnetskog polja duž longitudinalnog (pravac narančaste boje, slika 4.10) i dijagonalnog pravca (pravac plave boje, slika 4.10) u ravnini napajanja.

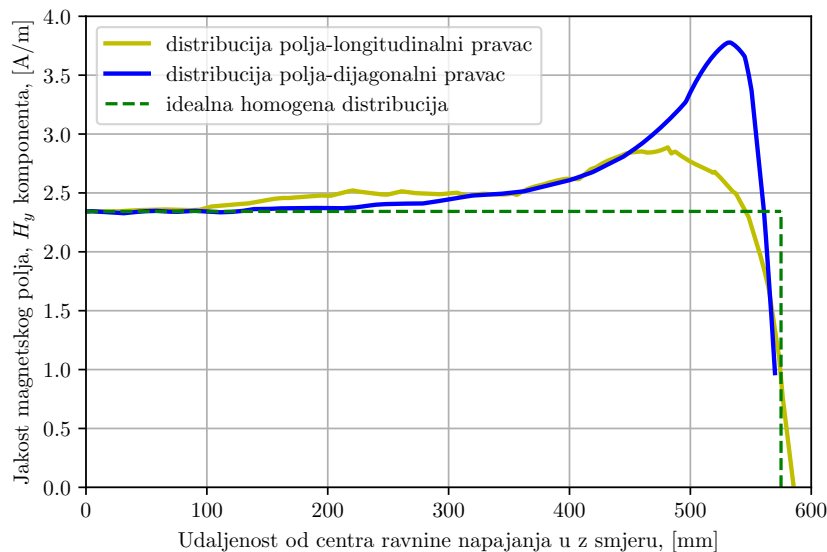
Zajedno s idealnom distribucijom jakosti magnetskog polja, na slici 4.11 prikazane su distribucije jakosti magnetskog polja u dijagonalnom i longitudinalnom pravcu. Zbog simetrije zavojnice sa slike 4.10 s obzirom na  $xy$  i  $yz$  ravninu, distribucija jakosti magnetskog polja računa se samo po pravcima koji se pružaju u polovini ravnine napajanja. Iako su postavljene vrijednosti varijabli  $W_2$  i  $D_2$  optimalne, distribucija jakosti magnetskog polja ima veće vrijednosti u blizini krajeva ravnine napajanja. Općenito vrijedi da se povećanjem udaljenosti od centra ravnine napajanja povećava jakost magnetskog polja u oba pravca. Takav trend promjene jakosti magnetskog polja čini distribuciju jakosti magnetskog polja u oba pravca nehomogenom.

Kako bi se očuvala homogenost jakosti magnetskog polja duž ravnine napajanja, u radu [55] se predlaže vertikalno savijanje kraćih krajeva oba pravokutna sloja zavojnice prema dolje kako je prikazano slikom 4.1. Optimalna dubina zavojnice,  $D$ , u radu [55] iznosi 11.8 cm. 3D model predajne zavojnice strukture sa slike 4.1 izrađen je i simuliran u *Ansys Maxwell*-u uz optimalne



Slika 4.10: 3D model zavojnice od dva sloja koji su pravokutne zavojnice

4. Optimizacija 3D predajne zavojnice s homogenom razdiobom magnetskog polja u ravnini napajanja uz pomoć populacijskog algoritma i algoritama iz skupine evolucijskog računanja



**Slika 4.11:** Rezultati simulacije: jakost magnetskog polja u dijagonalnom i longitudinalnom pravcu dvoslojne pravokutne 3D zavojnice s optimalnim  $W_2$  i  $D_2$  te  $o = 6$

vrijednosti varijabli  $W_2$ ,  $D_2$  iz optimizacije 2D modela pri  $o = 6$ . Modificirana je fitness funkcija za optimizaciju 3D modela:

$$f(\mathbf{x}) = \frac{H_{y\max\_P}(\mathbf{x}) - H_{ysr\_P}(\mathbf{x})}{H_{ysr\_P}(\mathbf{x})}, \quad (4-27)$$

koja se minimizira i u kojoj vektor  $\mathbf{x} = [D]$  predstavlja jedinku u optimizaciji 3D modela. Ograničenje varijable odluke  $D$  definirano je izrazom:

$$8.12 \geq D \geq 116 \text{ (mm)}. \quad (4-28)$$

Donja je granica varijable  $D$  postavljena uzimajući u obzir prethodno optimalno rješenje za varijablu  $D_2$  u optimizaciji 2D modela. Optimalna vrijednost varijable  $D_2$  je 3.62 mm, a vodiči slojeva zavojnice kvadratnog poprečnog presjeka imaju stranicu od 2 mm u 3D modelu zavojnice. Dakle, optimalna vrijednost varijable  $D_2$ , duljina stranice kvadratnog poprečnog presjeka za oba sloja zavojnice te minimalna vertikalna udaljenost između slojeva od 0.5 mm skupa daju vrijednost donje granice od 8.12 mm. Gornja je granica

varijable  $D$  postavljena na vrijednost koja odgovara optimalnoj u radu [55].

Jakosti magnetskog polja koje se koriste u fitnes funkciji (4-27) računaju se uz pomoć *Fields Calculator* alata u ravnini napajanja koja je u *Ansys Maxwell*-u postavljena 30 mm vertikalno iznad 3D modela zavojnice (udaljenost prijenosa). U jednadžbi (4-27),  $H_{y_{maks\_P}}$  je maksimalna vrijednost jakosti magnetskog polja u ravnini napajanja dok se srednja vrijednost jakosti magnetskog polja u ravnini napajanja definira kao:

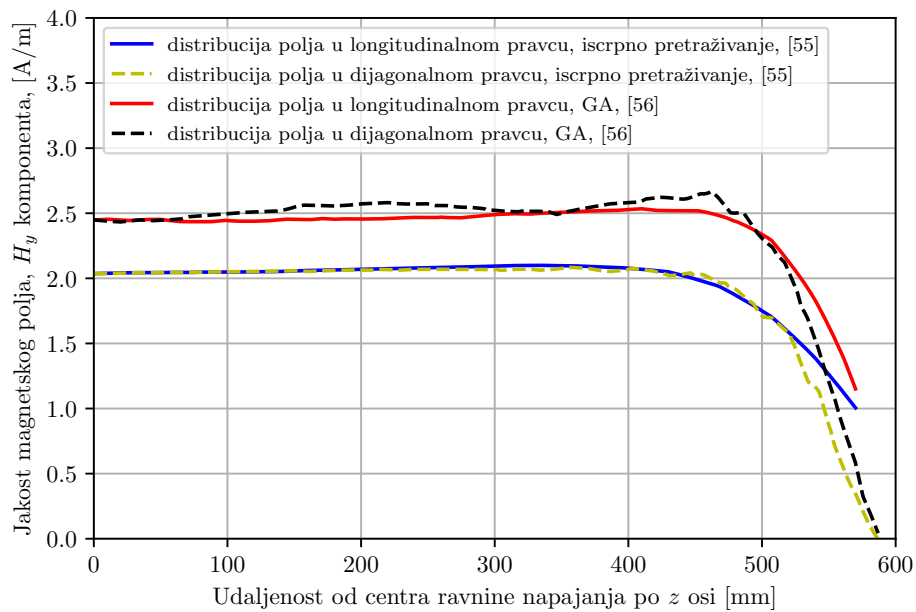
$$H_{y_{sr\_P}} = \frac{\int_0^P H_y dx dy}{P}. \quad (4-29)$$

Po uzoru na optimizaciju 2D modela, cilj je optimizacije 3D modela maksimizacija dijela površine u kojoj postoji homogeno magnetsko polje te maksimizacija srednje vrijednosti jakosti magnetskog polja,  $H_{y_{sr\_P}}$ , u ravnini napajanja.

Kako su, u ovom stupnju optimizacije, varijable  $W$ ,  $L$ ,  $W_2$  i  $D_2$  unaprijed definirane, preostaje optimirati varijablu  $D$  da bi se dobila optimalna geometrija 3D predajne zavojnice za  $o = 6$ . Postavljeno je da GA ima 50 generacija i 50 jedinki u populaciji. Ostali parametri GA odgovaraju onima iz tablice 4.12.

Minimalna vrijednost funkcije cilja, (4-27), ostvarena je uz  $D = 8.39$  cm. Prema tome, optimalna vrijednost dubine zavojnice je manja u odnosu na onu iz rada [55]. Distribucija jakosti magnetskog polja u longitudinalnom i dijagonalnom pravcu ravnine napajanja prikazana je na slici 4.12. Distribucije jakosti magnetskog polja, po dijagonalnom i longitudinalnom pravcu ravnine napajanja, zavojnice iz rada [55] i zavojnice optimirane genetskim algoritmom imaju sličan oblik, slika 4.12. Međutim, postoji razlika u jakosti magnetskog polja, duž dijagonalnog i longitudinalnog pravca, takva da je

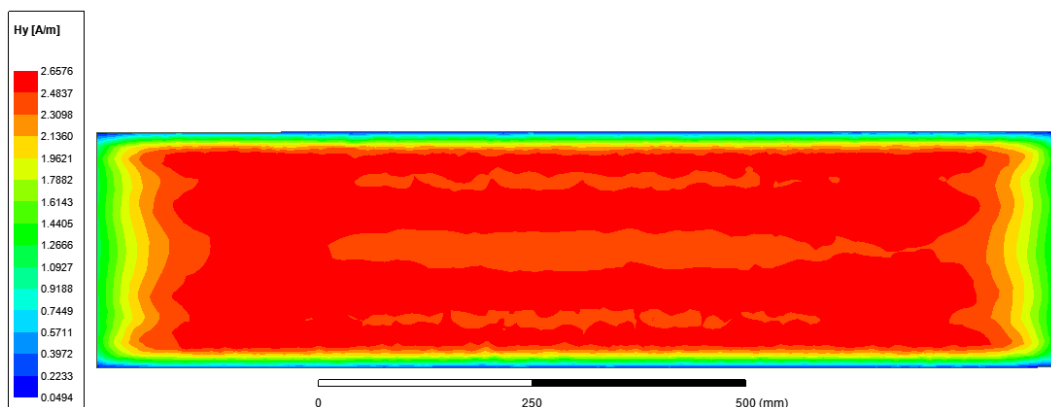
4. Optimizacija 3D predajne zavojnice s homogenom razdiobom magnetskog polja u ravnini napajanja uz pomoć populacijskog algoritma i algoritama iz skupine evolucijskog računanja



**Slika 4.12:** Rezultati simulacije: jakost magnetskog polja u dijagonalnom i longitudinalnom pravcu 3D zavojnice iz rada [55] i 3D zavojnice, iz rada [56], optimirane genetskim algoritmom s optimalnim vrijednostima  $W_2$ ,  $D_2$ ,  $D$  te  $o = 6$

jakost magnetskog polja zavojnice optimirane genetskim algoritmom veća u odnosu na jakost magnetskog polja zavojnice iz rada [55]. Stoga, zavojnica optimirana genetskim algoritmom generira veću srednju vrijednost jakosti magnetskog polja u ravnini napajanja.

