

Optimizacija i usporedba dizajna sinkronih motora s i bez neodimijskih magneta

Markunović, Anton

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:168165>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-22**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 137

**OPTIMIZACIJA I USPOREDBA DIZAJNA SINKRONIH
MOTORA S I BEZ NEODIMIJSKIH MAGNETA**

Anton Markunović

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 137

**OPTIMIZACIJA I USPOREDBA DIZAJNA SINKRONIH
MOTORA S I BEZ NEODIMIJSKIH MAGNETA**

Anton Markunović

Zagreb, lipanj 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 137

Pristupnik: **Anton Markunović (0036389661)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Profil: Elektrostrojarstvo i automatizacija
Mentor: izv. prof. dr. sc. Zlatko Hanić

Zadatak: **Optimizacija i usporedba dizajna sinkronih motora s i bez neodimijskih magneta**

Opis zadatka:

U okviru diplomskog rada potrebno je analizirati optimalne dizajne sinkronih motora s i bez neodimijskih magneta, odnosno s i bez magneta rijetkih zemalja. Poznato je da sinkroni motori s neodimijskim magnetima postižu visoke performanse u pogledu visoke efikasnosti i gustoće momenta i snage u usporedbi s drugim tipovima motora. Ovaj diplomski rad trebao bi dati odgovor na pitanje koliko su performanse sinkronih motora s neodimijskim magnetima kvantitativno bolje u usporedbi sa sinkronim motorima koji ne koriste neodimijske motore na primjeru tipičnog motora za pogon električnog vozila. U radu je potrebno postaviti zahtjeve za električni motor. Potrebno je automatizirati elektromagnetske i toplinske izračune u programskom paketu Ansys MotorCAD korištenjem programskog jezika Matlab. Potrebno je provesti parametarske optimizacije nekoliko odabranih topologija motora s i bez neodimijskih magneta, uz unaprijed definirane funkcije cilja i ograničenja. Dobivene optimalne dizajne potrebno je verificirati detaljnijim izračunima te je potrebno komentirati dobivene rezultate. Cijeli postupak potrebno je detaljno dokumentirati.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

Sadržaj

Uvod	1
1. Zahtjevi.....	2
2. Fizikalni model.....	4
3. Inicijalni odabiri	7
3.1. IPM motor.....	7
3.2. PMSynRM motor.....	8
3.3. Namot.....	9
3.4. Materijali.....	11
4. Inicijalna rješenja.....	14
4.1. Motor-CAD alat za projektiranje.....	14
4.2. Postupak projektiranja	14
4.3. Hlađenje	15
4.4. I topologija IPM motora	16
4.5. V topologija IPM motora.....	21
4.6. D topologija IPM motora.....	25
4.7. UUI topologija PMSynRM motora.....	30
5. Optimizacija.....	36
5.1. MIDACO-SOLVER alat za optimizaciju	36
5.2. Postupak optimizacije	37
5.3. Princip validacije	39
5.4. Optimizacija za I topologiju IPM motora	41
5.4.1. Parametri optimizacije.....	41
5.4.2. Rezultati optimizacije s ciljem moment/cijena.....	43
5.4.3. Rezultati optimizacije s ciljem moment/masa.....	49
5.4.4. Rezultat optimizacije s ciljem maksimalna efikasnost.....	55

5.5.	Optimizacija za V topologiju IPM motora	61
5.5.1.	Parametri optimizacije	61
5.5.2.	Rezultati optimizacije s ciljem moment/cijena.....	63
5.5.3.	Rezultati optimizacije s ciljem moment/masa.....	69
5.5.4.	Rezultati optimizacije s ciljem maksimalna efikasnost.....	75
5.6.	Optimizacija za D topologiju IPM motora	81
5.6.1.	Parametri optimizacije	81
5.6.2.	Rezultati optimizacije s ciljem moment/cijena.....	84
5.6.3.	Rezultati optimizacije s ciljem moment/masa.....	90
5.6.4.	Rezultati optimizacije s ciljem maksimalna efikasnost.....	97
5.7.	Optimizacija za UUI topologiju PMSynRM motora	103
5.7.1.	Parametri optimizacije	103
5.7.2.	Rezultati optimizacije s ciljem moment/cijena.....	106
5.7.3.	Rezultati optimizacije s ciljem moment/masa.....	113
5.7.4.	Rezultati optimizacije s ciljem maksimalna efikasnost.....	120
6.	Usporedba rezultata optimizacije	127
6.1.	Ukupni pregled rezultata.....	127
	Usporedba optimalnih rješenja optimizacija s ciljem moment/cijena.....	133
6.2.	Usporedba optimalnih rješenja optimizacija s ciljem moment/masa.....	135
6.3.	Usporedba optimalnih rješenja optimizacija s ciljem maksimalna efikasnost ...	137
	Zaključak	140
	Literatura	141
	Sažetak.....	142
	Summary.....	143

Uvod

Sinkroni motori s permanentnim magnetima (skraćeno SMPM, engl. *Permanent Magnet Synchronous Motor*, skraćeno PMSM) posjeduju visok nivo efikasnosti i gustoće momenta i snage u odnosu na druge izmjenične strojeve. Najbolji izbor permanentnih magneta za postizanje navedenih svojstava predstavljaju magneti rijetkih zemalja (engl. *Rare Earth Magnet*), poglavito neodimij-željezo-bor magneti.

Alternativni izbor permanentnih magneta u konstrukciji sinkronih motora predstavljaju feritni magneti. Znatno su niže cijene od magneta rijetkih zemalja, ali njihova primjena, zbog svojih znatno slabijih magnetskih svojstava, rezultira strojevima lošijih ukupnih svojstava, poglavito veće mase i volumena.

U ovom se radu nastoji projektirati obje vrste motora te ih podvrgnuti podjednako metodi optimizacije kako bi se njihova svojstva kao što su efikasnost, gustoća momenta u odnosu na masu ali i gustoća momenta u odnosu na cijenu mogla objektivno usporediti.

Domena za koju će se motori projektirati je pogon manjeg električnog vozila, i u skladu s tim će se postaviti zahtjevi za motor te izvesti inicijalni odabiri. Zbog svojih svojstava pogodnih za pogon automobila tipovi sinkronog motora s permanentnim magnetima koji ulaze u daljnje razmatranje su sinkroni motor s unutrašnjim permanentnim magnetima (engl. *Interior Permanent Magnet Synchronous Motor*, skraćeno IPMSM, odnosno IPM), te podvrsta IPM motora pod nazivom permanentnim magnetima potpomognuti sinkroni reluktantni motori (engl. *Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor*, skraćeno PMASynRM).

U kontekstu nedavnih naglih poskupljenja magneta rijetkih zemalja te kontinuiranih i rastućih zahtjeva za visokom efikasnošću motora, ovaj se rad može gledati kao pokušaj doprinosa u tom smjeru.

1. Zahtjevi

Za potrebe projektiranja motora za električno vozilo definirani su inicijalni zahtjevi koje motor mora ispunjavati.

Minimalne mehaničke performanse koje motor treba razvijati na osovini motora navedene su u tablici (Tablica 1.1).

Ograničenja izlaznih električnih veličina pretvarača napona i frekvencije navedena su u tablici (Tablica 1.2).

Ograničenja maksimalnih temperatura motora za trajni rad (tip pogona S1) navedena su u tablici (Tablica 1.3). Trajni rad provodi se u radnoj točki u kojoj motor razvija snagu P_{S1} na maksimalnoj brzini.

Ograničenja vanjskih dimenzija motora navedena su u tablici (Tablica 1.4).

Tablica 1.1 Zahtjevi za mehaničkim performansama na osovini motora

Maksimalna snaga	P_{max} [kW]	100
Maksimalna korisnost	η_{max} [%]	95
Rubna brzina	n_{cs} [min^{-1}]	5000
Maksimalna brzina	n_{max} [min^{-1}]	10000
Moment na osovini pri rubnoj brzini	M_{cs} [Nm]	160
Snaga na osovini pri rubnoj brzini	P_{cs} [kW]	$P_{max}/1,2 = 83,3$
Moment na osovini pri maksimalnoj brzini	M_{nmax} [Nm]	80
Snaga na osovini pri maksimalnoj brzini	P_{nmax} [kW]	80
Snaga u trajnom radu (pogon S1)	P_{S1} [kW]	60

Tablica 1.2 Ograničenja pretvarača napona i frekvencije

Napon istosmjernog međukruga	U_{DC} [V]	450
------------------------------	--------------	-----

Nazivna fazna struja	$I_{efn} [A]$	300
----------------------	---------------	-----

Tablica 1.3 Ograničenja maksimalnih temperatura u trajnom radu

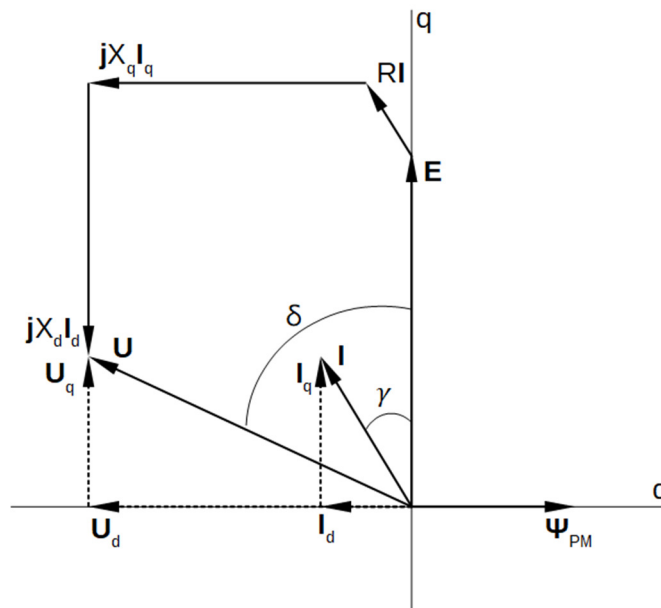
Maksimalna temperatura namota	$\vartheta_n [^{\circ}C]$	180
Maksimalna temperatura magneta	$\vartheta_m [^{\circ}C]$	160

Tablica 1.4 Ograničenja vanjskih dimenzija

Maksimalni ukupni promjer	$D [mm]$	260
Maksimalna ukupna duljina	$L [mm]$	260

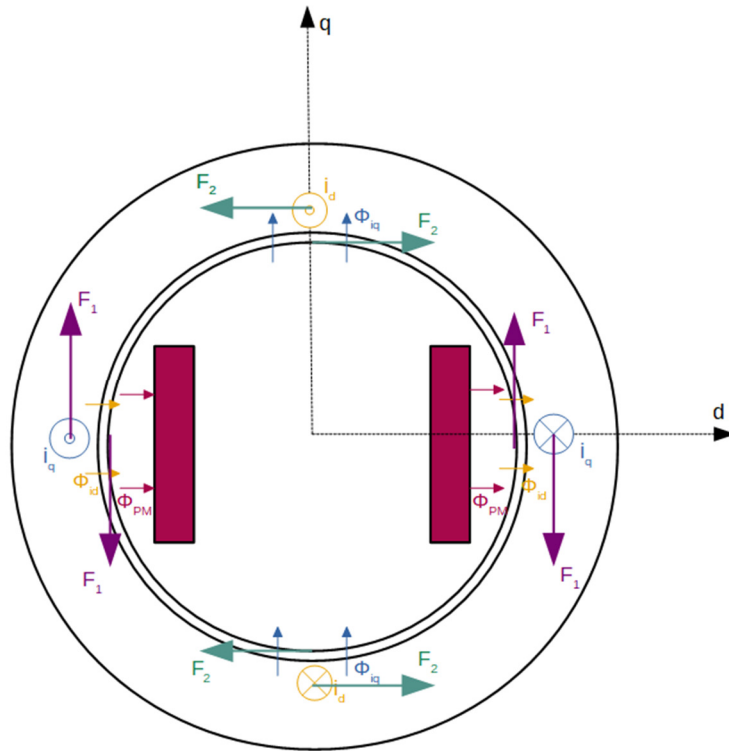
2. Fizikalni model

Fizikalni model IPM motora utemeljen je na primjeni dvoosne teorije, pri čemu pravac protjecanja magnetskog toka permanentnih magneta predstavlja d-os (uzdužna os, engl. *Direct*) a os okomita na nju je q-os (poprečna os, engl. *Quadrature*). Također, induktivitet u smjeru q osi veći je od induktiviteta u smjeru d osi, prema tome d os je os s većim magnetskim otporom (reluktancijom) od q osi. Fazorski dijagram prikazan je na slici (Slika 2.1).



Slika 2.1 Fazorski dijagram IPM motora

Elektromagnetni moment stroja sastoji može se razdvojiti na dva momenta, jedan generiran međudjelovanjem ulančenog toka u d osi s protjecanjem u q osi, i drugi generiran međudjelovanjem ulančenog toka u q osi s protjecanjem u d osi. Na slici (Slika 2.2) prikazan je princip nastanka elektromagnetskog momenta IPM motora. [1]



Slika 2.2 Princip nastanka elektromagnetskog momenta IPM motora

$$M_{EM}[pu] = M_1[pu] - M_2[pu] = \Psi_d I_q - \Psi_q I_d$$

$$\Psi_d = \Psi_{PM} + L_d I_d$$

$$\Psi_q = L_q I_q$$

$$M_{EM} = 3p (\Psi_{PM} I_q + I_d I_q (L_d - L_q))$$

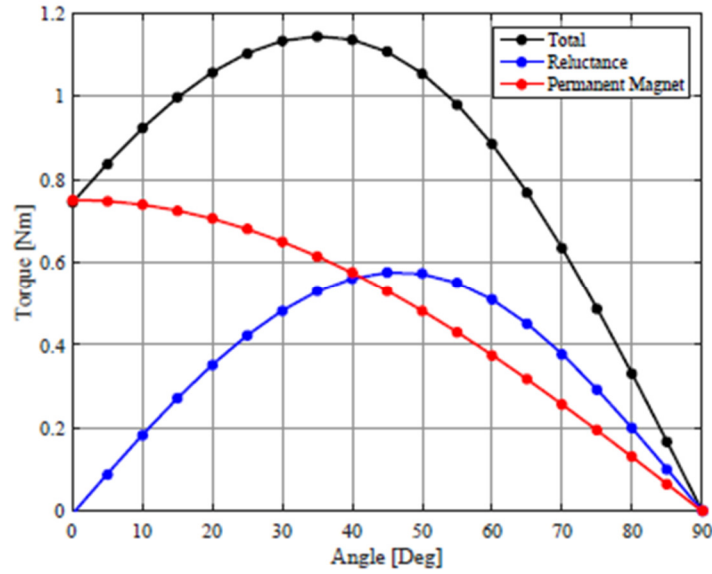
Sastoji se od dvije komponente. Prva komponenta je moment magnetske uzbude (engl. *PM Alignment Torque*), nastao međudjelovanjem magnetskog toka permanentnih magneta i okretnog protjecanja statora:

$$M_{PM} = 3p \Psi_{PM} I_q = 3p \Psi_{PM} I \cos \gamma$$

Druga komponenta je reluktantni moment (engl. *Reluctance Torque*) nastao međudjelovanjem razlike magnetskog otpora u osima rotora i okretnog protjecanja statora:

$$M_{REL} = 3p I_d I_q (L_d - L_q) = 3p \frac{1}{2} I^2 \sin 2\gamma (L_d - L_q)$$

Primjer krivulja momenta magnetske uzbude, reluktantnog i ukupnog elektromagnetskog momenta prikazane su na slici (Slika 2.3). [14]



Slika 2.3 Primjer krivulja momenta magnetske uzbude, reluktantnog i ukupnog elektromagnetskog momenta

Omjer induktiviteta u q i d osi:

$$\xi = \frac{L_q}{L_d}$$

naziva se „istaknutost“ (engl. *Saliency Ratio*). Omjer induktiviteta predstavlja osnovni parametar kojim se utječe na iznos reluktantnog momenta. [3][4]

3. Inicijalni odabiri

U daljnje razmatranje ulaze tri topologije IPM motora i jedna topologija PMSynRM motora. Sve navedene topologije imaju istu konfiguraciju namota.

3.1. IPM motor

Zbog visokog iznosa gustoće momenta i snage, efikasnosti i širokog raspona brzina sinkroni motor s unutrašnjim permanentnim magnetima (IPM) idealan je izbor za pogon električnog vozila. Najbolji izbor permanentnih magneta za postizanje navedenih svojstava predstavljaju magneti rijetkih zemalja, poglavito neodimij-željezo-bor (NdFeB, skraćeno neodimijski) magneti.

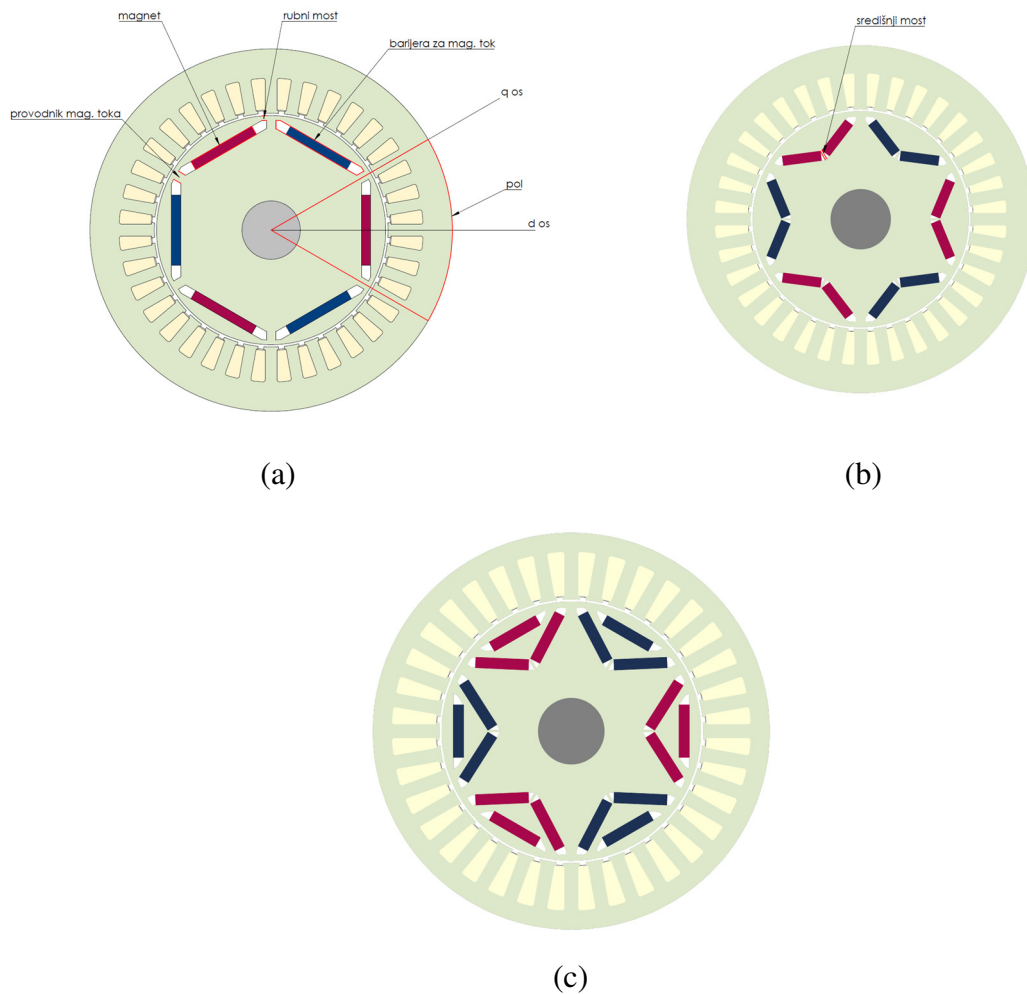
Elektromagnetni moment IPM motora potječe iz dva izvora: interakcija statorskog magnetskog polja i magnetskog polja magneta čime nastaje moment magnetske uzbude, i interakcija magnetskog polja i razlike u magnetskoj vodljivosti dviju osi rotora čime nastaje reluktantni moment.

Kako bi se postigla visoka gustoća momenta i snage u režimu konstantne snage motor treba postići visoke iznose reluktantnog momenta, za što je potreban visoki omjer induktiviteta L_q i L_d . Postavljanjem zračnih barijera za magnetski tok (engl. *Flux Barriers*) u d os i vodiča magnetskog toka (engl. *Flux Carriers*) u q os povećava se omjer induktiviteta. S obzirom da je relativna magnetska permeabilnost neodimijskog permanentnog magneta $\mu_r = 1.05$ permanentni magnet je za magnetski tok statora ekvivalentan zračnoj barijeri.

Topologije rotora koje se razmatraju:

- I topologija, poznata i kao topologija s ravnim magnetima (engl. *Flat type*).
- V topologija
- D topologija, poznata i kao delta topologija, predstavlja kombinaciju I i V topologije

Radijalni prikazi navedenih topologija prikazani su na slici (Slika 3.1).



Slika 3.1 Radijalni prikazi I (a), V (b) i D (c) topologije

Sve navedene topologije imaju po šest polova i provodnike magnetskog toka između susjednih barijera. I i V topologija posjeduju jedan sloj magneta i zračnih barijera, a D topologija dva sloja. V i D topologija posjeduju središnje mostove (engl. *Post*) koje uvode nužnu strukturnu čvrstoću ali pritom povećavaju induktivitet u d osi. [4][6][7]

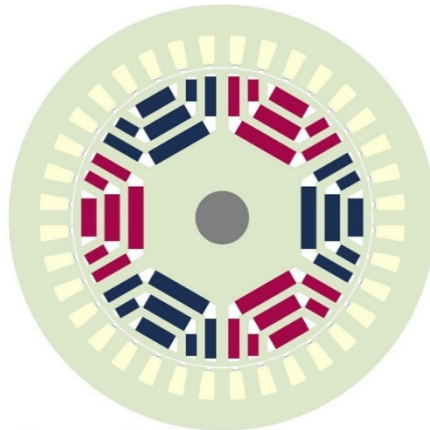
3.2. PMSynRM motor

Alternativa IPM motorima s neodimijskim magnetima su sinkroni motori s permanentnim magnetima koji svojom topologijom u većoj mjeri utiliziraju reluktantni moment. Radi se o podgrupi IPM motora pod nazivom permanentnim magnetima potpomognuti sinkroni reluktantni motori (PMSynRM).

S obzirom da glavnina momenta ne potječe od interakcije magnetog polja rotora i statora, takvi motori mogu razvijati značajan moment i uz korištenje magneta s manjom gustoćom magnetskog toka, kao što su feritni magneti. Osnovni motiv za korištenje feritnih magneta

je njihova značajno manja nabavna cijena od cijene neodimijskih magneta i drugih magneta rijetkih zemalja. S obzirom na svoja slabija magnetska svojstva u odnosu na magnete rijetkih zemalja, korištenje feritnih magneta rezultira strojevima većeg volumena.

Kako bi se postigao što veći omjer induktiviteta u q i d osi razmatra se topologija sa šest polova i tri sloja magneta i zračnih barijera, prikazana na slici (Slika 3.2). Radi se o trostrukoj U topologiji, preciznije UUI topologiji, pri čemu je vanjski sloj barijera konfiguriran u I topologiju, dok su dva unutrašnja sloja barijera konfigurirana u U topologiju. [8] [9] [10]



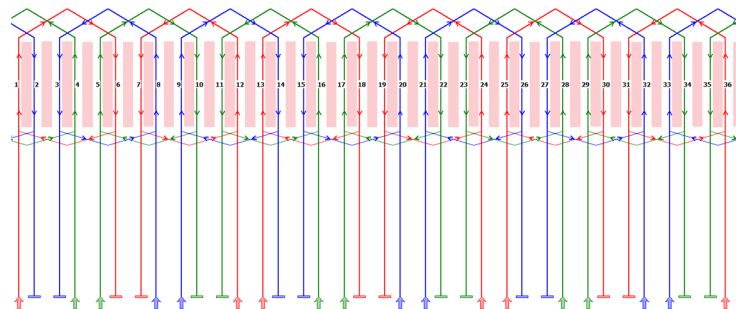
Slika 3.2 Radijalni prikaz UUI topologije

3.3. Namot

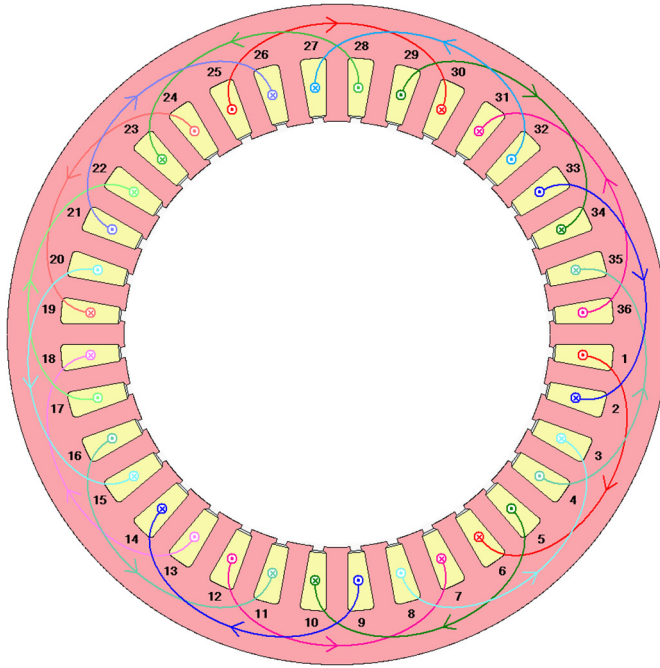
Za sve navedene vrste motora odabrana je jednaka konfiguracija statora sa $Q_s = 36$ utora i $p = 3$ pari polova.

Namot je trofazni $m = 3$, jednoslojni, petljasti, usipni, skraćen s korakom namota $y = 5 [\tau_u]$ i sa $a = 6$ paralelnih grana. Razložena shema namota prikazana je na slici (Slika 3.3).

Shema namota uloženog u utore statora prikazana je na slici (Slika 3.4). [2][5]



Slika 3.3 Razložena shema namota



Slika 3.4 Namot uložen u stator

Kut između dva susjedna utora:

$$\alpha_u = \frac{2\pi}{Q_s} = 10^\circ$$

Električni kut između dva susjedna utora:

$$\alpha_{uel} = \alpha_u p = 30^\circ$$

Polni korak izražen u utorskim koracima:

$$\tau_p = \frac{Q_s}{2p} = 6 [\tau_u]$$

Broj utora po polu i fazi:

$$q = \frac{Q_s}{2pm} = 2$$

Tetivni faktor:

$$f_t = \sin\left(\frac{\pi y}{2 \tau_p}\right) = 0,9659$$

Zonski faktor:

$$f_z = \frac{\sin\left(q \frac{\alpha_{uel}}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{\alpha_{uel}}{2}\right)} = 0,9659$$

Faktor namota:

$$f_n = f_t f_z = 0,933$$

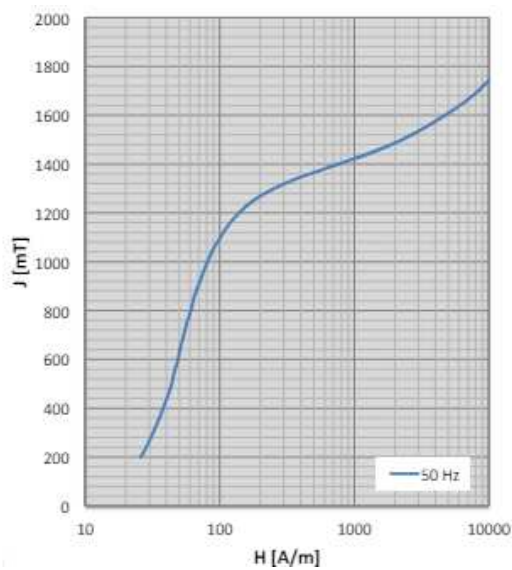
3.4. Materijali

Materijali odabrani za građu motora navedeni su u tablici (Tablica 3.1).

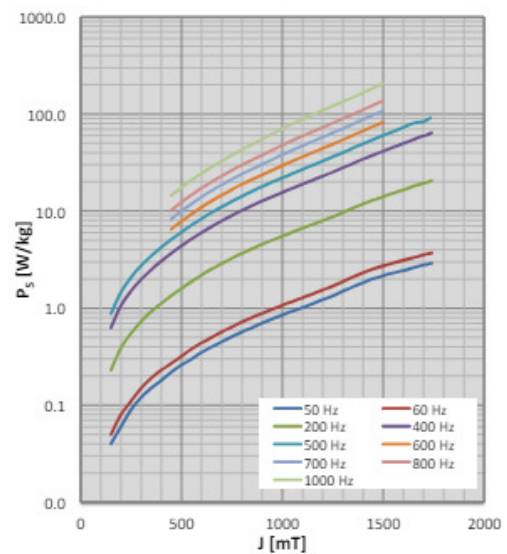
Tablica 3.1 Materijali

Materijal	Klasa	Okvirna cijena [\$/kg]
Čelični lim	M235-35A	2
Bakar		10
Neodimijski magnet	N42UH	150
Feritni magnet	Y34	10

Statorski i rotorski paket građen je od čeličnog lima klase M235-35A. Radi se o standardnom električnom čeličnom limu debljine 0,35 mm s 2,35 W/kg specifičnih gubitaka pri 1,5 T i 50 Hz. Primjer kataloških karakteristika odabrane klase čeličnog lima prikazan je na slici (Slika 3.5). [11]



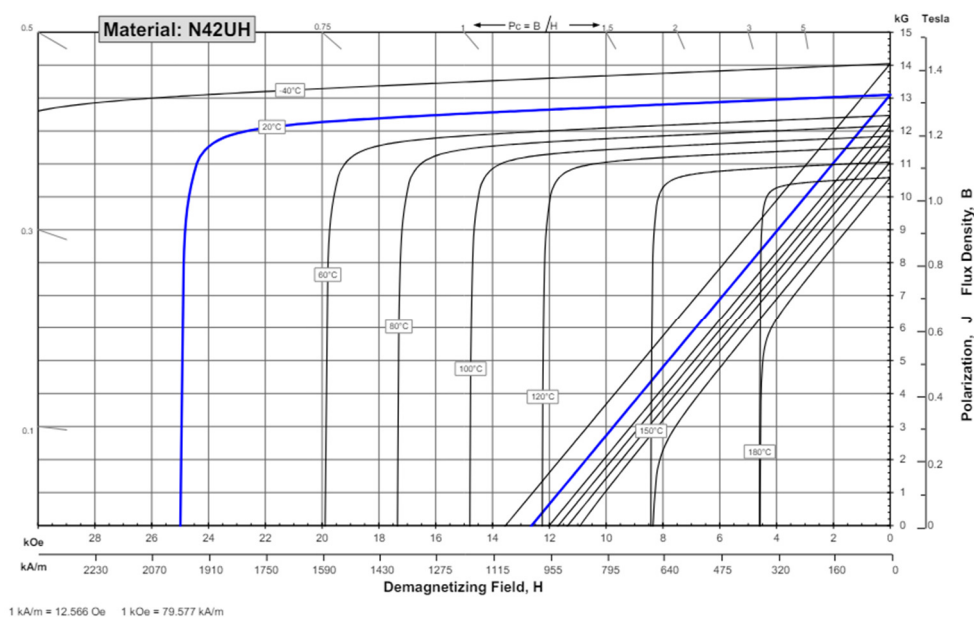
(a)



(b)

Slika 3.5 Primjer kataloških karakteristika čeličnog lima klase M235-35A

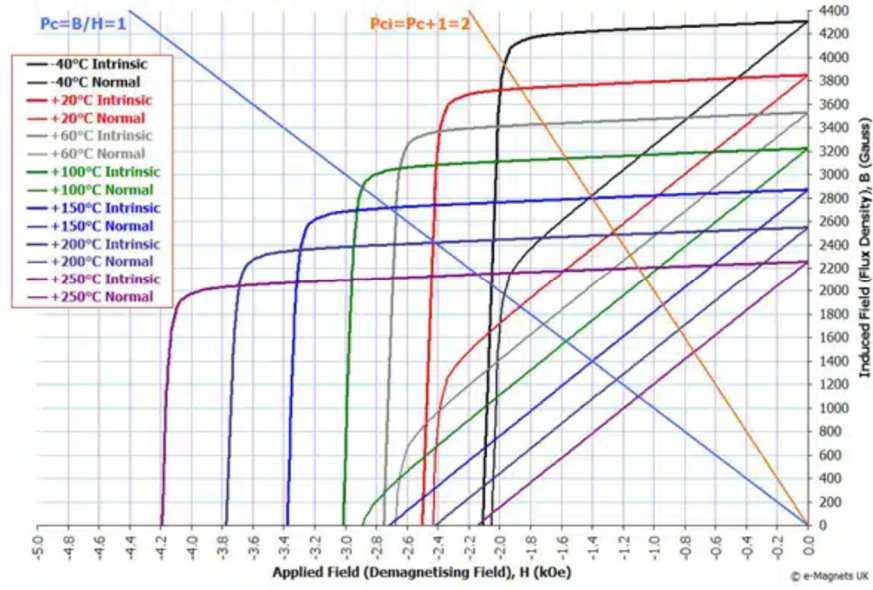
Magnete rijetkih zemalja, poglavito neodimij-željezo-bor (NdFeB, skraćeno neodimijski) magnet, karakteriziraju najviši iznosi remanentnog induktiviteta B_r i gustoće energije $(BH)_{max}$ od svih permanentnih magneta te vrlo visok iznos koercitivne sile H_k . Primjer kataloških karakteristika neodimijskog magneta klase N42UH prikazan je na slici (Slika 3.6). [12]



Slika 3.6 Normalna i intrinzična karakteristika N42UH magneta

Feritne magnete karakterizira linearna krivulja magnetizacije, srednje visoka temperatura demagnetiziranja i nizak iznos remanentnog induktiviteta B_r . Primjer kataloških karakteristika feritnog Y30 magneta prikazane su na slici (Slika 3.7). [13]

BH Curve - Ferrite Y30 / C5 / Feroba2 / HF26/18



Slika 3.7 Normalna i intrinzična karakteristika Y30 magneta

4. Inicijalna rješenja

Prilikom projektiranja električnog stroja potrebni su alati za izvođenje elektromagnetskih i termalnih izračuna. U tu svrhu koriste se softverski alati zasnovani na numeričkim metodama izračuna, poglavito na metodi konačnih elemenata (engl. *Finite Element Analysis*, skraćeno FEA), te analitičkim izračunima zasnovanim na modelima s koncentriranim parametrima (engl. *Lump model*).

4.1. Motor-CAD alat za projektiranje

Dizajn, izračun i analiza motora obavlja se komercijalnim softverskim alatom za analizu i projektiranje električnih strojeva ANSYS Motor-CAD. Alat se za analizu i elektromagnetske i termalne izračune električnih strojeva koristi metodom konačnih elemenata i analitičkim postupcima zasnovanim na modelima s koncentriranim parametrima. Modeli motora dizajniraju se odabirom i konfiguracijom jednog od ponuđenih predložaka ili definiranjem u potpunosti prilagođenih konfiguracija.

Sastoji se od četiri odvojena modula:

- Emag - dizajn, elektromagnetna analiza i izračun gubitaka putem analitičkih metoda i metode konačnih elemenata u određenoj radnoj točki
- Thermal - projektiranje komponenti hlađenja i analize stacionarnih i tranzijentnih termičkih stanja korištenjem termalnih mreža i metode konačnih elemenata
- Lab - kombinirane elektromagnetne i termalne simulacije kroz niz radnih točaka
- Mechanical - izračun mehaničkih svojstava putem metode konačnih elementa

Motor-CAD alat posjeduje ActiveX sučelje putem kojeg je dizajn, izračun i analizu moguće skriptirati putem skriptnih jezika kao što su Matlab, Python itd. [15]

4.2. Postupak projektiranja

Osnovni dizajn motora izveden je putem Emag modula Motor-CAD alata. Tip motora je BPM (engl. *Brushless Permanent Magnet*).

Definirani su statorski i rotorski parametri radijalne i aksijalne geometrije te parametri namota.

Tipovi rotora su:

- Interior Flat (web) - I topologija
- Interior V (web) s jednim slojem magneta - V topologija
- Interior V (web) s dva sloja magneta - D topologija
- Interior U-shape s tri sloja magneta - UUI topologija.

Dizajn komponenti hlađenja izveden je u Thermal modulu.

Performanse određene zahtjevima za mehaničkim performansama iz tablice (Tablica 1.1) te ciljne performanse izračunate su putem Electromagnetic izračuna koji je dio Lab modula, pri čemu se ograničenja pretvarača napona i frekvencije iz tablice (Tablica 1.2) definiraju kao ulazni podaci. Za potrebe izračuna izgrađeni su i korišteni modeli:

- Magnetskog zasićenja
- Gubitaka u željezu
- Gubitaka u bakru
- Gubitaka u magnetu

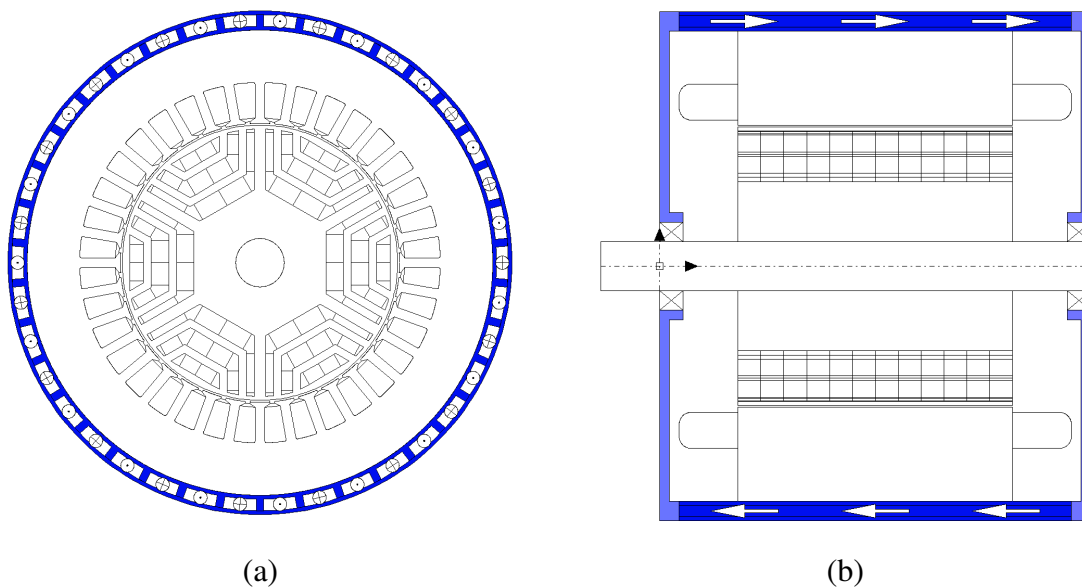
Ograničenja maksimalnih temperatura u trajnom pogonu određena zahtjevima iz tablice (Tablica 1.3) izračunate su putem Steady State izračuna koji je dio Thermal modula, a pritom je model gubitaka izgrađen putem Emag modula, izračunom u radnoj točki S1.

Ograničenja struje i odgovarajuća ograničenja momenta i snage u trajnom radu s obzirom na maksimalno dopuštene temperature izračunate su putem Thermal Steady State izračuna koji je dio Lab modula.

4.3. Hlađenje

Ograničenja temperatura iz tablice (Tablica 1.3) uvjetuju korištenje aktivnog hlađenja rashladnom tekućinom putem vodene košuljice ugrađene u kućište (engl. *Water Jacket*).

Kako bi se u kućište mogla smjestiti vodena košuljica, debljina kućišta u radijalnom smjeru iznosi 10 mm. Kako bi vodena košuljica u potpunosti zatvorila vrhove statorskog namota dodatna duljina vodene košuljice u odnosu na duljinu statorskog i rotorskog paketa iznosi 80 mm. Na slici (Slika 4.1) prikazan je radijalni i aksijalni presjek vodene košuljice sa označenim smjerovima protoka rashladne tekućine.



Slika 4.1 Radijalni (a) i aksijalni (b) presjek vodene košuljice

Osnovna svojstva rashladne tekućine su:

- Mješavina vode i alkohola etilen-glikol u omjeru 1:1 (engl. *Etylen-Glycol-Water*, EGW 50/50)
- Ulazna temperature rashladne tekućine: 60 °C
- Protok rashladne tekućine: 10 l/min

4.4. I topologija IPM motora

I topologija IPM motora, poznata i kao topologija s ravnim magnetima (engl. *Flat Type*) implementirana je u Motor-CAD-u konfiguracijom Interior Flat (Web) predložka za BPM (engl. *Brushless Permanent Magnet*) tip motora.

Vrijednosti Motor-CAD parametara navedeni su u tablici (Tablica 4.1).

Tablica 4.1 Vrijednosti Motor-CAD parametara

Motor-CAD parametar	Opis	Vrijednost
Slot Number	Broj utora [mm]	36
Housing Dia	Promjer kućišta [mm]	175,0
Stator Lam Dia	Promjer statora [mm]	155,0
Stator Bore	Promjer provrta statora [mm]	100,0
Tooth Width	Širina zuba [mm]	5,0

Sloth Depth	Dubina utora [mm]	15,0
Slot Opening	Širina otvora utora [mm]	2,5
Pole Number	Broj polova	6
Magnet Layers	Broj slojeva	1
Magnet Thickness	Širina magneta [mm]	4,0
Magnet Width	Duljina magneta [mm]	30,0
Magnet Segments	Broj segmenata magneta (radijalno)	2
Bridge Thickness	Širina rubnog mosta [mm]	2,0
Web Thickness	Širina vodiča magnetskog toka [mm]	4,0
L1 Pole Arc [ED]	Luk pola [el °]	135
Airgap	Zračni raspor [mm]	1,0
Shaft Dia	Promjer osovine [mm]	25,0
Motor Length	Ukupna duljina motora [mm]	246,0
Stator Lam Length	Duljina statorskog paketa [mm]	166,0
Rotor Lam Length	Duljina rotorskog paketa [mm]	166,0
Magnet Length	Aksijalna duljina magneta [mm]	166,0
Magnet Segments	Broj segmenata magneta (aksijalno)	12
Turns	Broj zavoja po svitku	22
Copper Slot Fill	Ispunjenost utora bakrom	0,4
Stator Lam (Back Iron)	Čelični lim statora	M235-35A
Armature Winding [Active]	Namot	Copper (Pure)
Rotor Lam (Back Iron)	Čelični lim rotora	M235-35A
Magnet	Vrsta magneta	N42UH

Radijalni i aksijalni presjek inicijalnog dizajna prikazan je na slici (Slika 4.2).

Vrijednosti izračunatih performansi koje su dio inicijalnih zahtjeva, zajedno s pripadnim ograničenjima, navedene su u tablici (Tablica 4.2).

Vrijednosti izračunatih ciljnih performansi navedeni su u tablici (

Tablica 4.3). Ciljne performanse su one performanse koje će prilikom optimizacije biti dio funkcije cilja.

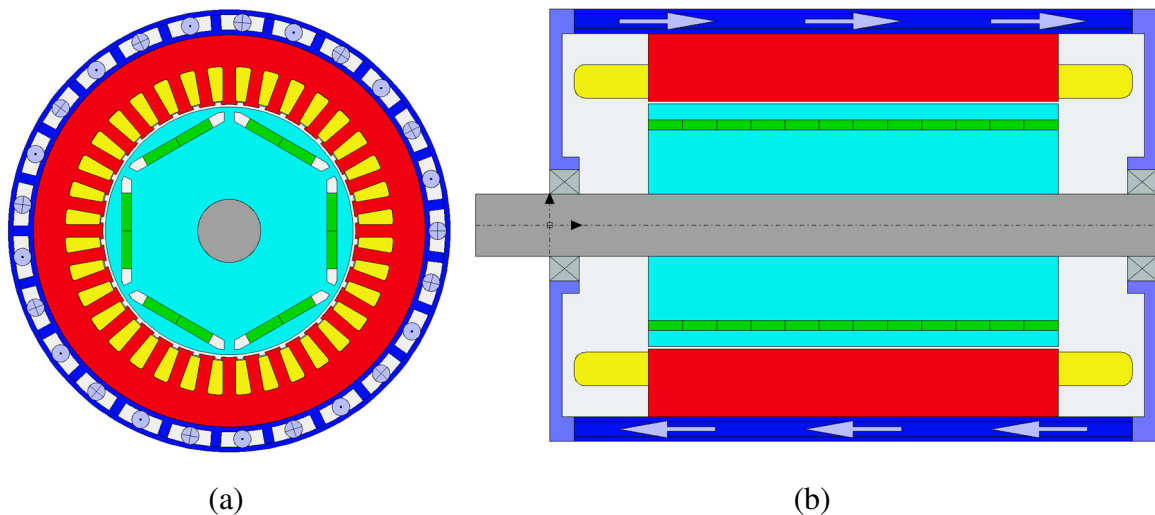
Mape korisnosti u moment–brzina i snaga–brzina ravninama prikazane su na slici (Slika 4.3).

Mape omjera induktiviteta L_q/L_d i udjela reluktantnog momenta u ukupnom elektromagnetskom momentu u moment–brzina ravnini prikazane su na slici (Slika 4.4).

Gubici u željezu, bakru i magnetima te ukupni gubici na faznim strujama I_n i I_{s1} prikazani su na slici (Slika 4.5).

Mape gubitaka i faktora snage u moment–brzina ravnini prikazane su na slici (Slika 4.6).

Raspodjela temperatura u trajnom radu i ograničenja snage s obzirom na maksimalno dozvoljene temperature prikazane su na slici (Slika 4.7).



Slika 4.2 Radijalni (a) i aksijalni (b) presjek inicijalnog dizajna IPM motora s I topologijom

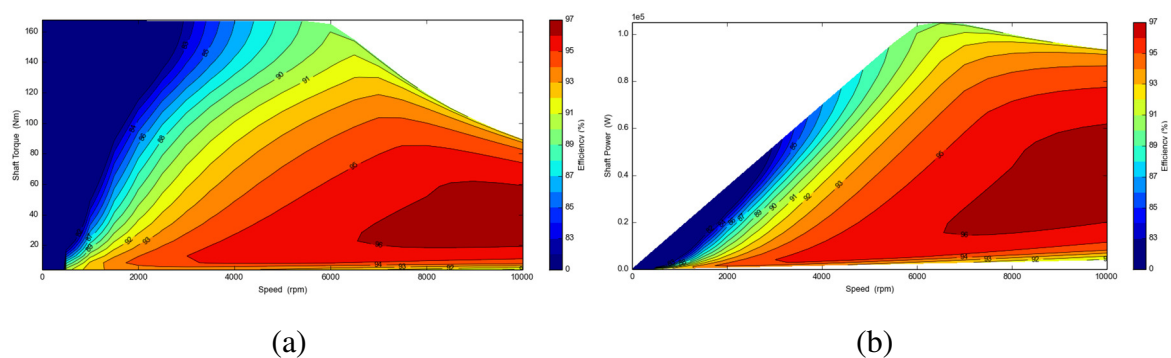
Tablica 4.2 Vrijednosti performansi koje su dio inicijalnih zahtjeva

Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna snaga	P_{max} [kW]	105,1	100
Moment na osovini pri rubnoj brzini	M_{cs} [Nm]	166,6	160
Snaga na osovini pri rubnoj brzini	P_{cs} [kW]	87,3	83,3
Moment na osovini pri maksimalnoj brzini	M_{nmax} [Nm]	89,1	80
Snaga na osovini pri maksimalnoj brzini	P_{nmax} [kW]	93,3	80

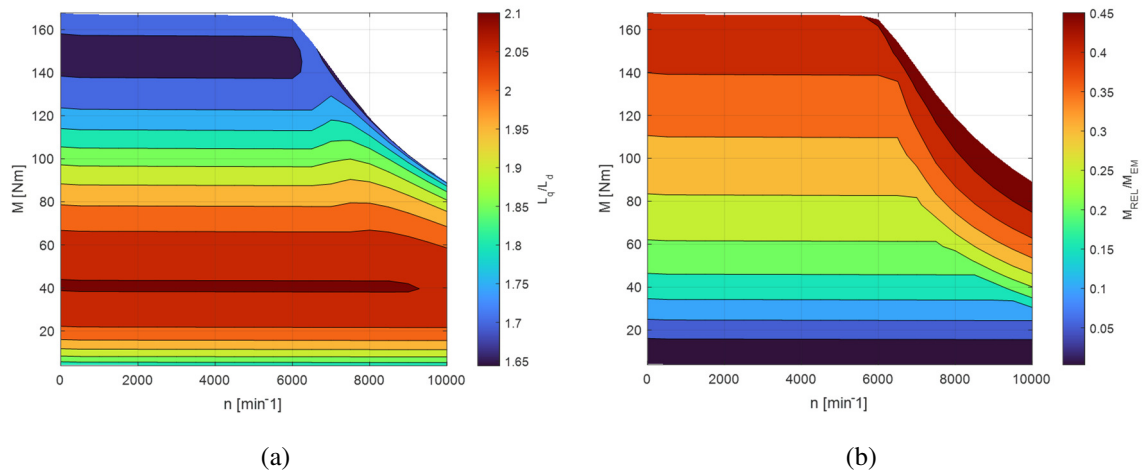
Maksimalna snaga u trajnom radu (pogon S1)	$P_{S1\ max} [kW]$	72,7	60
Maksimalna temperatura namota u S1 pogonu	$\vartheta_n [^{\circ}C]$	157,8	180
Maksimalna temperatura magneti u S1 pogonu	$\vartheta_m [^{\circ}C]$	120,5	160
Ukupni promjer	$D [mm]$	175,0	260
Ukupna duljina	$L [mm]$	246,0	260
Masa	$m [kg]$	22,1	
Cijena	$c [\$]$	193,3	
Fazna struja pri P_{cs} i n_{max} (S1 radna točka)	$I_{S1} [A]$	120	

Tablica 4.3 Vrijednosti ciljnih performansi

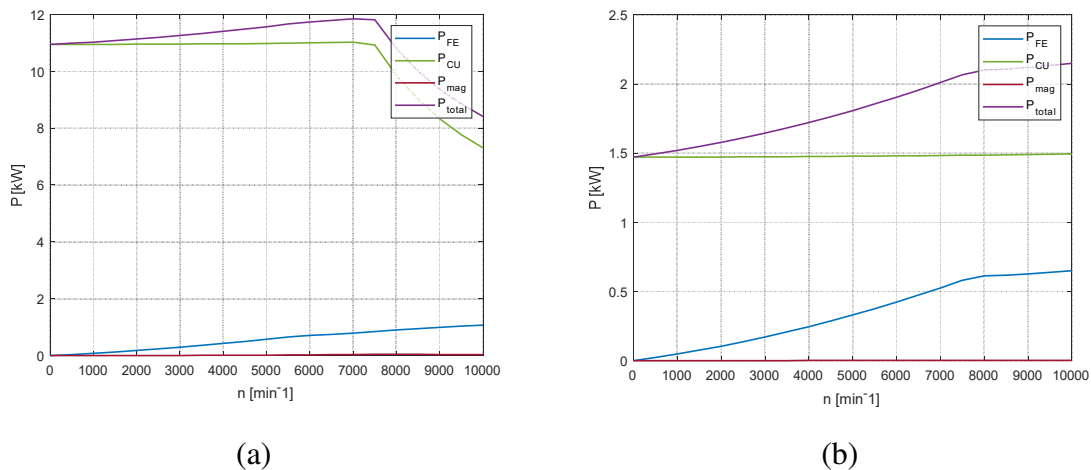
Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna korisnost	$\eta_{max} [\%]$	96,57	95
Omjer momenta i cijene	$M_{CS}/c [Nm/\$]$	0,86	
Omjer momenta za i mase	$M_{CS}/m [Nm/kg]$	7,56	



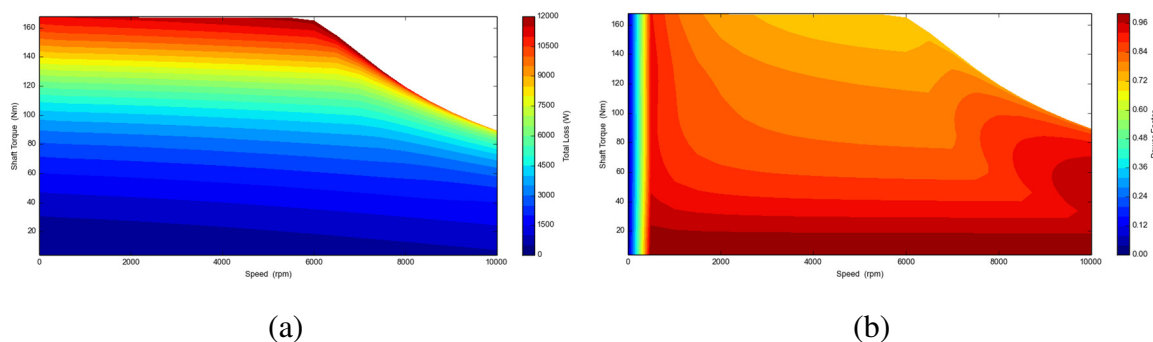
Slika 4.3 Mape korisnosti u moment-brzina (a) i snaga-brzina (b) ravninama



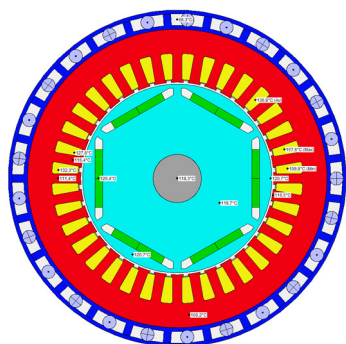
Slika 4.4 Mape omjera induktiviteta L_q/L_d (a) i udjela reluktantnog momenta u ukupnom elektromagnetskom omjeru (b) prikazane u moment–brzina ravnini



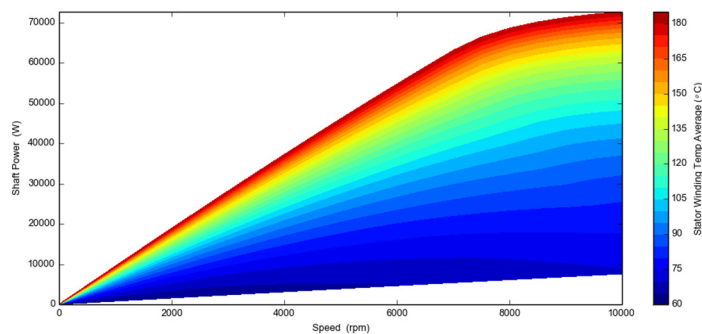
Slika 4.5 Gubici na faznim strujama I_n (a) i I_{S1} (b)



Slika 4.6 Mape gubitaka (a) i faktora snage (b) u moment–brzina ravnini



(a)



(b)

Slika 4.7 Radijalni presjek raspodjele temperatura u trajnom radu (a) i ograničenja snage u trajnom radu s obzirom na maksimalno dozvoljene temperature (b)

4.5. V topologija IPM motora

V topologija IPM motora implementirana je u Motor-CAD-u konfiguracijom Interior V (Web) predložka s jednim slojem magneta za BPM tip motora.

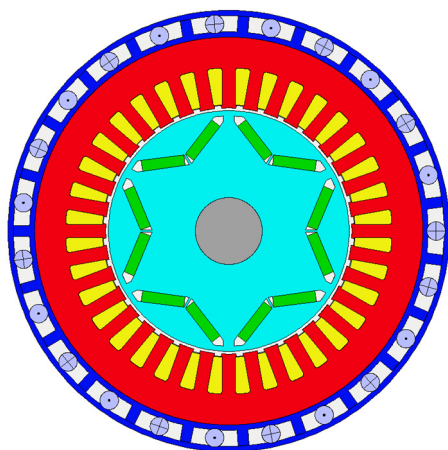
Vrijednosti Motor-CAD parametara navedeni su u tablici (Tablica 4.4).

Tablica 4.4 Vrijednosti Motor-CAD parametara

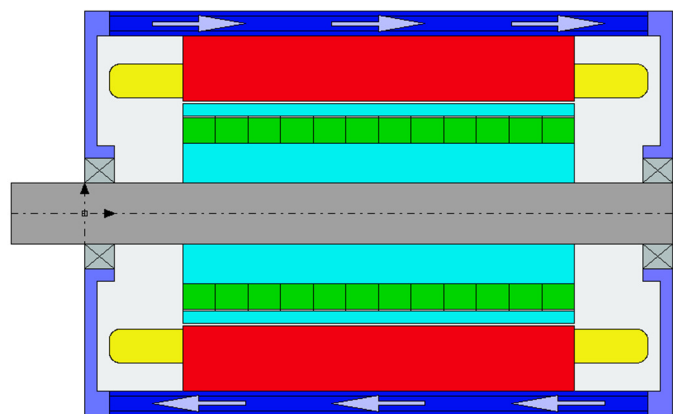
Motor-CAD parametar	Opis	Vrijednost
Slot Number	Broj utora [mm]	36
Housing Dia	Promjer kućišta [mm]	165,0
Stator Lam Dia	Promjer statora [mm]	145,0
Stator Bore	Promjer provrta statora [mm]	92,0
Tooth Width	Širina zuba [mm]	5,0
Sloth Depth	Dubina utora [mm]	15,0
Slot Opening	Širina otvora utora [mm]	2,5
Pole Number	Broj polova	6
Magnet Layers	Broj slojeva	1
L1 Magnet Thickness	Širina magneta [mm]	4,0
L1 Magnet Bar Width	Duljina magneta [mm]	16,0
L1 Bridge Thickness	Širina rubnog mosta [mm]	2,0
L1 Web Thickness	Širina vodiča magnetskog toka [mm]	4,0

L1 Web Length	Duljina vodiča magnetskog toka [mm]	2,0
L1 Pole V Angle	Kut između magneta [°]	135
L1 Pole Arc [ED]	Luk pola [el °]	135
L1 Magnet Post	Širina središnjeg mosta [mm]	0,8
L1 Magnet Separation	Udaljenost između magneta [mm]	0,3
L1 Magnet Segments	Broj segmenata magneta (radijalno)	1
Airgap	Zračni raspor [mm]	1,0
Shaft Dia	Promjer osovine [mm]	25,0
Motor Length	Ukupna duljina motora [mm]	246,0
Stator Lam Length	Duljina statorskog paketa [mm]	166,0
Rotor Lam Length	Duljina rotorskog paketa [mm]	166,0
Magnet Length	Aksijalna duljina magneta [mm]	166,0
Magnet Segments	Broj segmenata magneta (aksijalno)	12
Turns	Broj zavoja po svitku	22
Copper Slot Fill	Ispunjenost utora bakrom	0,4
Stator Lam (Back Iron)	Čelični lim statora	M235-35A
Armature Winding [Active]	Namot	Copper (Pure)
Rotor Lam (Back Iron)	Čelični lim rotora	M235-35A
Magnet	Vrsta magneta	N42UH

Slijede rezultati izračuna prezentirani kao u poglavlju 4.



(a)



(b)

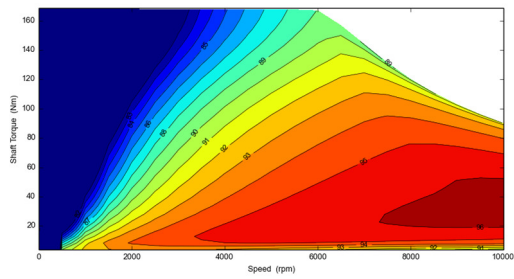
Radijalni (a) i aksijalni (b) presjek inicijalnog dizajna IPM motora s V topologijom

Tablica 4.5 Vrijednosti performansi koje su dio inicijalnih zahtjeva

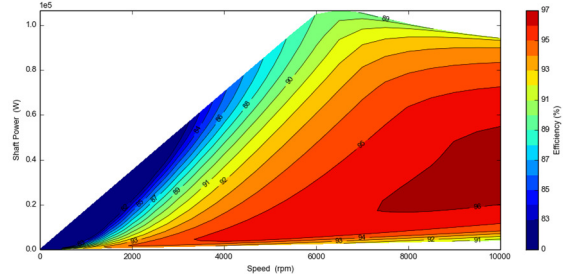
Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna snaga	P_{max} [kW]	106,5	100
Moment na osovini pri rubnoj brzini	M_{cs} [Nm]	167,5	160
Snaga na osovini pri rubnoj brzini	P_{cs} [kW]	87,7	83,3
Moment na osovini pri maksimalnoj brzini	M_{nmax} [Nm]	89,9	80
Snaga na osovini pri maksimalnoj brzini	P_{nmax} [kW]	94,1	80
Maksimalna snaga u trajnom radu (pogon S1)	$P_{S1 max}$ [kW]	67,3	60
Maksimalna temperatura namota u S1 pogonu	ϑ_n [°C]	174,9	180
Maksimalna temperatura magnetu u S1 pogonu	ϑ_m [°C]	129,4	160
Ukupni promjer	D [mm]	165,0	260
Ukupna duljina	L [mm]	240,0	260
Masa	m [kg]	18,7	
Cijena	c [\$]	187,2	
Fazna struja pri P_{cs} i n_{max} (S1 radna točka)	I_{S1} [A]	110	

Tablica 4.6 Vrijednosti ciljnih performansi

Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna korisnost	η_{max} [%]	96,38	95
Omjer momenta i cijene	M_{cs}/c [Nm/\$]	0,89	
Omjer momenta za i mase	M_{cs}/m [Nm/kg]	8,94	

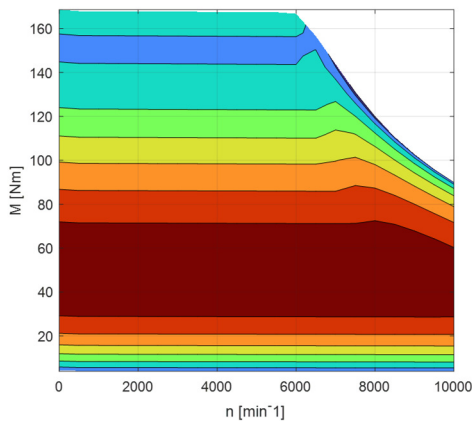


(a)

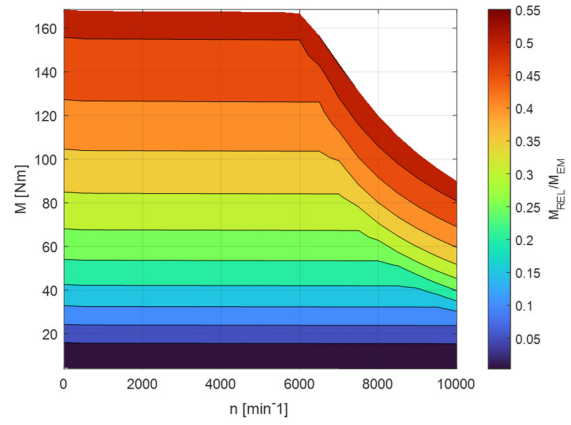


(b)

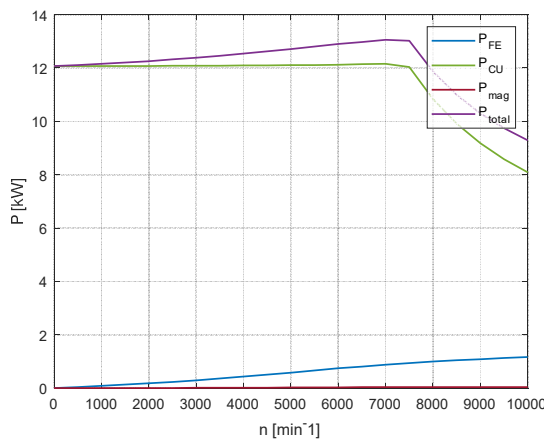
Slika 4.8 Mape korisnosti u moment–brzina (a) i snaga–brzina (b) ravninama



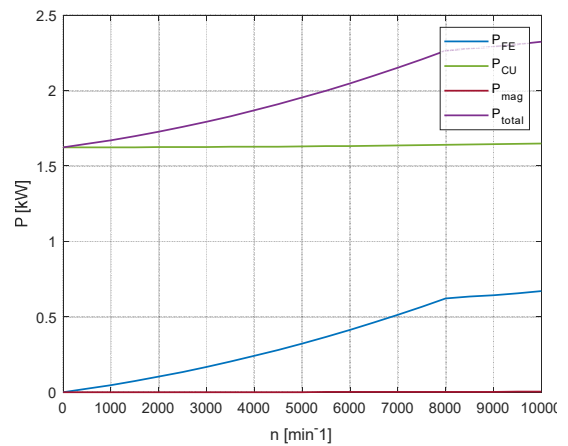
(a)



(b)

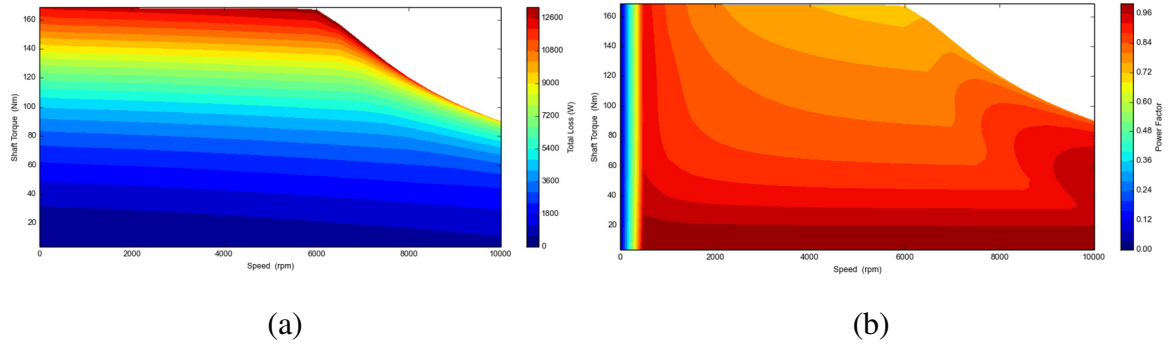
Slika 4.9 Mape omjera induktiviteta L_q/L_d (a) i udjela reluktantnog momenta u ukupnom elektromagnetskom omjeru (b) prikazane u moment–brzina ravnini

(a)

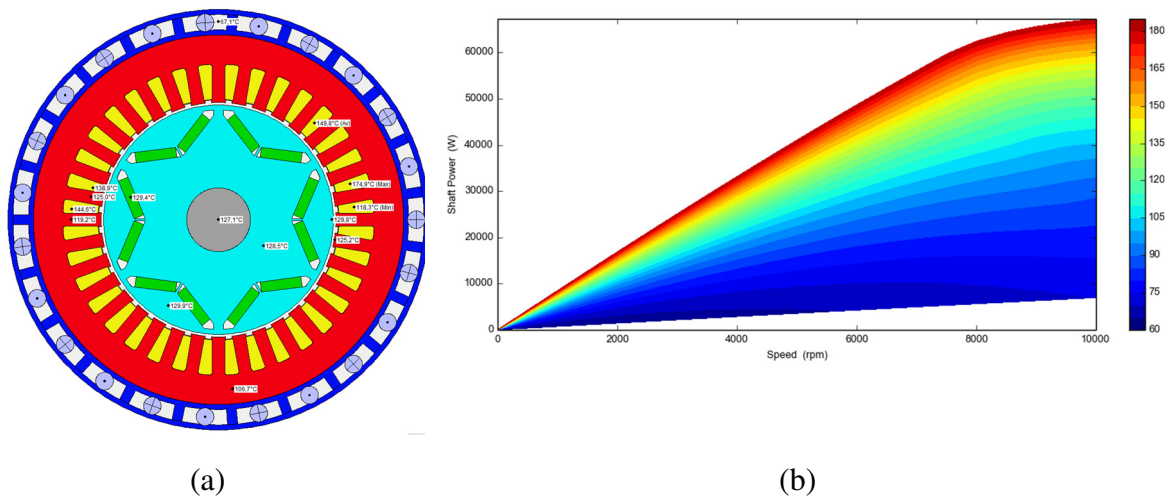


(b)

Slika 4.10 Gubici na faznim strujama I_n (a) i I_{s1} (b)



Slika 4.11 Mape gubitaka (a) i faktora snage (b) u moment–brzina ravnini



Slika 4.12 Radijalni presjek raspodjele temperatura u trajnom radu (a) i ograničenja snage u trajnom radu s obzirom na maksimalno dozvoljene temperature (b)

4.6. D topologija IPM motora

D topologija IPM motora implementirana je u Motor-CAD-u konfiguracijom Interior V (Web) predložka s dva sloja magneta za BPM tip motora.

Vrijednosti Motor-CAD parametara navedeni su u tablici (Tablica 4.7).

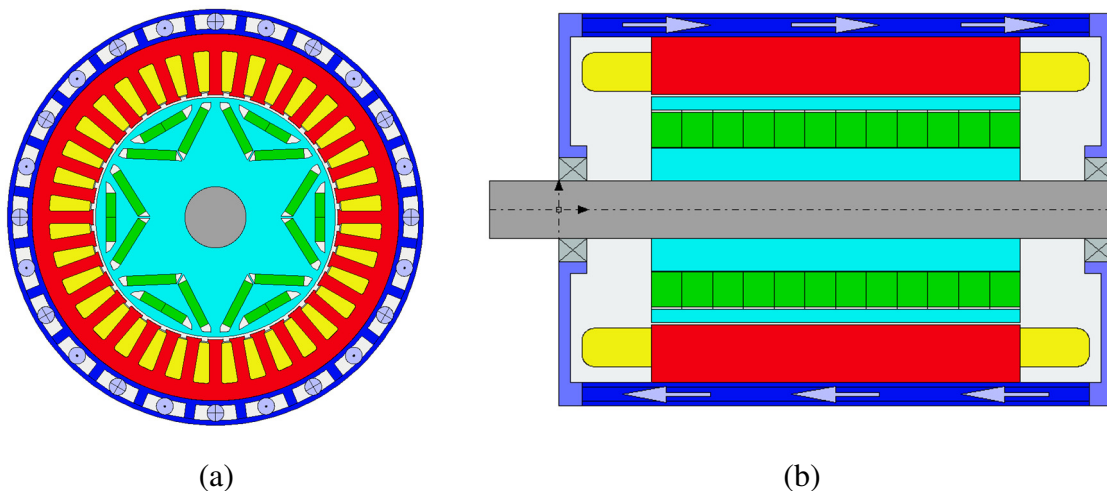
Tablica 4.7 Vrijednosti Motor-CAD parametara

Motor-CAD parametar	Opis	Vrijednost
Slot Number	Broj utora [mm]	36
Housing Dia	Promjer kućišta [mm]	170,0
Stator Lam Dia	Promjer statora [mm]	150,0
Stator Bore	Promjer provrta statora [mm]	100,0

Tooth Width	Širina zuba [mm]	5,0
Sloth Depth	Dubina utora [mm]	18,0
Slot Opening	Širina otvora utora [mm]	2,5
Pole Number	Broj polova	6
Magnet Layers	Broj slojeva	2
L1 Magnet Thickness	Širina magneta 1. (unutarnjeg) sl. [mm]	4,0
L1 Magnet Bar Width	Duljina magneta 1. sl [mm]	20,0
L1 Bridge Thickness	Širina rubnog mosta 1. sl [mm]	2,0
L1 Web Thickness	Širina vodiča mag. toka 1. sl [mm]	4,0
L1 Web Length	Duljina vodiča mag toka 1. sl [mm]	2,0
L1 Pole V Angle	Kut između magneta 1. sl [°]	115
L1 Pole Arc [ED]	Luk pola 1. sl [el °]	140
L1 Magnet Post	Širina središnjeg mosta 1. sl [mm]	0,8
L1 Magnet Separation	Udaljenost između magneta 1. sl [mm]	0,15
L1 Magnet Segments	Broj seg. magneta 1. sl (radijalno)	1
L2 Magnet Thickness	Širina magneta 2. sl [mm]	4,0
L2 Magnet Bar Width	Duljina magneta 2. sl [mm]	10,0
L2 Bridge Thickness	Širina rubnog mosta 2. sl [mm]	2,0
L2 Web Thickness	Širina vodiča mag toka 2. sl [mm]	19,6
L2 Web Length	Duljina vodiča mag toka 2. sl [mm]	2,0
L2 Pole V Angle	Kut između magneta 2. sl [°]	180
L2 Pole Arc [ED]	Luk pola 2. sl [el °]	120
L2 Magnet Post	Širina središnjeg mosta 2. sl [mm]	0
L2 Magnet Separation	Udaljenost između magneta 2. sl [mm]	0
L2 Magnet Segments	Broj seg. magneta 2. sl (radijalno)	1
Airgap	Zračni raspor [mm]	1,0
Shaft Dia	Promjer osovine [mm]	25,0
Motor Length	Ukupna duljina motora [mm]	240,0
Stator Lam Length	Duljina statorskog paketa [mm]	160,0
Rotor Lam Length	Duljina rotorskog paketa [mm]	160,0

Magnet Length	Aksijalna duljina magneta [mm]	160,0
Magnet Segments	Broj segmenata magneta (aksijalno)	12
Turns	Broj zavoja po svitku	27
Copper Slot Fill	Ispunjenost utora bakrom	0,4
Stator Lam (Back Iron)	Čelični lim statora	M235-35A
Armature Winding [Active]	Namot	Copper (Pure)
Rotor Lam (Back Iron)	Čelični lim rotora	M235-35A
Magnet	Vrsta magneta	N42UH

Slijede rezultati izračuna prezentirani kao u poglavlju 4.



Slika 4.13 Radijalni (a) i aksijalni (b) presjek inicijalnog dizajna IPM motora s D topologijom

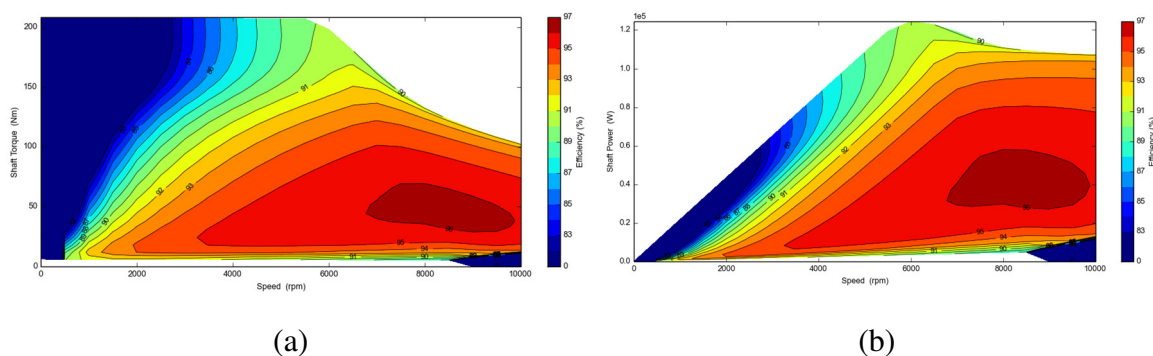
Tablica 4.8 Vrijednosti performansi koje su dio inicijalnih zahtjeva

Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna snaga	P_{max} [kW]	124,5	100
Moment na osovini pri rubnoj brzini	M_{cs} [Nm]	207,1	160
Snaga na osovini pri rubnoj brzini	P_{cs} [kW]	108,5	83,3
Moment na osovini pri maksimalnoj brzini	M_{nmax} [Nm]	102,3	80
Snaga na osovini pri maksimalnoj brzini	P_{nmax} [kW]	107,2	80

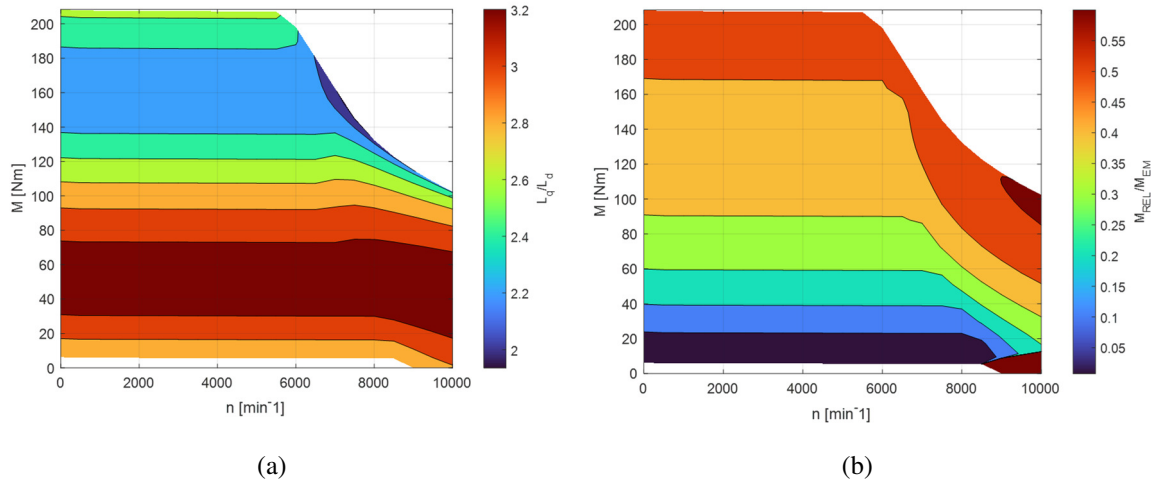
Maksimalna snaga u trajnom radu (pogon S1)	$P_{S1\ max}[kW]$	69,1	60
Maksimalna temperatura namota u S1 pogonu	$\vartheta_n [^{\circ}C]$	171,8	180
Maksimalna temperatura magneti u S1 pogonu	$\vartheta_m [^{\circ}C]$	142,5	160
Ukupni promjer	$D [mm]$	170,0	260
Ukupna duljina	$L [mm]$	240,0	260
Masa	$m [kg]$	19,7	
Cijena	$c [\$]$	316,5	
Fazna struja pri P_{cs} i n_{max} (S1 radna točka)	$I_{S1} [A]$	110	

Tablica 4.9 Vrijednosti ciljnih performansi

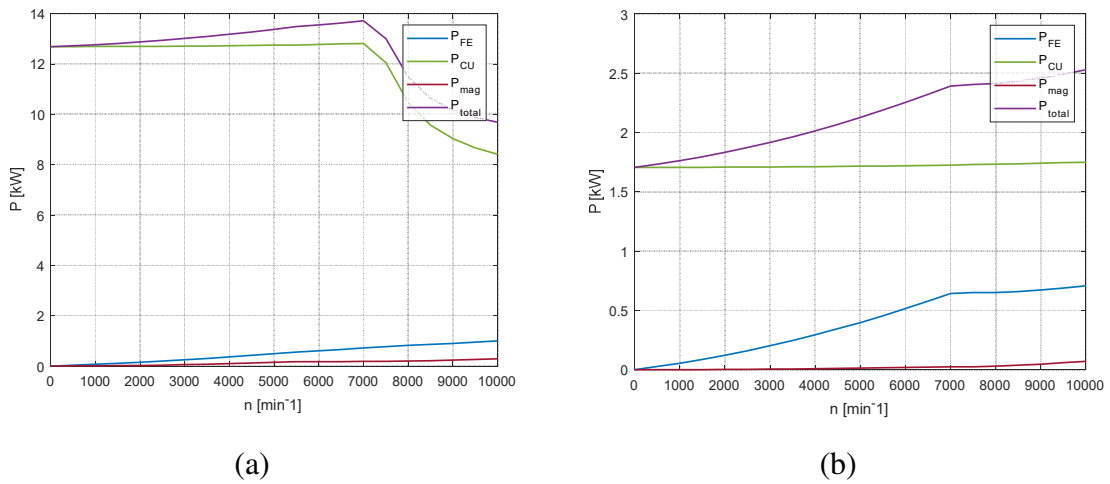
Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna korisnost	$\eta_{max} [\%]$	96,32	95
Omjer momenta i cijene	$M_{CS}/c [Nm/\$]$	0,65	
Omjer momenta za i mase	$M_{CS}/m [Nm/kg]$	10,53	



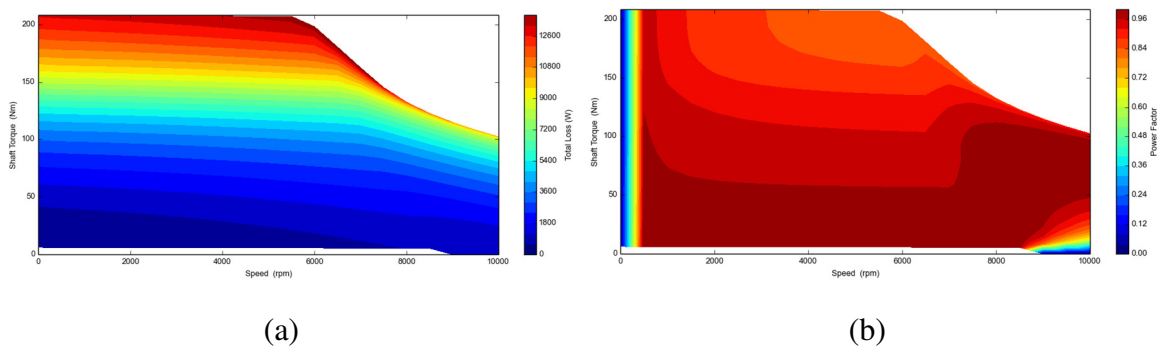
Slika 4.14 Mape korisnosti u moment–brzina (a) i snaga–brzina (b) ravninama



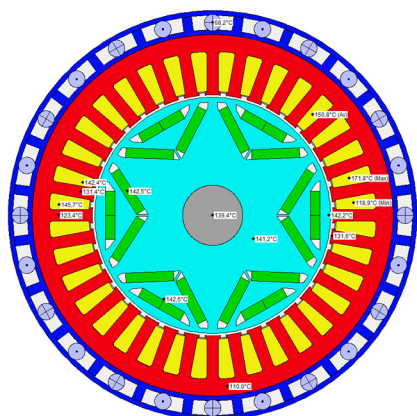
Slika 4.15 Mape omjera induktiviteta L_q/L_d (a) i udjela reluktantnog momenta u ukupnom elektromagnetskom omjeru (b) prikazane u moment–brzina ravnini



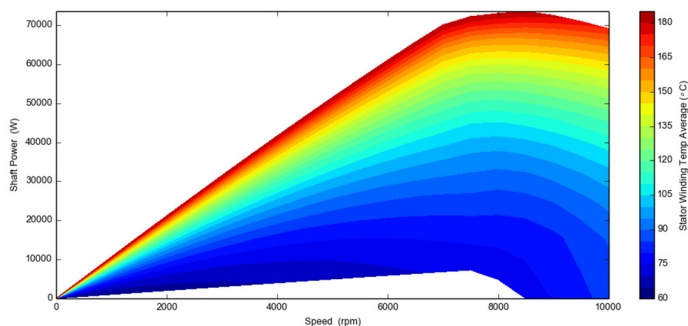
Slika 4.16 Gubici na faznim strujama I_n (a) i I_{s1} (b)



Slika 4.17 Mape gubitaka (a) i faktora snage (b) u moment–brzina ravnini



(a)



(b)

Slika 4.18 Radijalni presjek raspodjele temperatura u trajnom radu (a) i ograničenja snage u trajnom radu s obzirom na maksimalno dozvoljene temperature (b)

4.7. UII topologija PMSynRM motora

UII topologija PMSynRM motora implementirana je u Motor-CAD-u konfiguracijom Interior U-Shape predložka s tri sloja magneta za BPM tip motora.

Vrijednosti Motor-CAD parametara navedeni su u tablici (Tablica 4.10).

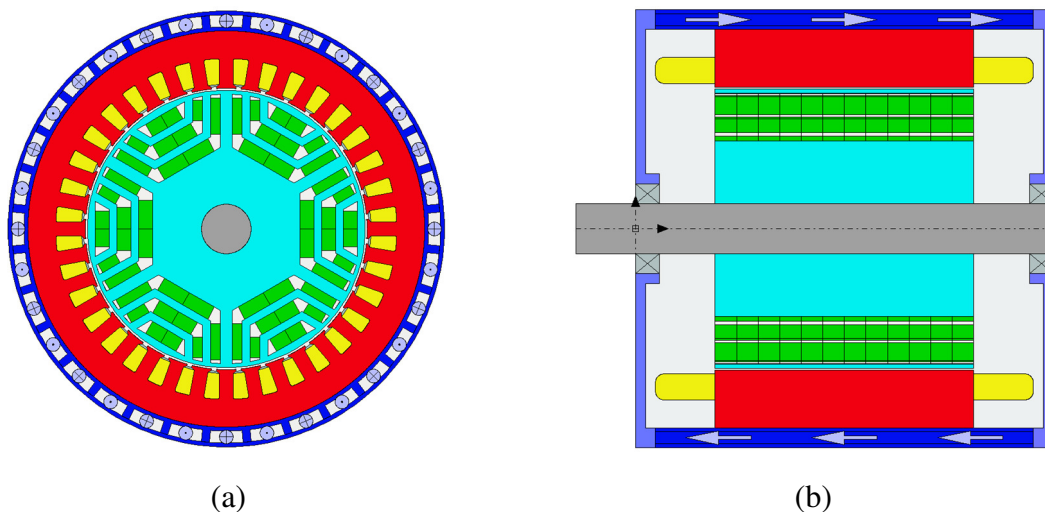
Tablica 4.10 Vrijednosti Motor-CAD parametara

Motor-CAD parametar	Opis	Vrijednost
Slot Number	Broj utora [mm]	36
Housing Dia	Promjer kućišta [mm]	220,0
Stator Lam Dia	Promjer statora [mm]	200,0
Stator Bore	Promjer provrta statora [mm]	142,0
Tooth Width	Širina zuba [mm]	7,0
Slot Depth	Dubina utora [mm]	15,0
Slot Opening	Širina otvora utora [mm]	2,5
Pole Number	Broj polova	6
Magnet Layers	Broj slojeva	3
L1 Diameter	Promjer 1. (unutarnjeg) sl. [mm]	74,2
L1 Bridge Thickness	Širina rubnog mosta 1. sl [mm]	2,0
L1 Web Thickness	Širina vodiča mag toka 1. sl. [mm]	6,0

L1 Outer Thickness	Širina vanjskih magneta 1. sl. [mm]	5,0
L1 Outer Mag Length	Duljina vanjskih magneta 1. sl. [mm]	18,5
L1 Outer Mag Segments	Broj seg vanjskih magneta 1. sl.	1
L1 Inner Thickness	Širina unutarnjeg magneta 1. sl. [mm]	7,0
L1 Inner Mag Length	Duljina unutarnjeg magneta 1. sl. [mm]	14,6
L1 Inner Mag Segments	Broj seg unutarnjeg magneta 1. sl.	1
L2 Diameter	Promjer 2. (srednjeg) sl. [mm]	96,2
L2 Bridge Thickness	Širina rubnog mosta 2. sl [mm]	2,0
L2 Web Thickness	Širina vodiča mag toka 2. sl. [mm]	24,0
L2 Outer Thickness	Širina vanjskih magneta 2. sl. [mm]	5,0
L2 Outer Mag Length	Duljina vanjskih magneta 2 sl. [mm]	10,22
L2 Outer Mag Segments	Broj seg. vanjskih magneta 2. sl.	1
L2 Inner Thickness	Širina unutarnjeg magneta 2. sl. [mm]	7,0
L2 Inner Mag Length	Duljina unutarnjeg magneta 2. sl. [mm]	11,0
L2 Inner Mag Segments	Broj seg unutarnjeg magneta 2. sl.	1
L3 Diameter	Promjer 3. (vanjskog) sl. [mm]	118,2
L3 Bridge Thickness	Širina rubnog mosta 3. sl [mm]	2,0
L3 Web Thickness	Širina vodiča mag toka 3. sl. [mm]	42,0
L3 Outer Thickness	Širina vanjskih magneta 3. sl. [mm]	0
L3 Outer Mag Length	Duljina vanjskih magneta 3 sl. [mm]	0
L3 Outer Mag Segments	Broj seg. vanjskih magneta 3. sl.	1
L3 Inner Thickness	Širina unutarnjeg magneta 3. sl. [mm]	7,0
L3 Inner Mag Length	Duljina unutarnjeg magneta 3. sl. [mm]	8,9
L3 Inner Mag Segments	Broj seg. unutarnjeg magneta 3. sl.	1
Airgap	Zračni raspor [mm]	1,0
Shaft Dia	Promjer osovine [mm]	25,0
Motor Length	Ukupna duljina motora [mm]	210,0
Stator Lam Length	Duljina statorskog paketa [mm]	130,0
Rotor Lam Length	Duljina rotorskog paketa [mm]	130,0
Magnet Length	Aksijalna duljina magneta [mm]	130,0

Magnet Segments	Broj segmenata magneta (aksijalno)	12
Turns	Broj zavoja po svitku	21
Copper Slot Fill	Ispunjenost utora bakrom	0,4
Stator Lam (Back Iron)	Čelični lim statora	M235-35A
Armature Winding [Active]	Namot	Copper (Pure)
Rotor Lam (Back Iron)	Čelični lim rotora	M235-35A
Magnet	Vrsta magneta	Y34

Slijede rezultati izračuna prezentirani kao u poglavlju 4.