Distribucija jakosti magnetskog polja u ravnini napajanja koja je dobivena simulacijama u *Ansys Maxwell*-u za zavojnicu optimiranu genetskim algoritmom prikazana je slikom 4.13. Uz pomoć palete boja i legende na lijevoj

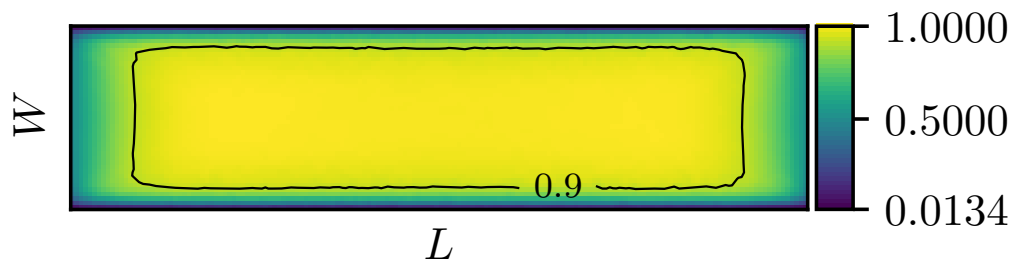


**Slika 4.13:** Rezultati simulacije: jakost magnetskog polja (u ravnini napajanja) 3D zavojnice optimirane genetskim algoritmom u *Ansys Maxwell*-u

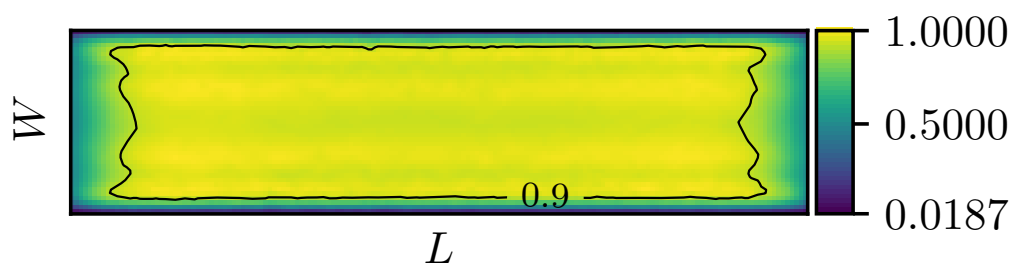
4. *Optimizacija 3D predajne zavojnice s homogenom razdiobom magnetskog polja u ravnini napajanja uz pomoć populacijskog algoritma i algoritama iz skupine evolucijskog računanja*

strani slike 4.13 mogu se razlikovati područja s različitom jakošću magnetskog polja u ravnini napajanja.

Rezultati simulacije jakosti magnetskog polja u ravnini napajanja za zavojnicu iz rada [55] i za zavojnicu optimiranu genetskim algoritmom prikazani su na slici 4.14 odnosno na slici 4.15. Vrijednosti jakosti magnetskog polja normalizirane su u odnosu na maksimalnu vrijednost jakosti magnetskog polja u ravnini napajanja,  $H_{y_{max\_P}}$ . Homogena je regija okružena crnom linijom koja predstavlja granicu te regije. Naime, izvan homogene regije, jakost magnetskog polja je manja od 90% vrijednosti  $H_{y_{max\_P}}$ . Homogenu regiju karakterizira jakost magnetskog polja koja je jednaka ili veća od 90%  $H_{y_{max\_P}}$ .



**Slika 4.14:** Rezultati simulacije, pogled odozgo: normalizirana jakost magnetskog polja (u ravnini napajanja) 3D zavojnice optimirane iscrpnim pretraživanjem, [55]



**Slika 4.15:** Rezultati simulacije, pogled odozgo: normalizirana jakost magnetskog polja (u ravnini napajanja) 3D zavojnice optimirane genetskim algoritmom, [56]

Udio je homogene regije 3D zavojnice koja je optimirana genetskim algoritmom, [56], značajno veći u odnosu na udio homogene regije zavojnice iz rada [55] u ravnini napajanja istih dimenzija. Homogena je regija zavoj-

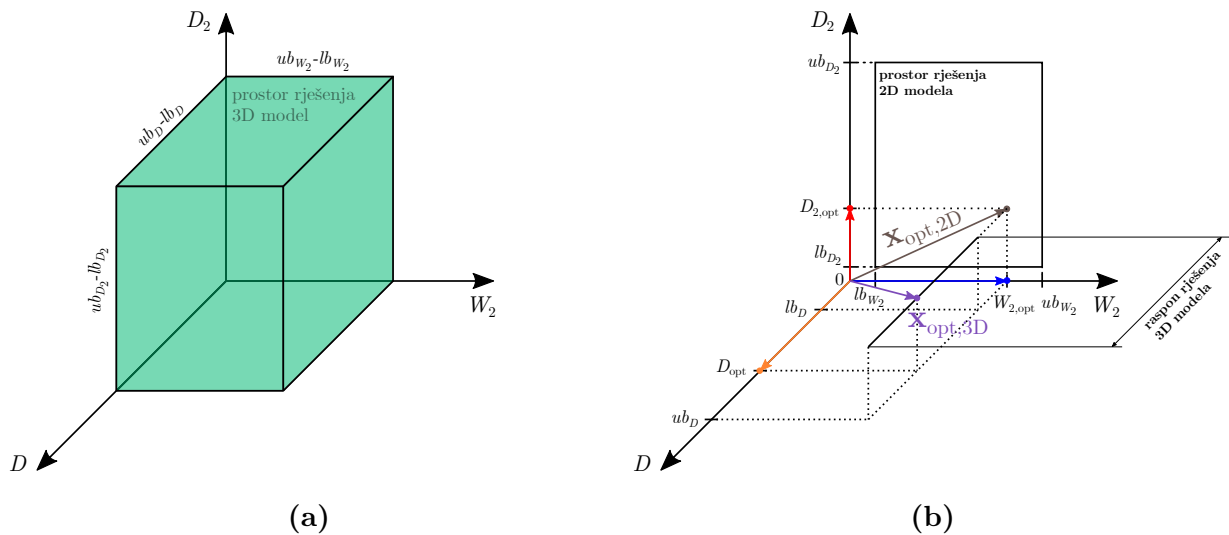
nice optimirane genetskim algoritmom šira i pruža se dalje prema kraćim stranicama pravokutne ravnine napajanja, slika 4.15. Prema simulacijama, homogena regija zavojnice iz rada [55] okupira 62.53% površine ravnine napajanja. S druge strane, izračunato je da zavojnica optimirana genetskim algoritmom generira homogenu regiju koja zauzima 70.33% površine ravnine napajanja. Zbog većeg udjela homogene regije u površinom istoj ravnini napajanja, veće srednje vrijednosti jakosti magnetskog polja u homogenoj regiji te manje dubine  $D_2$  i  $D$  odnosno manjeg profila, zavojnica optimirana genetskim algoritmom pogodnija je za upotrebu u sustavu rezonantnog WPT u odnosu na zavojnicu iz rada [55].

Na slici 4.16 prikazani su trodimenzionalni, dvodimenzionalni i jednodimenzionalni prostori pretraživanja. Ako bi se za 3D model optimirale sve tri varijalbe,  $D_2$ ,  $W_2$  i  $D$ , tada bi prostor pretraživanja bio značajno veći u usporedbi s prostorom pretraživanja pri optimizaciji u dva koraka kada se pretražuje dvodimenzionalni prostor pretraživanja (2D model) i jednodimenzionalni prostor pretraživanja (3D model). Donje i gornje granice varijabli odluke označene su kao  $ub$  i  $ul$  na slici 4.16. Granice varijabli odluke, vrijednosti optimalnih rješenja varijabli odluke ( $D_{2,opt}$ ,  $W_{2,opt}$  i  $D_{opt}$ ) i vektori optimalnih rješenja ( $\mathbf{x}_{opt,2D}$  i  $\mathbf{x}_{opt,3D}$ ) su prikazani pojednostavnjeno i nisu optimalnih vrijednosti nego služe za uvid u prostor pretrage.