Slika 4.19 Radijalni (a) i aksijalni (b) presjek inicijalnog dizajna IPM motora s D topologijom

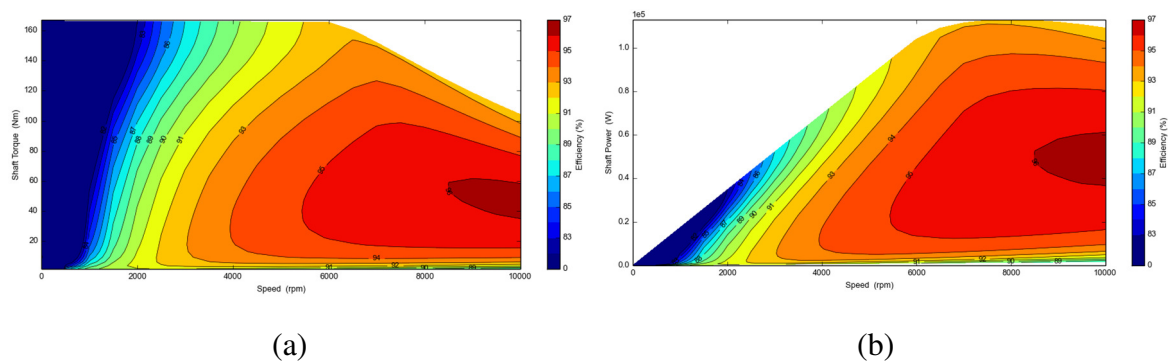
Tablica 4.11 Vrijednosti performansi koje su dio inicijalnih zahtjeva

Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna snaga	P_{max} [kW]	112,9	100
Moment na osovini pri rubnoj brzini	M_{cs} [Nm]	165,7	160
Snaga na osovini pri rubnoj brzini	P_{cs} [kW]	86,8	83,3
Moment na osovini pri maksimalnoj brzini	M_{nmax} [Nm]	104,2	80
Snaga na osovini pri maksimalnoj brzini	P_{nmax} [kW]	109,1	80

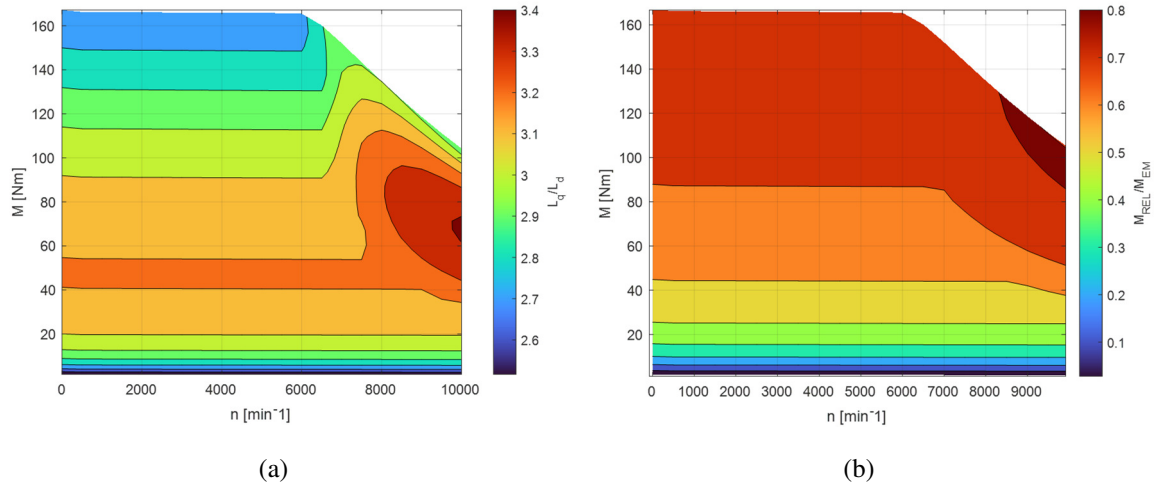
Maksimalna snaga u trajnom radu (pogon S1)	$P_{S1\ max}[kW]$	75,7	60
Maksimalna temperatura namota u S1 pogonu	$\vartheta_n [^{\circ}C]$	157,5	180
Maksimalna temperatura magnetu u S1 pogonu	$\vartheta_m [^{\circ}C]$	122,2	160
Ukupni promjer	$D [mm]$	220,0	260
Ukupna duljina	$L [mm]$	210,0	260
Masa	$m [kg]$	27,21	
Cijena	$c [\$]$	99,44	
Fazna struja pri P_{cs} i n_{max} (S1 radna točka)	$I_{s1} [A]$	130	

Tablica 4.12 Vrijednosti ciljnih performansi

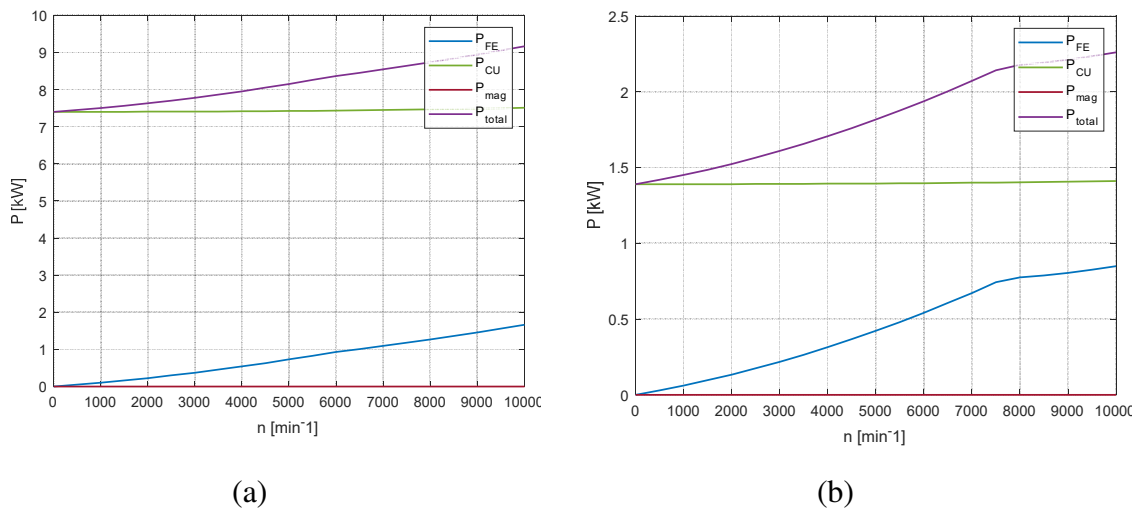
Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna korisnost	$\eta_{max} [\%]$	96,28	95
Omjer momenta i cijene	$M_{cs}/c [Nm/\$]$	1,67	
Omjer momenta za i mase	$M_{cs}/m [Nm/kg]$	6,10	



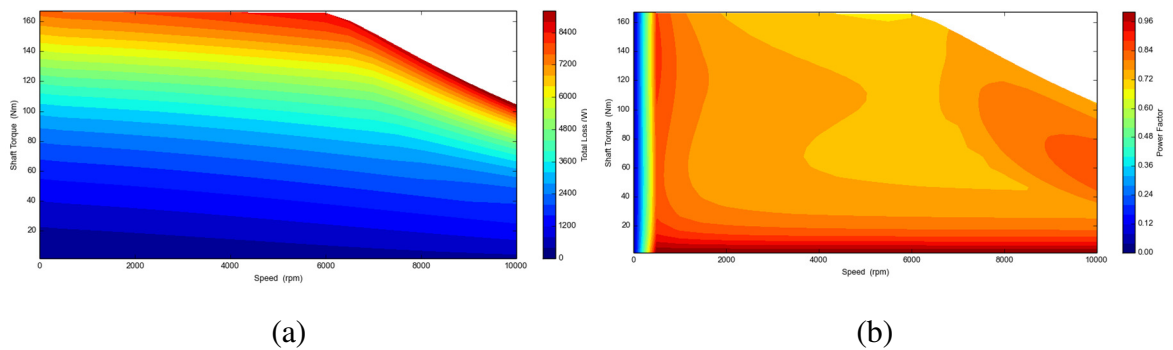
Slika 4.20 Mape korisnosti u moment–brzina (a) i snaga–brzina (b) ravninama



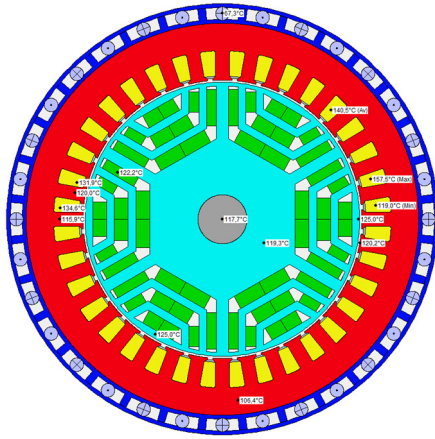
Slika 4.21 Mape omjera induktiviteta L_q/L_d (a) i udjela reluktantnog momenta u ukupnom elektromagnetskom omjeru (b) prikazane u moment–brzina ravnini



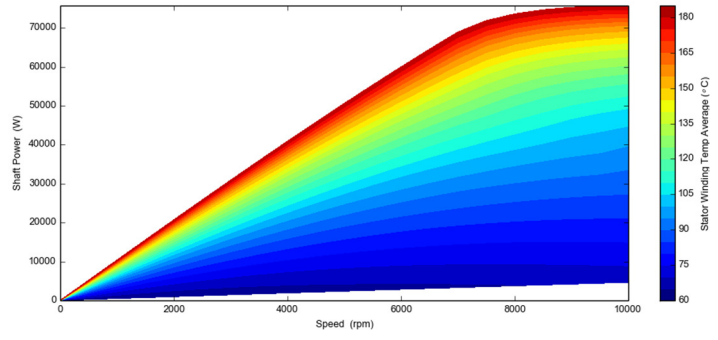
Slika 4.22 Gubici na faznim strujama I_n (a) i I_{s1} (b)



Slika 4.23 Mape gubitaka (a) i faktora snage (b) u moment–brzina ravnini



(a)



(b)

Slika 4.24 Radijalni presjek raspodjele temperatura u trajnom radu (a) i ograničenja snage s obzirom na maksimalno dozvoljene temperature (b)

5. Optimizacija

Kako bi se dobila što bolja svojstva odabranih dizajna motora kao što su efikasnost, gustoća momenta u odnosu na masu i gustoća momenta u odnosu na cijenu, te kako bi se odabrani dizajni motora mogli objektivno usporediti potrebno je podvrgnuti ih podjednako metodi optimizacije i usporediti rezultate.

5.1. MIDACO-SOLVER alat za optimizaciju

MIDACO-SOLVER (engl. *Mixed Integer Distributed Ant Colony Optimization*) je softver za rješavanje matematičkih optimizacijskih problema koji implementira prošireni algoritam optimizacije mravlje kolonije (engl. *Extended Ant Colony Optimization Algorithm*). Radi se o heurističkoj metodi koja stohastički aproksimira rješenje matematičkog problema. Može se koristiti na kontinuiranim (NLP), kombinatornim (IP) ili miješanim cjelobrojnim (engl. *Mixed Integer Non Linenar Problems*, skraćeno MINLP) optimizacijskim problemima.

Matematička formulacija općenitog miješano cjelobrojnog optimizacijskog problema navedena je u izrazu (5.1).

$$\begin{aligned} f(x, y), & \quad x \in \mathbb{R}^{n_{cont}}, y \in \mathbb{Z}^{n_{int}}, n_{cont}, n_{int} \in \mathbb{N} \\ g_i(x, y) = 0, & \quad i = 1, \dots, m_e \in \mathbb{N} \\ g_i(x, y) > 0, & \quad i = m_e + 1, \dots, m \in \mathbb{N} \\ x_l \leq x \leq x_u, & \quad (x_l, x_u \in \mathbb{R}^{n_{cont}}) \\ y_l \leq y \leq y_u, & \quad (y_l, y_u \in \mathbb{Z}^{n_{int}}) \end{aligned} \tag{5.1}$$

x je vektor kontinuiranih varijabli, y vektor diskretnih varijabli, $f(x, y)$ je vektor funkcija cilja koje treba minimizirati, $g_i(x, y)$ je vektor funkcija ograničenja, x_l i x_u su vektori donjih i gornjih granica kontinuiranih varijabli x a y_l i y_u su vektori donjih i gornjih granica diskretnih varijabli y . Vektor funkcija ograničenja sadrži ograničenja jednakosti i ograničenja nejednakosti.

Funkcije cilja i funkcije ograničenja tretiraju se kao crne kutije što otvara mogućnost korištenju numeričkih alata pri njihovom izračunu.

MIDACO-SOLVER uspješno je korišten u širokom spektru primjena: planiranje međuplanetarnih svemirskih misija, dizajn i kontrola svemirskih lansirnih vozila, satelitske konstelacije, optimizacija pozicije kamere u robotici, financijski modeli, strukturalna optimizacija podmornica itd. [16]

5.2. Postupak optimizacije

Za svaku od odabranih topologija motora obavljaju se po tri optimizacije svaka s po jednom funkcijom cilja:

$$f = -M_{cs}/c \quad (5.2)$$

$$f = -M_{cs}/m \quad (5.3)$$

$$f = -\eta_{max} \quad (5.4)$$

Izrazom (5.2) kao funkcija cilja formulirana je maksimizacija omjera momenta na rubnoj brzini i cijene motora. Izrazom (5.3) kao funkcija cilja formulirana je maksimizacija omjera momenta na rubnoj brzini i mase motora. Izrazom (5.4) kao funkcija cilja formulirana je maksimizacija maksimalne efikasnosti motora.

Funkcije ograničenja podjednako su definirane za svaku od optimizacija. Funkcija ograničenja jednakosti (5.5) osigurava da je geometrija motora validna. Funkcije ograničenja nejednakosti (5.6) do (5.14) osiguravaju ispunjavanje inicijalnih zahtjeva. Funkcije ograničenja nejednakosti (5.15) i (5.16) osiguravaju da je izračunata rubna brzina motora približno jednaka u zahtjevima definiranoj rubnoj brzini na kojoj se izračunavaju vrijednosti M_{cs} i P_{cs} .

$$g_1 = \text{geometrijaValidna} - 1 \quad (5.5)$$

$$g_2 = U_{DC \text{ zahtjev}} - U_{DC} \quad (5.6)$$

$$g_3 = M_{cs} - M_{cs \text{ zahtjev}} \quad (5.7)$$

$$g_4 = M_{nmax} - M_{nmax \text{ zahtjev}} \quad (5.8)$$

$$g_5 = P_{cs} - P_{cs \text{ zahtjev}} \quad (5.9)$$

$$g_6 = P_{nmax} - P_{nmax \text{ zahtjev}} \quad (5.10)$$

$$g_7 = P_{max} - P_{max\ zahtjev} \quad (5.11)$$

$$g_8 = \eta_{max} - \eta_{max\ zahtjev} \quad (5.12)$$

$$g_9 = \vartheta_m\ zahtjev - \vartheta_m \quad (5.13)$$

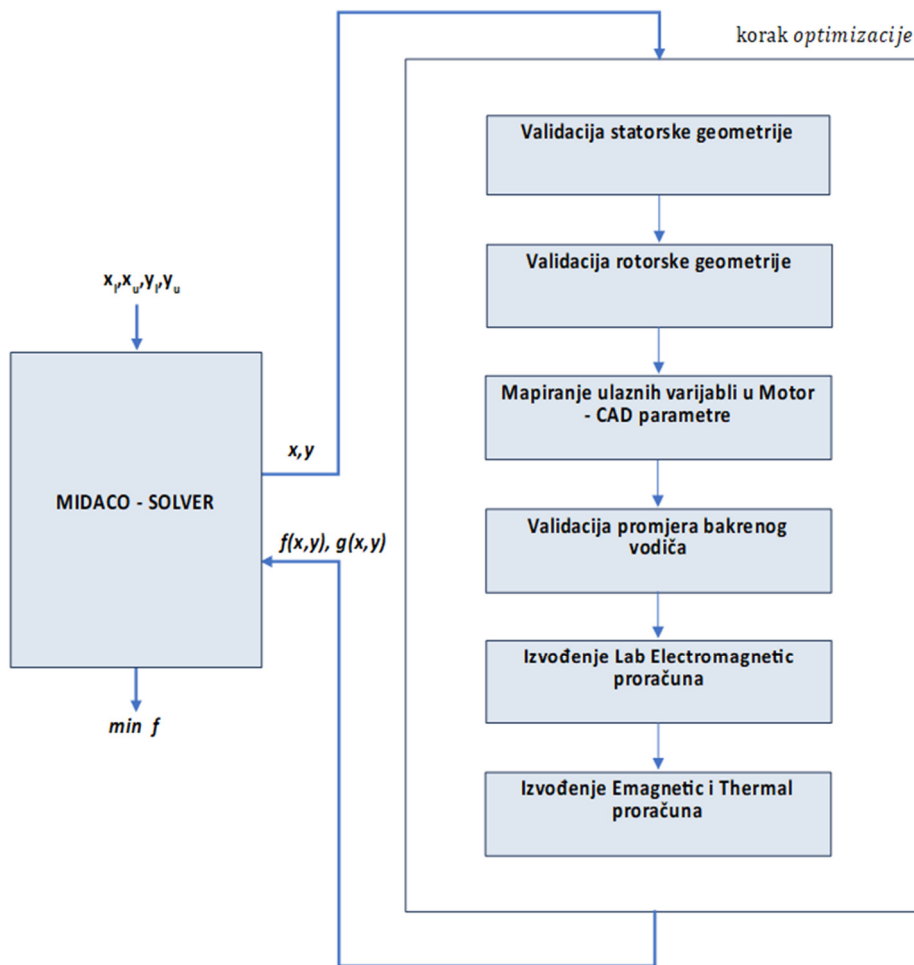
$$g_{10} = \vartheta_n\ zahtjev - \vartheta_n \quad (5.14)$$

$$g_{11} = n_{cs\ proracun} - n_{cs\ min\ zahtjev} \quad (5.15)$$

$$g_{12} = n_{cs\ max\ zahtjev} - n_{cs\ proracun} \quad (5.16)$$

Vektori ulaznih varijabli x i y s pripadnim ograničenjima definirani su za svaku od topologija motora.

Osnovni princip izvođenja optimizacije prikazan je na slici (Slika 5.1).



Slika 5.1 Osnovni princip izvođenja optimizacije

U svakoj iteraciji optimizacije solver odabire set parametara ograničen donjim i gornjim granicama ulaznih parametara i poziva izvršavanje koraka optimizacije. Korak optimizacije solveru vraća rezultate izvođenja funkcija ograničenja i funkcija cilja.

Svaki korak optimizacije sastoji se od:

- Validacija statorske geometrije – temelji se na geometrijskom modelu radijalne i aksijalne geometrije statora koja je jednaka za sve topologije motora
- Validacija rotorske geometrije – temelji se na geometrijskom modelu radijalne i aksijalne geometrije rotora koja je različita za svaku topologiju
- Mapiranje ulaznih varijabli u Motor-CAD parametre – ulazne varijable mapiraju se u Motor-CAD parametre na osnovi geometrijskih modela
- Validacija promjera bakrenog vodiča – nakon unosa parametara u Motor-CAD provjerava se promjer pojedinog vodiča kojim Motor-CAD postiže definiranu ispunjenost utora
- Izvođenje Lab Electromagnetic izračuna – prema opisu iz poglavlja 4
- Izvođenje Emagnetic Thermal izračuna – prema opisu iz poglavlja 4

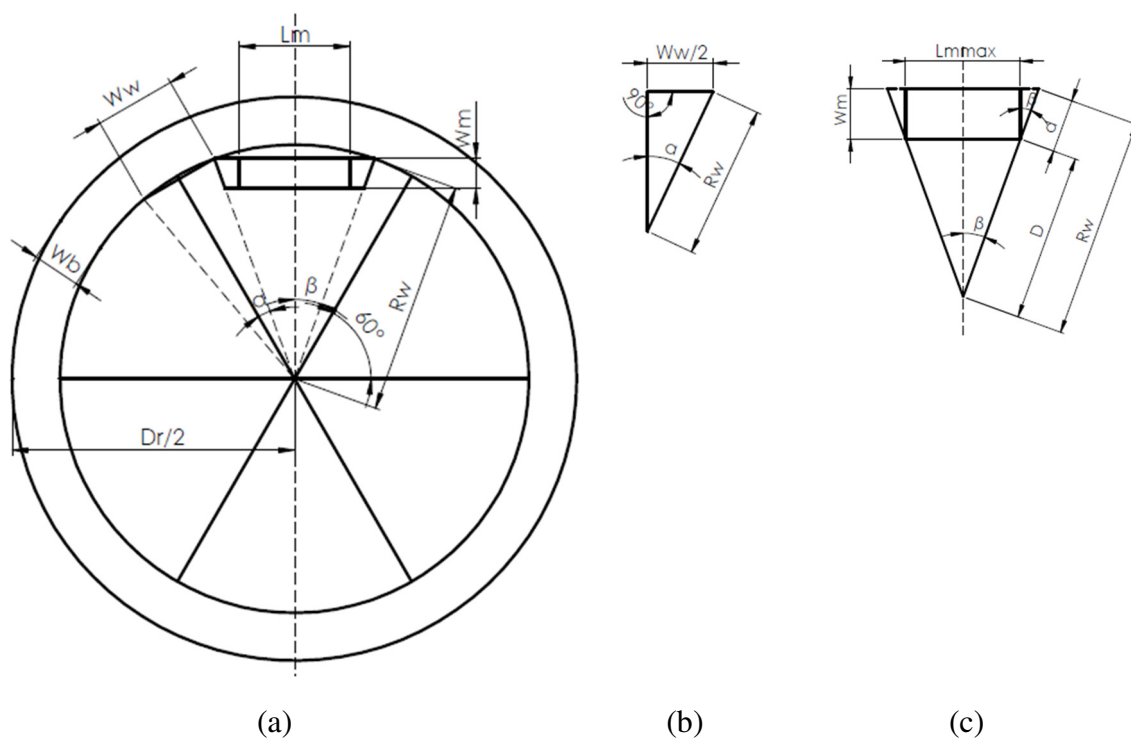
MIDACO-SOLVER implementiran je u C programskom jeziku. Optimizacija se izvršava putem programskog alata Matlab. U Matlabu je implementirana sva programska logika optimizacije: geometrijski modeli, mapiranje parametara, komunikacija s Motor-CAD-om, dohvat rezultata itd.

5.3. Princip validacije

Princip validacije optimizacijskih parametara putem geometrijskog modela prikazan je na primjeru izračuna maksimalne duljine magneta za I topologiju.

Radijalni geometrijski model I topologije prikazan je na slici (Slika 5.2). Parametri modela navedeni su u tablici (Tablica 5.1.).

Jednak princip koristi se i za potrebe mapiranja optimizacijskih parametara u Motor-CAD parametre.



Slika 5.2 Radijalni geometrijski model I topologije

Tablica 5.1 Parametri radijalnog geometrijskog modela za I topologiju

Oznaka	Opis
L_m	Duljina magneta
W_m	Širina magneta
W_w	Širina mreže
W_b	Širina mosta
R_w	Polumjer mreže
D_r	Promjer rotora

$$R_w = \frac{D_r}{2} - W_b \quad (5.17)$$

$$\sin \alpha = \frac{W_w/2}{R_w} \quad (5.18)$$

$$\beta = \frac{1}{2}(60 - 2\alpha) \quad (5.19)$$

$$d = \frac{W_m}{\cos\beta} \quad (5.20)$$

$$D = R_w - d \quad (5.21)$$

$$\sin\beta = \frac{L_{mmax}/2}{D} \quad (5.22)$$

$$L_{mmax} = 2D \sin\beta \quad (5.23)$$

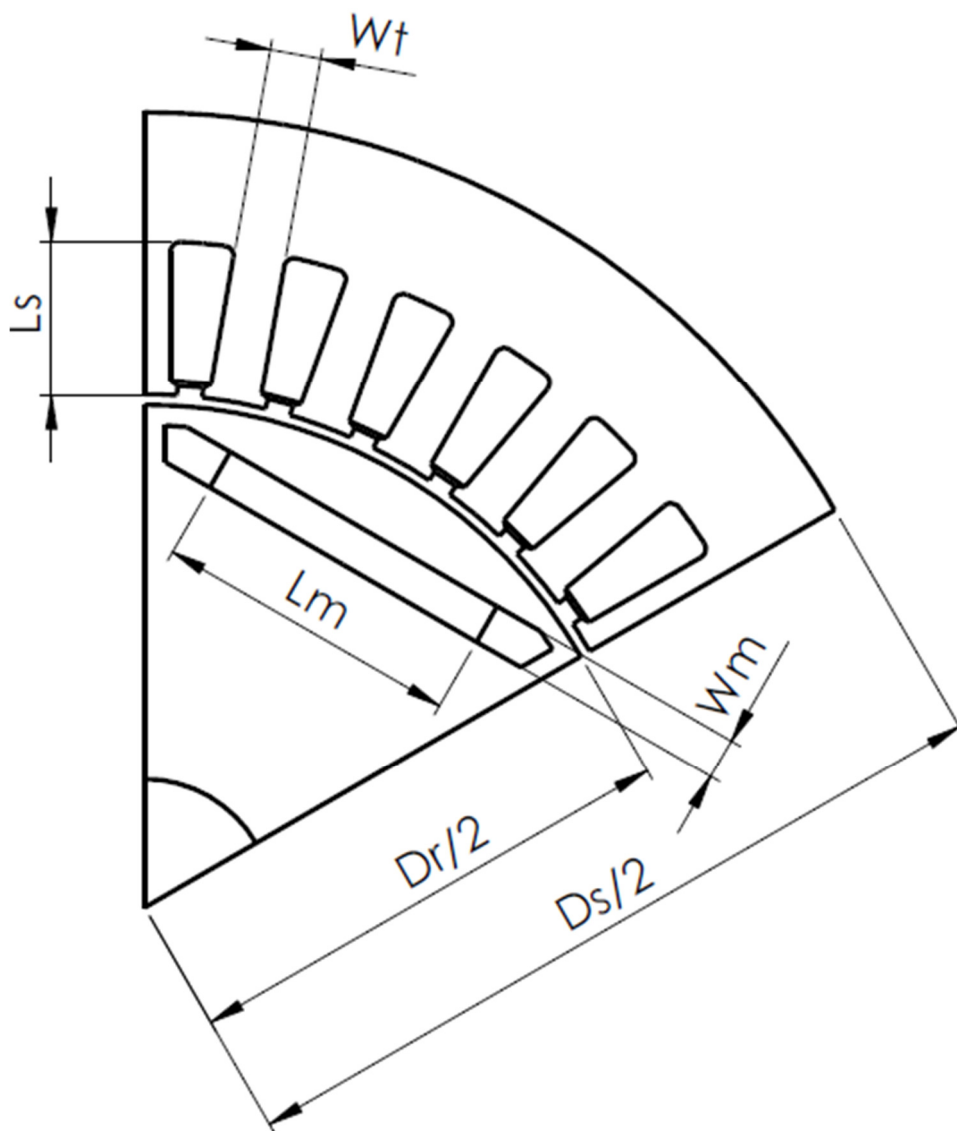
5.4. Optimizacija za I topologiju IPM motora

5.4.1. Parametri optimizacije

Za optimizaciju za I topologiju IPM motora vektor ulaznih varijabli y čine parametri navedeni u tablici (Tablica 5.2). Odgovarajući parametrizirani geometrijski model prikazan je na slici (Slika 5.3).

Tablica 5.2 Parametri optimizacije I topologije

Oznaka	Opis	Preciznost
D_s	Promjer statora	0,1 [mm]
D_r	Promjer rotora	0,1 [mm]
L_s	Dubina utora	0,1 [mm]
W_t	Širina zuba	0,1 [mm]
L	Aksijalna duljina statorskog i rotorskog paketa	0,1 [mm]
L_m	Duljina magneta	0,1 [mm]
W_m	Širina magneta	0,1 [mm]
n_t	Broj zavoja	1



Slika 5.3 Parametrizirani model radijalne geometrije

Inicijalna vrijednost parametara optimizacije kojom započinje svaka od optimizacija za I topologiju navedene su u tablici (Tablica 5.3). Njihovo mapiranje u parametre Motor-CAD rezultira inicijalnom konfiguracijom za I topologiju iz poglavlja 4.4.

Tablica 5.3 Inicijalne vrijednosti parametara optimizacije

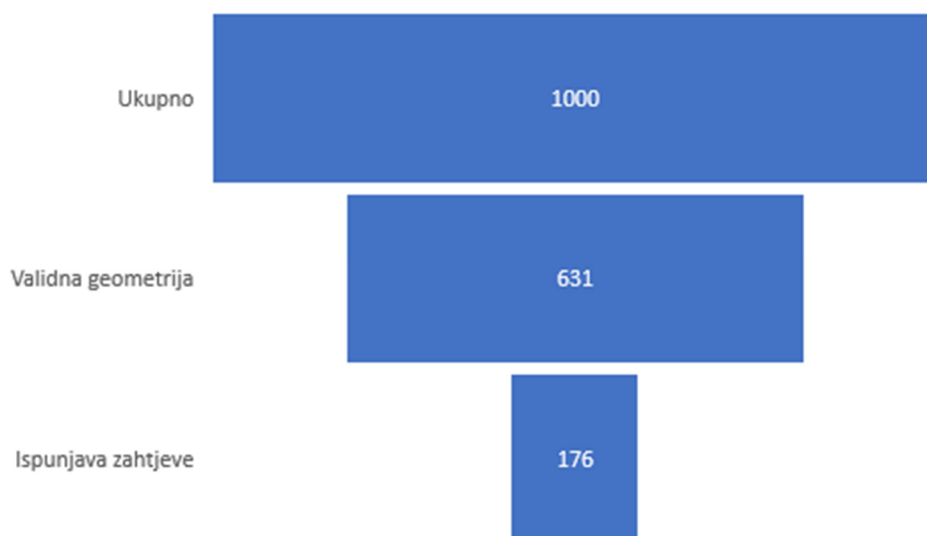
D_s	D_r	L_s	W_t	L	L_m	W_m	n_t
1550	980	150	50	1660	300	40	22

5.4.2. Rezultati optimizacije s ciljem moment/cijena

Osnovni statistički podaci o rezultatima izvođenja optimizacije s ciljem maksimizacije omjera moment/cijena navedeni su u tablici (Tablica 5.4) i prikazani na slici (Slika 5.4).

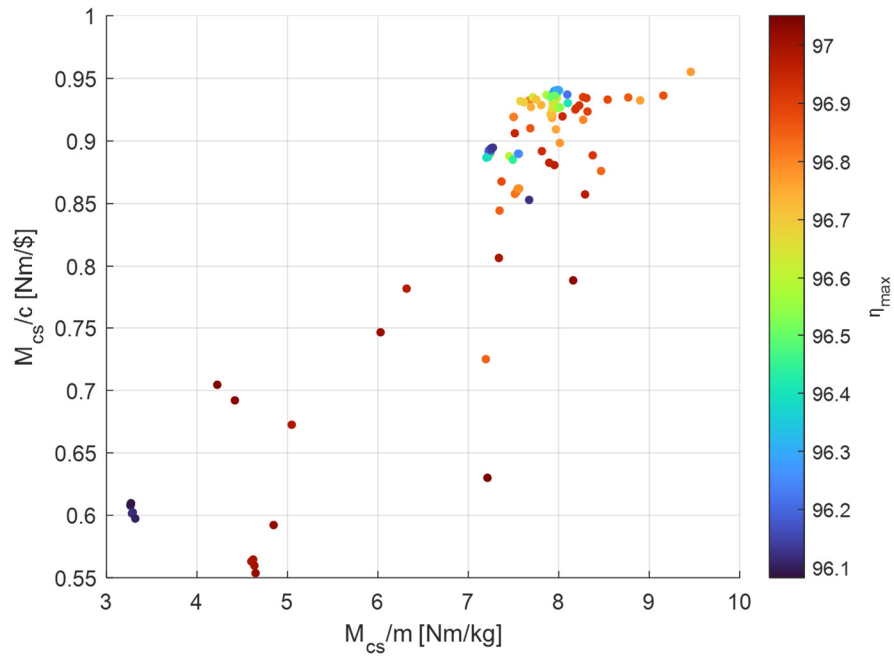
Tablica 5.4 Rezultati izvođenja optimizacije

Ukupan broj iteracija	1000
Konfiguracije s neispravnom geometrijom	36,9 %
Konfiguracije s ispravnom geometrijom koje ne ispunjavaju zahtjeve	45,5 %
Konfiguracije koje ispunjavaju zahtjeve (ispravne konfiguracije)	17,6 %
Optimalni iznos cilja moment/cijena	0,96 Nm/\$



Slika 5.4 Rezultati izvođenja optimizacije

Na slici (Slika 5.5) detaljan je prikaz raspodjele ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi: omjera momenta i cijene, omjera momenta i mase i maksimalne efikasnosti.



Slika 5.5 Raspodjela ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi

Ispis optimalnog rješenja MIDACO-SOLVER-a prikazan je na slici (Slika 5.6). Vektor ulaznih parametara naveden je u tablici (Tablica 5.5).

```

CURRENT BEST SOLUTION
-----
EVAL:          998,  TIME:   71155,  IFLAG:  -1
-----
f(x) =          -0.9552000000000000
-----
VIOLATION OF G(X)          0.000000000000
-----
g(  1) =          0.00000000 (EQUALITY CONSTR)
g(  2) =          1.20050000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  3) =          56.63820000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  4) =          12.63850000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  5) =          30.09820000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  6) =          17.01080000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  7) =          16.30740000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  8) =          0.00000000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  9) =          500.00000000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 10) =          1.56100000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 11) =          30.65800000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 12) =          20.12270000 (IN-EQUAL CONSTR)
-----
x(  1) =          1549.0000000000000000;  %  _____ x _____
x(  2) =          979.0000000000000000;  %  _____ x _____
x(  3) =          161.0000000000000000;  %  _____ x _____
x(  4) =          50.0000000000000000;   %  _____ x _____
x(  5) =          1712.0000000000000000; %  _____ x _____
x(  6) =          395.0000000000000000;  %  _____ x _____
x(  7) =          36.0000000000000000;   %  _____ x _____
x(  8) =          23.0000000000000000;   %  _____ x _____
-----
BOUNDS-PROFIL
-----
OPTIMIZATION FINISHED ---> MAXEVAL REACHED

```

Slika 5.6 Ispis optimalnog rješenja MIDACO-SOLVERA

Tablica 5.5 Parametri optimalne konfiguracije

D_s	D_r	L_s	W_t	L	L_m	W_m	n_t
1549	979	161	50	1712	395	36	23

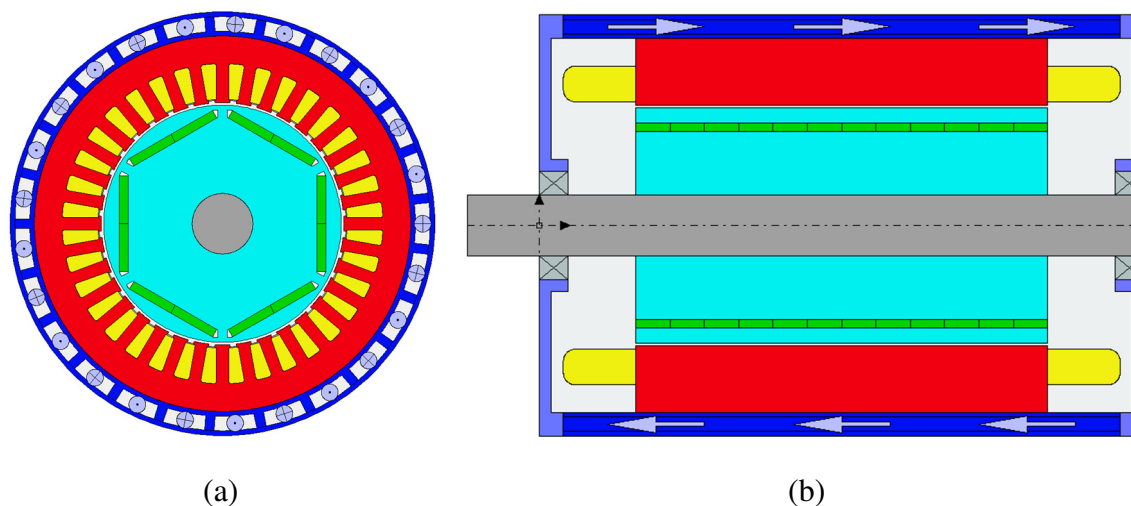
Motor-CAD parametri koji su mapiranjem parametara optimizacije promijenjeni u odnosu na inicijalnu konfiguraciju navedeni su u tablici (Tablica 5.6).

Tablica 5.6 Motor-CAD parametri

Motor-CAD parametar	Opis	Vrijednost
Housing Dia	Promjer kućišta [mm]	174,9
Stator Lam Dia	Promjer statora [mm]	154,9

Stator Bore	Promjer provrta statora [mm]	99,9
Tooth Width	Širina zuba [mm]	5,0
Sloth Depth	Dubina utora [mm]	16,1
Magnet Thickness	Širina magneta [mm]	3,6
Magnet Width	Duljina magneta [mm]	39,5
Motor Length	Ukupna duljina motora sa kućištem [mm]	251,2
Stator Lam Length	Duljina statorskog paketa [mm]	171,2
Rotor Lam Length	Duljina rotorskog paketa [mm]	171,2
Magnet Length	Aksijalna duljina magneta [mm]	171,2
Turns	Broj zavoja po svitku	23

Slijede rezultati izračuna prezentirani kao u poglavlju 4.



Slika 5.7 Radijalni (a) i aksijalni (b) presjek optimalne konfiguracije

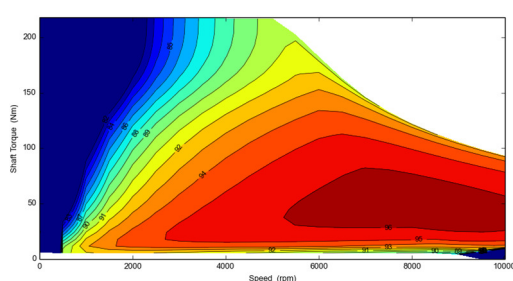
Tablica 5.7 Vrijednosti performansi koje su dio inicijalnih zahtjeva

Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna snaga	P_{max} [kW]	116,3	100
Moment na osovini pri rubnoj brzini	M_{cs} [Nm]	216,6	160
Snaga na osovini pri rubnoj brzini	P_{cs} [kW]	113,4	83,3

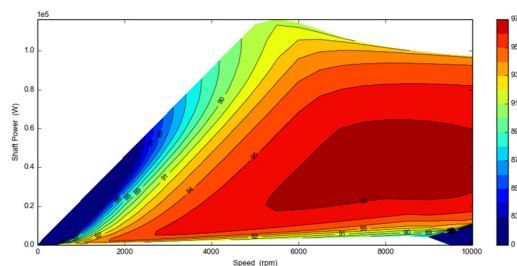
Moment na osovini pri maksimalnoj brzini	M_{nmax} [Nm]	92,6	80
Snaga na osovini pri maksimalnoj brzini	P_{nmax} [kW]	97,0	80
Maksimalna snaga u trajnom radu (pogon S1)	P_{S1max} [kW]	76,4	60
Maksimalna temperatura namota u S1 pogonu	ϑ_n [°C]	159,9	180
Maksimalna temperatura magneta u S1 pogonu	ϑ_m [°C]	129,3	160
Ukupni promjer	D [mm]	174,9	260
Ukupna duljina	L [mm]	251,2	260
Masa	m [kg]	22,9	
Cijena	c [\$]	226,8	
Fazna struja pri P_{cs} i n_{max} (S1 radna točka)	I_{s1} [A]	110	

Tablica 5.8 Vrijednosti ciljnih performansi

Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna korisnost	η_{max} [%]	96,56	95
Omjer momenta i cijene	M_{cs}/c [Nm/\$]	0,96	
Omjer momenta za i mase	M_{cs}/m [Nm/kg]	9,46	

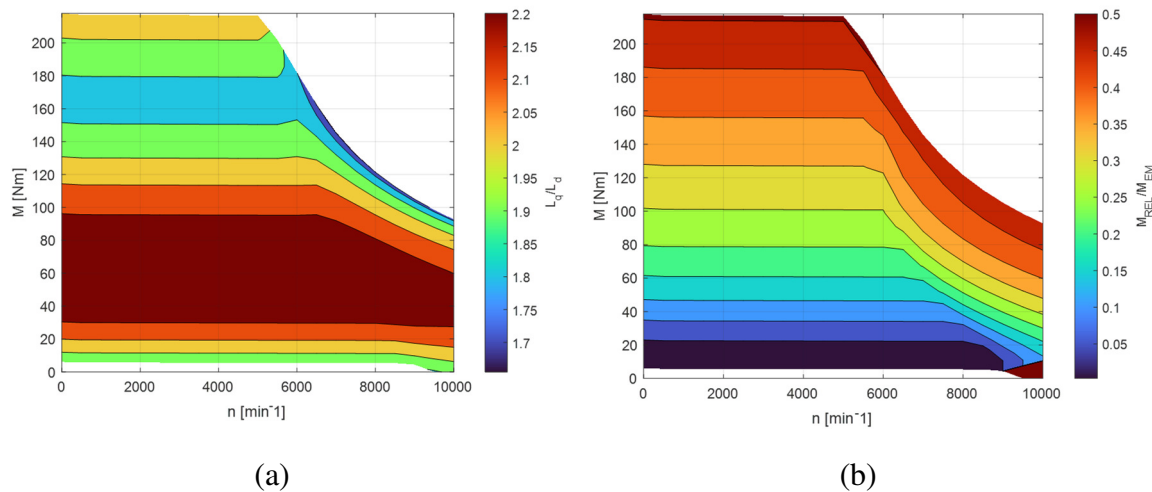


(a)

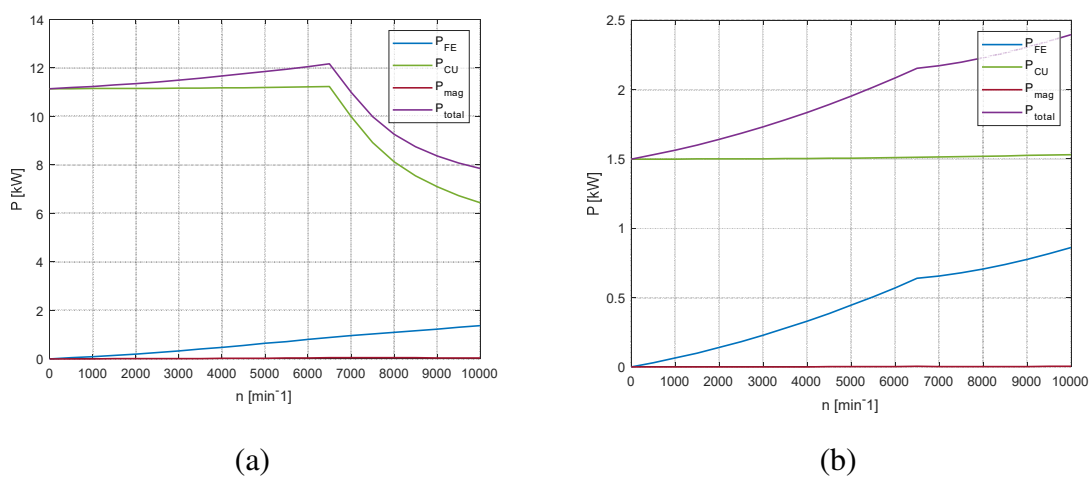


(b)

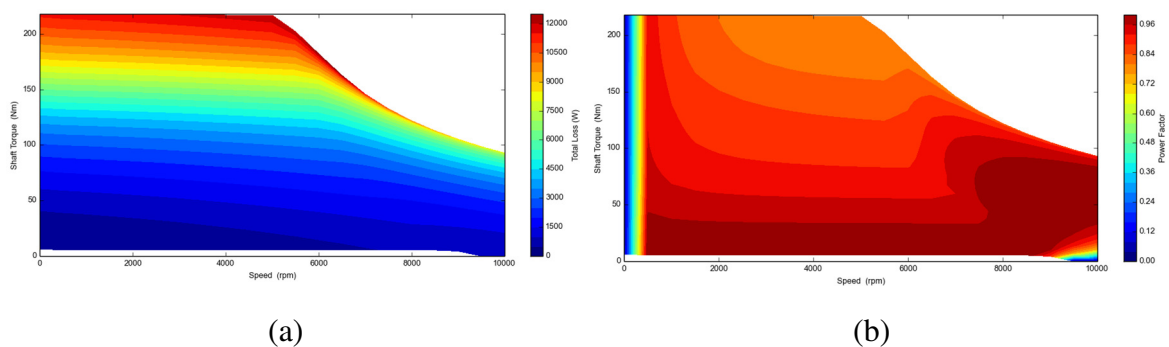
Slika 5.8 Mape korisnosti u moment–brzina (a) i snaga–brzina (b) ravninama



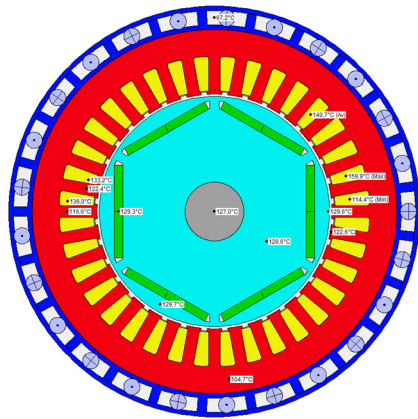
Slika 5.9 Mape omjera induktiviteta L_q/L_d (a) i udjela reluktantnog momenta u ukupnom elektromagnetskom omjeru (b) prikazane u moment–brzina ravnini



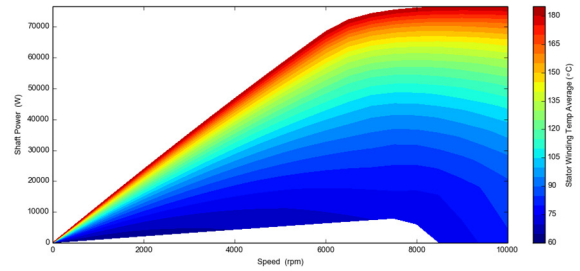
Slika 5.10 Gubici na faznim strujama I_n (a) i I_{s1} (b)



Slika 5.11 Mape gubitaka (a) i faktora snage (b) u moment–brzina ravnini



(a)



(b)

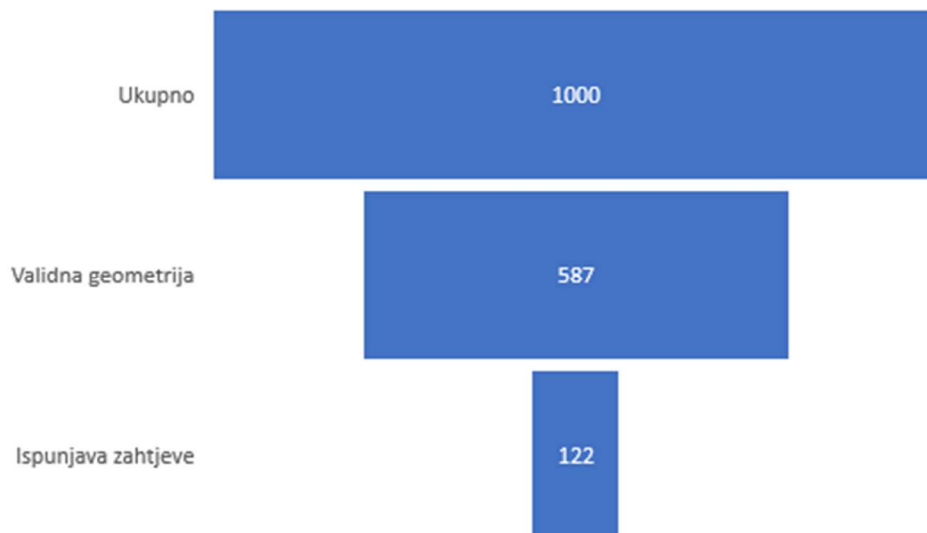
Slika 5.12 Radijalni presjek raspodjele temperatura u trajnom radu (a) i ograničenja snage u trajnom radu s obzirom na maksimalno dozvoljene temperature (b)

5.4.3. Rezultati optimizacije s ciljem moment/masa

Osnovni statistički podaci o rezultatima izvođenja optimizacije s ciljem maksimizacije omjera moment/cijena navedeni su u tablici (Tablica 5.9) i prikazani na slici (Slika 5.13).