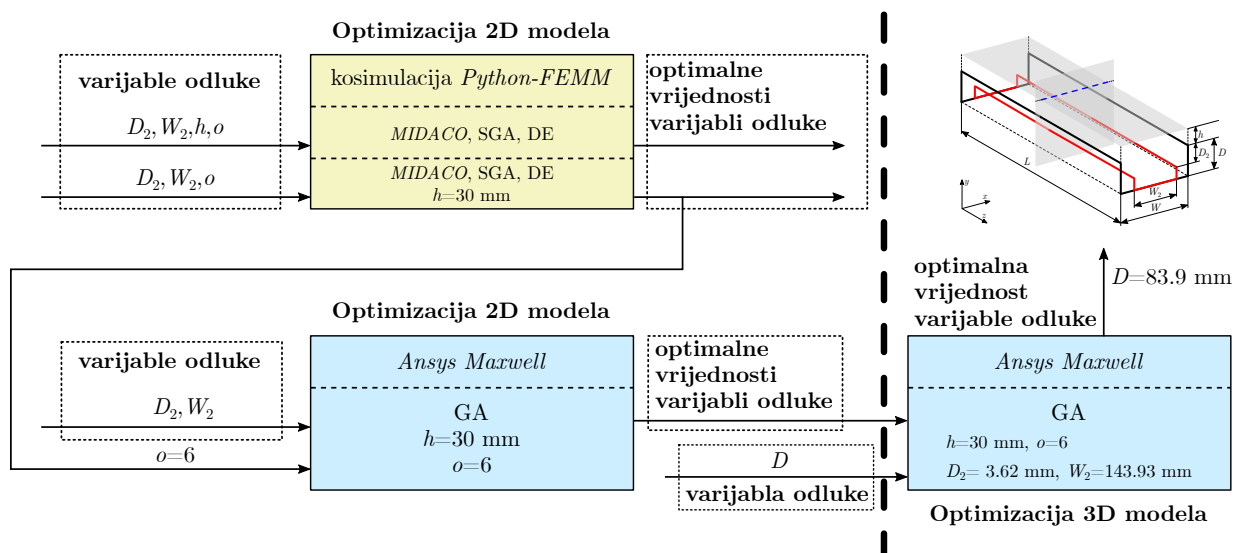
Tijek optimizacije u dva koraka prikazan je na slici 4.17. Potrebno je napomenuti da je optimizacija u *Python-FEMM* kosimulaciji s navedenim algoritmima manje vremenski zahtjevna jer se omjer struja ne treba manualno mijenjati kao u optimizaciji genetskim algoritmom u *Ansys Maxwell*-u. Zato se omjer  $o = 6$  preuzima iz optimizacije u kosimulaciji *Python-FEMM* i postavlja kao konstanta u optimizaciji varijabli  $D_2$  i  $W_2$  genetskim algoritmom

4. Optimizacija 3D predajne zavojnice s homogenom razdiobom magnetskog polja u ravnini napajanja uz pomoć populacijskog algoritma i algoritama iz skupine evolucijskog računanja

u *Ansys Maxwell*-u. Optimalne vrijednosti  $D_2$  i  $W_2$  iz optimizacije 2D modela u *Ansys Maxwell*-u konstante su tijekom optimizacije varijable odluke  $D$  u optimizaciji 3D modela u *Ansys Maxwell*-u.



Slika 4.16: (a) trodimenzionalni prostor pretraživanja, (b) dvodimenzionalni i jednodimenzionalni prostor pretraživanja



Slika 4.17: Tijek optimizacije u dva koraka: optimizacija 2D modela i optimizacija 3D modela



### 4.3. Mjerenja

Izrađen je prototip 3D predajne zavojnice koja je optimizirana genetskim algoritmom i provedena su mjerenja jakosti magnetskog polja u ravnini napajanja u svrhu verificiranja takve optimalne zavojnice. Duljina je oba sloja zavojnice jednaka i iznosi 114 cm. Širina prvog sloja zavojnice, a ujedno i širina zavojnice, iznosi 28 cm dok je drugi sloj zavojnice širok 14.4 cm. Varijable  $D_2$  i  $D$  su također u skladu s optimalnim vrijednostima. Dakle,  $D_2$  izrađene zavojnice iznosi 3.6 mm, a dubina prototipa,  $D$ , je 8.4 cm.

Drveni je okvir konstrukcija na kojoj je pričvršćena predajna zavojnica. Na taj je način ostvarena optimizacijom određena geometrija predajne zavojnice i osigurana je udaljenost prijenosa od 30 mm. Metalna je žica okruglog poprečnog presjeka čiji je promjer 4 mm iskorištena za izradu oba sloja predajne zavojnice. Na slici 4.18, odozdo je prikazan izrađeni prototip predajne zavojnice.



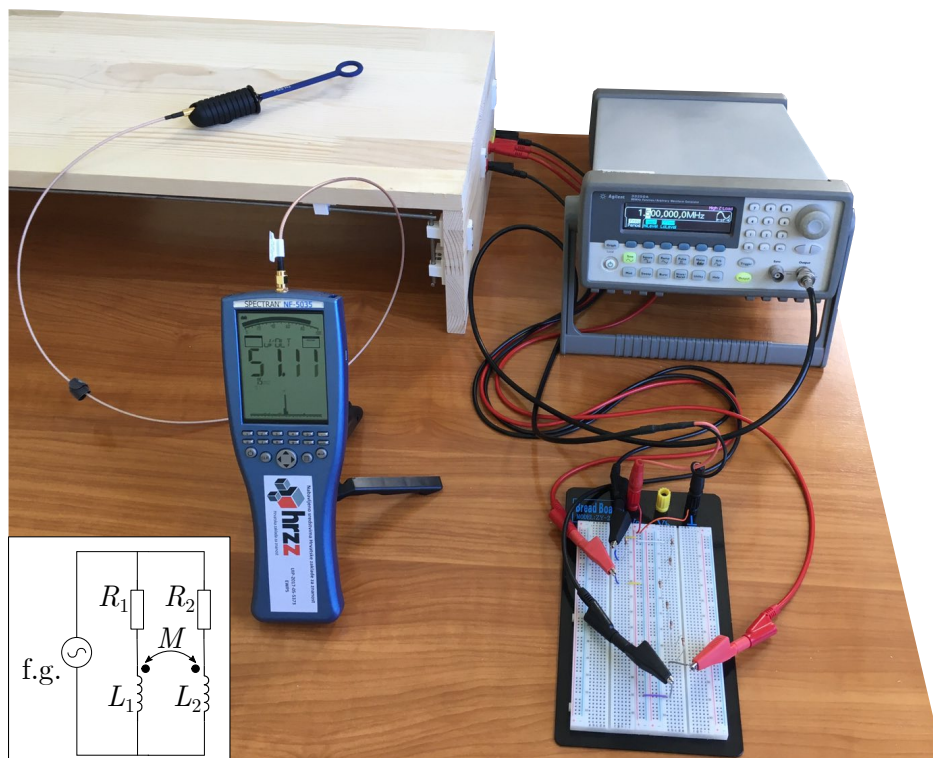
Slika 4.18: Prototip zavojnice (pogled odozdo)

Za potrebe mjerenja, zavojnica prikazana na slici 4.18 izrađena je tako da ima jedan namotaj po sloju i svaki je sloj zavojnice zapravo pojedinačna zavojnica. Tijekom mjerenja magnetskog polja, slojevi zavojnice međusobno su spojeni paralelno. Otpornik,  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ , priključen je serijski zavojnici prvog sloja,  $L_1$ . Šest puta veći otpor,  $R_2 = 6 \text{ k}\Omega$ , priključen je serijski drugom sloju zavojnice,  $L_2$ , slika 4.19. Time je ostvarena optimalna raspodjela

4. Optimizacija 3D predajne zavojnice s homogenom razdiobom magnetskog polja u ravnini napajanja uz pomoć populacijskog algoritma i algoritama iz skupine evolucijskog računanja

struje između slojeva zavojnice, ( $o = 6$ ). Ipak, takva topologija predajnog podsustava s dodanim otpornicima nije praktična za bežični prijenos energije. Naime, za potrebe bežičnog prijenosa energije optimalna se 3D predajna zavojnica sastoji od dva serijski vezana sloja (bakrena žica) koja nemaju naknadno dodane otpornike nego broj namotaja prvog sloja zavojnice treba biti šest puta veći od broja namotaja drugog sloja zavojnice u namjeri da se ostvari optimalna raspodjela struje između slojeva zavojnice. Ipak, veća preciznost izrade zavojnice (s pomoću metalnih žica) koja se tada sastoji od jednog namotaja po sloju, i otpornici koji osiguravaju optimalnu raspodjelu struje svrsishodni su za mjerenja magnetskog polja u ravnini napajanja.

Mjerenja su magnetskog polja provedena korištenjem spektralnog analizatora SPECTRAN NF-5035. Vanjski senzor spektralnog analizatora priključen je na SMA ulaz spektralnog analizatora. Korištenjem vanjskog sen-



**Slika 4.19:** Mjerna oprema i ekvivalentna shema predajnog podsustava (funkcijski generator, f.g., i predajna zavojnica s dodanim otpornicima)

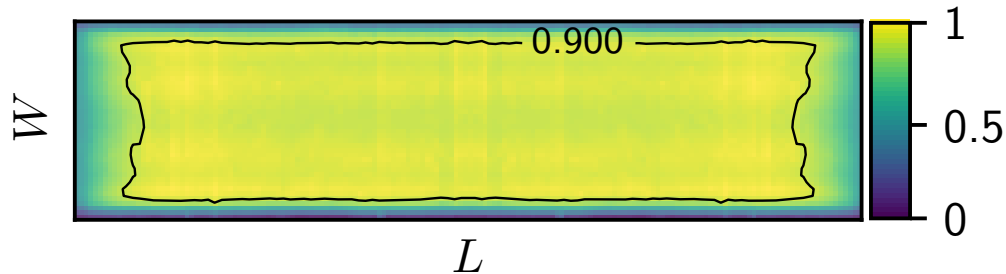
zora mjeri se napon koji se prikazuje na zaslonu spektralnog analizatora. Napon kojeg mjeri spektralni analizator proporcionalan je brzini promjene magnetskog toka pa se mjerenja magnetskog polja mogu provesti neizravno kako je opisano u prethodnom poglavlju. Prototip zavojnice se napaja funkcijskim generatorom Agilent 33250A na kojem je podešen napon sinusnog valnog oblika,  $20 V_{pp}$ , i frekvencije 1.5 MHz. Mjerna je oprema prikazana na slici 4.19.