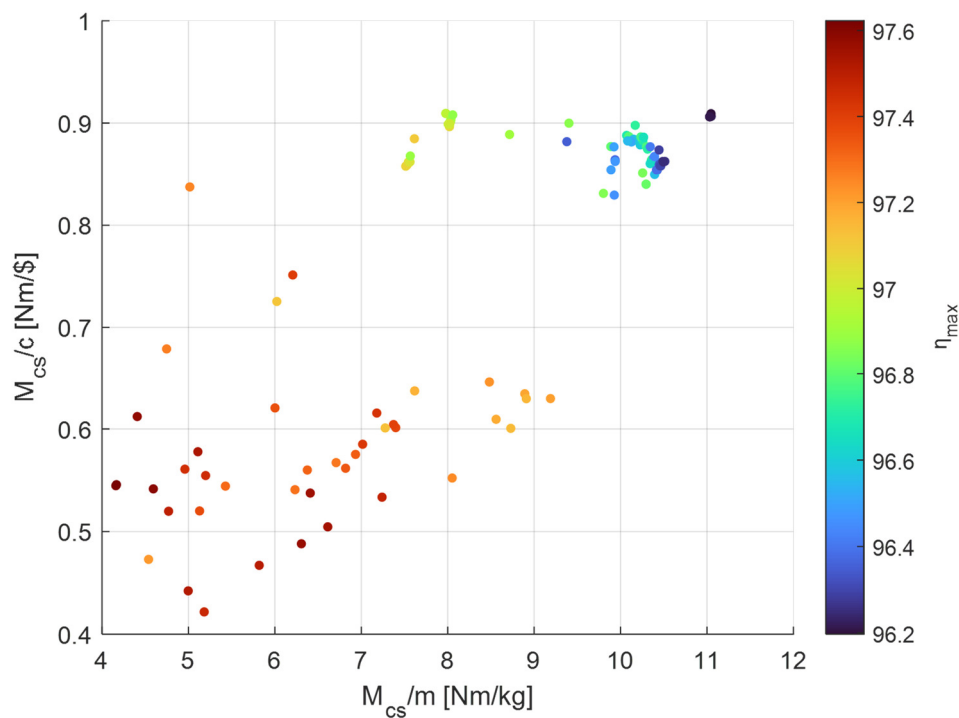
Tablica 5.9 Rezultati izvođenja optimizacije

Ukupan broj iteracija	1000
Konfiguracije s neispravnom geometrijom	41,3 %
Konfiguracije s ispravnom geometrijom koje ne ispunjavaju zahtjeve	46,5 %
Konfiguracije koje ispunjavaju zahtjeve (ispravne konfiguracije)	12,2 %
Optimalni iznos cilja moment/masa	11,05 Nm/kg



Slika 5.13 Rezultati izvođenja optimizacije

Na slici (Slika 5.14) detaljan je prikaz raspodjele ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi: omjera momenta i cijene, omjera momenta i mase i maksimalne efikasnosti.



Slika 5.14 Raspodjela ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi

Ispis optimalnog rješenja MIDACO-SOLVER-a prikazan je na slici (Slika 5.15). Vektor ulaznih parametara naveden je u tablici (Tablica 5.10).

```

CURRENT BEST SOLUTION
-----
EVAL:      482,  TIME:      449,  IFLAG:  -1
-----
f(X) =                -11.0487000000000000
-----
VIOLATION OF G(X)                0.00000000000000
-----
g(  1) =      0.000000000 (EQUALITY CONSTR)
g(  2) =      2.739700000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  3) =     78.481400000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  4) =     21.043500000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  5) =     41.535300000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  6) =     25.812500000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  7) =     28.344200000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  8) =      0.000000000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  9) =    500.000000000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 10) =      1.227700000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 11) =     24.767700000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 12) =      5.831700000 (IN-EQUAL CONSTR)
-----
                                BOUNDS-PROFIL
x(  1) =      1550.0000000000000000;  %  _____x_____
x(  2) =      1031.0000000000000000;  %  _____x_____
x(  3) =       157.0000000000000000;  %  _____x_____
x(  4) =        55.0000000000000000;  %  _____x_____
x(  5) =     1604.0000000000000000;  %  _____x_____
x(  6) =       412.0000000000000000;  %  _____x_____
x(  7) =        46.0000000000000000;  %  _____x_____
x(  8) =        24.0000000000000000;  %  _____x_____

OPTIMIZATION FINISHED ---> MAXEVAL REACHED

```

Slika 5.15 Ispis optimalnog rješenja MIDACO-SOLVERA

Tablica 5.10 Parametri optimalne konfiguracije

D_s	D_r	L_s	W_t	L	L_m	W_m	n_t
1550	1031	175	55	1604	412	46	24

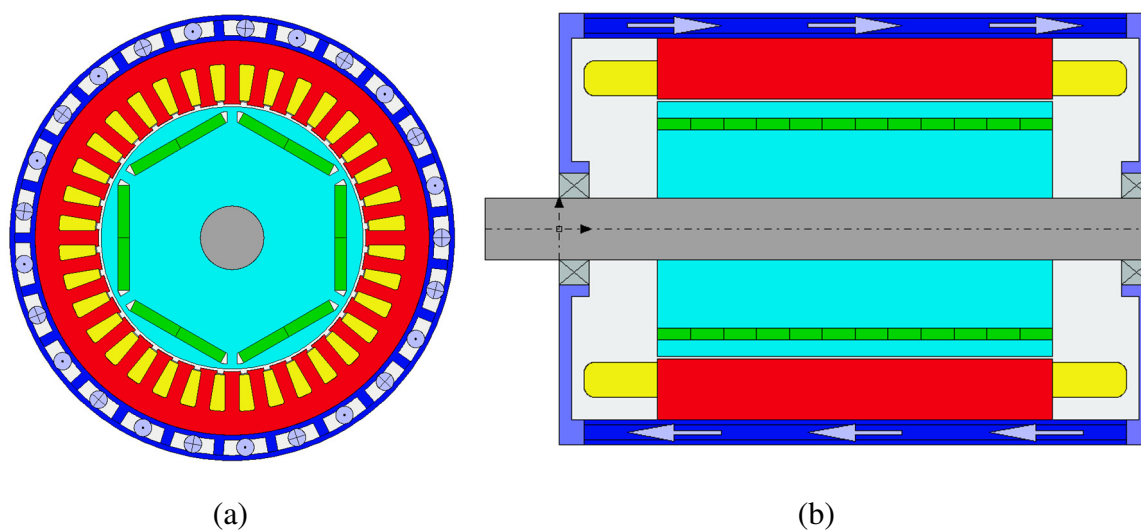
Motor-CAD parametri koji su mapiranjem parametara optimizacije promijenjeni u odnosu na inicijalnu konfiguraciju navedeni su u tablici (Tablica 5.11).

Tablica 5.11 Motor-CAD parametri

Motor-CAD parametar	Opis	Vrijednost
Housing Dia	Promjer kućišta [mm]	175,0

Stator Lam Dia	Promjer statora [mm]	155,0
Stator Bore	Promjer provrta statora [mm]	105,1
Tooth Width	Širina zuba [mm]	5,5
Sloth Depth	Dubina utora [mm]	15,7
Magnet Thickness	Širina magneta [mm]	4,6
Magnet Width	Duljina magneta [mm]	41,2
Motor Length	Ukupna duljina motora sa kućištem [mm]	240,4
Stator Lam Length	Duljina statorskog paketa [mm]	160,4
Rotor Lam Length	Duljina rotorskog paketa [mm]	160,4
Magnet Length	Aksijalna duljina magneta [mm]	160,4
Turns	Broj zavoja po svitku	24

Slijede rezultati izračuna prezentirani kao u poglavlju 4.



Slika 5.16 Radijalni (a) i aksijalni (b) presjek optimalne konfiguracije

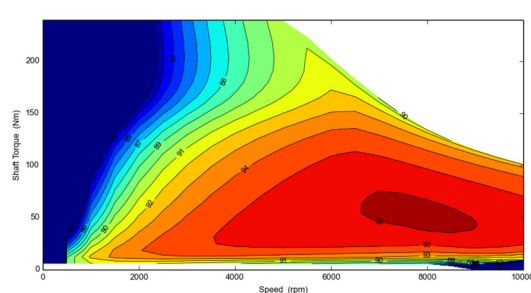
Tablica 5.12 Vrijednosti performansi koje su dio inicijalnih zahtjeva

Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna snaga	P_{max} [kW]	128,3	100
Moment na osovini pri rubnoj brzini	M_{cs} [Nm]	238,5	160

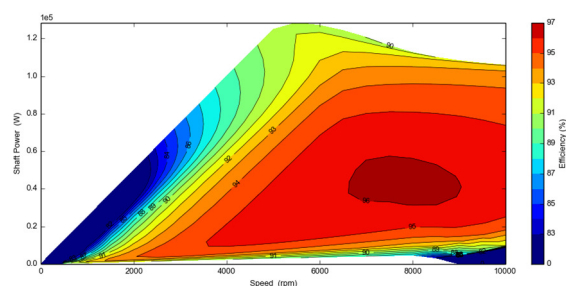
Snaga na osovini pri rubnoj brzini	P_{cs} [kW]	124,9	83,3
Moment na osovini pri maksimalnoj brzini	M_{nmax} [Nm]	101,0	80
Snaga na osovini pri maksimalnoj brzini	P_{nmax} [kW]	105,8	80
Maksimalna snaga u trajnom radu (pogon S1)	P_{S1max} [kW]	70,2	60
Maksimalna temperatura namota u S1 pogonu	ϑ_n [°C]	174,2	180
Maksimalna temperatura magnetu u S1 pogonu	ϑ_m [°C]	135,2	160
Ukupni promjer	D [mm]	175,0	260
Ukupna duljina	L [mm]	240,4	260
Masa	m [kg]	21,6	
Cijena	c [\$]	263,1	
Fazna struja pri P_{cs} i n_{max} (S1 radna točka)	I_{S1} [A]	110	

Tablica 5.13 Vrijednosti ciljnih performansi

Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna korisnost	η_{max} [%]	96,23	95
Omjer momenta i cijene	M_{cs}/c [Nm/\$]	0,91	
Omjer momenta za i mase	M_{cs}/m [Nm/kg]	11,05	

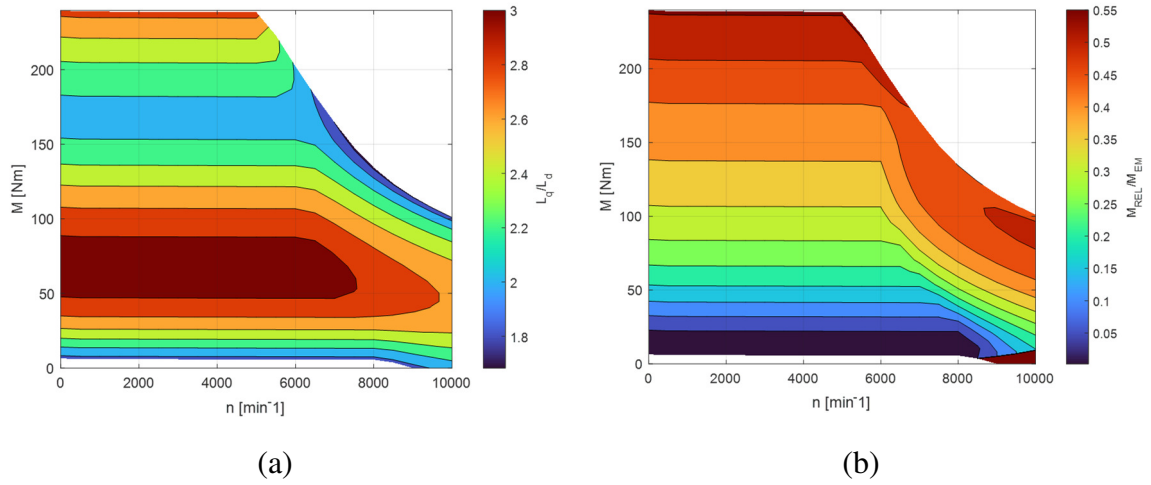


(a)

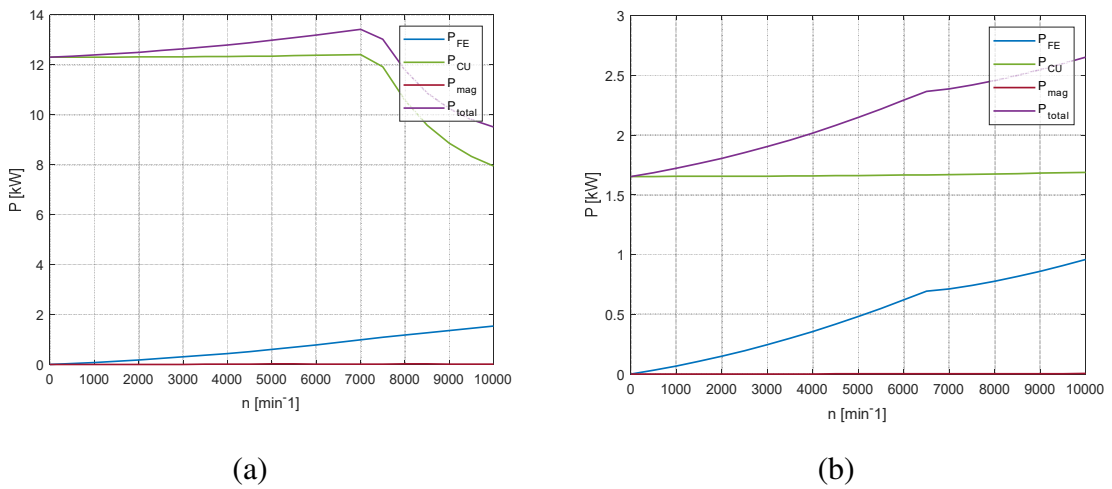


(b)

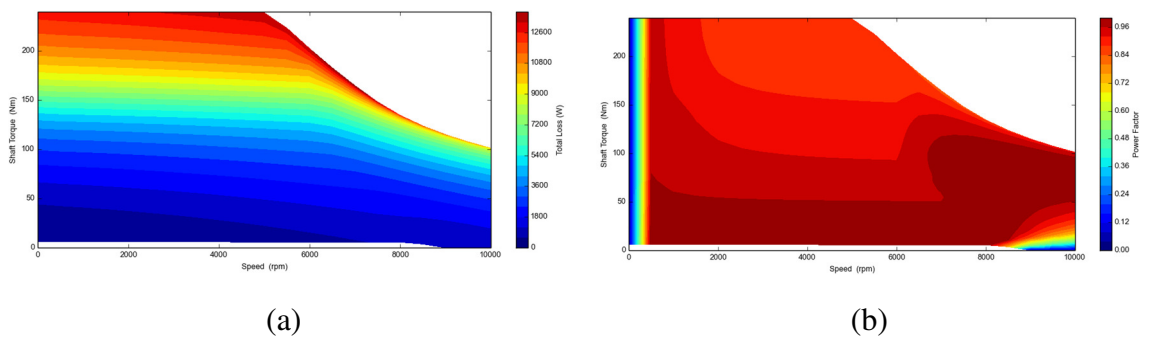
Slika 5.17 Mape korisnosti u moment–brzina (a) i snaga–brzina (b) ravninama



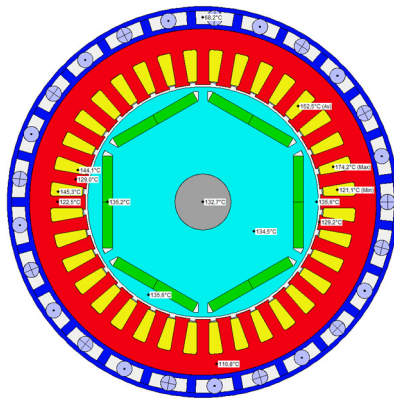
Slika 5.18 Mape omjera induktiviteta L_q/L_d (a) i udjela reluktantnog momenta u ukupnom elektromagnetskom omjeru (b) prikazane u moment–brzina ravnini



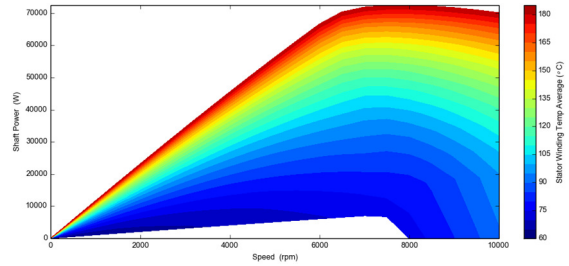
Slika 5.19 Gubici na faznim strujama I_n (a) i I_{s1} (b)



Slika 5.20 Mape gubitaka (a) i faktora snage (b) u moment–brzina ravnini



(a)



(b)

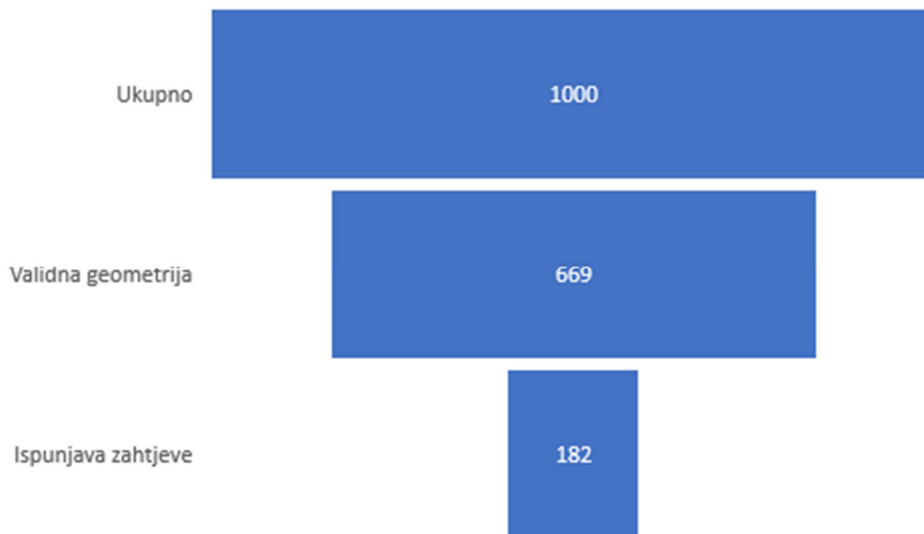
Slika 5.21 Radijalni presjek raspodjele temperatura u trajnom radu (a) i ograničenja snage u trajnom radu s obzirom na maksimalno dozvoljene temperature (b)

5.4.4. Rezultat optimizacije s ciljem maksimalna efikasnost

Osnovni statistički podaci o rezultatima izvođenja optimizacije s ciljem maksimizacije maksimalne efikasnosti navedeni su u tablici (Tablica 5.14) i prikazani na slici (Slika 5.22).

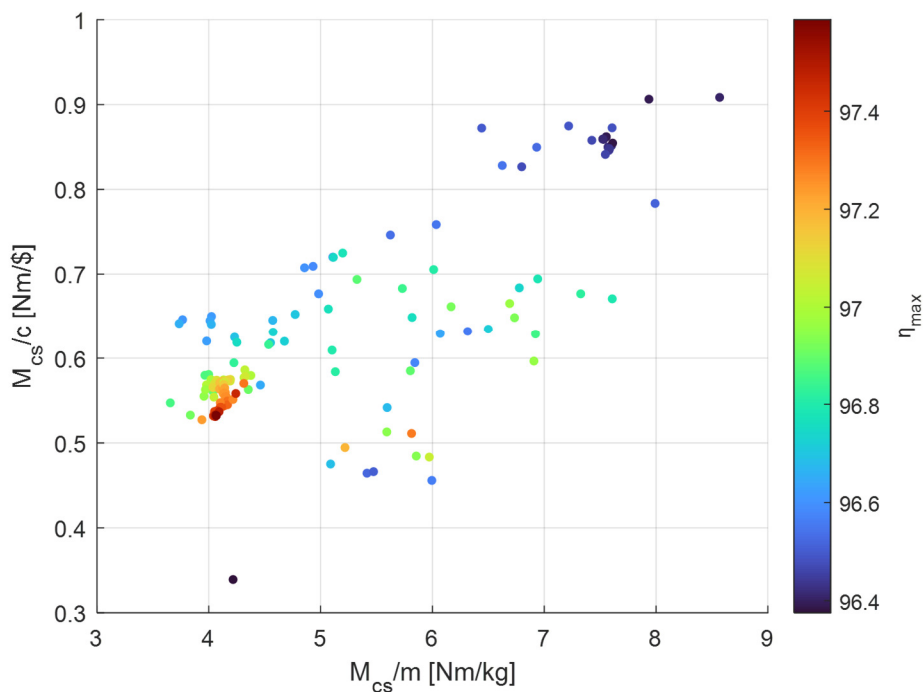
Tablica 5.14 Rezultati izvođenja optimizacije

Ukupan broj iteracija	1000
Konfiguracije s neispravnom geometrijom	33,1 %
Konfiguracije s ispravnom geometrijom koje ne ispunjavaju zahtjeve	48,7 %
Konfiguracije koje ispunjavaju zahtjeve (ispravne konfiguracije)	18,2 %
Optimalni iznos cilja maksimalna efikasnost	97,59 %



Slika 5.22 Rezultati izvođenja optimizacije

Na slici (Slika 5.23) detaljan je prikaz raspodjele ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi: omjera momenta i cijene, omjera momenta i mase i maksimalne efikasnosti.



Slika 5.23 Raspodjela ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi

Ispis optimalnog rješenja MIDACO-SOLVER-a prikazan je na slici (Slika 5.24). Vektor ulaznih parametara naveden je u tablici (Tablica 5.15).

```

CURRENT BEST SOLUTION
-----
EVAL:      500,  TIME:  117580,  IFLAG:  -2
-----
f(x) =      -97.586399999999998
-----
VIOLATION OF G(X)      0.000000000000000
-----
g(  1) =      0.000000000 (EQUALITY CONSTR)
g(  2) =     34.954400000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  3) =     56.143000000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  4) =     29.660800000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  5) =     29.838900000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  6) =     34.836500000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  7) =     30.694800000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  8) =     500.000000000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  9) =      0.000000000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 10) =      2.586400000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 11) =     47.199600000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 12) =     62.414000000 (IN-EQUAL CONSTR)
-----
                                BOUNDS-PROFIL
x(  1) =      2390.0000000000000000;  %  _____x
x(  2) =     1160.0000000000000000;  %  _____x
x(  3) =      293.0000000000000000;  %  _____x
x(  4) =       42.0000000000000000;  %  _____x
x(  5) =     1675.0000000000000000;  %  _____x
x(  6) =      399.0000000000000000;  %  _____x
x(  7) =       52.0000000000000000;  %  _____x
x(  8) =       23.0000000000000000;  %  _____x
-----
OPTIMIZATION FINISHED ---> MAXEVAL REACHED

```

Slika 5.24 Ispis optimalnog rješenja MIDACO-SOLVERA

Tablica 5.15 Parametri optimalne konfiguracije

D_s	D_r	L_s	W_t	L	L_m	W_m	n_t
2390	1160	293	42	1675	399	52	23

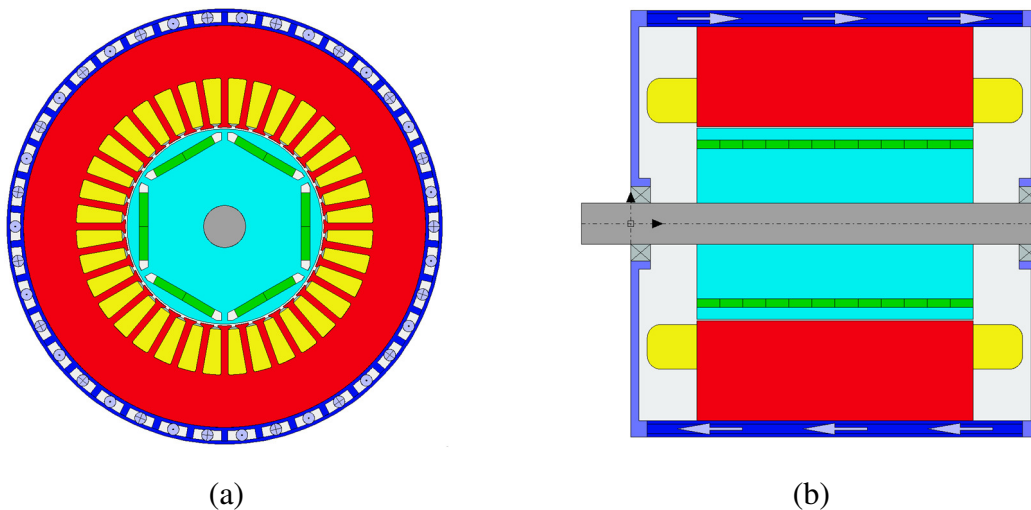
Motor-CAD parametri koji su mapiranjem parametara optimizacije promijenjeni u odnosu na inicijalnu konfiguraciju navedeni su u tablici (Tablica 5.16).

Tablica 5.16 Motor-CAD parametri

Motor-CAD parametar	Opis	Vrijednost
Housing Dia	Promjer kućišta [mm]	259,0
Stator Lam Dia	Promjer statora [mm]	239,0
Stator Bore	Promjer provrta statora [mm]	118

Tooth Width	Širina zuba [mm]	4,2
Sloth Depth	Dubina utora [mm]	29,3
Magnet Thickness	Širina magneta [mm]	5,2
Magnet Width	Duljina magneta [mm]	39,9
Motor Length	Ukupna duljina motora sa kućištem [mm]	247,5
Stator Lam Length	Duljina statorskog paketa [mm]	167,5
Rotor Lam Length	Duljina rotorskog paketa [mm]	167,5
Magnet Length	Aksijalna duljina magneta [mm]	167,5
Turns	Broj zavoja po svitku	23

Slijede rezultati izračuna prezentirani kao u poglavlju 4.



Slika 5.25 Radijalni (a) i aksijalni (b) presjek optimalne konfiguracije

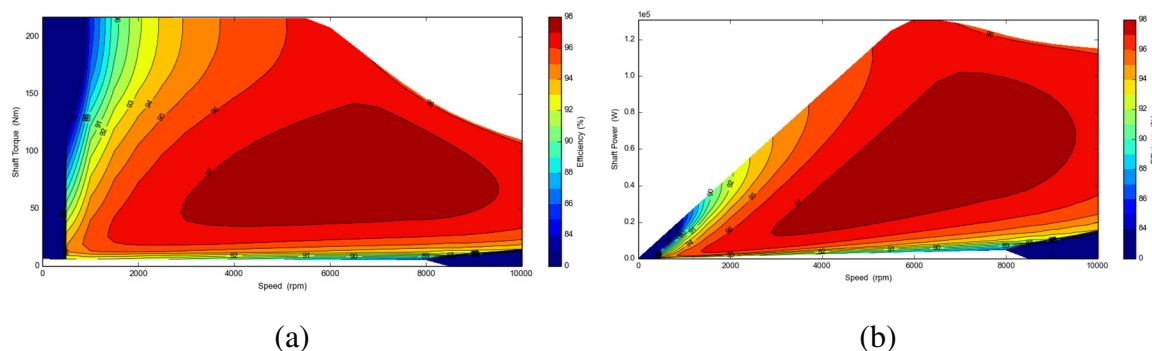
Tablica 5.17 Vrijednosti performansi koje su dio inicijalnih zahtjeva

Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna snaga	P_{max} [kW]	130,7	100
Moment na osovini pri rubnoj brzini	M_{cs} [Nm]	216,1	160
Snaga na osovini pri rubnoj brzini	P_{cs} [kW]	113,2	83,3
Moment na osovini pri maksimalnoj brzini	M_{nmax} [Nm]	109,7	80

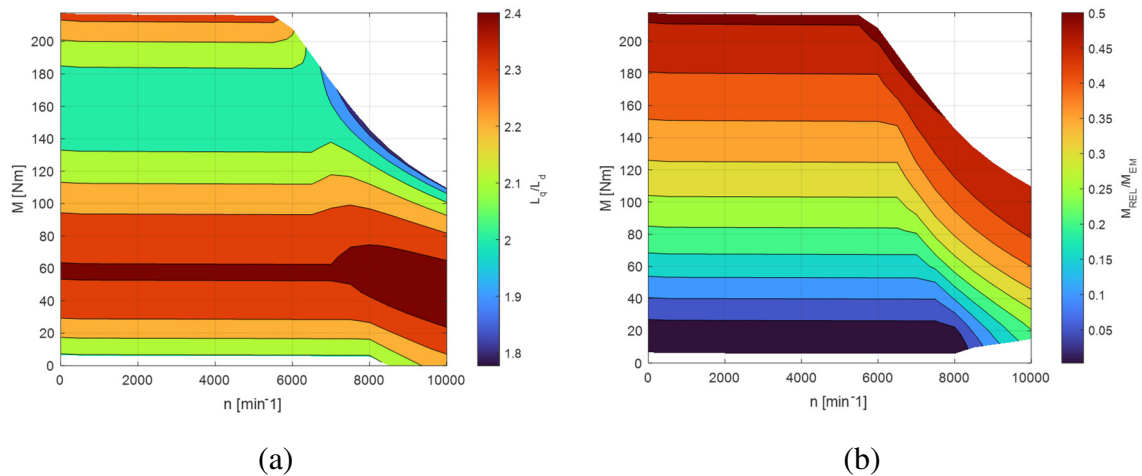
Snaga na osovini pri maksimalnoj brzini	$P_{nmax} [kW]$	114,8	80
Maksimalna snaga u trajnom radu (pogon S1)	$P_{S1 max}[kW]$	100,0	60
Maksimalna temperatura namota u S1 pogonu	$\vartheta_n [^{\circ}C]$	117,6	180
Maksimalna temperatura magnetu u S1 pogonu	$\vartheta_m [^{\circ}C]$	112,8	160
Ukupni promjer	$D [mm]$	259,0	260
Ukupna duljina	$L [mm]$	247,5	260
Masa	$m [kg]$	53,2	
Cijena	$c [\$]$	406,0	
Fazna struja pri P_{CS} i n_{max} (S1 radna točka)	$I_{S1} [A]$	110	

Tablica 5.18 Vrijednosti ciljnih performansi

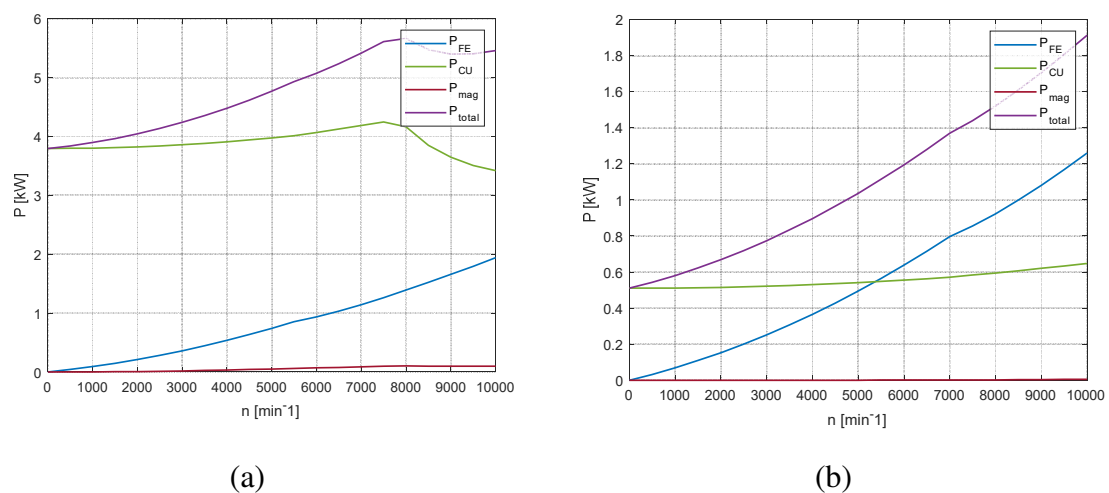
Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna korisnost	$\eta_{max} [\%]$	97,59	95
Omjer momenta i cijene	$M_{CS}/c [Nm/\$]$	0,53	
Omjer momenta za i mase	$M_{CS}/m [Nm/kg]$	4,07	



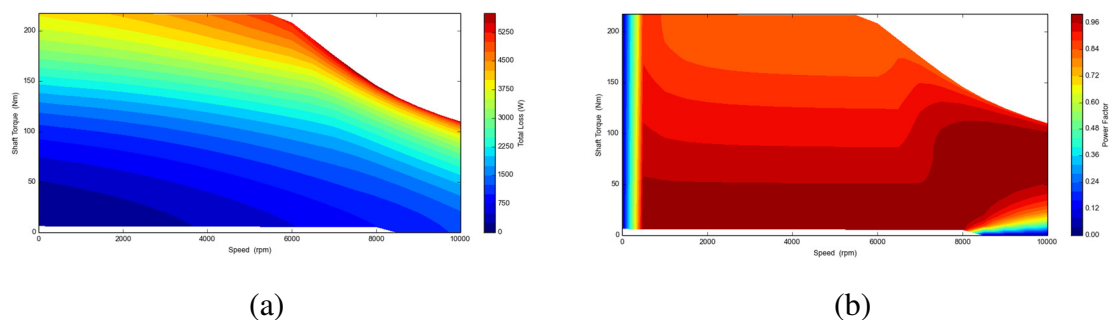
Slika 5.26 Mape korisnosti u moment–brzina (a) i snaga–brzina (b) ravninama



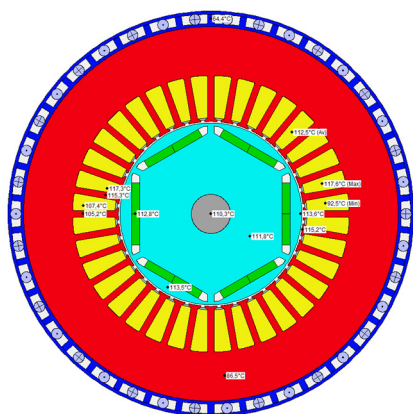
Slika 5.27 Mape omjera induktiviteta L_q/L_d (a) i udjela reluktantnog momenta u ukupnom elektromagnetskom omjeru (b) prikazane u moment–brzina ravnini



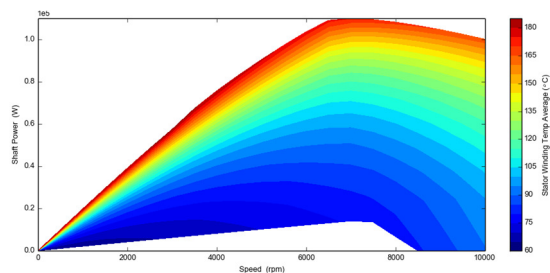
Slika 5.28 Gubici na faznim strujama I_n (a) i I_{s1} (b)



Slika 5.29 Mape gubitaka (a) i faktora snage (b) u moment–brzina ravnini



(a)



(b)

Slika 5.30 Radijalni presjek raspodjele temperatura u trajnom radu (a) i ograničenja snage u trajnom radu s obzirom na maksimalno dozvoljene temperature (b)

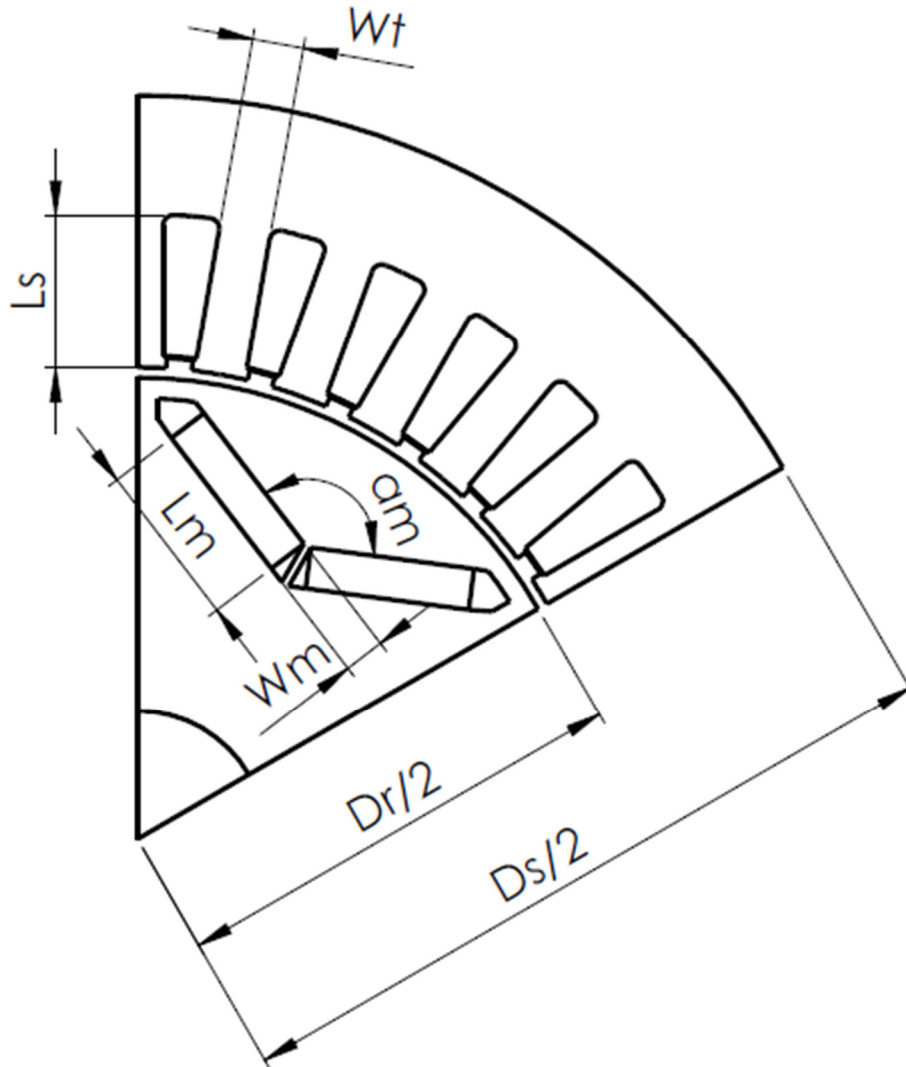
5.5. Optimizacija za V topologiju IPM motora

5.5.1. Parametri optimizacije

Za optimizaciju za V topologiju IPM motora vektor ulaznih varijabli y čine parametri navedeni u tablici (Tablica 5.19). Odgovarajući parametrizirani geometrijski model prikazan je na slici (Slika 5.31).

Tablica 5.19 Parametri optimizacije V topologije

Oznaka	Opis	Preciznost
D_s	Promjer statora	0,1 [mm]
D_r	Promjer rotora	0,1 [mm]
L_s	Dubina utora	0,1 [mm]
W_t	Širina zuba	0,1 [mm]
L	Aksijalna duljina statorskog i rotorskog paketa	0,1 [mm]
L_m	Duljina magneta	0,1 [mm]
W_m	Širina magneta	0,1 [mm]
n_t	Broj zavoja	1



Slika 5.31 Parametrizirani model radijalne geometrije

Inicijalna vrijednost parametara optimizacije kojom započinje svaka od optimizacija za V topologiju navedene su u tablici (Tablica 5.20). Njihovo mapiranje u parametre Motor-CAD rezultira inicijalnom konfiguracijom za V topologiju iz poglavlja 4.5.

Tablica 5.20 Inicijalne vrijednosti parametara optimizacije

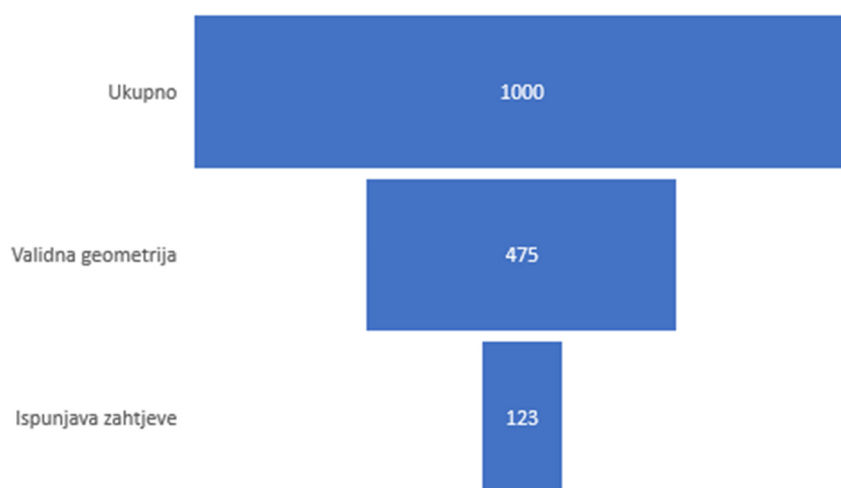
D_s	D_r	L_s	W_t	L	L_m	W_m	n_t	α_m
1450	900	150	50	1600	160	40	22	135

5.5.2. Rezultati optimizacije s ciljem moment/cijena

Osnovni statistički podaci o rezultatima izvođenja optimizacije s ciljem maksimizacije omjera moment/cijena navedeni su u tablici (Tablica 5.21) i prikazani na slici (Slika 5.32).

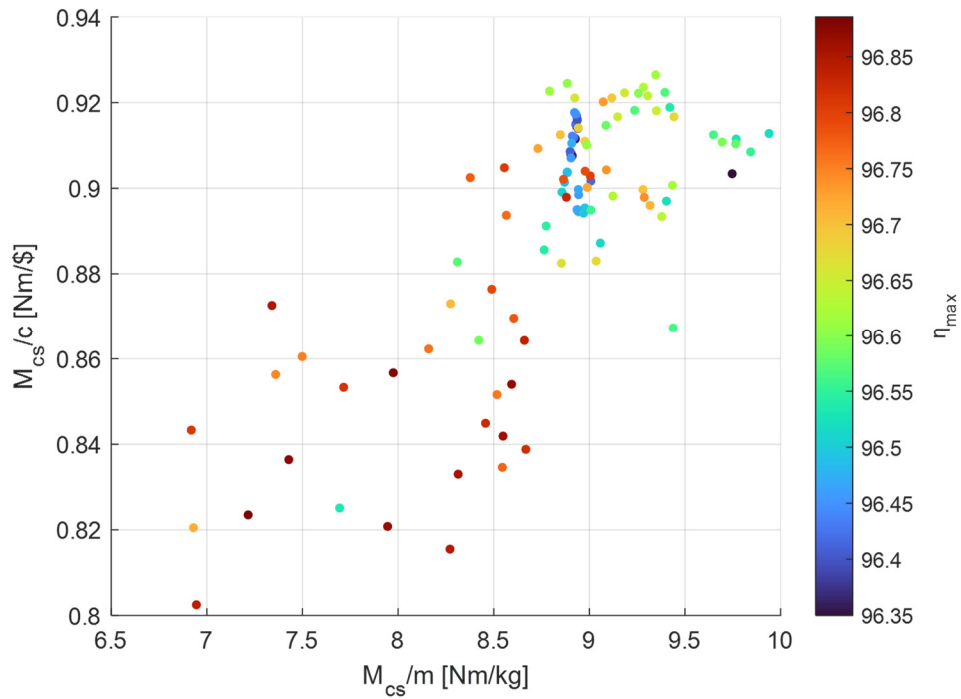
Tablica 5.21 Rezultati izvođenja optimizacije

Ukupan broj iteracija	1000
Konfiguracije s neispravnom geometrijom	52,5 %
Konfiguracije s ispravnom geometrijom koje ne ispunjavaju zahtjeve	35,2 %
Konfiguracije koje ispunjavaju zahtjeve (ispravne konfiguracije)	12,3 %
Optimalni iznos cilja moment/cijena	0,93 Nm/\$



Slika 5.32 Rezultati izvođenja optimizacije

Na slici (Slika 5.33) detaljan je prikaz raspodjele ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi: omjera momenta i cijene, omjera momenta i mase i maksimalne efikasnosti.



Slika 5.33 Raspodjela ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi

Ispis optimalnog rješenja MIDACO-SOLVER-a prikazan je na slici (Slika 5.34). Vektor ulaznih parametara naveden je u tablici (Tablica 5.22).

```

CURRENT BEST SOLUTION
-----
EVAL:      962,  TIME:  32362,  IFLAG:  -1
-----
f (X) =                -0.9265000000000000
-----
VIOLATION OF G (X)                0.0000000000000000
-----
g(  1) =      0.000000000 (EQUALITY CONSTR)
g(  2) =      7.137400000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  3) =     29.576800000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  4) =      4.856300000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  5) =     15.928900000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  6) =      8.861300000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  7) =      4.797600000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  8) =      0.000000000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  9) =     500.000000000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 10) =      1.596100000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 11) =     26.334000000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 12) =      0.488500000 (IN-EQUAL CONSTR)
-----
x(  1) =      1538.0000000000000000;  ⌘  _____ x _____
x(  2) =      909.0000000000000000;  ⌘  _____ x _____
x(  3) =     164.0000000000000000;  ⌘  _____ x _____
x(  4) =      51.0000000000000000;  ⌘  _____ x _____
x(  5) =     1539.0000000000000000;  ⌘  _____ x _____
x(  6) =     158.0000000000000000;  ⌘  _____ x _____
x(  7) =      46.0000000000000000;  ⌘  _____ x _____
x(  8) =      24.0000000000000000;  ⌘  _____ x _____
x(  9) =     133.0000000000000000;  ⌘  _____ x _____

OPTIMIZATION FINISHED  --->  MAXEVAL REACHED

```

Slika 5.34 Ispis optimalnog rješenja MIDACO-SOLVERA

Tablica 5.22 Parametri optimalne konfiguracije

D_s	D_r	L_s	W_t	L	L_m	W_m	n_t	α_m
1538	909	164	51	1539	158	46	24	133

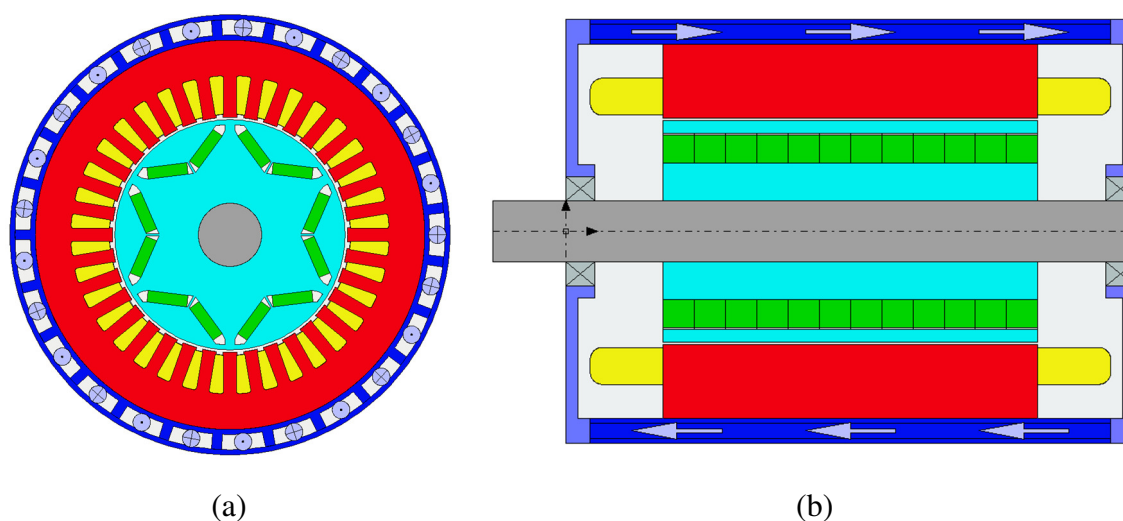
Motor-CAD parametri koji su mapiranjem parametara optimizacije promijenjeni u odnosu na inicijalnu konfiguraciju navedeni su u tablici (Tablica 5.23).

Tablica 5.23 Motor-CAD parametri

Motor-CAD parametar	Opis	Vrijednost
Housing Dia	Promjer kućišta [mm]	173,8
Stator Lam Dia	Promjer statora [mm]	153,8

Stator Bore	Promjer provrta statora [mm]	92,9
Tooth Width	Širina zuba [mm]	5,1
Sloth Depth	Dubina utora [mm]	16,4
L1 Magnet Thickness	Širina magneta [mm]	4,6
L1 Magnet Bar Width	Duljina magneta [mm]	15,8
L1 Pole V Angle	Kut između magneta [°]	133
L1 Magnet Separation	Udaljenost između magneta [mm]	1,2
Motor Length	Ukupna duljina motora sa kućištem [mm]	233,9
Stator Lam Length	Duljina statorskog paketa [mm]	153,9
Rotor Lam Length	Duljina rotorskog paketa [mm]	153,9
Magnet Length	Aksijalna duljina magneta [mm]	153,9
Turns	Broj zavoja po svitku	24

Slijede rezultati izračuna prezentirani kao u poglavlju 4.



Slika 5.35 Radijalni (a) i aksijalni (b) presjek optimalne konfiguracije

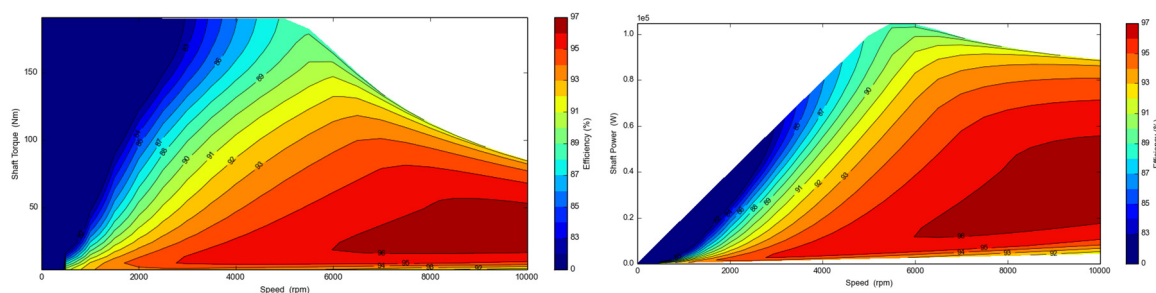
Tablica 5.24 Vrijednosti performansi koje su dio inicijalnih zahtjeva

Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna snaga	P_{max} [kW]	104,8	100

Moment na osovini pri rubnoj brzini	$M_{cs} [Nm]$	189,6	160
Snaga na osovini pri rubnoj brzini	$P_{cs} [kW]$	99,3	83,3
Moment na osovini pri maksimalnoj brzini	$M_{nmax} [Nm]$	84,9	80
Snaga na osovini pri maksimalnoj brzini	$P_{nmax} [kW]$	88,9	80
Maksimalna snaga u trajnom radu (pogon S1)	$P_{S1 max} [kW]$	66,2	60
Maksimalna temperatura namota u S1 pogonu	$\vartheta_n [^{\circ}C]$	179,5	180
Maksimalna temperatura magnetu u S1 pogonu	$\vartheta_m [^{\circ}C]$	133,7	160
Ukupni promjer	$D [mm]$	173,8	260
Ukupna duljina	$L [mm]$	233,9	260
Masa	$m [kg]$	20,3	
Cijena	$c [\$]$	204,6	
Fazna struja pri P_{cs} i n_{max} (S1 radna točka)	$I_{s1} [A]$	110	

Tablica 5.25 Vrijednosti ciljnih performansi

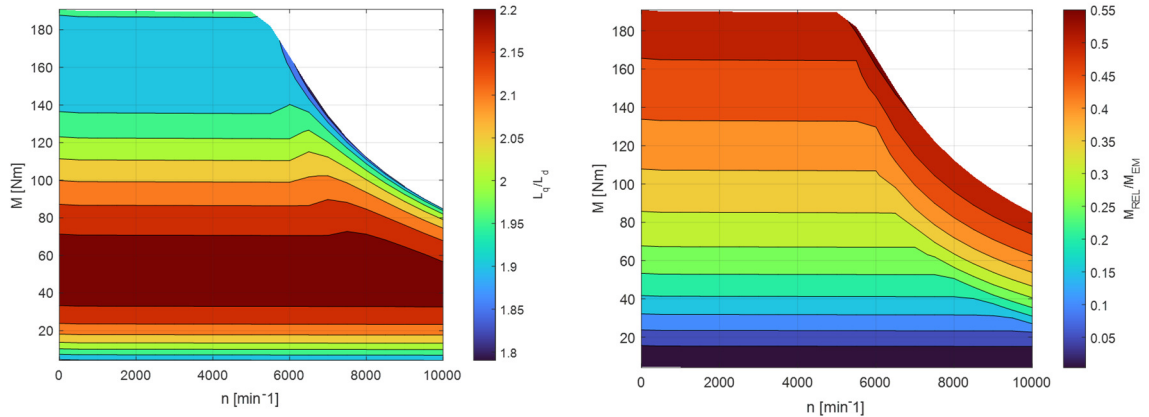
Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna korisnost	$\eta_{max} [\%]$	96,60	95
Omjer momenta i cijene	$M_{cs}/c [Nm/\$]$	0,93	
Omjer momenta za i mase	$M_{cs}/m [Nm/kg]$	9,35	



(a)

(b)

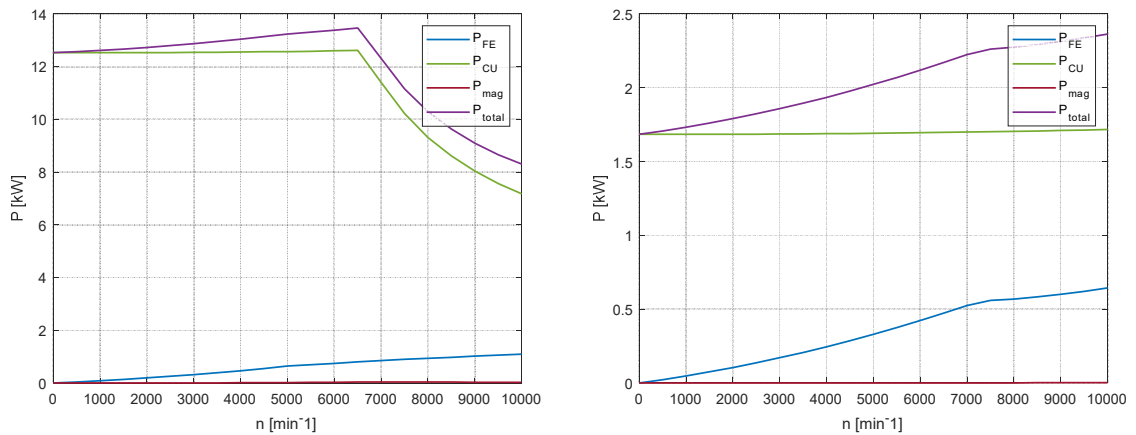
Slika 5.36 Mape korisnosti u moment–brzina (a) i snaga–brzina (b) ravninama



(a)

(b)

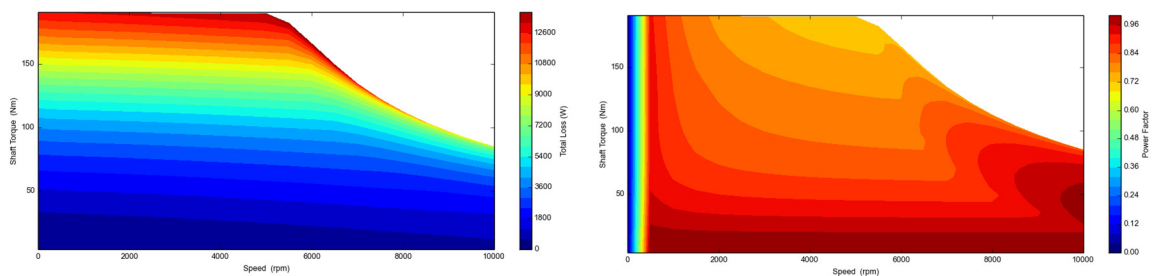
Slika 5.37 Mape omjera induktiviteta L_q/L_d (a) i udjela reluktantnog momenta u ukupnom elektromagnetskom omjeru (b) prikazane u moment–brzina ravnini



(a)

(b)

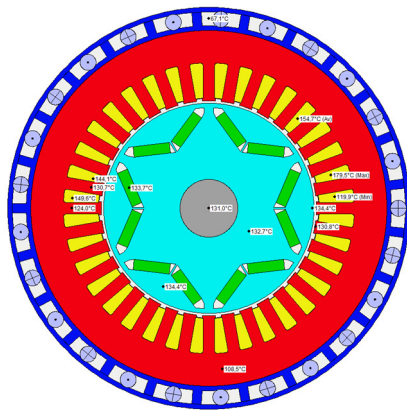
Slika 5.38 Gubici na faznim strujama I_n (a) i I_{S1} (b)



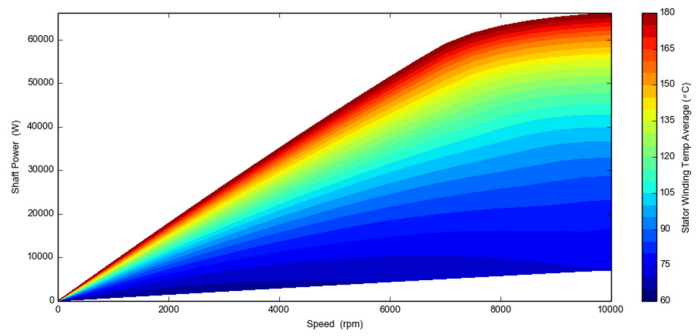
(a)

(b)

Slika 5.39 Mape gubitaka (a) i faktora snage (b) u moment–brzina ravnini



(a)



(b)

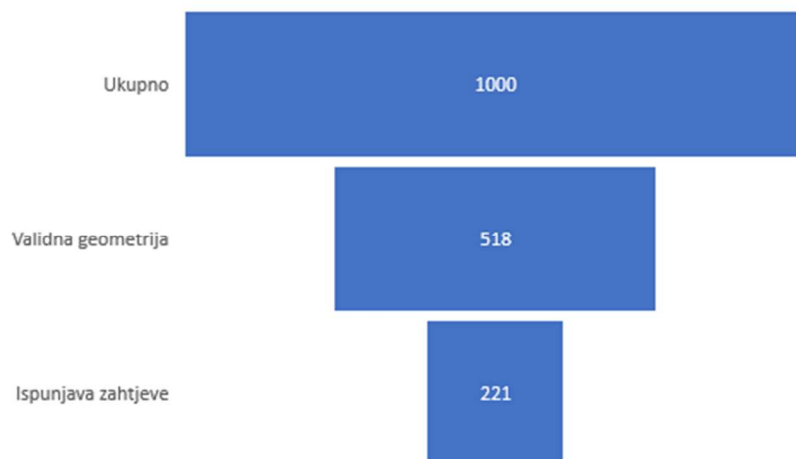
Slika 5.40 Radijalni presjek raspodjele temperatura u trajnom radu (a) i ograničenja snage u trajnom radu s obzirom na maksimalno dozvoljene temperature (b)

5.5.3. Rezultati optimizacije s ciljem moment/masa

Osnovni statistički podaci o rezultatima izvođenja optimizacije s ciljem maksimizacije omjera moment/masa navedeni su u tablici (Tablica 5.26) i prikazani na slici (Tablica 5.41).

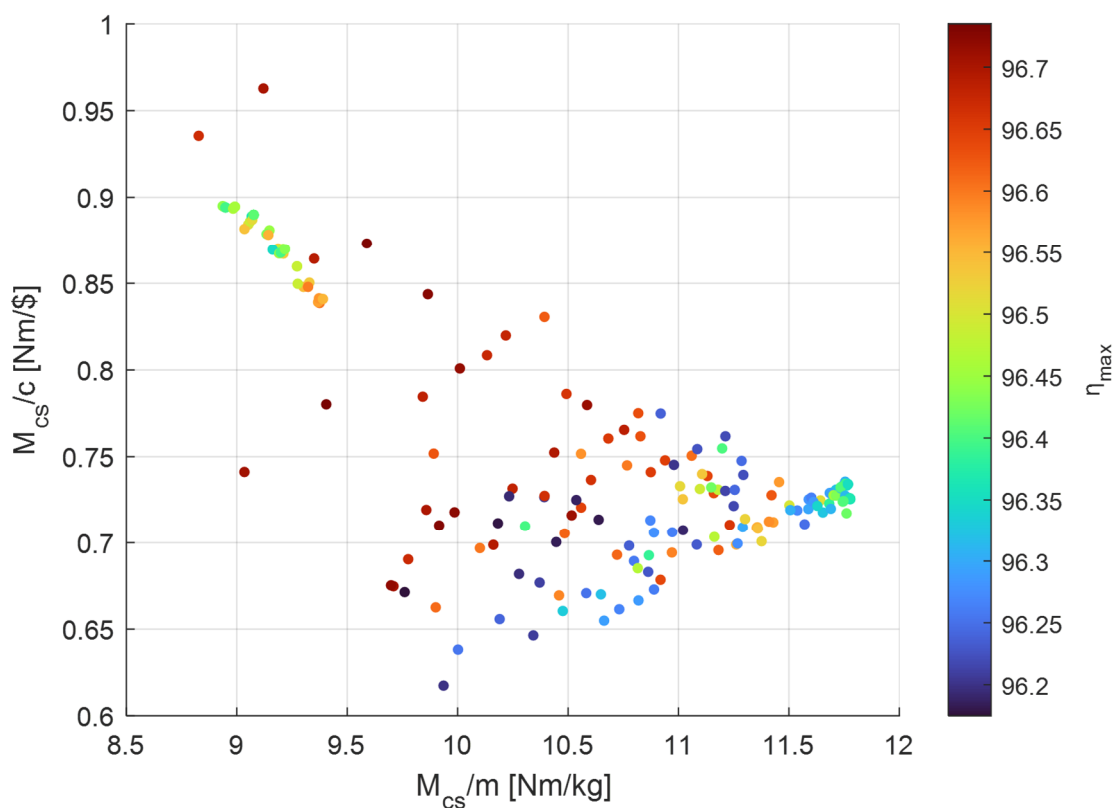
Tablica 5.26 Rezultati izvođenja optimizacije

Ukupan broj iteracija	1000
Konfiguracije s neispravnom geometrijom	48,2 %
Konfiguracije s ispravnom geometrijom koje ne ispunjavaju zahtjeve	29,7 %
Konfiguracije koje ispunjavaju zahtjeve (ispravne konfiguracije)	22,1 %
Optimalni iznos cilja moment/masa	11,78 Nm/kg



Slika 5.41 Rezultati izvođenja optimizacije

Na slici (Slika 5.42) detaljan je prikaz raspodjele ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi: omjera momenta i cijene, omjera momenta i mase i maksimalne efikasnosti.



Slika 5.42 Raspodjela ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi

Ispis optimalnog rješenja MIDACO-SOLVER-a prikazan je na slici (Slika 5.43). Vektor ulaznih parametara naveden je u tablici (Tablica 5.27).

```

CURRENT BEST SOLUTION
-----
EVAL:      986,  TIME:  55174,  IFLAG:  -2
-----
f(x) =                -11.7776000000000000
-----
VIOLATION OF G(X)                0.0000000000000000
-----
g(  1) =      0.00000000 (EQUALITY CONSTR)
g(  2) =      0.05940000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  3) =     77.18660000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  4) =     16.46470000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  5) =     40.85730000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  6) =     21.01760000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  7) =     25.53150000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  8) =      0.00000000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  9) =    500.00000000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 10) =      1.37090000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 11) =     16.32750000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 12) =      9.35800000 (IN-EQUAL CONSTR)
-----
                                BOUNDS-PROFIL
x(  1) =      1506.0000000000000000;  %  _____ x _____
x(  2) =      1013.0000000000000000;  %  _____ x _____
x(  3) =       157.0000000000000000;  %  _____ x _____
x(  4) =         40.0000000000000000;  %  XL _____
x(  5) =     1629.0000000000000000;  %  _____ x _____
x(  6) =       179.0000000000000000;  %  _____ x _____
x(  7) =         68.0000000000000000;  %  _____ x _____
x(  8) =         28.0000000000000000;  %  _____ x _____
x(  9) =       139.0000000000000000;  %  _____ x _____

OPTIMIZATION FINISHED ---> MAXEVAL REACHED

```

Slika 5.43 Ispis optimalnog rješenja MIDACO-SOLVERA

Tablica 5.27 Parametri optimalne konfiguracije

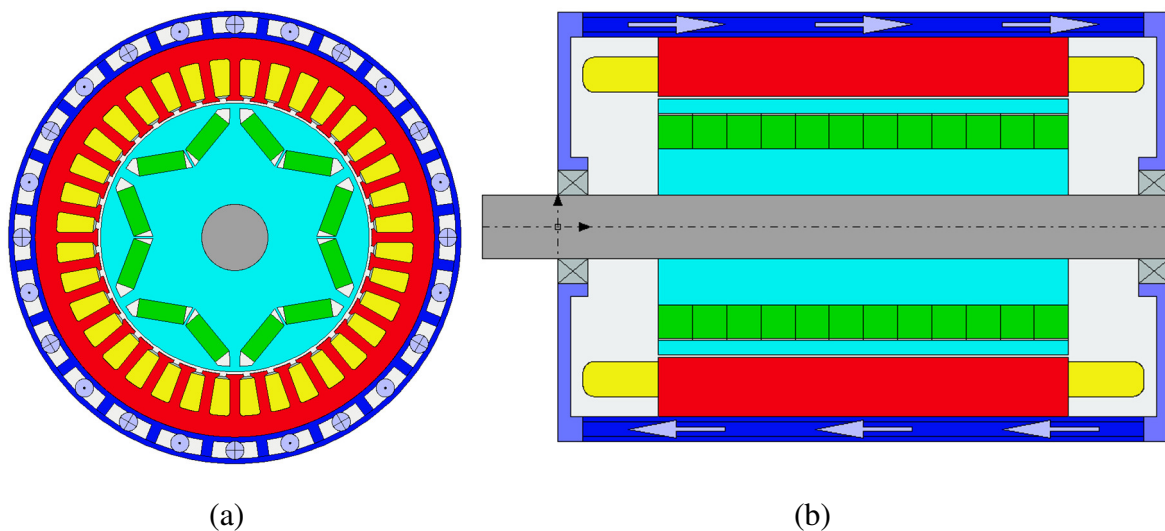
D_s	D_r	L_s	W_t	L	L_m	W_m	n_t	α_m
1506	1013	157	40	1629	179	68	28	139

Motor-CAD parametri koji su mapiranjem parametara optimizacije promijenjeni u odnosu na inicijalnu konfiguraciju navedeni su u tablici (Tablica 5.28).

Tablica 5.28 Motor-CAD parametri

Motor-CAD parametar	Opis	Vrijednost
Housing Dia	Promjer kućišta [mm]	170,6
Stator Lam Dia	Promjer statora [mm]	150,6
Stator Bore	Promjer provrta statora [mm]	103,3
Tooth Width	Širina zuba [mm]	4
Sloth Depth	Dubina utora [mm]	15,7
L1 Magnet Thickness	Širina magneta [mm]	6,8
L1 Magnet Bar Width	Duljina magneta [mm]	17,9
L1 Pole V Angle	Kut između magneta [°]	139
L1 Magnet Separation	Udaljenost između magneta [mm]	0,4
Motor Length	Ukupna duljina motora sa kućištem [mm]	242,9
Stator Lam Length	Duljina statorskog paketa [mm]	162,9
Rotor Lam Length	Duljina rotorskog paketa [mm]	162,9
Magnet Length	Aksijalna duljina magneta [mm]	162,9
Turns	Broj zavoja po svitku	28

Slijede rezultati izračuna prezentirani kao u poglavlju 4.



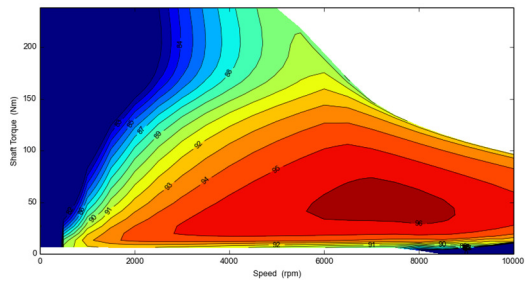
Slika 5.44 Radijalni (a) i aksijalni (b) presjek optimalne konfiguracije

Tablica 5.29 Vrijednosti performansi koje su dio inicijalnih zahtjeva

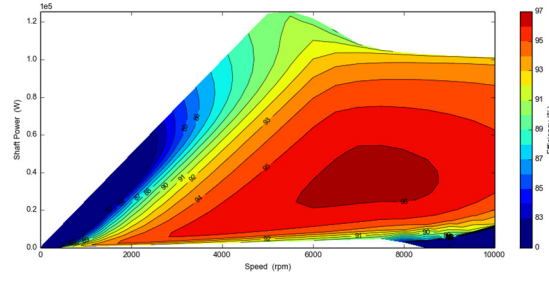
Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna snaga	P_{max} [kW]	125,5	100
Moment na osovini pri rubnoj brzini	M_{cs} [Nm]	237,2	160
Snaga na osovini pri rubnoj brzini	P_{cs} [kW]	124,2	83,3
Moment na osovini pri maksimalnoj brzini	M_{nmax} [Nm]	96,5	80
Snaga na osovini pri maksimalnoj brzini	P_{nmax} [kW]	101,0	80
Maksimalna snaga u trajnom radu (pogon S1)	$P_{S1 max}$ [kW]	68,2	60
Maksimalna temperatura namota u S1 pogonu	ϑ_n [°C]	170,6	180
Maksimalna temperatura magneti u S1 pogonu	ϑ_m [°C]	143,7	160
Ukupni promjer	D [mm]	170,6	260
Ukupna duljina	L [mm]	242,9	260
Masa	m [kg]	20,1	
Cijena	c [\$]	326,9	
Fazna struja pri P_{cs} i n_{max} (S1 radna točka)	I_{s1} [A]	110	

Tablica 5.30 Vrijednosti ciljnih performansi

Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna korisnost	η_{max} [%]	96,37	95
Omjer momenta i cijene	M_{cs}/c [Nm/\$]	0,73	
Omjer momenta za i mase	M_{cs}/m [Nm/kg]	11,78	

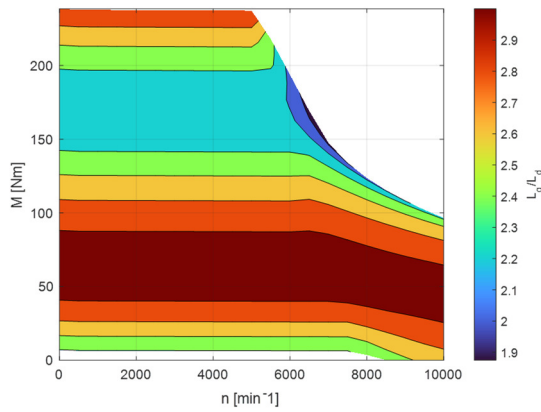


(a)

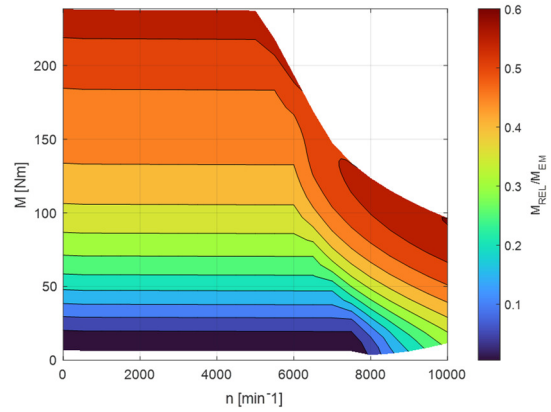


(b)

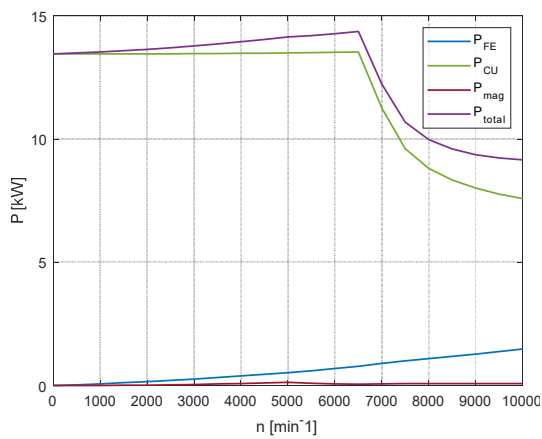
Slika 5.45 Mape korisnosti u moment–brzina (a) i snaga–brzina (b) ravninama



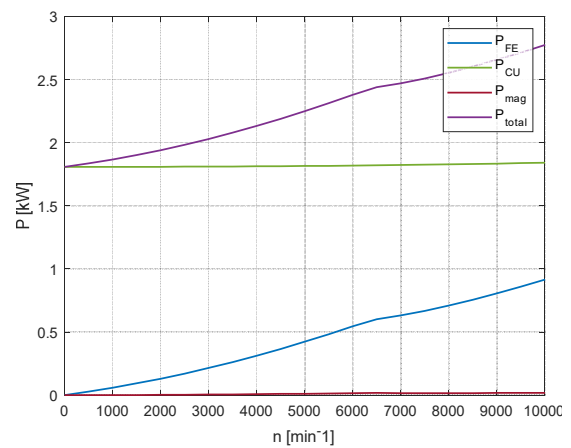
(a)



(b)

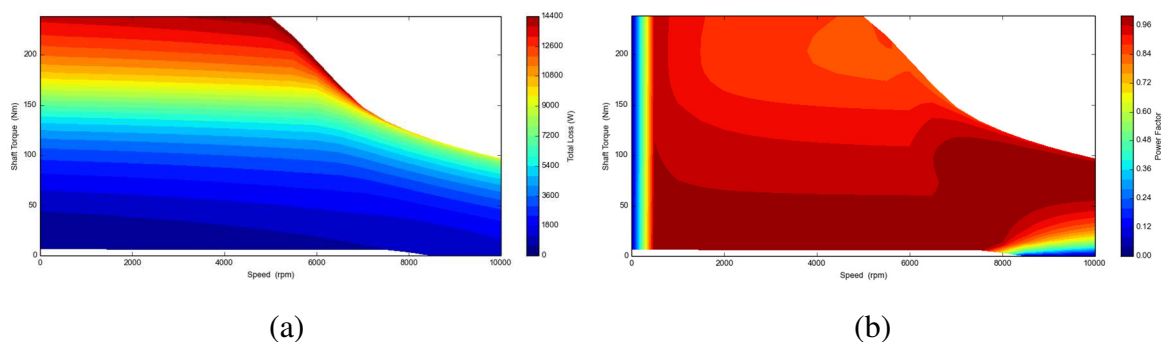
Slika 5.46 Mape omjera induktiviteta L_q/L_d (a) i udjela reluktantnog momenta u ukupnom elektromagnetskom omjeru (b) prikazane u moment–brzina ravnini

(a)

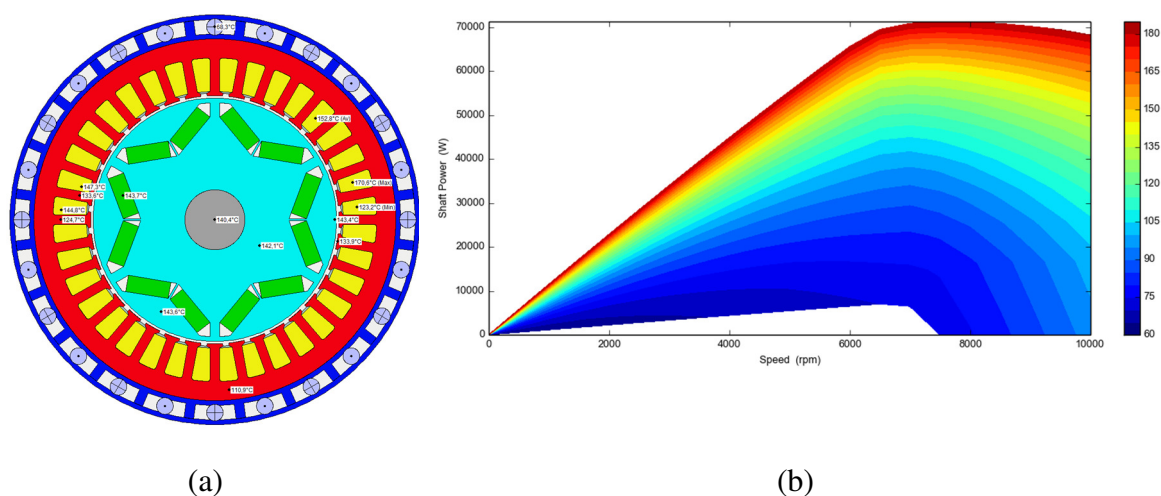


(b)

Slika 5.47 Gubici na faznim strujama I_n (a) i I_{s1} (b)



Slika 5.48 Mape gubitaka (a) i faktora snage (b) u moment–brzina ravnini



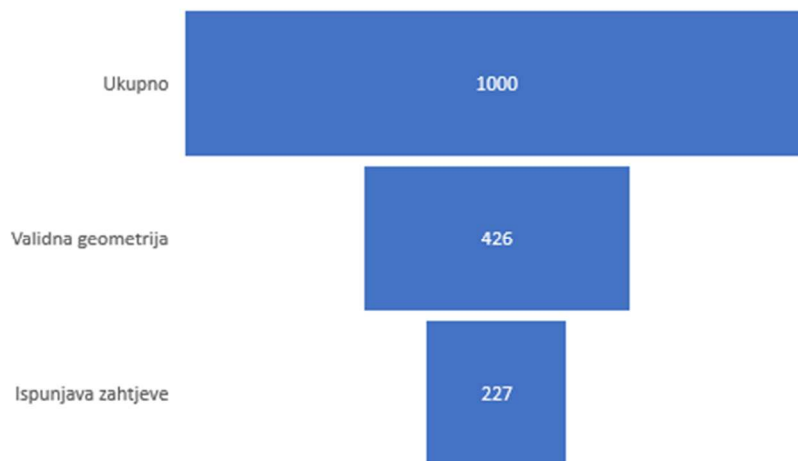
Slika 5.49 Radijalni presjek raspodjele temperatura u trajnom radu (a) i ograničenja snage u trajnom radu s obzirom na maksimalno dozvoljene temperature (b)

5.5.4. Rezultati optimizacije s ciljem maksimalna efikasnost

Osnovni statistički podaci o rezultatima izvođenja optimizacije s ciljem maksimizacije omjera moment/masa navedeni su u tablici (Tablica 5.31) i prikazani na slici (Slika 5.50).

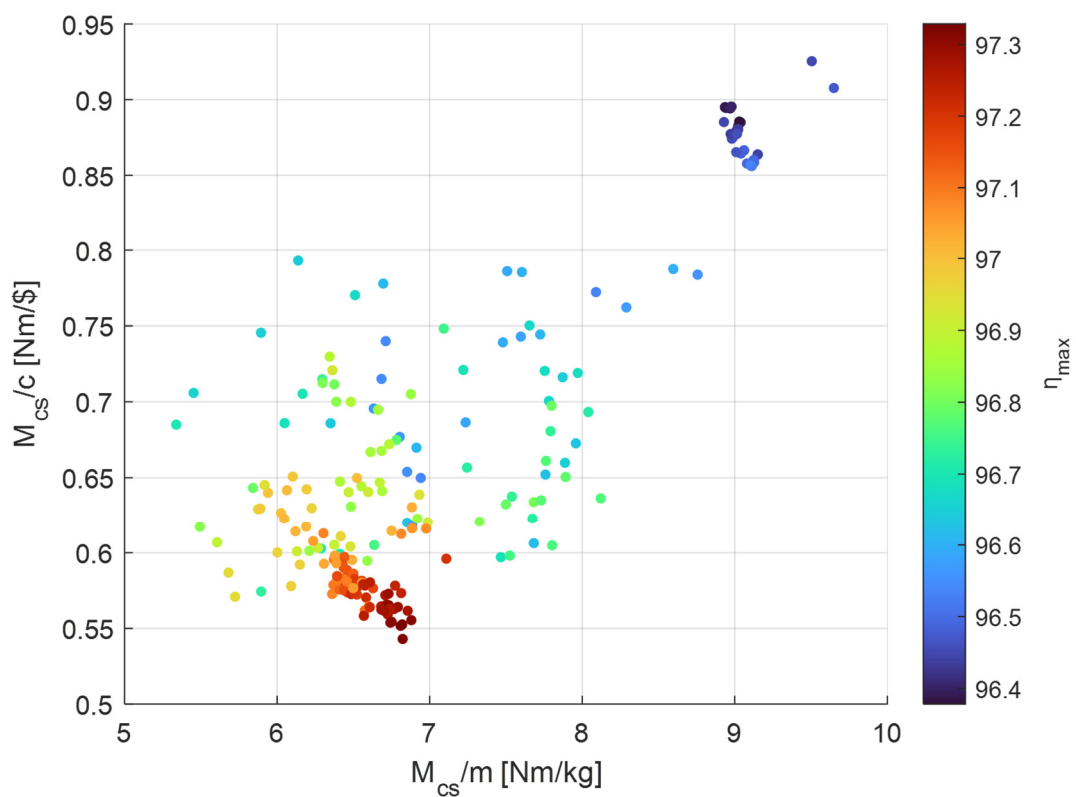
Tablica 5.31 Rezultati izvođenja optimizacije

Ukupan broj iteracija	1000
Konfiguracije s neispravnom geometrijom	57,4 %
Konfiguracije s ispravnom geometrijom koje ne ispunjavaju zahtjeve	19,9 %
Konfiguracije koje ispunjavaju zahtjeve (ispravne konfiguracije)	22,7 %
Optimalni iznos cilja moment/masa	97,33 %



Slika 5.50 Rezultati izvođenja optimizacije

Na slici (Slika 5.51) detaljan je prikaz raspodjele ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi: omjera momenta i cijene, omjera momenta i mase i maksimalne efikasnosti.



Slika 5.51 Raspodjela ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi

Ispis optimalnog rješenja MIDACO-SOLVER-a prikazan je na slici (Slika 5.52). Vektor ulaznih parametara naveden je u tablici (Tablica 5.32).

```

CURRENT BEST SOLUTION
-----
EVAL:      997,  TIME:  15568,  IFLAG:  -1
-----
f (X) =                -97.328599999999994
-----
VIOLATION OF G(X)                0.000000000000000
-----
g(  1) =      0.000000000  (EQUALITY CONSTR)
g(  2) =     42.550200000  (IN-EQUAL CONSTR)
g(  3) =     54.706200000  (IN-EQUAL CONSTR)
g(  4) =     46.785900000  (IN-EQUAL CONSTR)
g(  5) =     29.086600000  (IN-EQUAL CONSTR)
g(  6) =     52.769900000  (IN-EQUAL CONSTR)
g(  7) =     37.334200000  (IN-EQUAL CONSTR)
g(  8) =    500.000000000  (IN-EQUAL CONSTR)
g(  9) =      0.000000000  (IN-EQUAL CONSTR)
g( 10) =      2.328600000  (IN-EQUAL CONSTR)
g( 11) =     49.552600000  (IN-EQUAL CONSTR)
g( 12) =     61.729400000  (IN-EQUAL CONSTR)
-----
x(  1) =      1809.00000000000000000000;  %  _____ x _____
x(  2) =     1034.00000000000000000000;  %  _____ x _____
x(  3) =      222.00000000000000000000;  %  _____ x _____
x(  4) =       44.00000000000000000000;  %  x _____
x(  5) =     1765.00000000000000000000;  %  _____ x _____
x(  6) =     188.00000000000000000000;  %  _____ x _____
x(  7) =      65.00000000000000000000;  %  _____ x _____
x(  8) =      21.00000000000000000000;  %  _____ x _____
x(  9) =     130.00000000000000000000;  %  _____ x _____

OPTIMIZATION FINISHED ---> MAXEVAL REACHED

```

Slika 5.52 Ispis optimalnog rješenja MIDACO-SOLVERA

Tablica 5.32 Parametri optimalne konfiguracije

D_s	D_r	L_s	W_t	L	L_m	W_m	n_t	α_m
1809	1034	222	44	1765	188	65	21	130

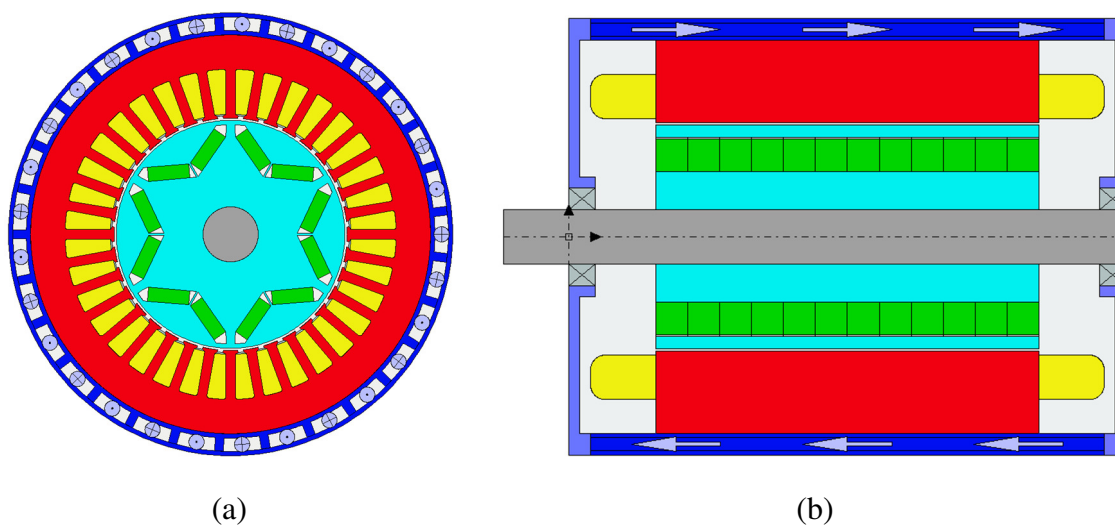
Motor-CAD parametri koji su mapiranjem parametara optimizacije promijenjeni u odnosu na inicijalnu konfiguraciju navedeni su u tablici (Tablica 5.33).