Mjerenja magnetskog polja provela su se u određenim točkama ravnine napajanja. Simetrija zavojnice s obzirom na  $xy$  i  $yz$  os (slika 4.1) je razlog zbog kojeg se pretpostavlja da je raspodjela jakosti magnetskog polja u jednoj polovini ravnine napajanja jednaka onoj u drugoj polovini ravnine napajanja. Stoga su mjerenja provedena samo u jednoj polovini ravnine napajanja. Prema tome, sve se mjerne točke nalaze u polovini ravnine napajanja koju definira širina ravnine napajanja,  $W$ , i polovina duljine ravnine napajanja,  $L/2$ . Mjerne su točke poravnate po paralelnim longitudinalnim pravcima (kao pravac narančaste boje na slici 4.10) koji su međusobno po  $x$  osi udaljeni 1 cm. Na taj način definirano je 29 longitudinalnih i međusobno paralelnih pravaca koji pokrivaju čitavu širinu ravnine napajanja, ( $W = 28$  cm). Udaljenost je između dvije susjedne mjerne točke na istom longitudinalnom pravcu postavljena na 1 cm. Dakle, postoji 58 mjernih točaka na svakom longitudinalnom pravcu. Na taj način formirana je mreža od 1682 ( $29 \times 58$ ) mjerne točke.

Rezultati mjerenja prikazani su na slici 4.20. Izmjerene vrijednosti normalizirane su s obzirom na maksimalnu izmjerenu vrijednost induciranog napona. Homogena regija okružena je krivuljom crne boje koja predstavlja granicu homogene regije. Izvan homogene regije, inducirani je napon manji od 90% vrijednosti maksimalnog induciranog napona. Na temelju rezultata

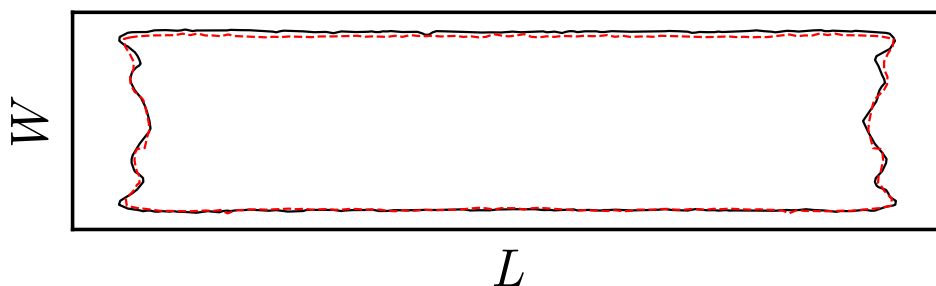
4. Optimizacija 3D predajne zavojnice s homogenom razdiobom magnetskog polja u ravnini napajanja uz pomoć populacijskog algoritma i algoritama iz skupine evolucijskog računanja

mjerenja, izračunato je da homogena regija čini 67.78% površine ravnine napajanja.



**Slika 4.20:** Rezultati mjerenja, pogled odozgo: normalizirana jakost magnetskog polja u ravnini napajanja 3D predajne zavojnice optimizirane genetskim algoritmom

Homogene su regije koje su određene simulacijama i mjerenjima prikazane na slici 4.21. Homogena regija određena iz rezultata mjerenja (površina unutar crvene isprekidane krivulje) zauzima 2.55% manje površine ravnine napajanja u odnosu na homogenu regiju određenu iz rezultata simulacije (površina unutar crne pune krivulje). Osim što se rezultati simulacija i mjerenja podudaraju po iznosu, oblik i granica homogene regije određeni iz rezultata mjerenja u skladu su s oblikom i granicom homogene regije koja je određena na temelju simulacija. Na temelju prethodnih usporedbi rezultata simulacija i mjerenja može se izvesti zaključak. Evaluacija je magnetskog polja zavojnice u programima koji su namijenjeni za simulacije magnetskih polja (*FEMM* i *Ansys Maxwell*) značajno preciznija u usporedbi s evaluacijom magnetskog



**Slika 4.21:** Homogene regije, pogled odozgo, definirane rezultatima mjerenja i simulacijama

4. *Optimizacija 3D predajne zavojnice s homogenom razdiobom magnetskog polja u ravnini napajanja uz pomoć populacijskog algoritma i algoritama iz skupine evolucijskog računanja*

polja pomoću analitičkog izraza (3-1) u *MATLAB*-u. S druge strane, simulacije u *FEMM*-u i *Ansys Maxwell*-u vremenski su značajno zahtjevnije u odnosu na proračun magnetskog polja u *MATLAB*-u.

Rezultati mjerenja, magnetskih polja u ravnini napajanja, iz drugih radova koji se nalaze u referencama ove disertacije mogu poslužiti za određivanje udjela homogene regije u ravnini napajanja pojedinog dizajna zavojnice i za usporedbu s rezultatima iz ove disertacije, tablica 4.14.

**Tablica 4.14:** *Usporedba karakteristika optimiziranih zavojnica*

Ref.	Struktura	Dimenzije TX zavojnice, [cm <sup>2</sup> ] ili [cm <sup>3</sup> ]	valovitost, [%]	Udaljenost prijenosa, [mm]	Udio homogene regije u ravnini napajanja, [%]
[34]	kvadratna spiralna	20 × 20	20	150	~48.0
[35]	kvadratna spiralna	20 × 20	20	50	~51.8
[36]	kvadratna spiralna	20 × 20	20	1	~36.0
[43]	kvadratna spiralna	80 × 80	9.6	100	~42.3
[44]	kružna spiralna	10 × π	30	15	~64.0
[51]	kvadratna spiralna	50 × 50	7.2	18	~49.0
[52]	kvadratna spiralna	31.5 × 31.5	2	30	~49.0
[53]	3D pravokutna	22 × 18 × 2	20	5	~32.0
[55]	3D pravokutna	114 × 28 × 12	10	30	~55.3
[56]	3D pravokutna	114 × 28 × 9	10	30	~67.8

## 5. Zaključak

Rezonantni induktivni bežični prijenos energije aktualna je tema znanstvenih istraživanja. Sustav bežičnog prijenosa energije obično se sastoji od jedne predajne zavojnice i jedne ili više prijemnih zavojnica. U konvencionalnom sustavu za bežični prijenos energije dolazi do nestabilnosti učinkovitosti prijenosa uslijed promjene odnosno nestabilnosti faktora magnetske veze između predajne i prijemne zavojnice. Tada zapravo dolazi do pojava neusklađenosti impedancija i razdvajanja frekvencije. Kako bi se očuvala stabilnost učinkovitosti primarno se predlažu dva rješenja: sustavi za praćenje i prilagodbu frekvenije i sustavi za usklađivanje impedancije. Alternativa tim rješenjima je homogeno magnetsko polje u ravnini gdje se nalaze prijemne zavojnice, u ravnini napajanja.

Magnetsko polje predajne zavojnice ima dominantnu ulogu u generiranju magnetskog polja u ravnini napajanja. Stoga se optimalnim dizajnom, ponekad zajedno s raspodjelom struje između namotaja predajne zavojnice nastoji generirati homogeno magnetsko polje u ravnini napajanja sustava za bežični prijenos energije.

U ovoj je disertaciji prvi cilj bio odrediti opću geometriju 3D predajne zavojnice koja postiže što veći udio homogene regije u ravnini napajanja odnosno površine u kojoj je prisutno homogeno magnetsko polje. U toj se fazi istraživanja koristilo iscrpno pretraživanje za pronalazak optimalne geometrije 3D predajne zavojnice. Takva zavojnica ima dva pravokutna sloja, s

okomito prema dolje savijenim kraćim stranicama, kroz koja protječe ista struja uslijed serijske veze i istog broja namotaja. Simulacije su provedene u *MATLAB*-u i izrađeni je prototip optimalne zavojnice generirao homogenu regiju koja je prema mjerenjima činila 55.3% površine ravnine napajanja. Određena je i optimalna udaljenost prijenosa energije koja je iznosila 24.6 mm. Homogenost je magnetskog polja definirana s obzirom na maksimalnu jakost komponente jakosti magnetskog polja koja je vertikalna u odnosu na ravninu napajanja. Jakost magnetskog polja koja je jednaka ili veća od 90% maksimalne jakosti magnetskog polja smatra se homogenom.

Nakon što je utvrđena struktura 3D predajne zavojnice koja generira homogeno magnetsko polje u većini ravnine napajanja postavila se pretpostavka da će drugačija raspodjela struje između slojeva donijeti bolja svojstva takve 3D predajne zavojnice. Za optimizaciju geometrije i omjera struje između slojeva korišteni su algoritmi koji se temelje na populaciji i algoritmi iz skupine evolucijskog računanja. Razlog tome je nepoznavanje fitnes funkcije čija se vrijednost minimizira i simulacijama utvrđuje za različite vrijednosti varijabli odluke. Optimizacija 3D predajne zavojnice podijeljena je u dva koraka: optimizacija varijabli odluke 2D modela i optimizacija varijable odluke 3D modela. Razlog tome je izbjegavanje optimizacije 3D modela s tri varijable odluke odnosno s trodimenzionalnim prostorom pretraživanja. Simulacije 2D modela značajno su manje vremenski zahtjevne u odnosu na simulacije 3D modela.

2D model zapravo je poprečni presjek 3D modela koji pak predstavlja čitavu zavojnicu. Optimizacija 2D modela odnosno optimizacija varijabli odluke koje opisuju položaj drugog sloja zavojnice i raspodjelu struje između slojeva rađena je u kosimulaciji *Python-FEMM*. Optimizacija je provedena

*MIDACO* alatom, a zatim jednostavnim genetskim algoritmom (SGA) i diferencijalnom evolucijom (DE) iz *pygmo* biblioteke. Uz isti kriterij homogenosti magnetskog polja, *MIDACO*, SGA i DE pružili su veću srednju vrijednost jakosti magnetskog polja i približno jednak udio homogenog polja u promatranom području. Od svih korištenih algoritama, DE je pronašao rješenje s najmanjom vrijednošću fitnes funkcije. U *Ansys Maxwell*-u koristio se genetski algoritam i dobivena je približno ista optimalna geometrija kao u kosimulaciji *Python-FEMM* za konstantnu udaljenost prijenosa od 30 mm. Sve optimizacije dale su isti optimalan omjer struja koji iznosi 6.