Tablica 5.33 Motor-CAD parametri

Motor-CAD parametar	Opis	Vrijednost
---------------------	------	------------

Housing Dia	Promjer kućišta [mm]	200,9
Stator Lam Dia	Promjer statora [mm]	180,9
Stator Bore	Promjer provrta statora [mm]	105,4
Tooth Width	Širina zuba [mm]	4,4
Sloth Depth	Dubina utora [mm]	22,2
L1 Magnet Thickness	Širina magneta [mm]	6,5
L1 Magnet Bar Width	Duljina magneta [mm]	18,8
L1 Pole V Angle	Kut između magneta [°]	130
L1 Magnet Separation	Udaljenost između magneta [mm]	0,6
Motor Length	Ukupna duljina motora sa kućištem [mm]	256,5
Stator Lam Length	Duljina statorskog paketa [mm]	176,5
Rotor Lam Length	Duljina rotorskog paketa [mm]	176,5
Magnet Length	Aksijalna duljina magneta [mm]	176,5
Turns	Broj zavoja po svitku	21

Slijede rezultati izračuna prezentirani kao u poglavlju 4.



Slika 5.53 Radijalni (a) i aksijalni (b) presjek optimalne konfiguracije

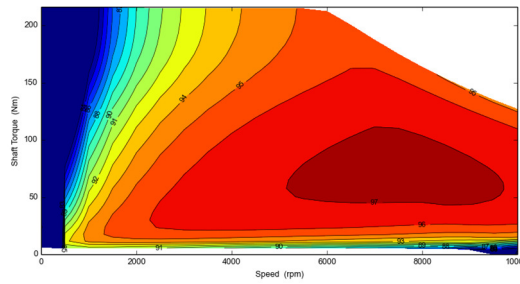
Tablica 5.34 Vrijednosti performansi koje su dio inicijalnih zahtjeva

Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
-------	--------	-------	---------

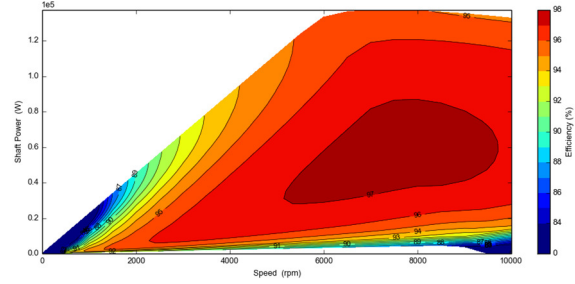
Maksimalna snaga	P_{max} [kW]	137,3	100
Moment na osovini pri rubnoj brzini	M_{cs} [Nm]	214,7	160
Snaga na osovini pri rubnoj brzini	P_{cs} [kW]	112,4	83,3
Moment na osovini pri maksimalnoj brzini	M_{nmax} [Nm]	126,8	80
Snaga na osovini pri maksimalnoj brzini	P_{nmax} [kW]	132,8	80
Maksimalna snaga u trajnom radu (pogon S1)	$P_{S1 max}$ [kW]	103,9	60
Maksimalna temperatura namota u S1 pogonu	ϑ_n [°C]	118,8	180
Maksimalna temperatura magneta u S1 pogonu	ϑ_m [°C]	110,4	160
Ukupni promjer	D [mm]	200,9	260
Ukupna duljina	L [mm]	256,5	260
Masa	m [kg]	31,5	
Cijena	c [\$]	388,5	
Fazna struja pri P_{cs} i n_{max} (S1 radna točka)	I_{s1} [A]	110	

Tablica 5.35 Vrijednosti ciljnih performansi

Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna korisnost	η_{max} [%]	97,33	95
Omjer momenta i cijene	M_{cs}/c [Nm/\$]	0,55	
Omjer momenta za i mase	M_{cs}/m [Nm/kg]	6,82	

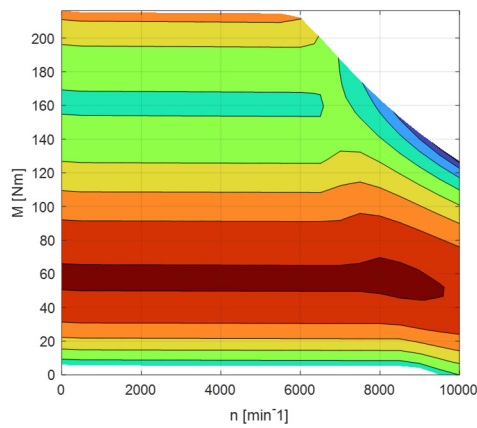


(a)

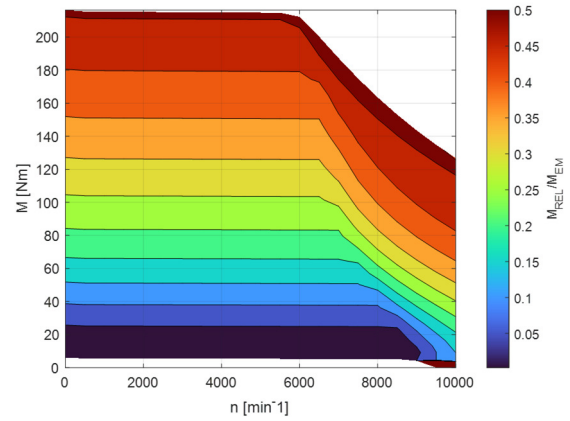


(b)

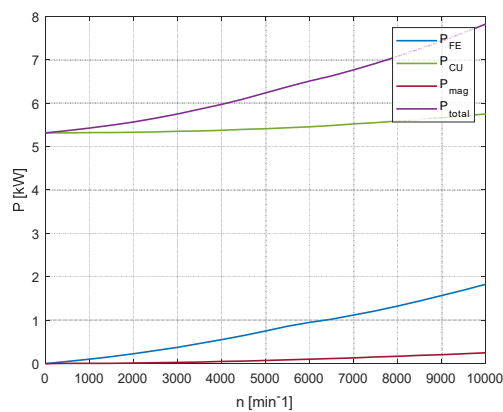
Slika 5.54 Mape korisnosti u moment–brzina (a) i snaga–brzina (b) ravninama



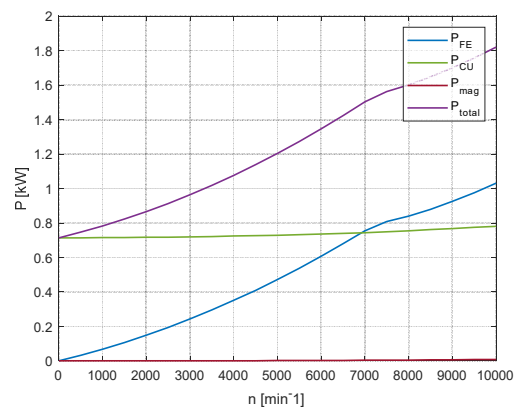
(a)



(b)

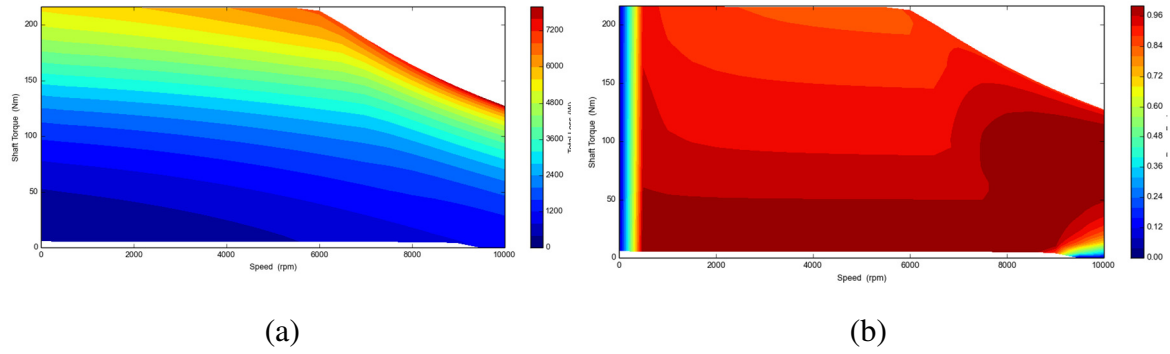
Slika 5.55 Mape omjera induktiviteta L_q/L_d (a) i udjela reluktantnog momenta u ukupnom elektromagnetskom omjeru (b) prikazane u moment–brzina ravnini

(a)

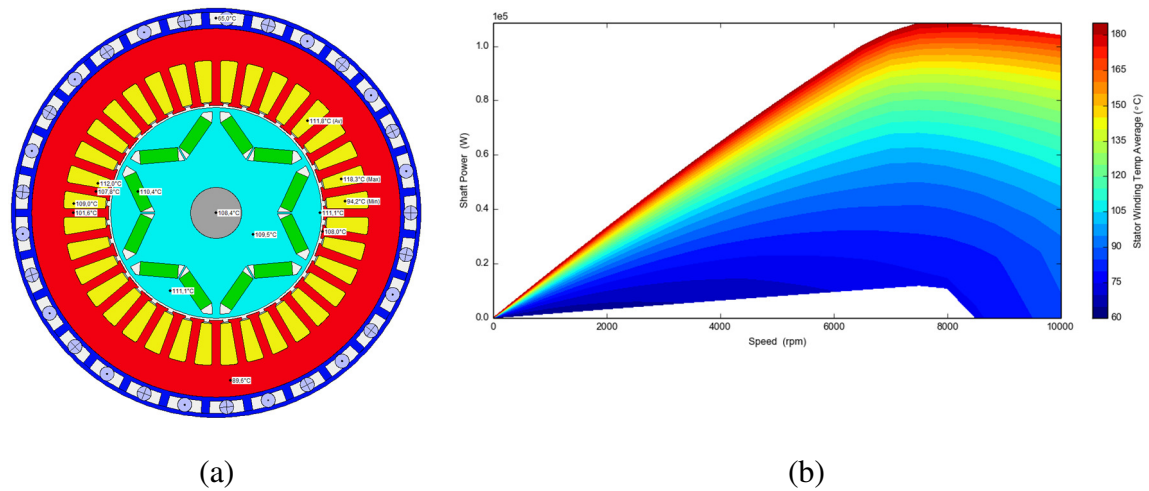


(b)

Slika 5.56 Gubici na faznim strujama I_n (a) i I_{s1} (b)



Slika 5.57 Mape gubitaka (a) i faktora snage (b) u moment–brzina ravnini



Slika 5.58 Radijalni presjek raspodjele temperatura u trajnom radu (a) i ograničenja snage u trajnom radu s obzirom na maksimalno dozvoljene temperature (b)

5.6. Optimizacija za D topologiju IPM motora

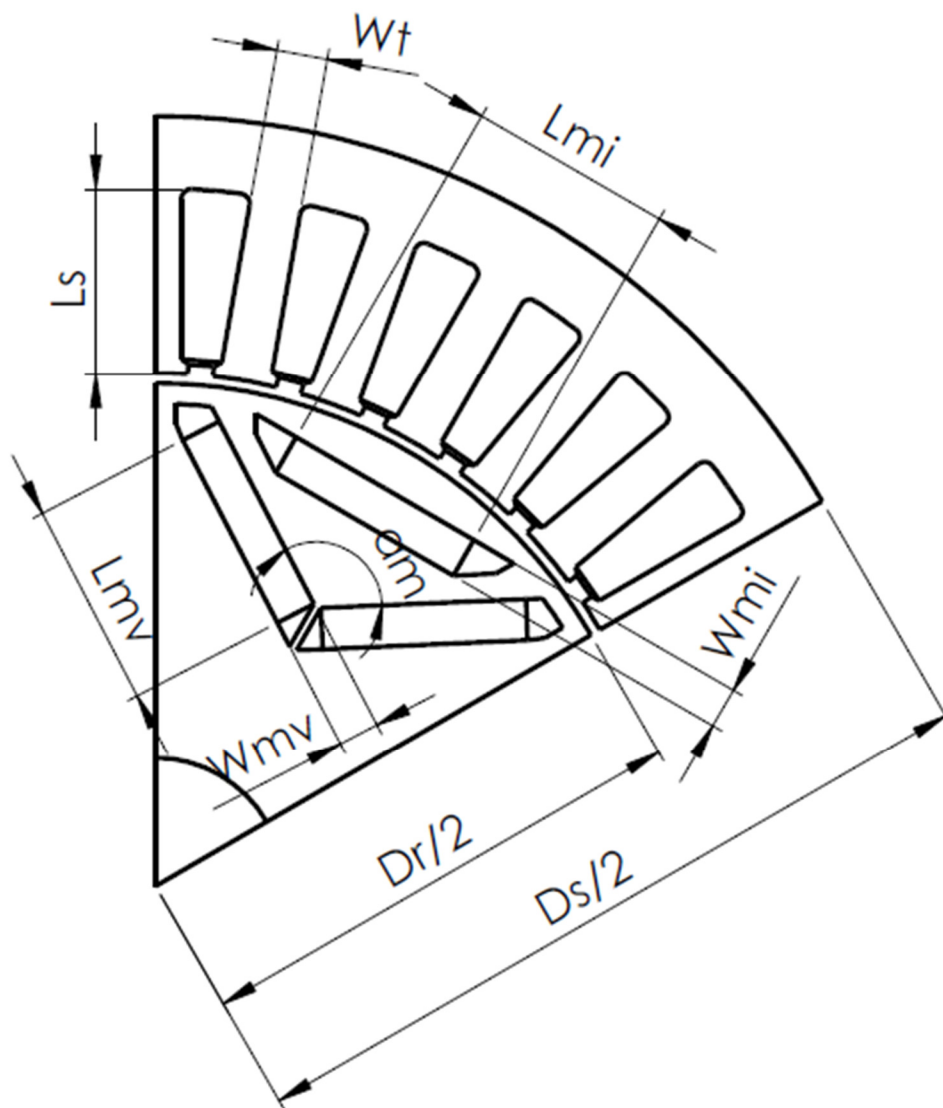
5.6.1. Parametri optimizacije

Za optimizaciju za D topologiju IPM motora vektor ulaznih variabli y čine parametri navedeni u tablici (Tablica 5.36). Odgovarajući parametrizirani geometrijski model prikazan je na slici (Slika 5.59).

Tablica 5.36 Parametri optimizacije D topologije

Oznaka	Opis	Preciznost
D_s	Promjer statora	0,1 [mm]
D_r	Promjer rotora	0,1 [mm]

L_s	Dubina utora	0,1 [mm]
W_t	Širina zuba	0,1 [mm]
L	Aksijalna duljina statorskog i rotorskog paketa	0,1 [mm]
L_{mi}	Duljina I magneta	0,1 [mm]
W_{mi}	Širina I magneta	0,1 [mm]
L_{mv}	Duljina V magneta	0,1 [mm]
W_{mv}	Širina V magneta	0,1 [mm]
n_t	Broj zavoja	1
α_m	Kut između magneta	1



Slika 5.59 Parametrizirani model radijalne geometrije

Inicijalna vrijednost parametara optimizacije kojom započinje svaka od optimizacija za D topologiju navedene su u tablici (Tablica 5.37). Njihovo mapiranje u parametre Motor-CAD rezultira inicijalnom konfiguracijom za D topologiju iz poglavlja 4.6.

Tablica 5.37 Inicijalne vrijednosti parametara optimizacije

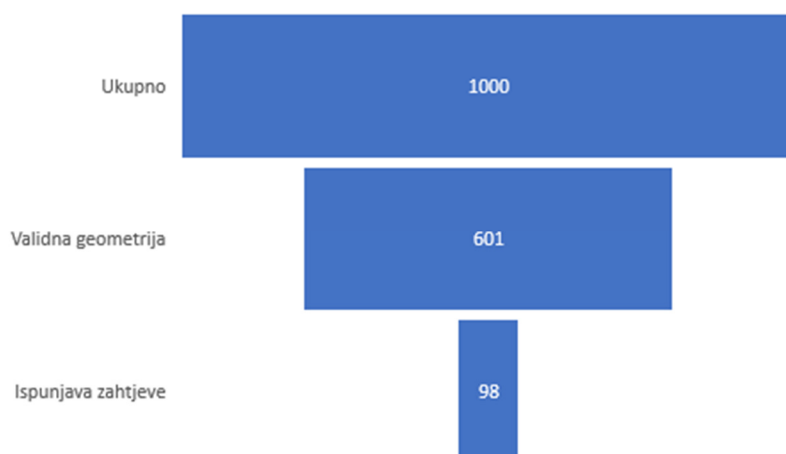
D_s	D_r	L_s	W_t	L	L_{mi}	W_{mi}	L_{mv}	W_{mv}	n_t	α_m
1500	980	180	50	1600	100	40	200	40	27	115

5.6.2. Rezultati optimizacije s ciljem moment/cijena

Osnovni statistički podaci o rezultatima izvođenja optimizacije s ciljem maksimizacije omjera moment/cijena navedeni su u tablici (Tablica 5.38) i prikazani na slici (Slika 5.60).

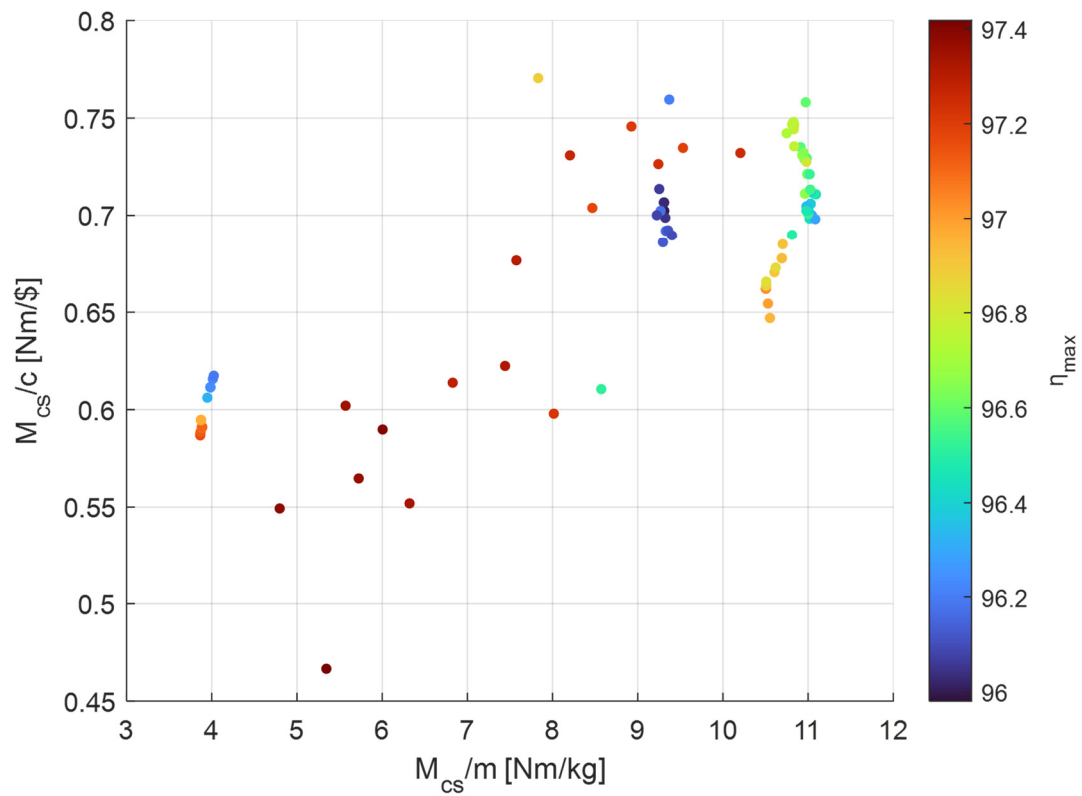
Tablica 5.38 Rezultati izvođenja optimizacije

Ukupan broj iteracija	1000
Konfiguracije s neispravnom geometrijom	60,1 %
Konfiguracije s ispravnom geometrijom koje ne ispunjavaju zahtjeve	30,1 %
Konfiguracije koje ispunjavaju zahtjeve (ispravne konfiguracije)	9,8 %
Optimalni iznos cilja moment/cijena	0,77 Nm/\$



Slika 5.60 Rezultati izvođenja optimizacije

Na slici (Slika 5.61) detaljan je prikaz raspodjele ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi: omjera momenta i cijene, omjera momenta i mase i maksimalne efikasnosti.



Slika 5.61 Raspodjela ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi

Ispis optimalnog rješenja MIDACO-SOLVER-a prikazan je na slici (Slika 5.62). Vektor ulaznih parametara naveden je u tablici (Tablica 5.39).

```

CURRENT BEST SOLUTION
-----
EVAL:          983,  TIME:  59016,  IFLAG:  -1
-----
f(X) =                -0.7705000000000000
-----
VIOLATION OF G(X)                0.0000000000000000
-----
g(  1) =      0.000000000 (EQUALITY CONSTR)
g(  2) =     36.019300000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  3) =     20.003400000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  4) =     16.667800000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  5) =     10.916200000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  6) =     21.230300000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  7) =     12.499900000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  8) =    500.000000000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  9) =      0.000000000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 10) =      1.303800000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 11) =     33.102500000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 12) =      5.478900000 (IN-EQUAL CONSTR)
-----
                                BOUNDS-PROFIL
x(  1) =      1659.000000000000000;  %  _____ x _____
x(  2) =      1149.000000000000000;  %  _____ x _____
x(  3) =          114.000000000000000;  %  _x _____
x(  4) =          52.000000000000000;  %  _x _____
x(  5) =     1524.000000000000000;  %  _____ x _____
x(  6) =          51.000000000000000;  %  x _____
x(  7) =          29.000000000000000;  %  _____ x _____
x(  8) =         177.000000000000000;  %  _____ x _____
x(  9) =          40.000000000000000;  %  _____ x _____
x( 10) =          22.000000000000000;  %  _____ x _____
x( 11) =         119.000000000000000;  %  _____ x _____

OPTIMIZATION FINISHED ---> MAXEVAL REACHED

```

Slika 5.62 Ispis optimalnog rješenja MIDACO-SOLVERA

Tablica 5.39 Parametri optimalne konfiguracije

D_s	D_r	L_s	W_t	L	L_{mi}	W_{mi}	L_{mv}	W_{mv}	n_t	α_m
1659	1149	114	52	1524	51	29	177	40	22	119

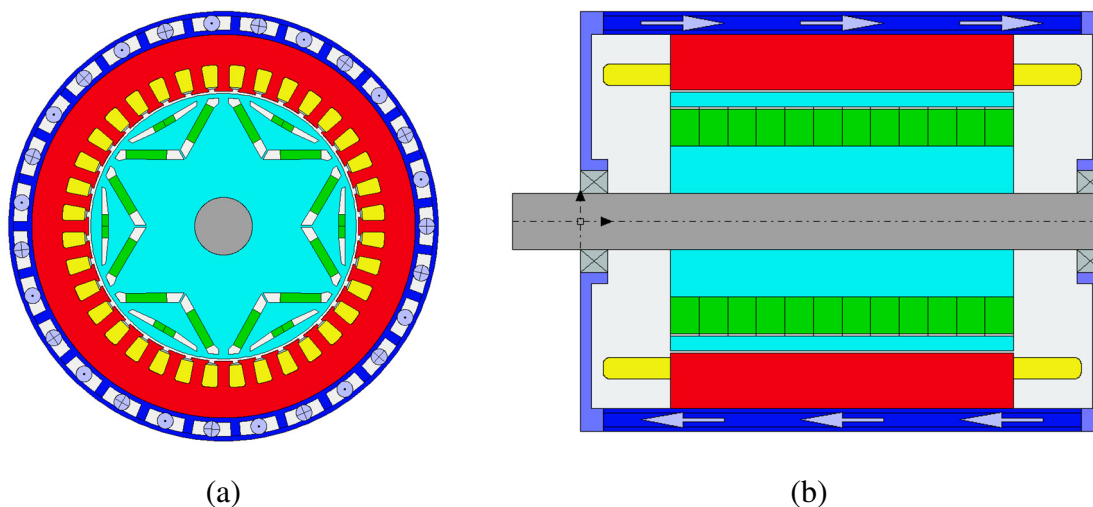
Motor-CAD parametri koji su mapiranjem parametara optimizacije promijenjeni u odnosu na inicijalnu konfiguraciju navedeni su u tablici (Tablica 5.40).

Tablica 5.40 Motor-CAD parametri

Motor-CAD parametar	Opis	Vrijednost
---------------------	------	------------

Housing Dia	Promjer kućišta [mm]	185,9
Stator Lam Dia	Promjer statora [mm]	165,9
Stator Bore	Promjer provrta statora [mm]	116,9
Tooth Width	Širina zuba [mm]	5,2
Sloth Depth	Dubina utora [mm]	11,4
L1 Magnet Thickness	Širina magneta 1. (unutarnjeg) sl. [mm]	4,0
L1 Magnet Bar Width	Duljina magneta 1. sl [mm]	17,7
L1 Web Thickness	Širina vodiča mag toka 1. sl [mm]	4,0
L1 Pole V Angle	Kut između magneta 1. sl [°]	119
L1 Magnet Separation	Udaljenost između magneta 1. sl [mm]	9,6
L2 Magnet Thickness	Širina magneta 2. sl [mm]	2,9
L2 Magnet Bar Width	Duljina magneta 2. sl [mm]	5,1
L2 Web Thickness	Širina vodiča mag toka 2. sl [mm]	23,0
Motor Length	Ukupna duljina motora sa kućištem [mm]	232,4
Stator Lam Length	Duljina statorskog paketa [mm]	152,4
Rotor Lam Length	Duljina rotorskog paketa [mm]	152,4
Magnet Length	Aksijalna duljina magneta [mm]	152,4
Turns	Broj zavoja po svitku	22

Slijede rezultati izračuna prezentirani kao u poglavlju 4.



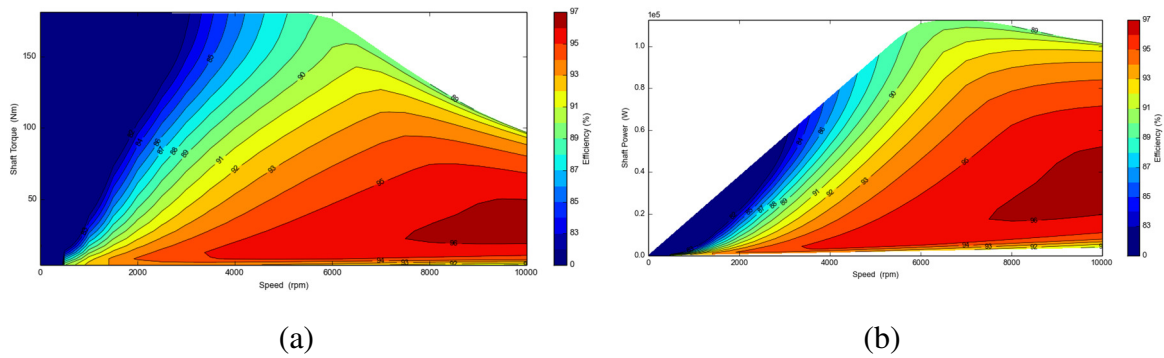
Slika 5.63 Radijalni (a) i aksijalni (b) presjek optimalne konfiguracije

Tablica 5.41 Vrijednosti performansi koje su dio inicijalnih zahtjeva

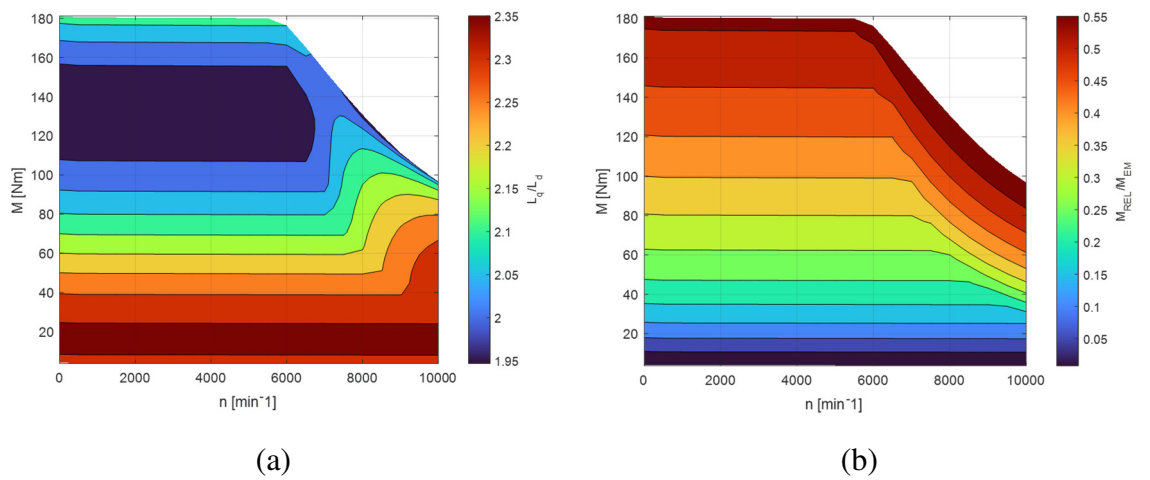
Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna snaga	P_{max} [kW]	112,5	100
Moment na osovini pri rubnoj brzini	M_{cs} [Nm]	180,0	160
Snaga na osovini pri rubnoj brzini	P_{cs} [kW]	94,2	83,3
Moment na osovini pri maksimalnoj brzini	M_{nmax} [Nm]	96,7	80
Snaga na osovini pri maksimalnoj brzini	P_{nmax} [kW]	101,2	80
Maksimalna snaga u trajnom radu (pogon S1)	$P_{S1 max}$ [kW]	65,7	60
Maksimalna temperatura namota u S1 pogonu	ϑ_n [°C]	174,5	180
Maksimalna temperatura magneta u S1 pogonu	ϑ_m [°C]	126,9	160
Ukupni promjer	D [mm]	185,9	260
Ukupna duljina	L [mm]	232,4	260
Masa	m [kg]	23,0	
Cijena	c [\$]	233,6	
Fazna struja pri P_{cs} i n_{max} (S1 radna točka)	I_{s1} [A]	110	

Tablica 5.42 Vrijednosti ciljnih performansi

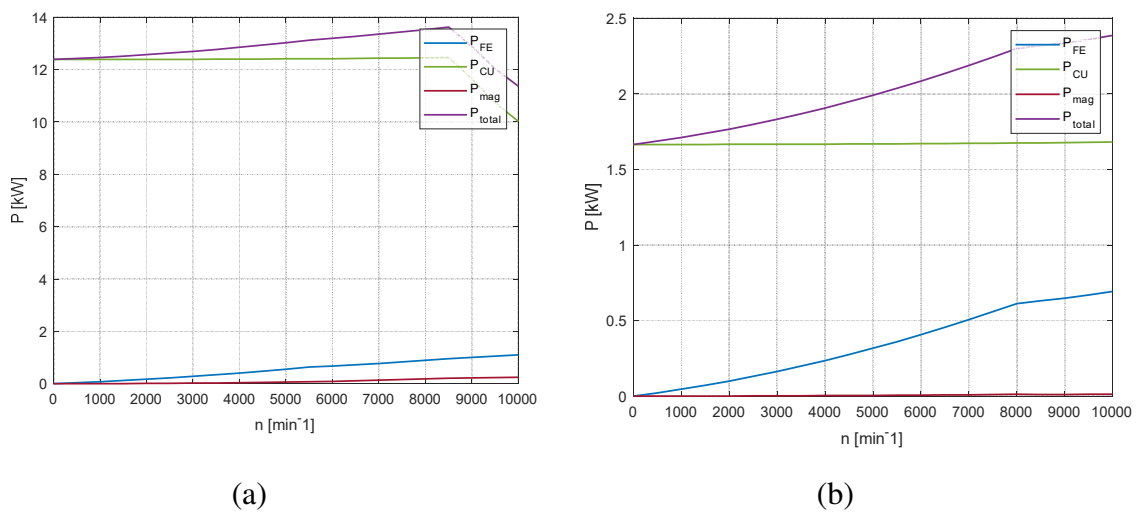
Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna korisnost	η_{max} [%]	96,30	95
Omjer momenta i cijene	M_{cs}/c [Nm/\$]	0,77	
Omjer momenta za i mase	M_{cs}/m [Nm/kg]	7,83	



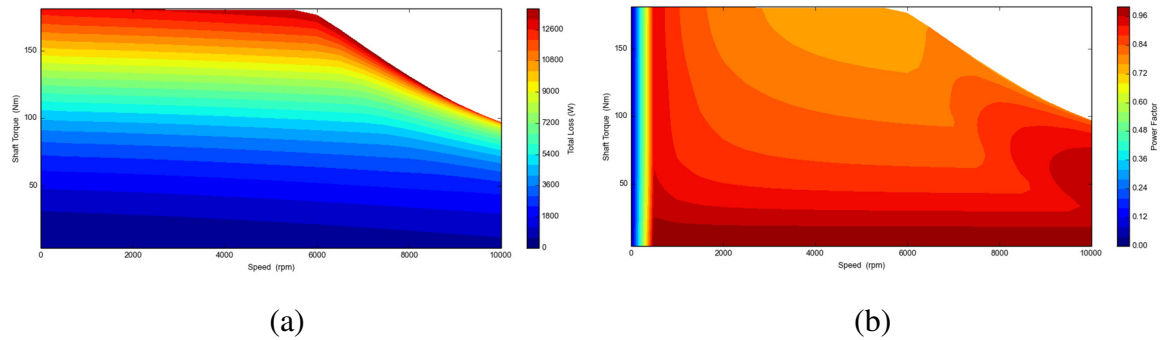
Slika 5.64 Mape korisnosti u moment–brzina (a) i snaga–brzina (b) ravninama



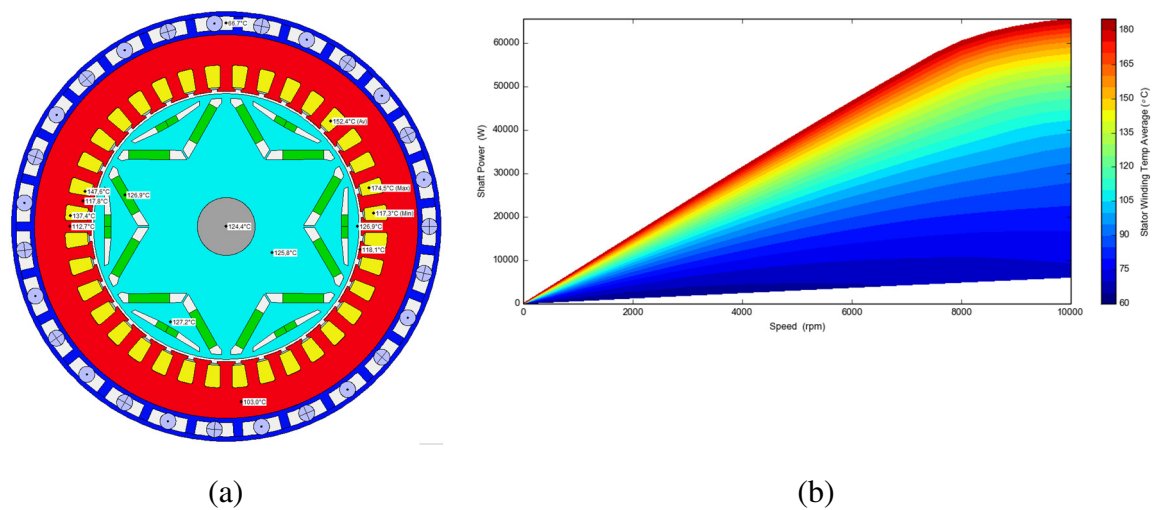
Slika 5.65 Mape omjera induktiviteta L_q/L_d (a) i udjela reluktantnog momenta u ukupnom elektromagnetskom omjeru (b) prikazane u moment–brzina ravnini



Slika 5.66 Gubici na faznim strujama I_n (a) i I_{s1} (b)



Slika 5.67 Mape gubitaka (a) i faktora snage (b) u moment–brzina ravnini



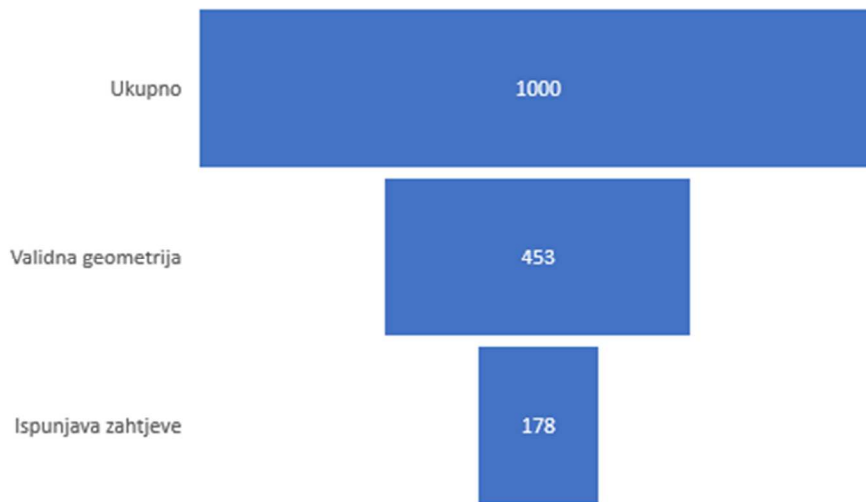
Slika 5.68 Radijalni presjek raspodjele temperatura u trajnom radu (a) i ograničenja snage u trajnom radu s obzirom na maksimalno dozvoljene temperature (b)

5.6.3. Rezultati optimizacije s ciljem moment/masa

Osnovni statistički podaci o rezultatima izvođenja optimizacije s ciljem maksimizacije omjera moment/cijena navedeni su u tablici (Tablica 5.43) i prikazani na slici (Slika 5.69).

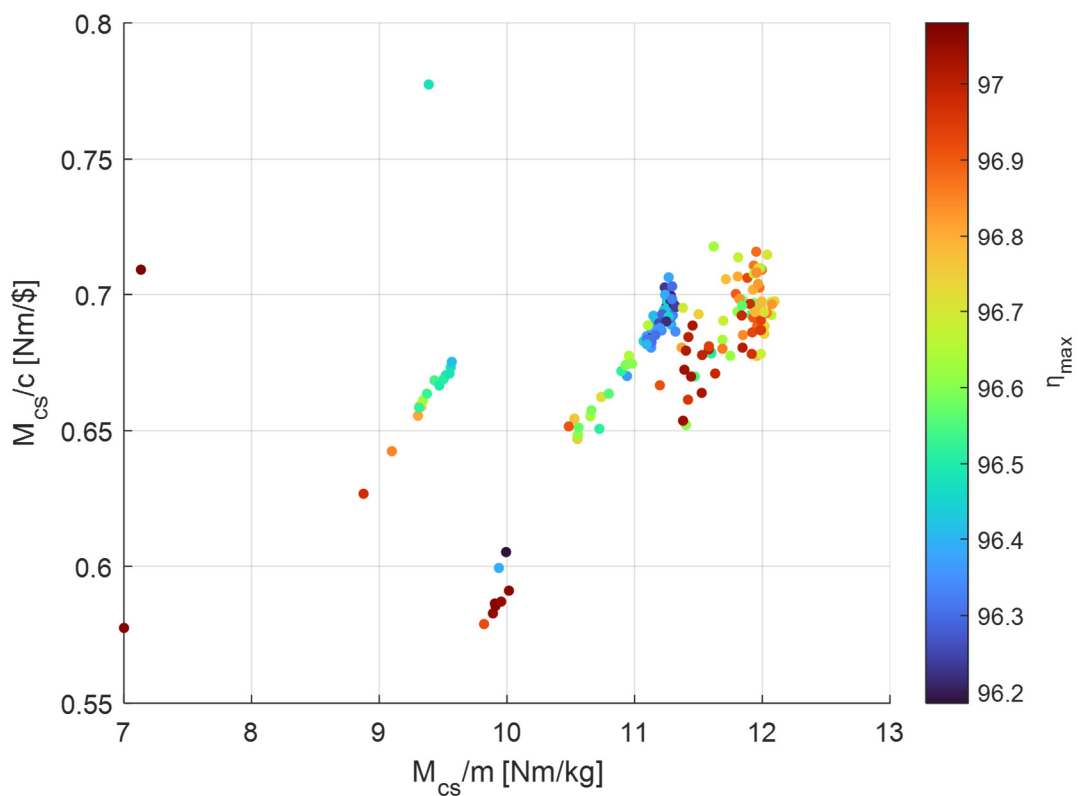
Tablica 5.43 Rezultati izvođenja optimizacije

Ukupan broj iteracija	1000
Konfiguracije s neispravnom geometrijom	54,7 %
Konfiguracije s ispravnom geometrijom koje ne ispunjavaju zahtjeve	27,5 %
Konfiguracije koje ispunjavaju zahtjeve (ispravne konfiguracije)	17,8 %
Optimalni iznos cilja moment/masa	12,1 Nm/kg



Slika 5.69 Rezultati izvođenja optimizacije

Na slici (Slika 5.70) detaljan je prikaz raspodjele ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi: omjera momenta i cijene, omjera momenta i mase i maksimalne efikasnosti.



Slika 5.70 Raspodjela ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi

Ispis optimalnog rješenja MIDACO-SOLVER-a prikazan je na slici (Slika 5.71). Vektor ulaznih parametara naveden je u tablici (Tablica 5.44).

```

CURRENT BEST SOLUTION
-----
EVAL:      946,  TIME:  33776,  IFLAG:  -1
-----
f(x) =                -12.0961000000000000
-----
VIOLATION OF G(X)                0.0000000000000000
-----
g(  1) =      0.000000000 (EQUALITY CONSTR)
g(  2) =      1.086500000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  3) =      74.356200000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  4) =      26.948700000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  5) =      39.375300000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  6) =      31.996400000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  7) =      26.558300000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  8) =      0.000000000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  9) =     500.000000000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 10) =      1.312200000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 11) =     16.217000000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 12) =      0.820500000 (IN-EQUAL CONSTR)
-----
x(  1) =     1504.0000000000000000;  %  _____x_____
x(  2) =      977.0000000000000000;  %  _____x_____
x(  3) =      170.0000000000000000;  %  _____x_____
x(  4) =       50.0000000000000000;  %  _____x_____
x(  5) =     1560.0000000000000000;  %  _____x_____
x(  6) =      102.0000000000000000;  %  _____x_____
x(  7) =       43.0000000000000000;  %  _____x_____
x(  8) =      200.0000000000000000;  %  _____x_____
x(  9) =       45.0000000000000000;  %  _____x_____
x( 10) =       27.0000000000000000;  %  _____x_____
x( 11) =      115.0000000000000000;  %  _____x_____

OPTIMIZATION FINISHED  --->  MAXEVAL REACHED

```

Slika 5.71 Ispis optimalnog rješenja MIDACO-SOLVERA

Tablica 5.44 Parametri optimalne konfiguracije

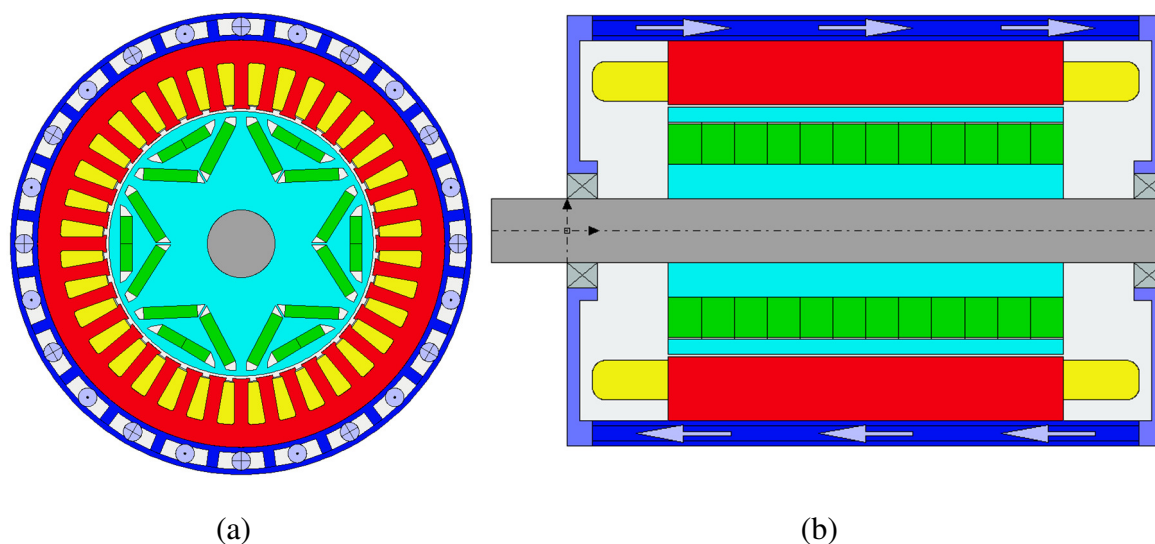
D_s	D_r	L_s	W_t	L	L_{mi}	W_{mi}	L_{mv}	W_{mv}	n_t	α_m
1504	977	170	50	1560	102	43	200	45	27	115

Motor-CAD parametri koji su mapiranjem parametara optimizacije promijenjeni u odnosu na inicijalnu konfiguraciju navedeni su u tablici (Tablica 5.45).

Tablica 5.45 Motor-CAD parametri

Motor-CAD parametar	Opis	Vrijednost
Housing Dia	Promjer kućišta [mm]	170,4
Stator Lam Dia	Promjer statora [mm]	150,4
Stator Bore	Promjer provrta statora [mm]	99,7
Tooth Width	Širina zuba [mm]	5,0
Sloth Depth	Dubina utora [mm]	17,0
L1 Magnet Thickness	Širina magneta 1. (unutarnjeg) sl. [mm]	4,5
L1 Magnet Bar Width	Duljina magneta 1. sl [mm]	20,0
L1 Web Thickness	Širina vodiča mag toka 1. sl [mm]	4,0
L1 Pole V Angle	Kut između magneta 1. sl [°]	115
L1 Magnet Separation	Udaljenost između magneta 1. sl [mm]	0,0
L2 Magnet Thickness	Širina magneta 2. sl [mm]	4,3
L2 Magnet Bar Width	Duljina magneta 2. sl [mm]	10,2
L2 Web Thickness	Širina vodiča mag toka 2. sl [mm]	19,5
Motor Length	Ukupna duljina motora sa kućištem [mm]	236,0
Stator Lam Length	Duljina statorskog paketa [mm]	156,0
Rotor Lam Length	Duljina rotorskog paketa [mm]	156,0
Magnet Length	Aksijalna duljina magneta [mm]	156,0
Turns	Broj zavoja po svitku	27

Slijede rezultati izračuna prezentirani kao u poglavlju 4.



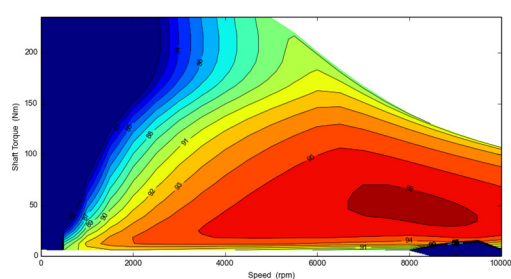
Slika 5.72 Radijalni (a) i aksijalni (b) presjek optimalne konfiguracije

Tablica 5.46 Vrijednosti performansi koje su dio inicijalnih zahtjeva

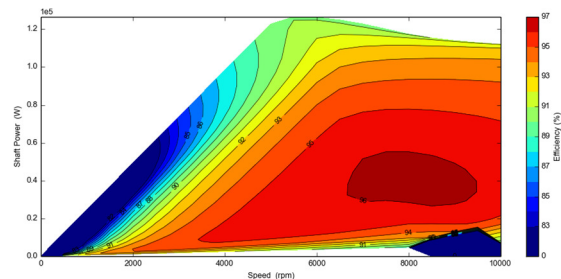
Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna snaga	P_{max} [kW]	126,6	100
Moment na osovini pri rubnoj brzini	M_{cs} [Nm]	234,4	160
Snaga na osovini pri rubnoj brzini	P_{cs} [kW]	122,7	83,3
Moment na osovini pri maksimalnoj brzini	M_{nmax} [Nm]	106,9	80
Snaga na osovini pri maksimalnoj brzini	P_{nmax} [kW]	112,0	80
Maksimalna snaga u trajnom radu (pogon S1)	P_{S1max} [kW]	65,4	60
Maksimalna temperatura namota u S1 pogonu	ϑ_n [°C]	179,2	180
Maksimalna temperatura magneta u S1 pogonu	ϑ_m [°C]	143,8	160
Ukupni promjer	D [mm]	170,4	260
Ukupna duljina	L [mm]	236,0	260
Masa	m [kg]	19,4	
Cijena	c [\$]	336,0	

Tablica 5.47 Vrijednosti ciljnih performansi

Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna korisnost	η_{max} [%]	96,31	95
Omjer momenta i cijene	M_{CS}/c [Nm/\$]	0,70	
Omjer momenta za i mase	M_{CS}/m [Nm/kg]	12,1	

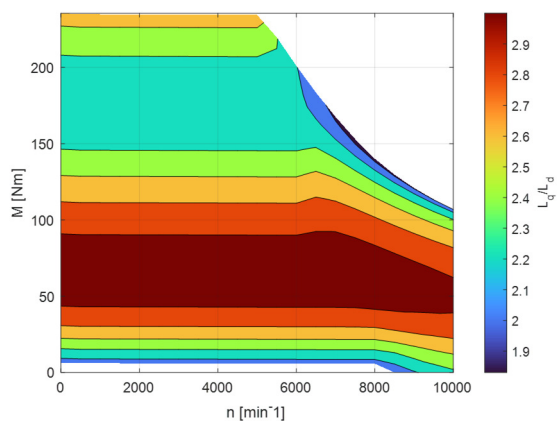


(a)

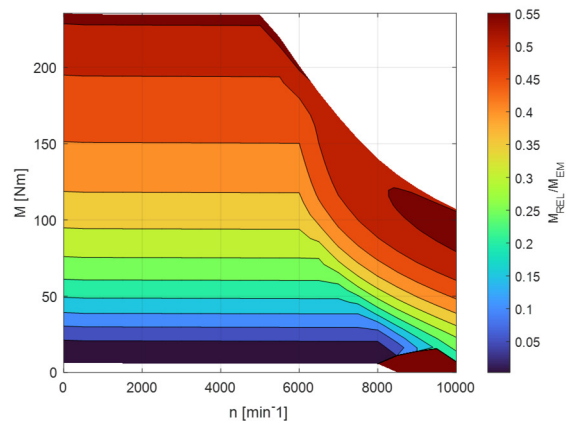


(b)

Slika 5.73 Mape korisnosti u moment–brzina (a) i snaga–brzina (b) ravninama



(a)



(b)

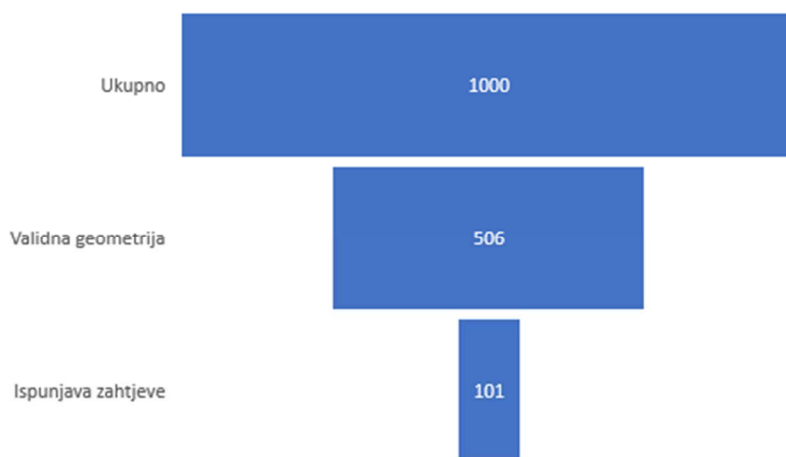
Slika 5.74 Mape omjera induktiviteta L_q/L_d (a) i udjela reluktantnog momenta u ukupnom elektromagnetskom omjeru (b) prikazane u moment–brzina ravnini

5.6.4. Rezultati optimizacije s ciljem maksimalna efikasnost

Osnovni statistički podaci o rezultatima izvođenja optimizacije s ciljem maksimizacije omjera moment/cijena navedeni su u tablici (Tablica 5.48) i prikazani na slici (Slika 5.78).

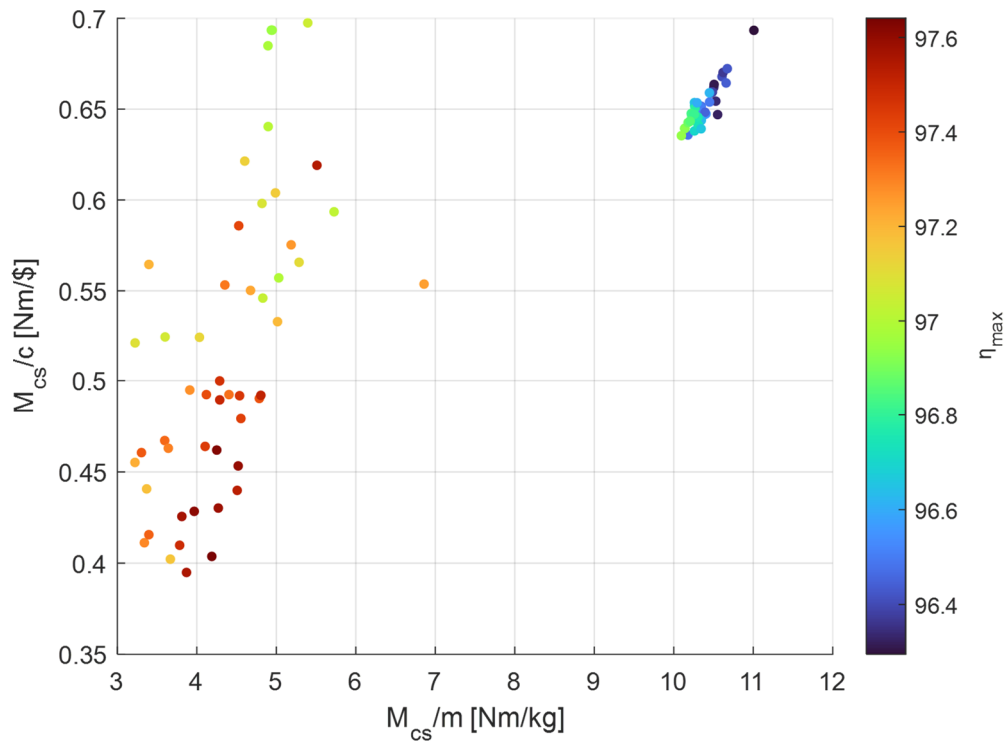
Tablica 5.48 Rezultati izvođenja optimizacije

Ukupan broj iteracija	1000
Konfiguracije s neispravnom geometrijom	49,4 %
Konfiguracije s ispravnom geometrijom koje ne ispunjavaju zahtjeve	40,5 %
Konfiguracije koje ispunjavaju zahtjeve (ispravne konfiguracije)	10,1 %
Optimalni iznos cilja moment/maksimalna efikasnost	97,64 %



Slika 5.78 Rezultati izvođenja optimizacije

Na slici (Slika 5.79) detaljan je prikaz raspodjele ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi: omjera momenta i cijene, omjera momenta i mase i maksimalne efikasnosti.



Slika 5.79 Raspodjela ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi

Ispis optimalnog rješenja MIDACO-SOLVER-a prikazan je na slici (Slika 5.80). Vektor ulaznih parametara naveden je u tablici (Tablica 5.49).

```

CURRENT BEST SOLUTION
-----
EVAL:      929,  TIME:  97695,  IFLAG:  -1
-----
f (X) =                    -97.640299999999996
-----
VIOLATION OF G(X)                0.000000000000000
-----
g(  1) =      0.000000000 (EQUALITY CONSTR)
g(  2) =     37.866000000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  3) =     74.729300000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  4) =     52.810300000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  5) =     39.570700000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  6) =     59.078600000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  7) =     45.972600000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  8) =    500.000000000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  9) =      0.000000000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 10) =      2.640300000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 11) =     37.477400000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 12) =     58.366800000 (IN-EQUAL CONSTR)
-----
                                BOUNDS-PROFIL
x(  1) =      2380.000000000000000000;  %  _____x
x(  2) =     1154.000000000000000000;  %  _____x
x(  3) =      277.000000000000000000;  %  _____x
x(  4) =       45.000000000000000000;  %  _____x
x(  5) =     1800.000000000000000000;  %  _____XU
x(  6) =       69.000000000000000000;  %  _____x
x(  7) =       49.000000000000000000;  %  _____x
x(  8) =      230.000000000000000000;  %  _____x
x(  9) =       59.000000000000000000;  %  _____x
x( 10) =      21.000000000000000000;  %  _____x
x( 11) =     120.000000000000000000;  %  _____x
-----
OPTIMIZATION FINISHED ---> MAXEVAL REACHED

```

Slika 5.80 Ispis optimalnog rješenja MIDACO-SOLVERA

Tablica 5.49 Parametri optimalne konfiguracije

D_s	D_r	L_s	W_t	L	L_{mi}	W_{mi}	L_{mv}	W_{mv}	n_t	α_m
2380	1154	277	45	1800	69	49	230	59	21	120

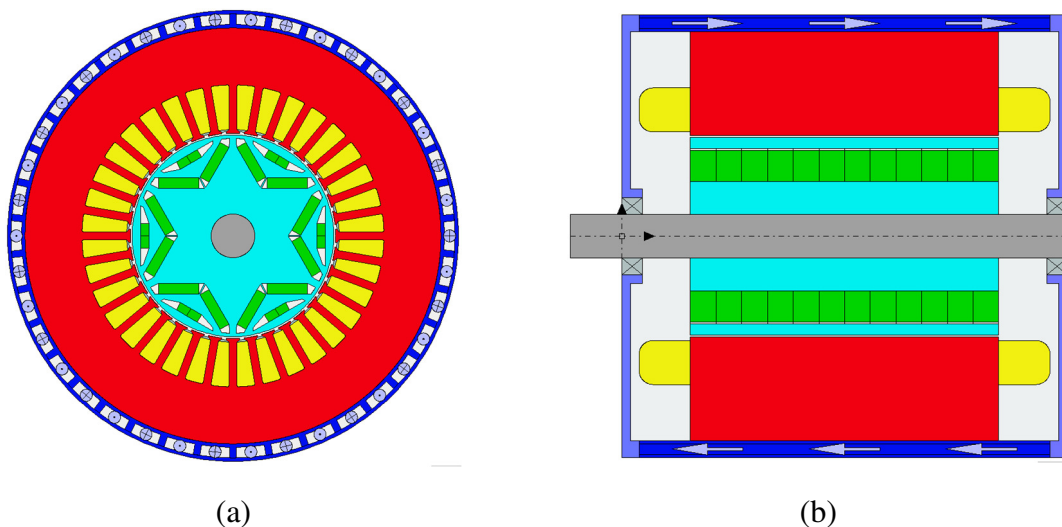
Motor-CAD parametri koji su mapiranjem parametara optimizacije promijenjeni u odnosu na inicijalnu konfiguraciju navedeni su u tablici (Tablica 5.50).

Tablica 5.50 Motor-CAD parametri

Motor-CAD parametar	Opis	Vrijednost
---------------------	------	------------

Housing Dia	Promjer kućišta [mm]	258,0
Stator Lam Dia	Promjer statora [mm]	238,0
Stator Bore	Promjer provrta statora [mm]	117,4
Tooth Width	Širina zuba [mm]	4,5
Sloth Depth	Dubina utora [mm]	27,7
L1 Magnet Thickness	Širina magneta 1. (unutarnjeg) sl. [mm]	5,9
L1 Magnet Bar Width	Duljina magneta 1. sl [mm]	23
L1 Web Thickness	Širina vodiča mag toka 1. sl [mm]	4,0
L1 Pole V Angle	Kut između magneta 1. sl [°]	120
L1 Magnet Separation	Udaljenost između magneta 1. sl [mm]	0,5
L2 Magnet Thickness	Širina magneta 2. sl [mm]	4,9
L2 Magnet Bar Width	Duljina magneta 2. sl [mm]	6,9
L2 Web Thickness	Širina vodiča mag toka 2. sl [mm]	23,0
Motor Length	Ukupna duljina motora sa kućištem [mm]	260,0
Stator Lam Length	Duljina statorskog paketa [mm]	180,0
Rotor Lam Length	Duljina rotorskog paketa [mm]	180,0
Magnet Length	Aksijalna duljina magneta [mm]	180,0
Turns	Broj zavoja po svitku	21

Slijede rezultati izračuna prezentirani kao u poglavlju 4.



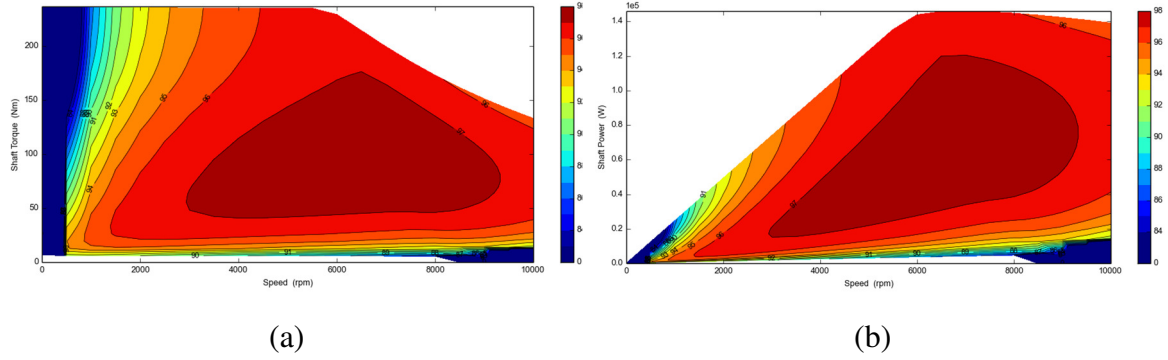
Slika 5.81 Radijalni (a) i aksijalni (b) presjek optimalne konfiguracije

Tablica 5.51 Vrijednosti performansi koje su dio inicijalnih zahtjeva

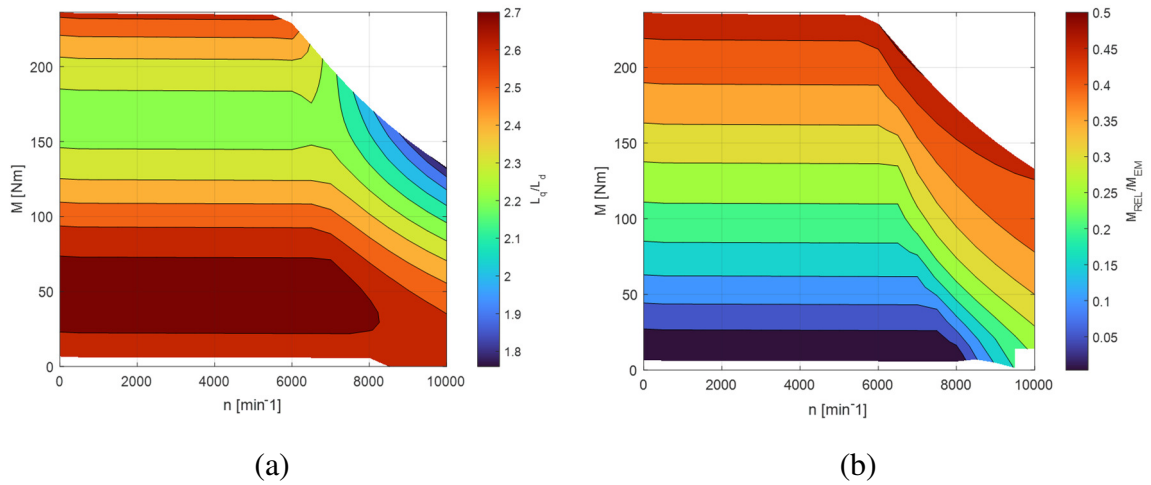
Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna snaga	P_{max} [kW]	146,0	100
Moment na osovini pri rubnoj brzini	M_{cs} [Nm]	234,7	160
Snaga na osovini pri rubnoj brzini	P_{cs} [kW]	122,9	83,3
Moment na osovini pri maksimalnoj brzini	M_{nmax} [Nm]	132,8	80
Snaga na osovini pri maksimalnoj brzini	P_{nmax} [kW]	139,1	80
Maksimalna snaga u trajnom radu (pogon S1)	$P_{S1 max}$ [kW]	101,6	60
Maksimalna temperatura namota u S1 pogonu	ϑ_n [°C]	121,6	180
Maksimalna temperatura magneta u S1 pogonu	ϑ_m [°C]	122,5	160
Ukupni promjer	D [mm]	258,0	260
Ukupna duljina	L [mm]	260,0	260
Masa	m [kg]	56,0	
Cijena	c [\$]	581,4	
Fazna struja pri P_{cs} i n_{max} (S1 radna točka)	I_{s1} [A]	120	

Tablica 5.52 Vrijednosti ciljnih performansi

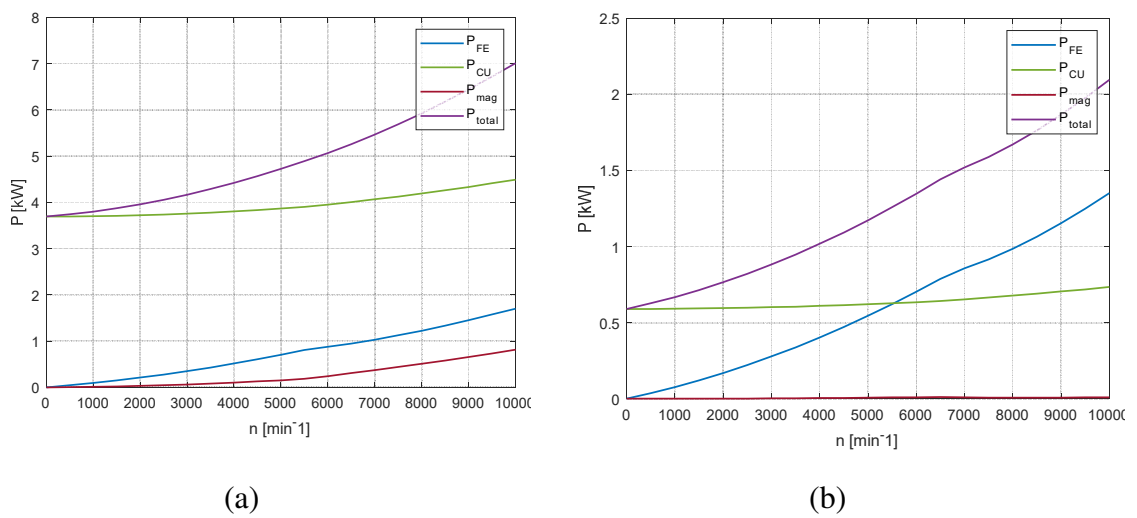
Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna korisnost	η_{max} [%]	97,64	95
Omjer momenta i cijene	M_{cs}/c [Nm/\$]	0,40	
Omjer momenta za i mase	M_{cs}/m [Nm/kg]	4,19	



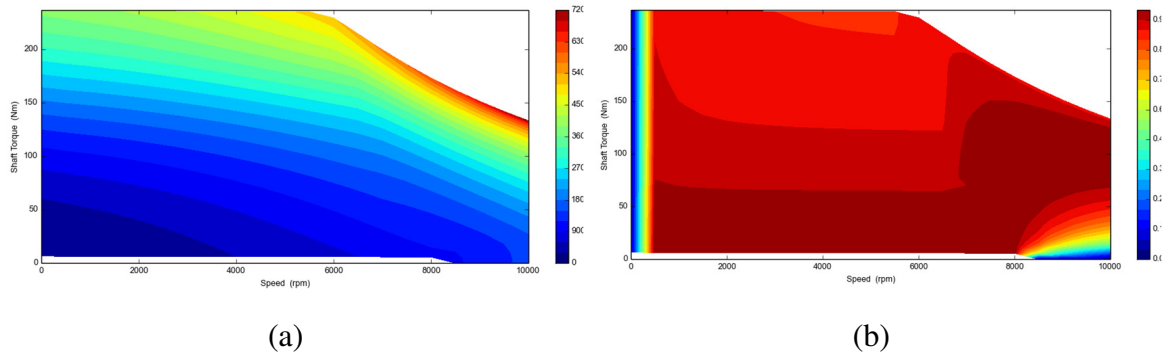
Slika 5.82 Mape korisnosti u moment–brzina (a) i snaga–brzina (b) ravninama



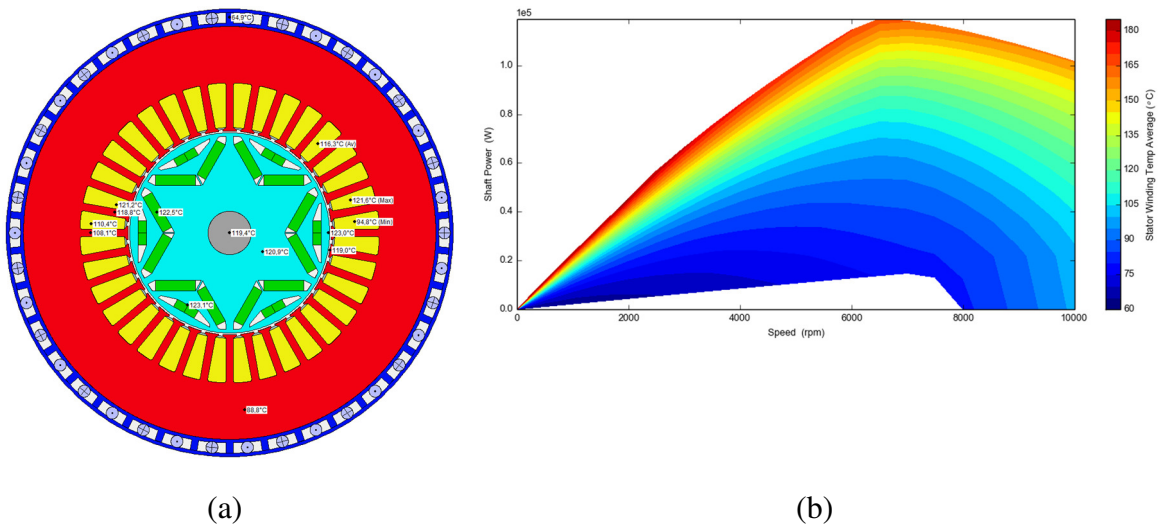
Slika 5.83 Mape omjera induktiviteta L_q/L_d (a) i udjela reluktantnog momenta u ukupnom elektromagnetskom omjeru (b) prikazane u moment–brzina ravnini



Slika 5.84 Gubici na faznim strujama I_n (a) i I_{s1} (b)



Slika 5.85 Mape gubitaka (a) i faktora snage (b) u moment–brzina ravnini



Slika 5.86 Radijalni presjek raspodjele temperatura u trajnom radu (a) i ograničenja snage u trajnom radu s obzirom na maksimalno dozvoljene temperature (b)

5.7. Optimizacija za UII topologiju PMSynRM motora

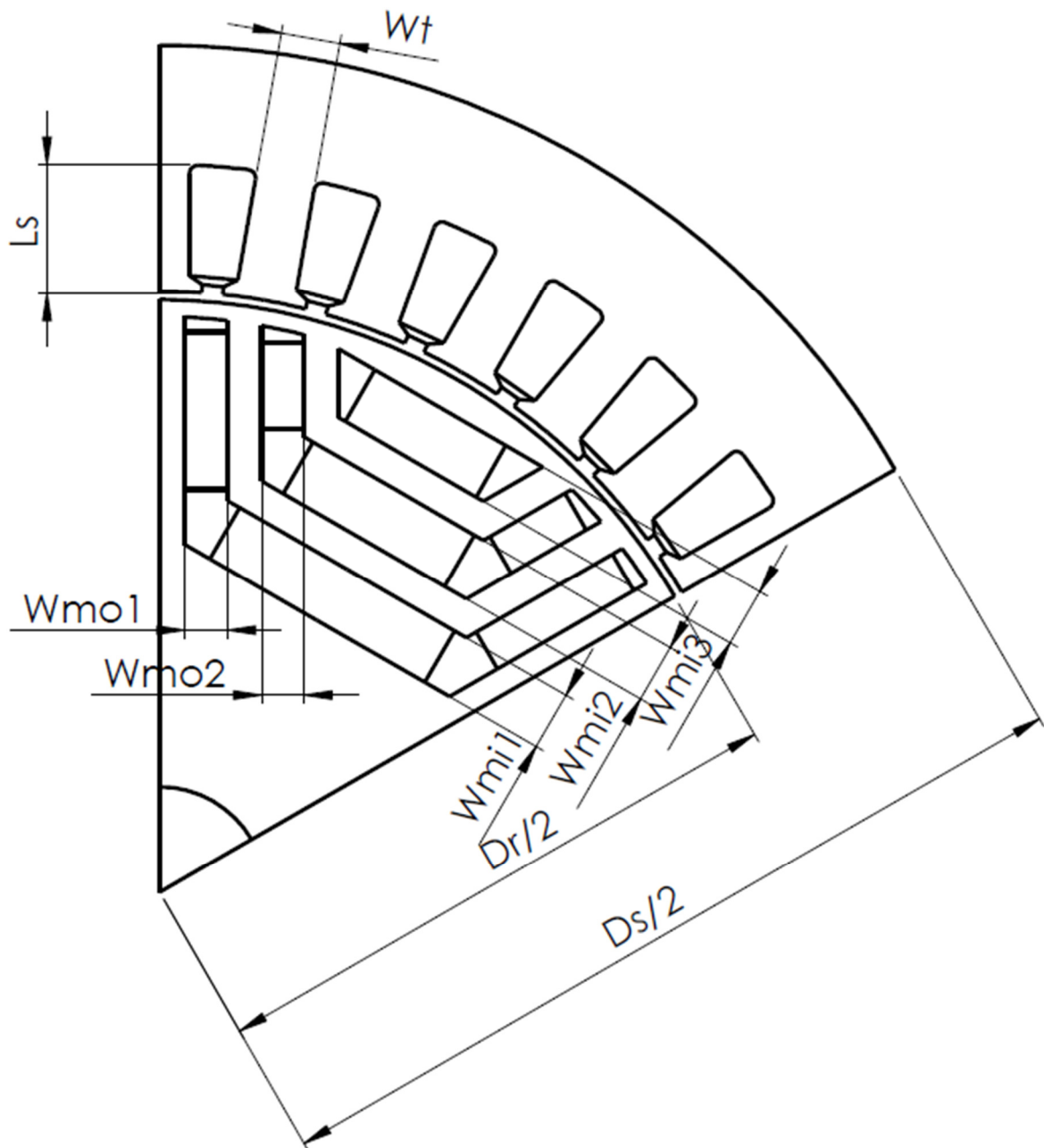
5.7.1. Parametri optimizacije

Za optimizaciju za UII topologiju IPM motora vektor ulaznih varijabli y čine parametri navedeni u tablici (Tablica 5.53). Odgovarajući parametrizirani geometrijski model prikazan je na slici (Slika 5.87).

Tablica 5.53 Parametri optimizacije UII topologije

Oznaka	Opis	Preciznost
D_s	Promjer statora	0,1 [mm]

D_r	Promjer rotora	0,1 [mm]
L_s	Dubina utora	0,1 [mm]
W_t	Širina zuba	0,1 [mm]
L	Aksijalna duljina statorskog i rotorskog paketa	0,1 [mm]
W_{mi1}	Širina unutarnjeg magneta 1. sloja	0,1 [mm]
W_{mo1}	Širina vanjskog magneta 1. sloja	0,1 [mm]
W_{mi2}	Širina unutarnjeg magneta 2. sloja	0,1 [mm]
W_{mo2}	Širina vanjskog magneta 2. sloja	0,1 [mm]
W_{mi3}	Širina unutarnjeg magneta 3. sloja	0,1 [mm]
n_t	Broj zavoja	1



Slika 5.87 Parametrizirani model radijalne geometrije

Inicijalna vrijednost parametara optimizacije kojom započinje svaka od optimizacija za UUI topologiju navedene su u tablici (Tablica 5.54). Njihovo mapiranje u parametre Motor-CAD rezultira inicijalnom konfiguracijom za UUI topologiju iz poglavlja 4.7.

Tablica 5.54 Inicijalne vrijednosti parametara optimizacije

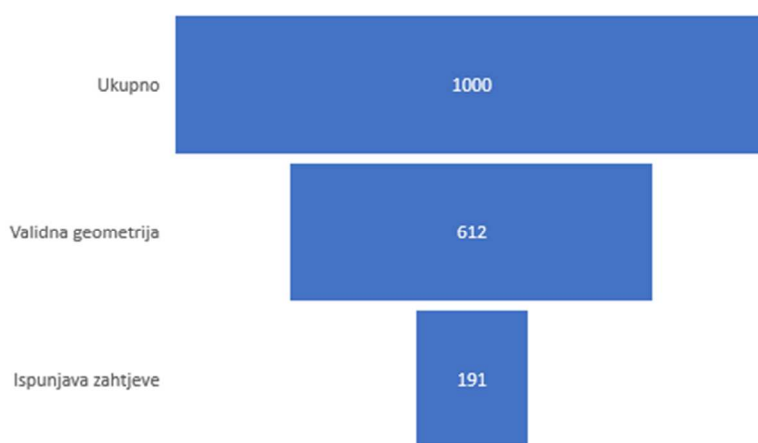
D_s	D_r	L_s	W_t	L	W_{mi1}	W_{mo1}	W_{mi2}	W_{mo2}	W_{mi3}	n_t
2000	1400	150	70	1300	70	50	70	50	70	21

5.7.2. Rezultati optimizacije s ciljem moment/cijena

Osnovni statistički podaci o rezultatima izvođenja optimizacije s ciljem maksimizacije omjera moment/cijena navedeni su u tablici (Tablica 5.55) i prikazani na slici (Slika 5.88).

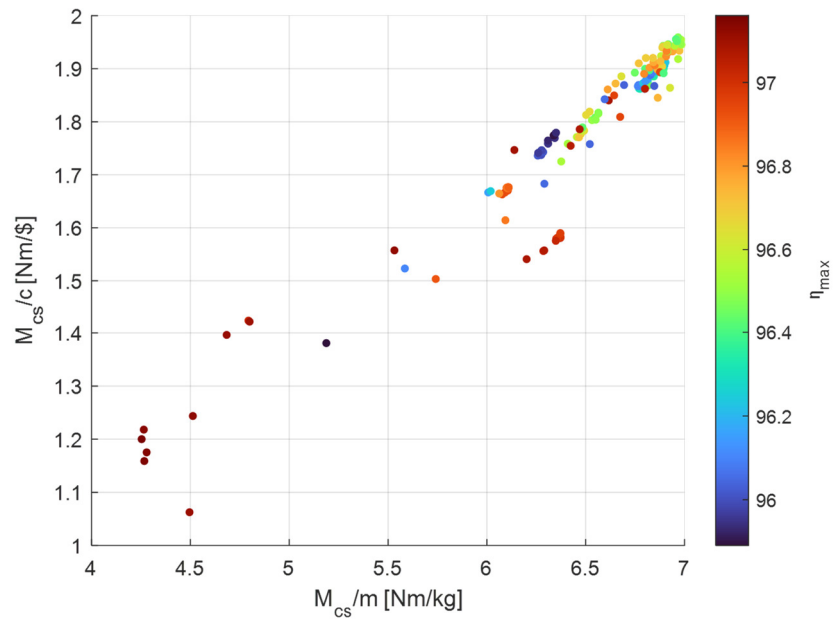
Tablica 5.55 Rezultati izvođenja optimizacije

Ukupan broj iteracija	1000
Konfiguracije s neispravnom geometrijom	37,7 %
Konfiguracije s ispravnom geometrijom koje ne ispunjavaju zahtjeve	42,1 %
Konfiguracije koje ispunjavaju zahtjeve (ispravne konfiguracije)	19,1 %
Optimalni iznos cilja moment/cijena	1,96 Nm/\$



Slika 5.88 Rezultati izvođenja optimizacije

Na slici (Slika 5.89) detaljan je prikaz raspodjele ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi: omjera momenta i cijene, omjera momenta i mase i maksimalne efikasnosti.



Slika 5.89 Raspodjela ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi
 Ispis optimalnog rješenja MIDACO-SOLVER-a prikazan je na slici (Slika 5.90). Vektor ulaznih parametara naveden je u tablici (Tablica 5.56).

```

CURRENT BEST SOLUTION
-----
EVAL:      994,  TIME:  43158,  IFLAG:  -1
-----
f(x) =                                           -1.9592000000000000
-----
VIOLATION OF G(X)                               0.0000000000000000
-----
g(  1) =      0.000000000 (EQUALITY CONSTR)
g(  2) =      1.966200000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  3) =     28.979200000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  4) =      7.525900000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  5) =     15.616000000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  6) =     11.656900000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  7) =      8.105400000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  8) =      0.000000000 (IN-EQUAL CONSTR)
g(  9) =     500.000000000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 10) =      1.203300000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 11) =     26.967200000 (IN-EQUAL CONSTR)
g( 12) =      3.067800000 (IN-EQUAL CONSTR)
-----
x(  1) =      2011.0000000000000000; % _____x_____
x(  2) =     1383.0000000000000000; % _____x_____
x(  3) =      142.0000000000000000; % _____x_____
x(  4) =      65.0000000000000000; % _____x_____
x(  5) =    1263.0000000000000000; % _____x_____
x(  6) =      63.0000000000000000; % _____x_____
x(  7) =      33.0000000000000000; % _____x_____
x(  8) =      71.0000000000000000; % _____x_____
x(  9) =      44.0000000000000000; % _____x_____
x( 10) =      65.0000000000000000; % _____x_____
x( 11) =      23.0000000000000000; % _____x_____

BOUNDS-PROFIL
-----
OPTIMIZATION FINISHED ---> MAXEVAL REACHED

```

Slika 5.90 Ispis optimalnog rješenja MIDACO-SOLVERA

Tablica 5.56 Parametri optimalne konfiguracije

D_s	D_r	L_s	W_t	L	W_{mi1}	W_{mo1}	W_{mi2}	W_{mo2}	W_{mi3}	n_t
2011	1383	142	65	1263	63	33	71	44	65	23

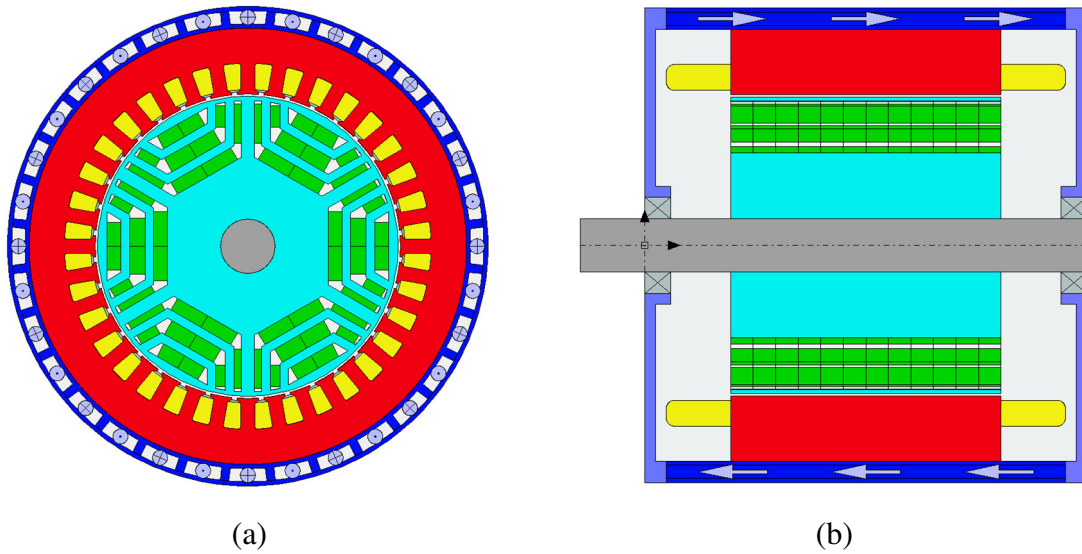
Motor-CAD parametri koji su mapiranjem parametara optimizacije promijenjeni u odnosu na inicijalnu konfiguraciju navedeni su u tablici (Tablica 5.57).

Tablica 5.57 Motor-CAD parametri

Motor-CAD parametar	Opis	Vrijednost
---------------------	------	------------

Housing Dia	Promjer kućišta [mm]	221,1
Stator Lam Dia	Promjer statora [mm]	201,1
Stator Bore	Promjer provrta statora [mm]	140,3
Tooth Width	Širina zuba [mm]	6,5
Sloth Depth	Dubina utora [mm]	14,2
L1 Diameter	Promjer 1. (unutarnjeg) sl. [mm]	73,9
L1 Web Thickness	Širina vodiča mag toka 1. sl. [mm]	6,0
L1 Outer Thickness	Širina vanjskih magneta 1. sl. [mm]	3,3
L1 Outer Mag Length	Duljina vanjskih magneta 1. sl. [mm]	18,0
L1 Inner Thickness	Širina unutarnjeg magneta 1. sl. [mm]	6,3
L1 Inner Mag Length	Duljina unutarnjeg magneta 1. sl. [mm]	16,0
L2 Diameter	Promjer 2. (srednjeg) sl. [mm]	94,5
L2 Web Thickness	Širina vodiča mag toka 2. sl. [mm]	20,6
L2 Outer Thickness	Širina vanjskih magneta 2. sl. [mm]	4,4
L2 Outer Mag Length	Duljina vanjskih magneta 2. sl. [mm]	9,7
L2 Inner Thickness	Širina unutarnjeg magneta 2. sl. [mm]	7,1
L2 Inner Mag Length	Duljina unutarnjeg magneta 2. sl. [mm]	13,0
L3 Diameter	Promjer 3. (vanjskog) sl. [mm]	116,7
L3 Web Thickness	Širina vodiča mag toka 3. sl. [mm]	37,4
L3 Inner Thickness	Širina unutarnjeg magneta 3. sl. [mm]	6,5
L3 Inner Mag Length	Duljina unutarnjeg magneta 3. sl. [mm]	11,0
Motor Length	Ukupna duljina motora [mm]	206,3
Stator Lam Length	Duljina statorskog paketa [mm]	126,3
Rotor Lam Length	Duljina rotorskog paketa [mm]	126,3
Magnet Length	Aksijalna duljina magneta [mm]	126,3
Turns	Broj zavoja po svitku	23

Slijede rezultati izračuna prezentirani kao u poglavlju 4.