Optimalne vrijednosti varijabli odluke 2D modela koriste se kao konstante u optimizaciji 3D modela gdje se optimira dubina 3D predajne zavojnice. Na taj je način prostor pretraživanja u optimizaciji 3D modela postao jednodimenzionalan. Genetskim algoritmom u *Ansys Maxwell*-u određena je optimalna dubina zavojnice. Dubina zavojnice je za 28.8% manja u odnosu na onu koja je optimirana iscrpnim pretraživanjem, što je u skladu s tendencijom da profil zavojnice bude što niži. Mjerenjima na izrađenom prototipu optimalne 3D predajne zavojnice utvrđeno je da homogena regija čini 67.78% ravnine napajanja. Također je i srednja vrijednost jakosti magnetskog polja u ravnini napajanja veća u odnosu na srednju vrijednost jakosti magnetskog polja zavojnice dobivene iscrpnim pretraživanjem.

Na kraju se usporedbom s ostalim mjerenjima magnetskog polja zavojnica iz *state-of-the-art* literature dolazi do činjenice da zavojnica optimirana u istraživanjima opisanima u ovoj disertaciji pruža veći udio homogene regije u ravnini napajanja.



## Literatura

- [1] *Ansys Maxwell Electronics Desktop, AnsysEM 19.4, Materials, SysLibrary, iron, Relative Permeability.*
- [2] T. Imura and Y. Hori. Maximizing air gap and efficiency of magnetic resonant coupling for wireless power transfer using equivalent circuit and Neumann formula. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(10):4746–4752, 2011.
- [3] A. P. Sample, D. T. Meyer, and J. R. Smith. Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(2):544–554, 2011.
- [4] Z. Zhang, H. Pang, A. Georgiadis, and C. Cecati. Wireless power transfer—an overview. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(2):1044–1058, 2019.
- [5] Kurs André, Karalis Aristeidis, Moffatt Robert, D. Joannopoulos J., Fisher Peter, and Soljačić Marin. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. *Science*, 317(5834):83–86, 2007.
- [6] André Kurs, Robert Moffatt, and Marin Soljačić. Simultaneous mid-range power transfer to multiple devices. *Applied Physics Letters*, 96(4):044102, 2010.

- [7] J. Garnica, J. Casanova, and J. Lin. High efficiency midrange wireless power transfer system. In *2011 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications*, pages 73–76, 2011.
- [8] B. L. Cannon, J. F. Hoburg, D. D. Stancil, and S. C. Goldstein. Magnetic resonant coupling as a potential means for wireless power transfer to multiple small receivers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(7):1819–1825, 2009.
- [9] Y. Kim, S. Kang, S. Cheon, M. Lee, and T. Zyung. Wireless power transmission to multi devices through resonant coupling. In *2010 International Conference on Electrical Machines and Systems*, pages 2000–2002, 2010.
- [10] S. Ito, Y. Tsuchida, and M. Fukui. An implementation of wireless power transfer system for multiple receivers. In *2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, pages 1–4, 2019.
- [11] H. Hong, D. Yang, and S. Won. The analysis for selecting compensating capacitances of two-coil resonant wireless power transfer system. In *2017 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI)*, pages 220–225, 2017.
- [12] Y. Zhang and Z. Zhao. Frequency splitting analysis of two-coil resonant wireless power transfer. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 13:400–402, 2014.

- [13] R. Huang, B. Zhang, D. Qiu, and Y. Zhang. Frequency splitting phenomena of magnetic resonant coupling wireless power transfer. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50(11):1–4, 2014.
- [14] M. Iordache, D. Niculae, L. I. Bobaru, and L. Mandache. Circuit analysis of frequency splitting phenomena in wireless power transfer systems. In *2015 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, pages 146–151, 2015.
- [15] M. Iordache, L. Mandache, D. Niculae, and L. Iordache. On exact circuit analysis of frequency splitting and bifurcation phenomena in wireless power transfer systems. In *2015 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, pages 1–4, 2015.
- [16] X. Liu, X. Yuan, C. Xia, and X. Wu. Analysis and utilization of the frequency splitting phenomenon in wireless power transfer systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(4):3840–3851, 2021.
- [17] W. Niu, J. Chu, W. Gu, and A. Shen. Exact analysis of frequency splitting phenomena of contactless power transfer systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 60(6):1670–1677, 2013.
- [18] D. Vinko, I. Biondić, and D. Bilandžija. Impact of receiver power and coupling coefficient on resonant frequency in wireless power transfer system. In *2019 International Symposium ELMAR*, pages 207–210, 2019.
- [19] H. L. Li, Aiguo Hu, Grant Covic, and C. S. Tang. Optimal coupling condition of IPT system for achieving maximum power transfer. *Electronics Letters*, 45:76–77, February 2009.

- [20] N. Y. Kim, K. Y. Kim, Y. H. Ryu, J. Choi, D. Z. Kim, C. Yoon, Y. K. Park, and S. Kwon. Automated adaptive frequency tracking system for efficient mid-range wireless power transfer via magnetic resonance coupling. In *2012 42nd European Microwave Conference*, pages 221–224, 2012.
- [21] R. Huang and B. Zhang. Frequency, impedance characteristics and HF converters of two-coil and four-coil wireless power transfer. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3(1):177–183, 2015.
- [22] S. Cheon, Y. Kim, S. Kang, M. L. Lee, J. Lee, and T. Zyung. Circuit-model-based analysis of a wireless energy-transfer system via coupled magnetic resonances. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(7):2906–2914, 2011.
- [23] T. C. Beh, T. Imura, M. Kato, and Y. Hori. Basic study of improving efficiency of wireless power transfer via magnetic resonance coupling based on impedance matching. In *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pages 2011–2016, 2010.
- [24] B. H. Waters, A. P. Sample, and J. R. Smith. Adaptive impedance matching for magnetically coupled resonators. In *PIERS Proceedings, Moscow, Russia*, 2012.
- [25] J. Park, Y. Tak, Y. Kim, Y. Kim, and S. Nam. Investigation of adaptive matching methods for near-field wireless power transfer. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 59(5):1769–1773, 2011.

- [26] T. C. Beh, M. Kato, T. Imura, and Y. Hori. Wireless power transfer system via magnetic resonant coupling at fixed resonance frequency – power transfer system based on impedance matching. *World Electric Vehicle Journal*, 4, January 2011.
- [27] T. C. Beh, M. Kato, T. Imura, S. Oh, and Y. Hori. Automated impedance matching system for robust wireless power transfer via magnetic resonance coupling. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(9):3689–3698, 2013.
- [28] K. Fotopoulou and B. W. Flynn. Wireless power transfer in loosely coupled links: Coil misalignment model. *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(2):416–430, 2011.
- [29] P. Smirnov, P. Kapitanova, E. Nenasheva, and M. Song. Compact hybrid metasurface-inspired resonator with uniform magnetic field distribution for wireless power transfer. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 21(1):193–197, 2022.
- [30] Q. Wang, W. Che, M. Mongiardo, and G. Monti. Wireless power transfer system with high misalignment tolerance for bio-medical implants. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 67(12):3023–3027, 2020.
- [31] X. Liu and S. Y. Hui. Optimal design of a hybrid winding structure for planar contactless battery charging platform. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23(1):455–463, 2008.

- [32] J. Kim, H.-C. Son, and Y.-J. Park. Multi-loop coil supporting uniform mutual inductances for free-positioning WPT. *Electronics Letters*, 49, March 2013.
- [33] T. H. Kim, G. H. Yun, W. Y. Lee, and J. G. Yook. Asymmetric coil structures for highly efficient wireless power transfer systems. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 66(7):3443–3451, 2018.
- [34] C. Qiu, K. T. Chau, L. Chunhua, T. Ching, and Z. Zhang. Modular inductive power transmission system for high misalignment electric vehicle application. *Journal of Applied Physics*, 117:17B528, May 2015.
- [35] S. Wang, Z. Hu, C. Rong, C. Lu, J. Chen, and M. Liu. Planar multiple-antiparallel square transmitter for position-insensitive wireless power transfer. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17(2):188–192, 2018.
- [36] J. J. Casanova, Zhen Ning Low, Jenshan Lin, and R. Tseng. Transmitting coil achieving uniform magnetic field distribution for planar wireless power transfer system. In *2009 IEEE Radio and Wireless Symposium*, pages 530–533, 2009.
- [37] D. Yinliang, S. Yuanmao, and G. Yougang. Design of coil structure achieving uniform magnetic field distribution for wireless charging platform. In *2011 4th International Conference on Power Electronics Systems and Applications*, pages 1–5, 2011.
- [38] T. D. Yeo, D. H. Kim, S. C. Chae, S. T. Khang, and J. W. Yu. Design of free-positioning wireless power charging system for AAA rechargeable

- battery. In *2016 46th European Microwave Conference (EuMC)*, pages 759–762, 2016.
- [39] L. Shen, W. Tang, H. Xiang, and W. Zhuang. Uniform magnetic field of the planar coil with new winding structure for displacement-insensitive WPT. In *2014 IEEE International Conference on Communication Problem-solving*, pages 394–396, 2014.
- [40] X. Huang, W. Chen, and Q. Chen. A design algorithm of circular transmitting coil to achieve uniform magnetic field distribution in WPT applications. In *2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC)*, pages 1–5, 2015.
- [41] E. Waffenschmidt. Free positioning for inductive wireless power system. In *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pages 3480–3487, 2011.
- [42] E. Elkhoully and S. Yang. Transmitter coil design for resonant wireless power transfer. In *2016 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW)*, pages 1–5, 2016.
- [43] Y. Zhang, L. Wang, Y. Guo, and Y. Zhang. Optimisation of planar rectangular coil achieving uniform magnetic field distribution for EV wireless charging based on genetic algorithm. *IET Power Electronics*, 12(10):2706–2712, August 2019.
- [44] Q. Xu, Q. Hu, H. Wang, Z. H. Mao, and M. Sun. Optimal design of planar spiral coil for uniform magnetic field to wirelessly power position-free targets. *IEEE Transactions on Magnetics*, 57(2):1–9, 2021.
- [45] M. Golub. *Genetski algoritam, Prvi dio*. 1997.

- [46] E. Waffenschmidt. Homogeneous magnetic coupling for free positioning in an inductive wireless power system. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3(1):226–233, 2015.
- [47] K. Mori, H. Lim, S. Iguchi, K. Ishida, M. Takamiya, and T. Sakurai. Positioning-free resonant wireless power transmission sheet with staggered repeater coil array (SRCA). *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11:1710–1713, 2012.
- [48] F. Jolani, Y. q. Yu, and Z. Chen. A planar magnetically-coupled resonant wireless power transfer using array of resonators for efficiency enhancement. In *2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, pages 1–4, 2015.
- [49] Y. Yang, Xiaofei Kuang, Peng Yang, Yonghai Jing, Xiang Su, and Y. Cheng. Parallel connected transmitting coil for achieving uniform magnetic field distribution in WPT. In *2015 IEEE 16th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, pages 529–532, 2015.
- [50] Y. Li, J. Zhao, Q. Yang, L. Liu, J. Ma, and X. Zhang. A novel coil with high misalignment tolerance for wireless power transfer. *IEEE Transactions on Magnetics*, 55(6):1–4, 2019.
- [51] J. Li, J. Sun, R. Qin, and D. Costinett. Transmitter coil design for multi-load wireless power transfer systems. In *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pages 1032–1038, 2020.
- [52] C. Zhang, W. Wang, C. Xu, and J. Yang. Research on uniform magnetic field compensation structure of array circular coils for wireless power transfer. *IEEE Transactions on Magnetics*, 57(6):1–5, 2021.



- [53] W.-S. Lee, H. Lim Lee, K.-S. Oh, and J.-W. Yu. Uniform magnetic field distribution of a spatially structured resonant coil for wireless power transfer. *Appl. Phys. Lett.*, 100(21):214105, May 2012.
- [54] J. Huang, T. Hong, M. Bojarski, F. de León, and D. Czarkowski. Design algorithm of a uniform magnetic field transmitter intended for the wireless charging of electric vehicles. In *2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, pages 1–6, 2014.
- [55] D. Vinko, D. Bilandžija, and V. Mandrić Radivojević. Optimization of a two-layer 3D coil structure with uniform magnetic field. *Wireless Power Transfer*, 2021:6303628, 2021.
- [56] D. Bilandžija, D. Vinko, and M. Barukčić. Genetic-algorithm-based optimization of a 3D transmitting coil design with a homogeneous magnetic field distribution in a WPT system. *Energies*, 15(4), 2022.
- [57] D. Meeker. [Finite Element Method Magnetics-User’s Manual, Version 4.2](#), May 2020.
- [58] J. Brownlee. [How to choose an optimization algorithm](#), October 2021.
- [59] T. Sasatani, Y. Narusue, and Y. Kawahara. Genetic algorithm-based receiving resonator array design for wireless power transfer. *IEEE Access*, 8:222385–222396, 2020.
- [60] [Spyder documentation](#), July 2022.
- [61] [MIDACO-SOLVER User Manual, Version 6.0](#), April 2018.
- [62] Andries P. Engelbrecht. *Computational Intelligence An Introduction*. John Wiley and Sons, Ltd, second edition, 2007.

- [63] M. Schlüter, J. A. Egea, and J. R. Banga. Extended ant colony optimization for non-convex mixed integer nonlinear programming. *Computers and Operations Research*, 36(7):2217–2229, July 2009.
- [64] D. Meeker. [Finite Element Method Magnetics: pyFEMM-User’s Manual](#), March 2018.
- [65] F. Biscani and D. Izzo. A parallel global multiobjective framework for optimization: pagmo. *Journal of Open Source Software*, 5(53):2338, 2020.
- [66] [pygmo documentation, v 2.18.0](#).
- [67] M. Sebag, M. Schoenauer, and C. Ravisé. Inductive learning of mutation step-size in evolutionary parameter optimization. In *Evolutionary Programming VI*, pages 247–261, Berlin, Heidelberg, 1997. Springer Berlin Heidelberg.

## Popis slika

2.1. Električna shema sustava za induktivni bežični prijenos energije . . . . .	5
2.2. Učinkovitost u ovisnosti o frekvenciji izvora pri optimalnoj impedanciji za različite udaljenosti prijenosa - rezultati simulacije . . . . .	7
2.3. Sustav rezonantnog WPT s četiri zavojnice, [5]: 1-uzbudna zavojnica, 2-TX zavojnica, 3-RX zavojnica, 4-zavojnica s trošilom . . . . .	10
2.4. Ekvivalentna shema, topologija S-S . . . . .	12
2.5. Ekvivalentna shema, topologija S-P . . . . .	15
2.6. Ekvivalentna shema, topologija P-S . . . . .	17
2.7. Ekvivalentna shema, topologija P-P . . . . .	18
2.8. Učinkovitost sustava rezonantnog WPT (topologija S-S) za različite faktore magnetske veze u ovisnosti o frekvenciji sustava . . . . .	20
2.9. Snaga na trošilu sustava rezonantnog WPT (topologija S-S) za različite faktore magnetske veze u ovisnosti o frekvenciji sustava . . . . .	21
2.10. Pojednostavljena ekvivalentna shema svih topologija sustava rezonantnog WPT s dvije zavojnice . . . . .	24

2.11. Modul ulazne impedancije sustava rezonantnog WPT pri osnovnoj rezonantnoj frekvenciji . . . . .	25
2.12. Modul ulazne impedancije sustava rezonantnog WPT u ovisnosti o faktoru magnetske veze uz raspon frekvencije od 5 MHz do 11 MHz . . . . .	27
2.13. Shema sustava rezonantnog WPT (topologija S-S) s krugom za usklađivanje impedancije: (a) L-tip, (b) invertirani L-tip .	30
2.14. Položaj RX zavojnice u odnosu na TX zavojnicu: (a) centralni položaj, (b) lateralni položaj i (c) centralni položaj s kutnim odstupanjem . . . . .	32
2.15. Hibridne predajne zavojnice: (a) [31], (b) [32], (c) [33] i (d) [30]	36
2.16. Spiralne predajne zavojnice: (a) [36, 37], (b) [38], (c) [39], (d) [40, 41], (e) [42, 43] i (f) [44] . . . . .	42
2.17. Predajne zavojnice specifičnog oblika: (a) zavojnica koncentričnih kružnica [49], (b) zavojnica u obliku simbola Tao [50], (c) zavojnica s isprepletenim namotajima [51] i (d) pomoćna zavojnica (crvena boja) između gusto raspoređenih kružnih zavojnica (crna boja) [52] . . . . .	43
2.18. 3D predajne zavojnice: (a) hibridna [31], (b) pravokutna [53] i (c) u obliku lijevka [54] . . . . .	43
3.1. Jakost magnetskog polja u točki $P_0$ koje generira linearni segment $P_1$ - $P_2$ . . . . .	47
3.2. (a) pravokutna zavojnica, (b) distribucija jakosti magnetskog polja u ravini (200x100 cm) smještena 30 mm iznad zavojnice	49
3.3. Struktura dvoslojne 3D predajne zavojnice . . . . .	50

3.4. Radni okvir postupka određivanja geometrije 3D predajne zavojnice . . . . .	51
3.5. Primjeri razdiobe i analize magnetskog polja: (a) valovitost=1%, $h/W=0.08$ , $D_2/W=0.18$ , $W_2/W=0.7$ , (b) valovitost=1%, $h/W=0.08$ , $D_2/W=0.12$ , $W_2/W=0.6$ , (c) valovitost=1%, $h/W=0.08$ , $D_2/W=0.24$ , $W_2/W=0.7$ , (d) valovitost=1%, $h/W=0.08$ , $D_2/W=0.1$ , $W_2/W=0.7$ . . . . .	54
3.6. FoM <sub>1</sub> vrijednosti za različite kombinacije $h/W$ i valovitost od 2%: (a) valovitost=2%, $h/W=0.05$ ; (b) valovitost=2%, $h/W=0.07$ ; (c) valovitost=2%, $h/W=0.10$ ; (d) valovitost=2%, $h/W=0.14$ ; (e) valovitost=2%, $h/W=0.20$ . . . . .	57
3.7. Izračunate vrijednosti FoM <sub>1</sub> za različite kombinacije $h/W$ i $r$ .	58
3.8. Optimalni omjeri $h/W$ za različite vrijednosti maksimalne dopuštene valovitosti - rezultati simulacija označeni su plavim točkama koje su povezane krivuljom uz navedeni matematički zapis te krivulje . . . . .	58
3.9. Geometrijski smještaj drugog sloja zavojnice koji pruža maksimalnu vrijednost FoM <sub>1</sub> za različite vrijednosti maksimalne dopuštene valovitosti uz optimalnu udaljenost prijenosa . . .	59
3.10. Optimalni omjeri $D_2/W$ za različite vrijednosti maksimalne dopuštene valovitosti - rezultati simulacija označeni su plavim točkama koje su povezane krivuljom uz navedeni matematički zapis te krivulje . . . . .	59

3.11. (a) pravokutna zavojnica s dva sloja-optimalne vrijednosti varijabli $W_2$ i $D_2$ , (b) distribucija jakosti magnetskog polja u ravini (200x100 cm) iznad zavojnice sa slike lijevo, optimalna udaljenost prijenosa, $h$ , za dopuštenu valovitost, $r$ , od 0.5% (jednadžba (3-8)) . . . . .	60
3.12. Magnetska indukcija (pogled odozgo) za različite vrijednosti valovitosti: (a) $cs_1$ 5%, $cs_2$ 5%, ( $D/W=0.19$ ); (b) $cs_1$ 5%, $cs_2$ 0.5%, ( $D/W=0.43$ ); (c) $cs_1$ 0.5%, $cs_2$ 5%, ( $D/W=0.19$ ); (d) $cs_1$ 2.5%, $cs_2$ 2.5%, ( $D/W=0.26$ ) . . . . .	61
3.13. Homogena regija (pogled odozgo) za različite kombinacije valovitosti za $cs_1$ i $cs_2$ : (a) Homogena regija (49.81%) za distribuciju sa slike 3.12a, $FoM_2=0.0015$ T; (b) Homogena regija (75.78%) za distribuciju sa slike 3.12b, $FoM_2=0.0021$ T; (c) Homogena regija (75.92%) za distribuciju sa slike 3.12c, $FoM_2=0.0019$ T; (d) Homogena regija (79.85%) za distribuciju sa slike 3.12d, $FoM_2=0.0021$ T . . . . .	63
3.14. Potrebna dubina zavojnice, $D$ , za različite maksimalno dopuštene valovitosti i različite omjere $L/W$ . . . . .	64
3.15. Postotak homogene regije u ravnini napajanja za različite omjere $L/W$ . . . . .	64
3.16. Izrađeni prototip predložene zavojnice (pogled odozdo) . . . . .	65
3.17. Izrađeni prototip konvencionalne zavojnice (pogled odozdo) . . . . .	65
3.18. Mjerna oprema . . . . .	66
3.19. (a) struktura predložene 3D zavojnice, (b) distribucija jakosti magnetskog polja u ravini (200x100 cm) smještena 30 mm iznad zavojnice . . . . .	67

3.20. Rezultati simulacije i mjerenja: (a) simulacija-normalizirano magnetsko polje predložene zavojnice u ravnini napajanja (pogled odozgo), (b) mjerenje-normalizirano magnetsko polje predložene zavojnice u ravnini napajanja (pogled odozgo), (c) mjerenje-normalizirano magnetsko polje konvencionalne zavojnice u ravnini napajanja (pogled odozgo) . . . . .	67
4.1. Osnovna struktura 3D predajne zavojnice . . . . .	71
4.2. Dvodimenzionalni prikaz 3D predajne zavojnice . . . . .	72
4.3. Distribucija normalizirane jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja pri optimalnim vrijednostima varijabli odluke (MIDACO alat) . . . . .	87
4.4. Distribucija normalizirane jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja pri optimalnim vrijednostima varijabli odluke (pygmo biblioteka, SGA) . . . . .	92
4.5. Distribucija normalizirane jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja pri optimalnim vrijednostima varijabli odluke (pygmo biblioteka, SGA) . . . . .	95
4.6. Distribucija normalizirane jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja pri optimalnim vrijednostima varijabli odluke pri $h=30$ mm, MIDACO alat . . . . .	97
4.7. Distribucija normalizirane jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja pri optimalnim vrijednostima varijabli odluke pri $h=30$ mm, SGA . . . . .	98
4.8. Distribucija normalizirane jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja pri optimalnim vrijednostima varijabli odluke pri $h=30$ mm, DE . . . . .	99

4.9. Raspodjela jakosti magnetskog polja u pravcu napajanja uz optimalne vrijednosti varijabli $D_2$ i $W_2$ za različite vrijednosti raspodjele struje . . . . .	104
4.10. 3D model zavojnice od dva sloja koji su pravokutne zavojnice	107
4.11. Rezultati simulacije: jakost magnetskog polja u dijagonalnom i longitudinalnom pravcu dvoslojne pravokutne 3D zavojnice s optimalnim $W_2$ i $D_2$ te $o = 6$ . . . . .	108
4.12. Rezultati simulacije: jakost magnetskog polja u dijagonalnom i longitudinalnom pravcu 3D zavojnice iz rada [55] i 3D zavojnice, iz rada [56], optimirane genetskim algoritmom s optimalnim vrijednostima $W_2$ , $D_2$ , $D$ te $o = 6$ . . . . .	110
4.13. Rezultati simulacije: jakost magnetskog polja (u ravnini napajanja) 3D zavojnice optimirane genetskim algoritmom u Ansys Maxwell-u . . . . .	110
4.14. Rezultati simulacije, pogled odozgo: normalizirana jakost magnetskog polja (u ravnini napajanja) 3D zavojnice optimirane iscrpnim pretraživanjem, [55] . . . . .	111
4.15. Rezultati simulacije, pogled odozgo: normalizirana jakost magnetskog polja (u ravnini napajanja) 3D zavojnice optimirane genetskim algoritmom, [56] . . . . .	111
4.16. (a) trodimenzionalni prostor pretraživanja, (b) dvodimenzionalni i jednodimenzionalni prostor pretraživanja . . . . .	113
4.17. Tijek optimizacije u dva koraka: optimizacija 2D modela i optimizacija 3D modela . . . . .	113
4.18. Prototip zavojnice (pogled odozdo) . . . . .	114



4.19. Mjerna oprema i ekvivalentna shema predajnog podsustava (funkcijski generator, f.g., i predajna zavojnica s dodanim otporima) . . . . .	115
4.20. Rezultati mjerenja, pogled odozgo: normalizirana jakost magnetskog polja u ravnini napajanja 3D predajne zavojnice optimizirane genetskim algoritmom . . . . .	117
4.21. Homogene regije, pogled odozgo, definirane rezultatima mjerenja i simulacijama . . . . .	117

## Popis tablica

4.1. Svojstva 2D modela zavojnice u FEMM-u . . . . .	85
4.2. Optimalne vrijednosti varijabli odluke, MIDACO alat . . . . .	87
4.3. Parametri SGA iz pygmo biblioteke za optimizaciju četiri varijable odluke 2D modela zavojnice . . . . .	91
4.4. Optimalne vrijednosti varijabli odluke, pygmo biblioteka, SGA	91
4.5. Parametri DE iz pygmo biblioteke za optimizaciju četiri varijable odluke 2D modela zavojnice . . . . .	95
4.6. Optimalne vrijednosti varijabli odluke, pygmo biblioteka, DE	95
4.7. Vrijednosti fitnes funkcije (pri optimalnim vrijednostima varijabli odluke) za primijenjene optimizacijske algoritme . . . . .	96
4.8. Optimalne vrijednosti varijabli odluke pri h=30 mm, MIDACO alat . . . . .	97
4.9. Optimalne vrijednosti varijabli odluke pri h=30 mm, SGA . . . . .	98
4.10. Optimalne vrijednosti varijabli odluke pri h=30 mm, DE . . . . .	99
4.11. Vrijednosti fitnes funkcije (pri optimalnim vrijednostima varijabli odluke) za primijenjene optimizacijske algoritme . . . . .	100
4.12. Parametri GA za optimizaciju dvije varijable odluke 2D modela zavojnice, Ansys Maxwell . . . . .	104
4.13. Usporedba optimiranih 2D modela zavojnica za različite omjere struja . . . . .	105

4.14. Usporedba karakteristika optimiziranih zavojnica . . . . . 118

## A. PRILOZI

### A.1.

U *Python*-u se za računanje broja elemenata u listi koristi funkcija `len()`. Za potrebe ove disertacije izrađuje se lista u koju se pohranjuju vrijednosti jakosti magnetskog polja ( $y$  komponenta) u pravcu napajanja,  $H_y$ :

```
RNG=281
td=170
br=[];
Hy=[];
for n in range (0,RNG):
    h=femm.mo_geth(n,td);
    br.append(n)
    Hy.append(h[1]);
```

Varijabla `RNG` predstavlja broj ravnomjerno raspoređenih točaka po pravcu napajanja u kojima se računa jakost magnetskog polja. Varijabla `td` predstavlja udaljenost prijenosa energije koja odgovara zbroju varijable  $h$  sa slike 4.2 i gornje granice zavojnice koja iznosi 140. Nakon toga je potrebno elemente iz liste pod imenom `Hy` normalizirati s obzirom na maksimalnu vrijednost liste odnosno maksimalnu jakost magnetskog polja:

```
Hy_n=[]
for n in Hy:
```

```
Hy_n.append(n/max(Hy))
```

Iz liste s normaliziranim vrijednostima jakosti magnetskog polja ( $H_{y\_n}$ ) računa se duljina liste odnosno broj elemenata liste koji imaju vrijednost jednaku ili veću od 0.9:

```
Hy_n_09=[]
```

```
Hy_n_09=[i for i in Hy_n if i>=0.9]
```

```
len(Hy_n_09)
```

## A.2.

*Python* kod u nastavku koristi se za definiranje optimizacijskog problema za *MIDACO* alat u kosimulaciji *Python-FEMM*. Optimiraju se četiri varijable odluke:  $X1$ ,  $Y1$ ,  $t_d$  i  $o$ . U slučaju optimiranja tri ili manje varijabli odluke,  $t_d$  ili  $t_d$  i  $o$  se postavljaju kao konstante.

```
Xs=140
```

```
Ys=138
```

```
I1=10
```

```
I2=10
```

```
a=2
```

```
RNG=281
```

```
def problem_function(x):
```

```
    femm.opendocument('ime_dokumenta.fem')
```

```
    f=[0.0]*1
```

```
    g=[0.0]*1
```

```
    X1=x[0]
```

```
    Y1=x[1]
```

```
td=x[2]
o=x[3]
femm.mi_drawrectangle(0, 138, 2, 140);
femm.mi_drawrectangle(278, 138, 280, 140);
femm.mi_drawrectangle(Xs-x[0], Y1, Xs-x[0]+a, Y1+a);
femm.mi_drawrectangle(Xs+x[0], Y1, Xs+x[0]-a, Y1+a);
femm.mi_addblocklabel(1, 139);
femm.mi_addblocklabel(279, 139);
femm.mi_addblocklabel(Xs-x[0]+a/2, Y1+a/2);
femm.mi_addblocklabel(Xs+x[0]-a/2, Y1+a/2);
femm.mi_getmaterial('Copper');
femm.mi_getmaterial('Air');
femm.mi_addcircprop('current_1', ((I1+I2)/(omj+1))*omj, 0);
femm.mi_addcircprop('current_2', -((I1+I2)/(omj+1))*omj, 0);
femm.mi_addcircprop('current_3', (I1+I2)/(omj+1), 0);
femm.mi_addcircprop('current_4', -(I1+I2)/(omj+1), 0);
femm.mi_selectlabel(1, 139);
femm.mi_setblockprop('Copper', 0, 1, 'current_1', 0, 0, 1);
femm.mi_clearselected()
femm.mi_selectlabel(279, 139);
femm.mi_setblockprop('Copper', 0, 1, 'current_2', 0, 0, 1);
femm.mi_clearselected()
femm.mi_selectlabel(Xs-x[0]+a/2, Y1+a/2);
femm.mi_setblockprop('Copper', 0, 1, 'current_3', 0, 0, 1);
femm.mi_clearselected()
femm.mi_selectlabel(Xs+x[0]-a/2, Y1+a/2);
```

```
femm.mi_setblockprop('Copper',0,1,'current_4',0,0,1);
femm.mi_clearselected()
femm.mi_saveas(ime_dokumenta_v2);
femm.mi_analyze();
femm.mi_loadsolution()
br=[];
Hy=[];
for n in range(0,RNG):
    h=femm.mo_geth(n,td);
    br.append(n)
    Hy.append(h[1]);
Hy_n=[]
for n in Hy:
    Hy_n.append(n/max(Hy))
Hy_n_09=[]
Hy_n_09=[i for i in Hy_n if i>=0.9]
len(Hy_n_09)
f[0]=-((len(Hy_n_09)/RNG)*np.average(Hy))
femm.mi_close()
return f,g
```

## B. POPIS KRATICA

- **ACO** - Optimizacija kolonije mrava (engl. *Ant Colony Optimization*)
- **DE** - Diferencijalna evolucija (engl. *Differential Evolution*)
- **EA** - Evolucijski algoritam (engl. *Evolutionary Algorithm*)
- **EC** - Evolucijsko računanje (engl. *Evolutionary Computation*)
- **FEMM** - Softver koji koristi metodu konačnih elemenata za probleme iz magnetizma (engl. *Finite Element Method Magnetics*)
- **FoM** - Mjera kvalitete (engl. *Figure of Merit*)
- **GA** - Genetski algoritam (engl. *Genetic Algorithm*)
- **ISM** - Industrijski, znanstveni i medicinski frekvencijski raspon (engl. *Industrial, Scientific and Medical Band*)
- **PCB** - Tiskana pločica (engl. *Printed Circuit Board*)
- **RX** - Prijemna zavojnica (engl. *Receiving Coil*)
- **SACO** - Jednostavna optimizacija kolonije mrava (engl. *Simple Ant Colony Optimization*)
- **SGA** - Jednostavni genetski algoritam (engl. *Simple Genetic Algorithm*)
- **TX** - Predajna zavojnica (engl. *Transmitting Coil*)



- **WPT** - Bežični prijenos energije (engl. *Wireless Power Transfer*)

## SAŽETAK

### **Izvedba predajne zavojnice u sustavu bežičnog prijenosa energije s homogenom razdiobom magnetskog polja**

Razdvajanje frekvencije i neusklađenost impedancije posljedice su promjene faktora magnetske veze između predajne i prijemne zavojnice odnosno promjene položaja prijemne zavojnice u odnosu na predajnu zavojnicu u konvencionalnom rezonantnom induktivnom sustavu za bežični prijenos energije. Problemi razdvajanja frekvencije i neusklađenosti impedancije u rezonantnom induktivnom prijenosu energije mogu se ublažiti generiranjem homogenog magnetskog polja u većini površine ravnine punjenja. Homogenost magnetskog polja postiže se optimiranjem geometrije predajne zavojnice i optimiranjem raspodjele struje između namotaja iste zavojnice. U ovoj disertaciji provodi se postupak određivanja strukture dvoslojne pravokutne predajne 3D zavojnice za generiranje homogenog magnetskog polja iscrpnim pretraživanjem. Mjerenja magnetskog polja na prototipu takve zavojnice potvrđuju homogenu regiju koja čini 55.3% površine ravnine napajanja. Nakon što je određena struktura predajne zavojnice uvodi se pretpostavka da će raspodjela struje između namotaja predajne zavojnice uz optimizaciju geometrije sada poznate strukture pridonijeti poboljšanju svojstava predajne zavojnice. Optimizacija se provodi u dva koraka: optimizacija 2D modela i optimizacija 3D modela. Razlog tome je smanjenje prostora pretraživanja

odnosno dimenzije problema koji se nastoji riješiti optimizacijom 3D modela. Optimalne vrijednosti varijabli odluka iz optimizacije 2D modela (geometrijske varijable drugog sloja zavojnice, omjer struja) koriste se kao konstante u optimizaciji 3D modela. Optimizacija 2D modela 3D predajne zavojnice obavlja se u kosimulaciji *Python-FEMM* uz pomoć *MIDACO* alata i genetskog algoritma te diferencijalne evolucije iz *pygmo* biblioteke. Najbolja rješenja fitnes funkcije ostvarena su diferencijalnom evolucijom. Nužna je i optimizacija u *Ansys Maxwell*-u zbog toga što je to programski paket koji ima opciju simulacije, a također i optimizacije 3D modela s pomoću alata *Optimetrics tool*. Odabire se konstanta udaljenost prijenosa od 30 mm. Tako optimirana zavojnica ima bolja svojstva u odnosu na prvotnu. Homogena regija čini 67.78% površine ravnine napajanja, dubina zavojnice smanjena je za 28.8% te je postignuta veća srednja vrijednost jakosti magnetskog polja u ravnini napajanja.

**Ključne riječi:** Bežični prijenos energije, homogeno magnetsko polje, optimizacija 3D predajne zavojnice, iscrpno pretraživanje, kosimulacija, algoritmi evolucijskog računanja, populacijski algoritmi.

## ABSTRACT

### **Transmitting coil design in wireless power transfer system with homogeneous magnetic field distribution**

Frequency splitting and impedance mismatching are happening due to magnetic coupling factor variations. i.e. due to relative shift in receiving coil position with respect to transmitting coil in a conventional resonant inductive wireless power transfer system. Frequency splitting and impedance mismatching can be mitigated by generating homogeneous magnetic field intensity at the majority of the charging plane surface. Homogeneity of the magnetic field intensity are achieved by optimization of the transmitting coil geometry and current ratio among the coil turns. In this PhD thesis, the process of determining geometry of the 3D rectangular coil with two layers using exhaustive search is carried out. Measurements that were carried out with prototype of such optimized 3D coil verified that homogeneous region occupies at least 55.3% of the charging plane surface. Then, after the 3D coil structure is determined, a hypothesis is introduced. It is supposed that different current ratio among turns of such coil along with geometry optimization will contribute to achieve better features of known 3D coil structure. Optimization is carried out in two steps: optimization of the 2D model and optimization of the 3D model. Main reason to split optimization is to reduce the search space, i.e. dimension of the problem that is trying to be solved. Optimal va-

lues of decision variables (variables that represent coil second layer geometry and current ratio) obtained from 2D model optimization are used as constants in optimization of 3D model. 2D model optimizations are executed in *Python-FEMM* co-simulation along with *MIDACO* tool. Furthermore, genetic algorithm and differential evolution from *pygmo* library are also applied in solving 2D model optimization. Best fitness function value is achieved using differential evolution strategy. Optimization in *Ansys Maxwell* is necessary because of its feature that 3D models can be simulated and also optimized using *Optimetrics Tool* of *Ansys Maxwell*. Transfer distance in both 2D and 3D models is set to be 30 mm. Such optimized coil own better features compared to coil obtained by exhaustive search. Homogeneous region now occupies 67.78% of charging plane surface, coil depth is reduced by 28.8% and also the higher value of average magnetic field intensity at charging plane is achieved.

**Keywords:** Wireless power transfer, homogeneous magnetic field, 3D transmitting coil optimization, exhaustive search, co-simulation, evolutionary computation algorithms, population based algorithms.

## BIOGRAFIJA

Domagoj Bilandžija je rođen 04. studenoga 1992. godine u Osijeku. Nakon završetka Osnovne škole Jagode Truhelke u Osijeku upisuje Prvu gimnaziju u Osijeku koju završava 2010./2011. nastavne godine.

Nakon završetka srednjoškolskog obrazovanja polaže ispite državne mature i 2011. godine upisuje Preddiplomski studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. 2014. godine, nakon završetka Preddiplomskog studija, upisuje Diplomski studij, smjer Elektroenergetika, na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku. Završava Diplomski studij 2017. godine te se 2018. godine zapošljava na Fakultetu Elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek u okviru projekta *Učinkovito bežično napajanje* pod pokroviteljstvom Hrvatske zaklade za znanost. Iste godine upisuje Poslijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike i računarstva, smjer Komunikacije i informatika. Tijekom Poslijediplomskog studija održava nastavu odnosno laboratorijske vježbe iz kolegija Elektronika 1. Znanstvena istraživanja u sklopu rada na navedenom projektu objavljena su u nekoliko znanstvenih radova u zbornicima znanstvenih konferencija i u dva znanstvena rada koji su objavljeni u časopisima *Wireless Power Transfer* i *Energies*. Početkom 2022. godine na Fakultetu Elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek prihvaća se tema doktorske disertacije pod naslovom *Izvedba predajne zavojnice u sustavu bežičnog prijenosa energije s homogenom razdiobom magnetskog polja* autora Domagoja Bilandžije.