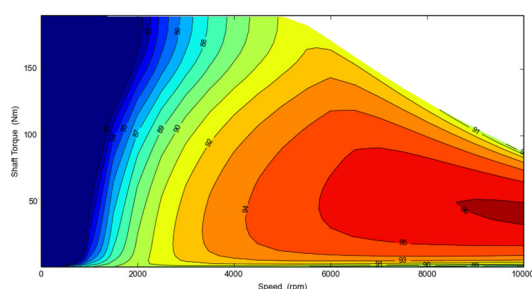
Slika 5.91 Radijalni (a) i aksijalni (b) presjek optimalne konfiguracije

Tablica 5.58 Vrijednosti performansi koje su dio inicijalnih zahtjeva

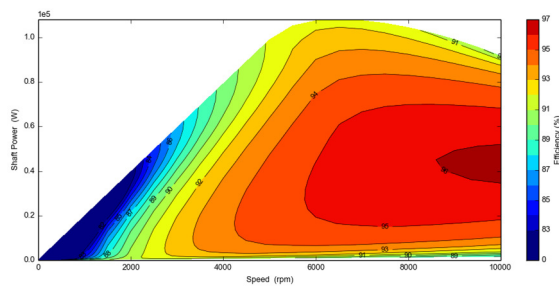
Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna snaga	P_{max} [kW]	108,1	100
Moment na osovini pri rubnoj brzini	M_{cs} [Nm]	188,0	160
Snaga na osovini pri rubnoj brzini	P_{cs} [kW]	98,9	83,3
Moment na osovini pri maksimalnoj brzini	M_{nmax} [Nm]	87,5	80
Snaga na osovini pri maksimalnoj brzini	P_{nmax} [kW]	91,7	80
Maksimalna snaga u trajnom radu (pogon S1)	P_{S1max} [kW]	67,0	60
Maksimalna temperatura namota u S1 pogonu	ϑ_n [°C]	176,9	180
Maksimalna temperatura magneta u S1 pogonu	ϑ_m [°C]	133,0	160
Ukupni promjer	D [mm]	221,1	260
Ukupna duljina	L [mm]	206,3	260
Masa	m [kg]	27,1	
Cijena	c [\$]	96,4	

Tablica 5.59 Vrijednosti ciljnih performansi

Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna korisnost	η_{max} [%]	96,20	95
Omjer momenta i cijene	M_{CS}/c [Nm/\$]	1,96	
Omjer momenta za i mase	M_{CS}/m [Nm/kg]	6,97	

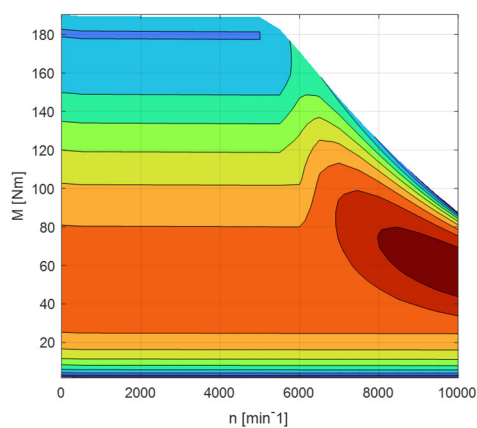


(a)

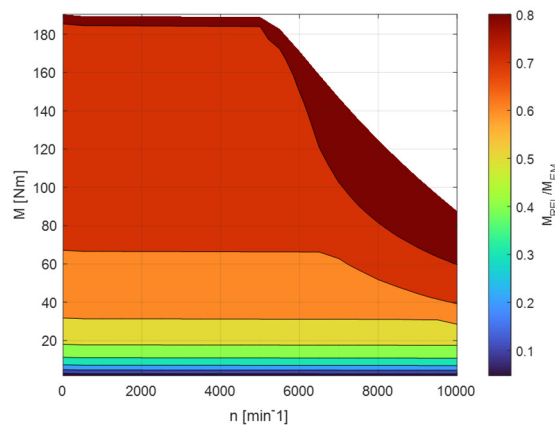


(b)

Slika 5.92 Mape korisnosti u moment–brzina (a) i snaga–brzina (b) ravninama

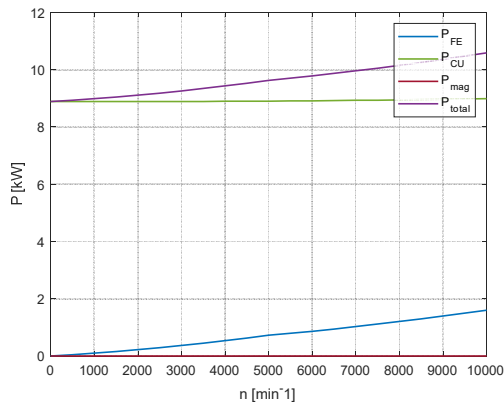


(a)

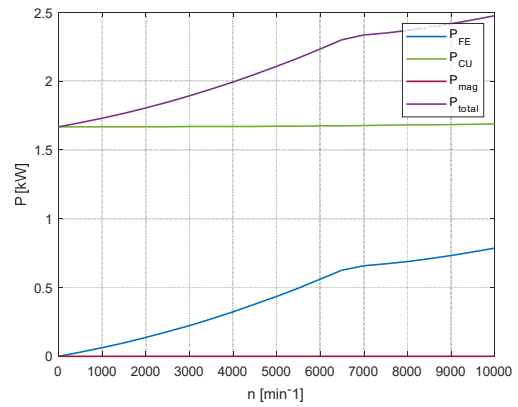


(b)

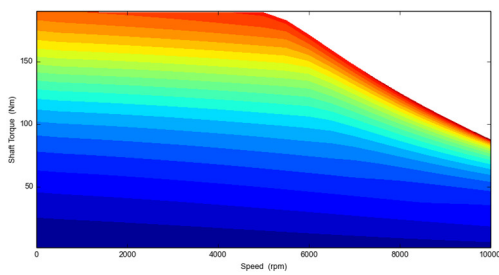
Slika 5.93 Mape omjera induktiviteta L_q/L_d (a) i udjela reluktantnog momenta u ukupnom elektromagnetskom omjeru (b) prikazane u moment–brzina ravnini



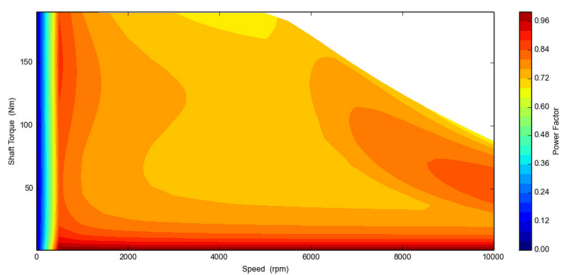
(a)



(b)

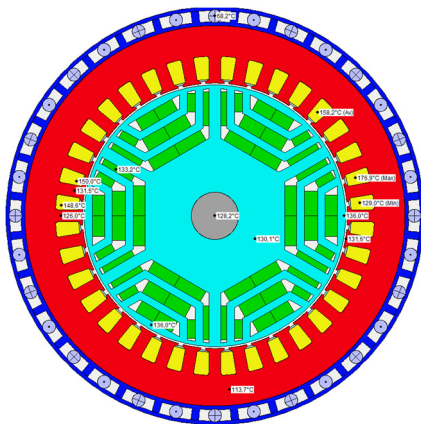
Slika 5.94 Gubici na faznim strujama I_n (a) i I_{s1} (b)

(a)

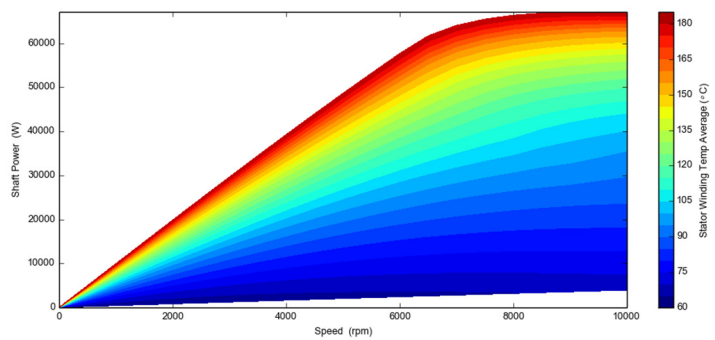


(b)

Slika 5.95 Mape gubitaka (a) i faktora snage (b) u moment–brzina ravnini



(a)



(b)

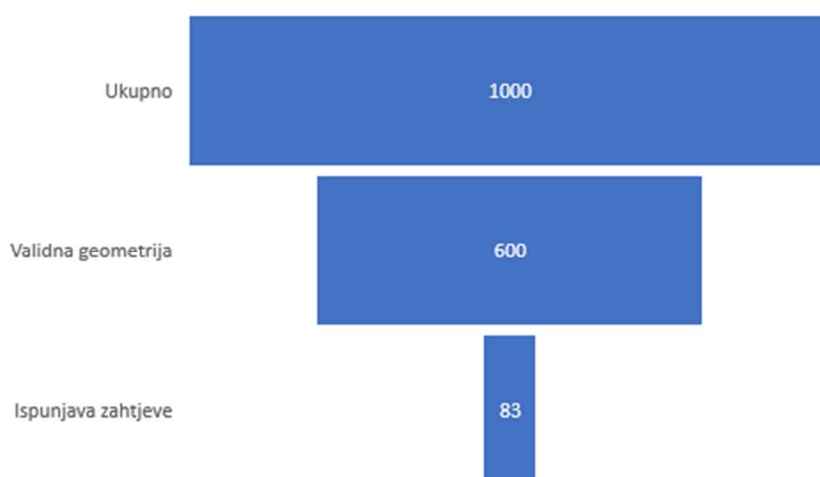
Slika 5.96 Radijalni presjek raspodjele temperatura u trajnom radu (a) i ograničenja snage u trajnom radu s obzirom na maksimalno dozvoljene temperature (b)

5.7.3. Rezultati optimizacije s ciljem moment/masa

Osnovni statistički podaci o rezultatima izvođenja optimizacije s ciljem maksimizacije omjera moment/cijena navedeni su u tablici (Tablica 5.60) i prikazani na slici (Slika 5.97).

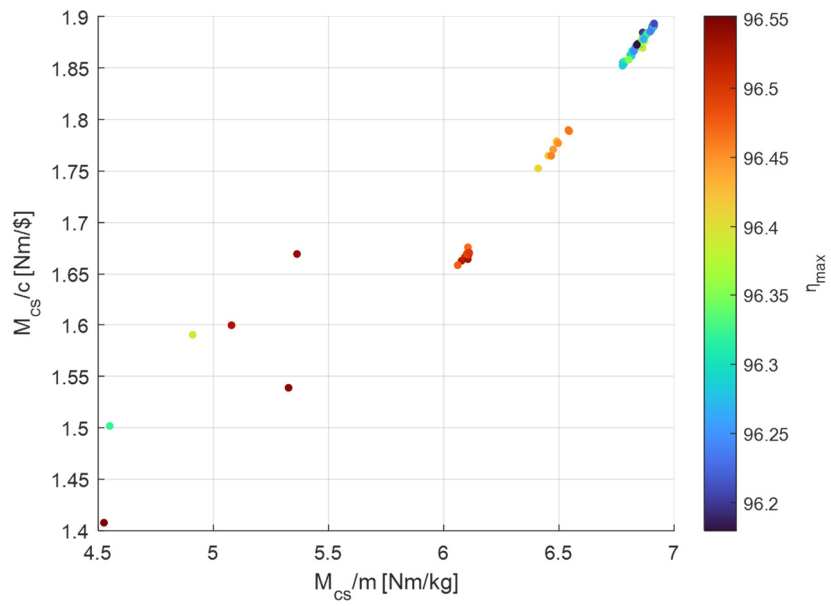
Tablica 5.60 Rezultati izvođenja optimizacije

Ukupan broj iteracija	1000
Konfiguracije s neispravnom geometrijom	40,0 %
Konfiguracije s ispravnom geometrijom koje ne ispunjavaju zahtjeve	51,7 %
Konfiguracije koje ispunjavaju zahtjeve (ispravne konfiguracije)	8,3 %
Optimalni iznos cilja moment/cijena	6,91 Nm/kg



Slika 5.97 Rezultati izvođenja optimizacije

Na slici (Slika 5.98) detaljan je prikaz raspodjele ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi: omjera momenta i cijene, omjera momenta i mase i maksimalne efikasnosti.



Slika 5.98 Raspodjela ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi
 Ispis optimalnog rješenja MIDACO-SOLVER-a prikazan je na slici (Slika 5.99). Vektor ulaznih parametara naveden je u tablici (Tablica 5.61).

```

CURRENT BEST SOLUTION
-----
EVAL:      360,  TIME:  75055,  IFLAG:  -2
-----
f(x) =      -6.9125000000000000
-----
VIOLATION OF G(X)      0.000000000000
-----
g(  1) =      0.00000000  (EQUALITY CONSTR)
g(  2) =      1.91080000  (IN-EQUAL CONSTR)
g(  3) =     28.31780000  (IN-EQUAL CONSTR)
g(  4) =      9.29710000  (IN-EQUAL CONSTR)
g(  5) =     15.26970000  (IN-EQUAL CONSTR)
g(  6) =     13.51170000  (IN-EQUAL CONSTR)
g(  7) =      8.04060000  (IN-EQUAL CONSTR)
g(  8) =      0.00000000  (IN-EQUAL CONSTR)
g(  9) =     500.00000000  (IN-EQUAL CONSTR)
g( 10) =      1.18990000  (IN-EQUAL CONSTR)
g( 11) =     28.31970000  (IN-EQUAL CONSTR)
g( 12) =      4.65810000  (IN-EQUAL CONSTR)
-----
                                BOUNDS-PROFIL
x(  1) =      1999.0000000000000000;  %  _____ x
x(  2) =      1400.0000000000000000;  %  _____ x
x(  3) =       148.0000000000000000;  %  _____ x
x(  4) =       70.0000000000000000;  %  _____ x
x(  5) =     1303.0000000000000000;  %  _____ x
x(  6) =       74.0000000000000000;  %  _____ x
x(  7) =       47.0000000000000000;  %  _____ x
x(  8) =       69.0000000000000000;  %  _____ x
x(  9) =       48.0000000000000000;  %  _____ x
x( 10) =       70.0000000000000000;  %  _____ x
x( 11) =       23.0000000000000000;  %  _____ x
-----
OPTIMIZATION FINISHED ---> MAXEVAL REACHED

```

Slika 5.99 Ispis optimalnog rješenja MIDACO-SOLVERA

Tablica 5.61 Parametri optimalne konfiguracije

D_s	D_r	L_s	W_t	L	W_{mi1}	W_{mo1}	W_{mi2}	W_{mo2}	W_{mi3}	n_t
1999	1400	148	70	1303	74	47	69	48	70	23

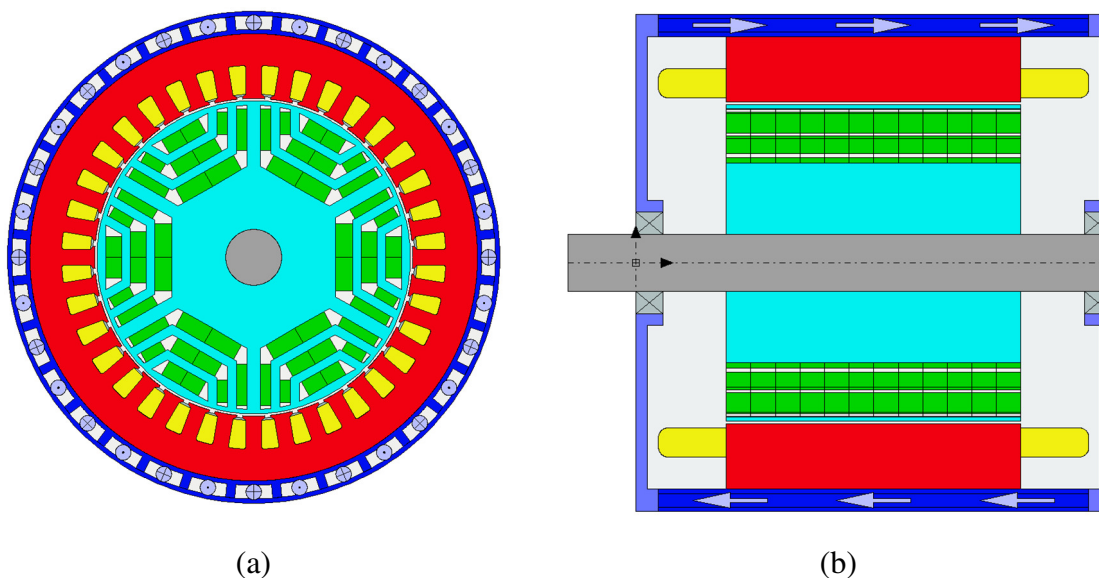
Motor-CAD parametri koji su mapiranjem parametara optimizacije promijenjeni u odnosu na inicijalnu konfiguraciju navedeni su u tablici (Tablica 5.62).

Tablica 5.62 Motor-CAD parametri

Motor-CAD parametar	Opis	Vrijednost
---------------------	------	------------

Housing Dia	Promjer kućišta [mm]	219,0
Stator Lam Dia	Promjer statora [mm]	199,9
Stator Bore	Promjer provrta statora [mm]	142,0
Tooth Width	Širina zuba [mm]	7
Sloth Depth	Dubina utora [mm]	14,8
L1 Diameter	Promjer 1. (unutarnjeg) sl. [mm]	73,4
L1 Web Thickness	Širina vodiča mag toka 1. sl. [mm]	6,0
L1 Outer Thickness	Širina vanjskih magneta 1. sl. [mm]	4,7
L1 Outer Mag Length	Duljina vanjskih magneta 1. sl. [mm]	18,4
L1 Inner Thickness	Širina unutarnjeg magneta 1. sl. [mm]	7,4
L1 Inner Mag Length	Duljina unutarnjeg magneta 1. sl. [mm]	14,9
L2 Diameter	Promjer 2. (srednjeg) sl. [mm]	96,2
L2 Web Thickness	Širina vodiča mag toka 2. sl. [mm]	23,4
L2 Outer Thickness	Širina vanjskih magneta 2. sl. [mm]	4,8
L2 Outer Mag Length	Duljina vanjskih magneta 2. sl. [mm]	10,2
L2 Inner Thickness	Širina unutarnjeg magneta 2. sl. [mm]	6,9
L2 Inner Mag Length	Duljina unutarnjeg magneta 2. sl. [mm]	11,4
L3 Diameter	Promjer 3. (vanjskog) sl. [mm]	118,0
L3 Web Thickness	Širina vodiča mag toka 3. sl. [mm]	41,0
L3 Inner Thickness	Širina unutarnjeg magneta 3. sl. [mm]	6,5
L3 Inner Mag Length	Duljina unutarnjeg magneta 3. sl. [mm]	9,4
Motor Length	Ukupna duljina motora [mm]	210,3
Stator Lam Length	Duljina statorskog paketa [mm]	130,3
Rotor Lam Length	Duljina rotorskog paketa [mm]	130,3
Magnet Length	Aksijalna duljina magneta [mm]	130,3
Turns	Broj zavoja po svitku	23

Slijede rezultati izračuna prezentirani kao u poglavlju 4.



Slika 5.100 Radijalni (a) i aksijalni (b) presjek optimalne konfiguracije

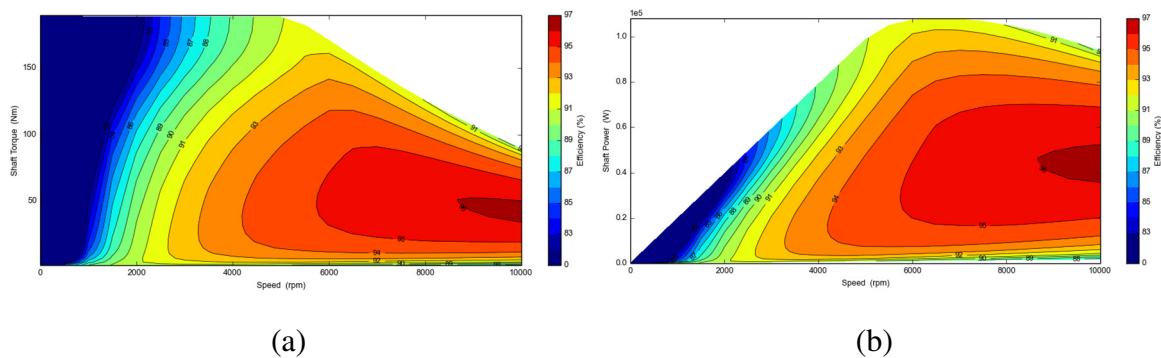
Tablica 5.63 Vrijednosti performansi koje su dio inicijalnih zahtjeva

Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna snaga	P_{max} [kW]	108,0	100
Moment na osovini pri rubnoj brzini	M_{cs} [Nm]	188,3	160
Snaga na osovini pri rubnoj brzini	P_{cs} [kW]	98,6	83,3
Moment na osovini pri maksimalnoj brzini	M_{nmax} [Nm]	89,3	80
Snaga na osovini pri maksimalnoj brzini	P_{nmax} [kW]	93,5	80
Maksimalna snaga u trajnom radu (pogon S1)	P_{S1max} [kW]	68,9	60
Maksimalna temperatura namota u S1 pogonu	ϑ_n [°C]	175,3	180
Maksimalna temperatura magneta u S1 pogonu	ϑ_m [°C]	131,7	160
Ukupni promjer	D [mm]	219,9	260
Ukupna duljina	L [mm]	210,3	260
Masa	m [kg]	27,2	

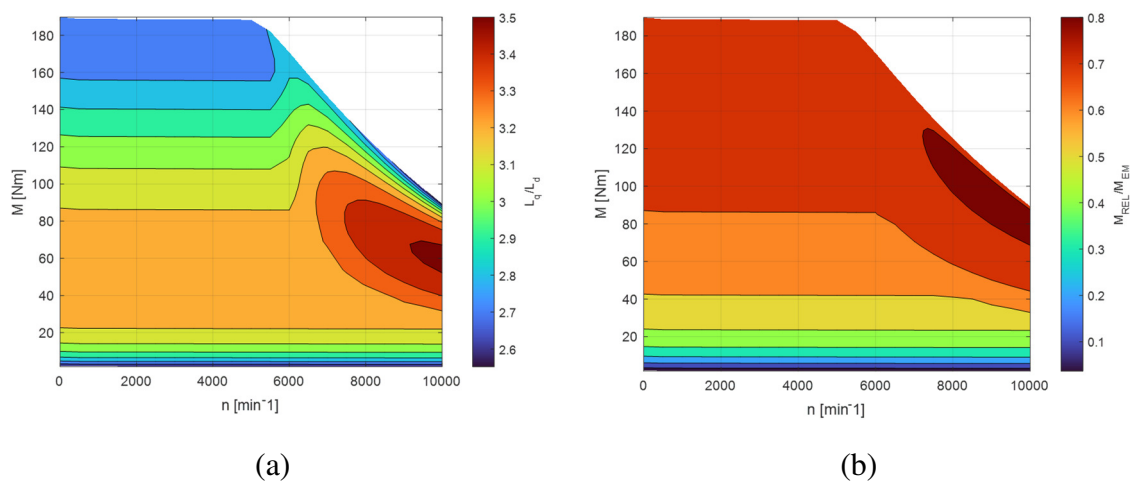
Cijena	c [\$]	99,5
Fazna struja pri P_{CS} i n_{max} (S1 radna točka)	I_{S1} [A]	130

Tablica 5.64 Vrijednosti ciljnih performansi

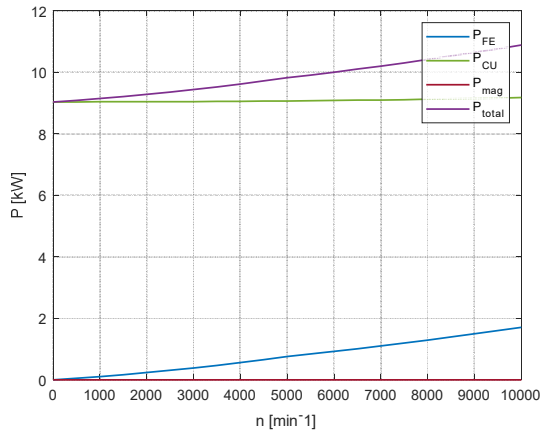
Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna korisnost	η_{max} [%]	96,19	95
Omjer momenta i cijene	M_{CS}/c [Nm/\$]	1,89	
Omjer momenta za i mase	M_{CS}/m [Nm/kg]	6,91	



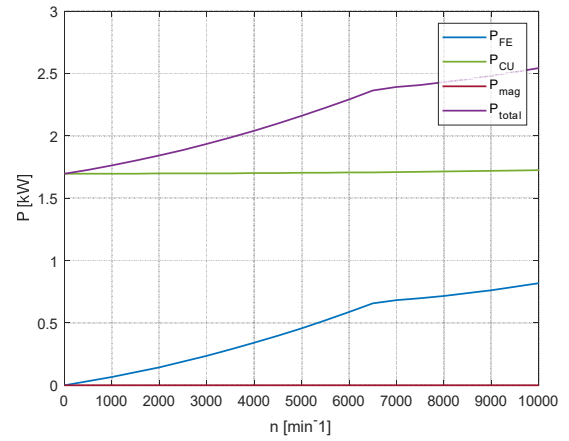
Slika 5.101 Mape korisnosti u moment–brzina (a) i snaga–brzina (b) ravninama



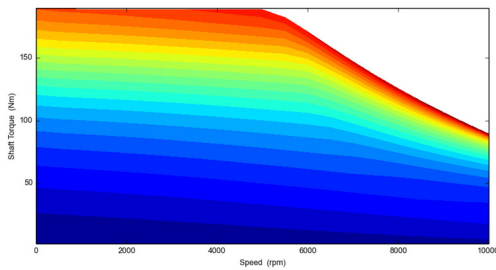
Slika 5.102 Mape omjera induktiviteta L_q/L_d (a) i udjela reluktantnog momenta u ukupnom elektromagnetskom omjeru (b) prikazane u moment–brzina ravnini



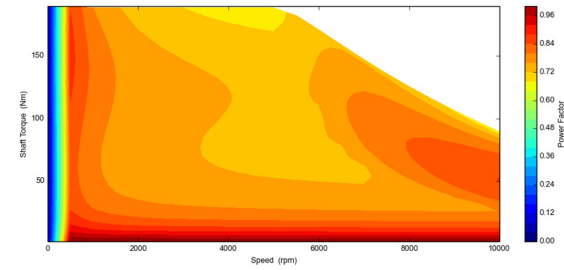
(a)



(b)

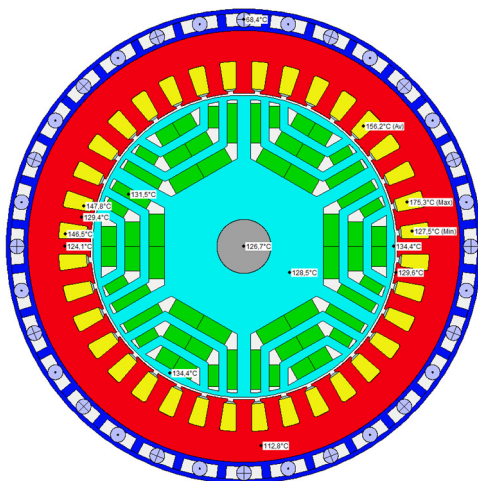
Slika 5.103 Gubici na faznim strujama I_n (a) i I_{S1} (b)

(a)

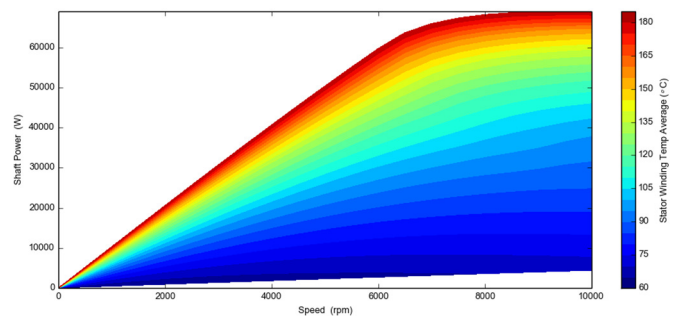


(b)

Slika 5.104 Mape gubitaka (a) i faktora snage (b) u moment–brzina ravnini



(a)



(b)

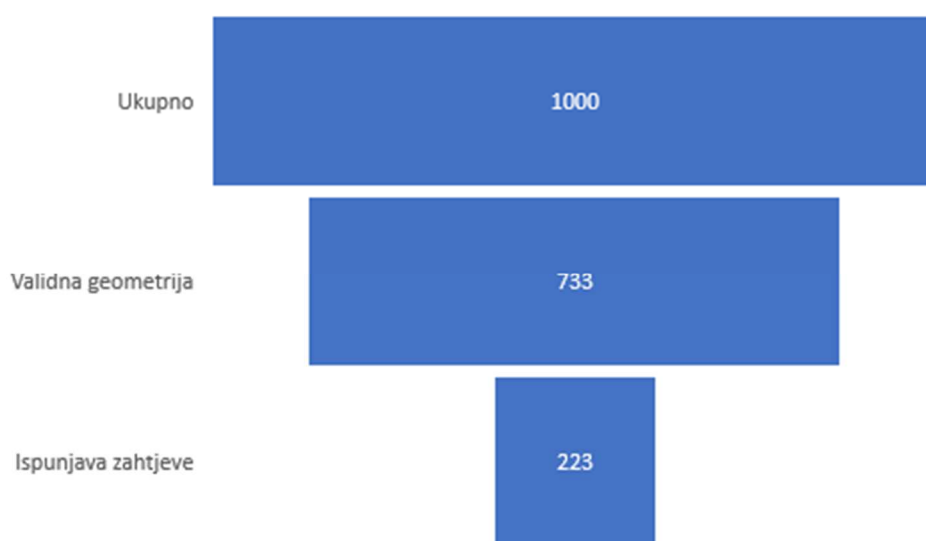
Slika 5.105 Radijalni presjek raspodjele temperatura u trajnom radu (a) i ograničenja snage u trajnom radu s obzirom na maksimalno dozvoljene temperature (b)

5.7.4. Rezultati optimizacije s ciljem maksimalna efikasnost

Osnovni statistički podaci o rezultatima izvođenja optimizacije s ciljem maksimizacije omjera moment/cijena navedeni su u tablici (Tablica 5.65) i prikazani na slici (Slika 5.106).

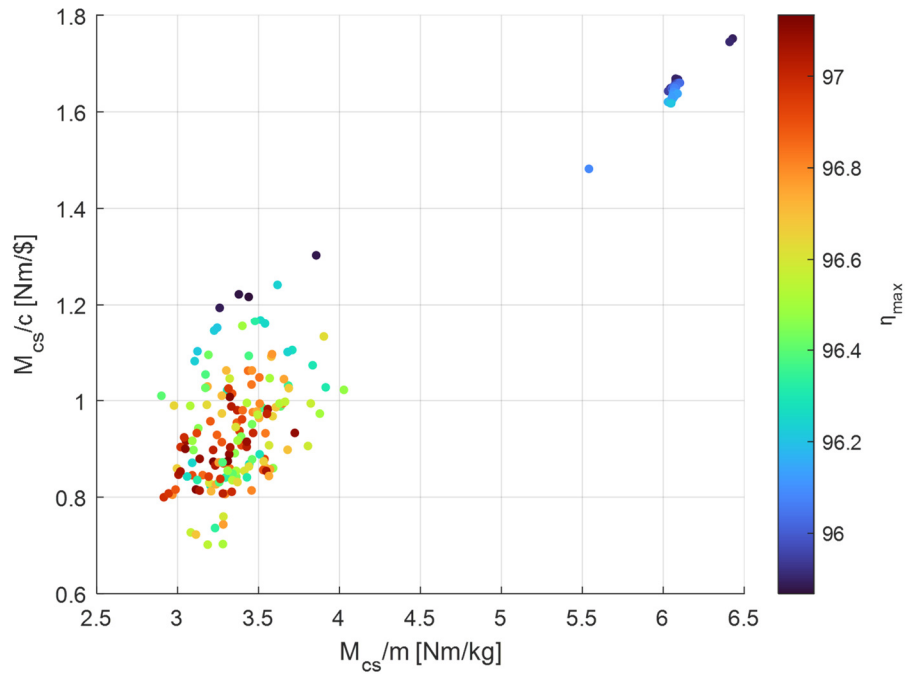
Tablica 5.65 Rezultati izvođenja optimizacije

Ukupan broj iteracija	1000
Konfiguracije s neispravnom geometrijom	26,7 %
Konfiguracije s ispravnom geometrijom koje ne ispunjavaju zahtjeve	51,0 %
Konfiguracije koje ispunjavaju zahtjeve (ispravne konfiguracije)	22,3 %
Optimalni iznos cilja maksimalna efikasnost	97,13 %



Slika 5.106 Rezultati izvođenja optimizacije

Na slici (Slika 5.107) detaljan je prikaz raspodjele ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi: omjera momenta i cijene, omjera momenta i mase i maksimalne efikasnosti.



Slika 5.107 Raspodjela ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi
 Ispis optimalnog rješenja MIDACO-SOLVER-a prikazan je na slici (Slika 5.108). Vektor ulaznih parametara naveden je u tablici (Tablica 5.66).


```

CURRENT BEST SOLUTION
-----
EVAL:          937,  TIME:   99941,  IFLAG:  -1
-----
f(X) =                -97.1333000000000006
-----
VIOLATION OF G(X)                0.000000000000
-----
g(  1) =      0.00000000  (EQUALITY  CONSTR)
g(  2) =     18.28980000  (IN-EQUAL  CONSTR)
g(  3) =     21.08600000  (IN-EQUAL  CONSTR)
g(  4) =     10.77590000  (IN-EQUAL  CONSTR)
g(  5) =     11.48310000  (IN-EQUAL  CONSTR)
g(  6) =     15.06030000  (IN-EQUAL  CONSTR)
g(  7) =     11.61170000  (IN-EQUAL  CONSTR)
g(  8) =      0.00000000  (IN-EQUAL  CONSTR)
g(  9) =    500.00000000  (IN-EQUAL  CONSTR)
g( 10) =      2.13330000  (IN-EQUAL  CONSTR)
g( 11) =     52.40250000  (IN-EQUAL  CONSTR)
g( 12) =     71.73290000  (IN-EQUAL  CONSTR)
-----
                                BOUNDS-PROFIL
x(  1) =      2393.0000000000000000;  %  _____x
x(  2) =     1508.0000000000000000;  %  _____x
x(  3) =      212.0000000000000000;  %  _____x
x(  4) =       43.0000000000000000;  %  _____x
x(  5) =     1796.0000000000000000;  %  _____x
x(  6) =       84.0000000000000000;  %  _____x
x(  7) =       49.0000000000000000;  %  _____x
x(  8) =       55.0000000000000000;  %  _____x
x(  9) =       24.0000000000000000;  %  _____x
x( 10) =       21.0000000000000000;  %  _____x
x( 11) =       21.0000000000000000;  %  _____x
-----
OPTIMIZATION FINISHED  --->  MAXEVAL REACHED

```

Slika 5.108 Ispis optimalnog rješenja MIDACO-SOLVERA

Tablica 5.66 Parametri optimalne konfiguracije

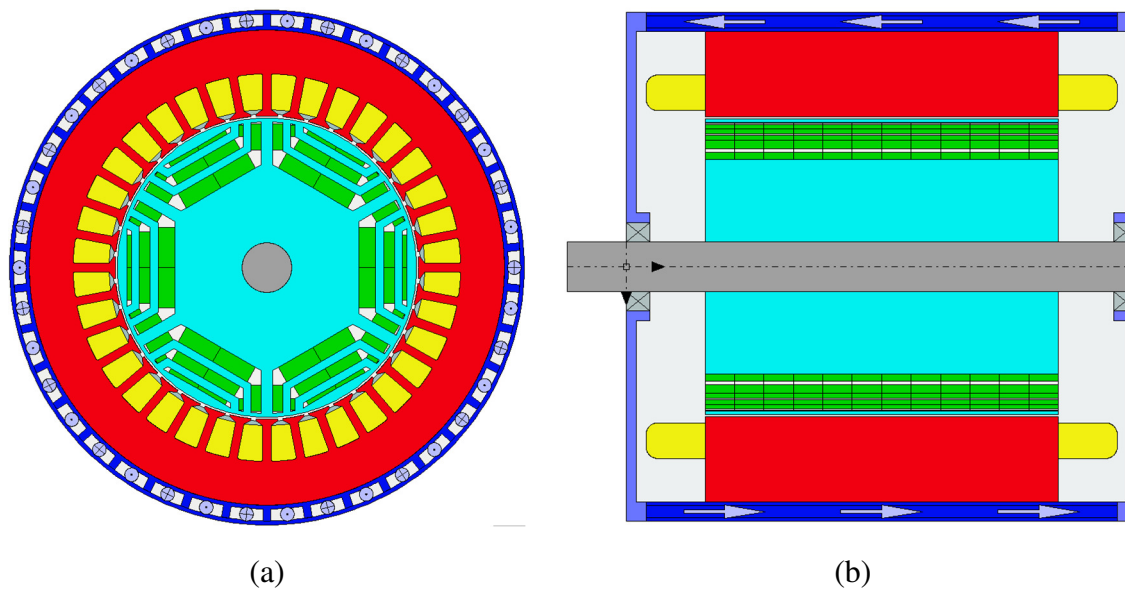
D_s	D_r	L_s	W_t	L	W_{mi1}	W_{mo1}	W_{mi2}	W_{mo2}	W_{mi3}	n_t
2393	1508	212	43	1796	84	49	55	24	21	21

Motor-CAD parametri koji su mapiranjem parametara optimizacije promijenjeni u odnosu na inicijalnu konfiguraciju navedeni su u tablici (Tablica 5.67).

Tablica 5.67 Motor-CAD parametri

Motor-CAD parametar	Opis	Vrijednost
Housing Dia	Promjer kućišta [mm]	259,3
Stator Lam Dia	Promjer statora [mm]	239,3
Stator Bore	Promjer provrta statora [mm]	152,8
Tooth Width	Širina zuba [mm]	4,3
Sloth Depth	Dubina utora [mm]	21,2
L1 Diameter	Promjer 1. (unutarnjeg) sl. [mm]	92,7
L1 Web Thickness	Širina vodiča mag toka 1. sl. [mm]	6,0
L1 Outer Thickness	Širina vanjskih magneta 1. sl. [mm]	4,9
L1 Outer Mag Length	Duljina vanjskih magneta 1. sl. [mm]	13,0
L1 Inner Thickness	Širina unutarnjeg magneta 1. sl. [mm]	8,4
L1 Inner Mag Length	Duljina unutarnjeg magneta 1. sl. [mm]	20,24
L2 Diameter	Promjer 2. (srednjeg) sl. [mm]	117,5
L2 Web Thickness	Širina vodiča mag toka 2. sl. [mm]	23,8
L2 Outer Thickness	Širina vanjskih magneta 2. sl. [mm]	2,4
L2 Outer Mag Length	Duljina vanjskih magneta 2 sl. [mm]	5,7
L2 Inner Thickness	Širina unutarnjeg magneta 2. sl. [mm]	5,5
L2 Inner Mag Length	Duljina unutarnjeg magneta 2. sl. [mm]	18,2
L3 Diameter	Promjer 3. (vanjskog) sl. [mm]	136,5
L3 Web Thickness	Širina vodiča mag toka 3. sl. [mm]	36,6
L3 Inner Thickness	Širina unutarnjeg magneta 3. sl. [mm]	2,1
L3 Inner Mag Length	Duljina unutarnjeg magneta 3. sl. [mm]	16,44
Motor Length	Ukupna duljina motora [mm]	259,6
Stator Lam Length	Duljina statorskog paketa [mm]	179,6
Rotor Lam Length	Duljina rotorskog paketa [mm]	179,6
Magnet Length	Aksijalna duljina magneta [mm]	179,6
Turns	Broj zavoja po svitku	21

Slijede rezultati izračuna prezentirani kao u poglavlju 4.



Slika 5.109 Radijalni (a) i aksijalni (b) presjek optimalne konfiguracije

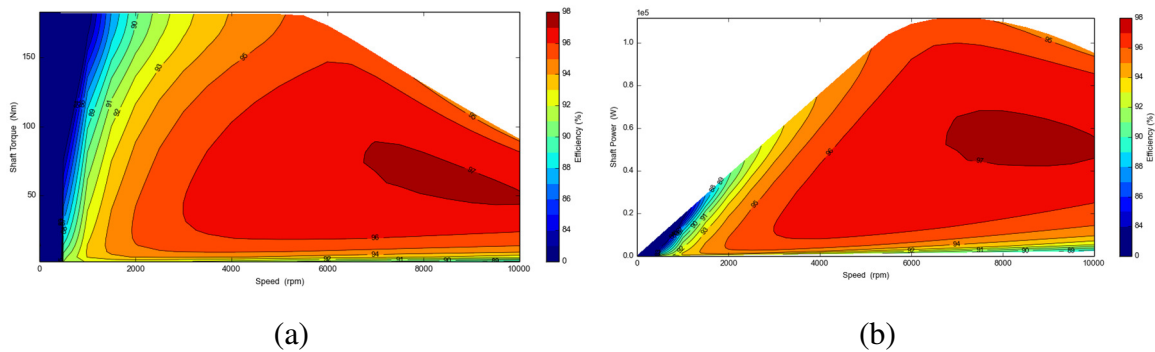
Tablica 5.68 Vrijednosti performansi koje su dio inicijalnih zahtjeva

Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna snaga	P_{max} [kW]	111,6	100
Moment na osovini pri rubnoj brzini	M_{cs} [Nm]	181,1	160
Snaga na osovini pri rubnoj brzini	P_{cs} [kW]	94,8	83,3
Moment na osovini pri maksimalnoj brzini	M_{nmax} [Nm]	90,8	80
Snaga na osovini pri maksimalnoj brzini	P_{nmax} [kW]	95,1	80
Maksimalna snaga u trajnom radu (pogon S1)	$P_{S1 max}$ [kW]	94,3	60
Maksimalna temperatura namota u S1 pogonu	ϑ_n [°C]	108,3	180
Maksimalna temperatura magneta u S1 pogonu	ϑ_m [°C]	107,7	160
Ukupni promjer	D [mm]	259,3	260
Ukupna duljina	L [mm]	259,6	260
Masa	m [kg]	54,7	

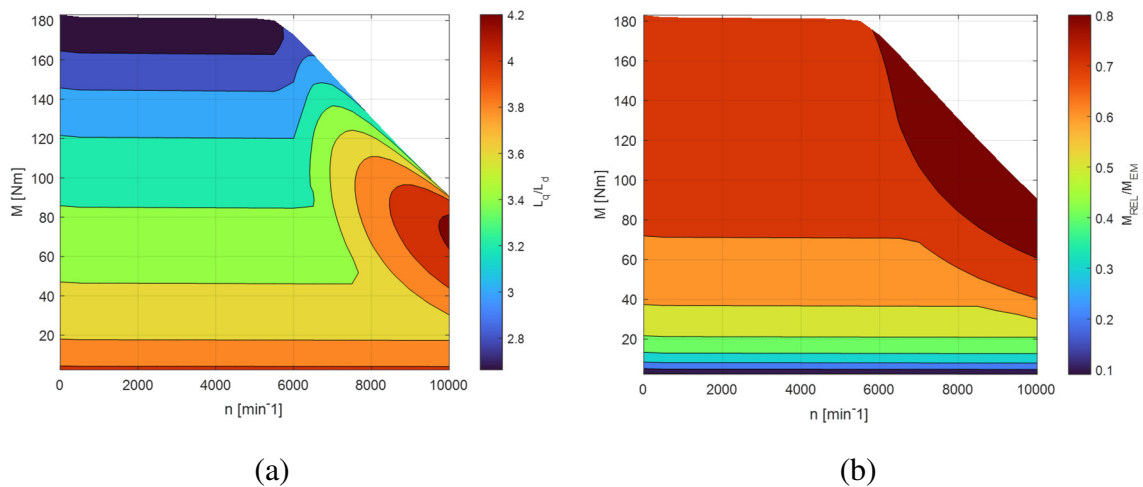
Cijena	c [\$]	207,0
Fazna struja pri P_{CS} i n_{max} (S1 radna točka)	I_{S1} [A]	120

Tablica 5.69 Vrijednosti ciljnih performansi

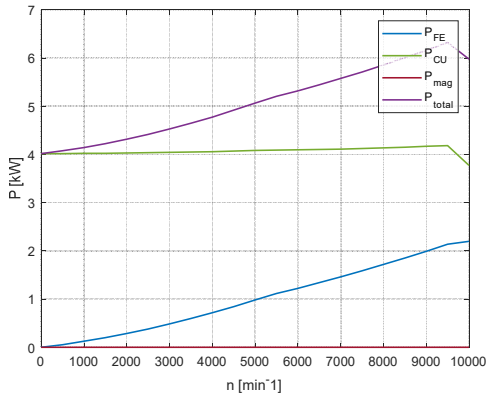
Naziv	Oznaka	Iznos	Zahtjev
Maksimalna korisnost	η_{max} [%]	97,13	95
Omjer momenta i cijene	M_{CS}/c [Nm/\$]	0,87	
Omjer momenta za i mase	M_{CS}/m [Nm/kg]	3,31	



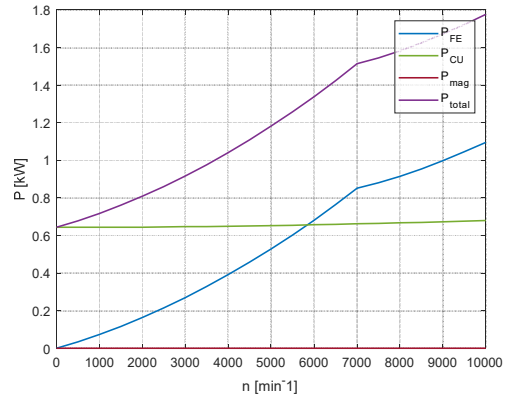
Slika 5.110 Mape korisnosti u moment–brzina (a) i snaga–brzina (b) ravninama



Slika 5.111 Mape omjera induktiviteta L_q/L_d (a) i udjela reluktantnog momenta u ukupnom elektromagnetskom omjeru (b) prikazane u moment–brzina ravnini

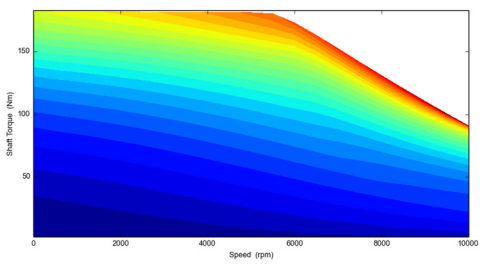


(a)

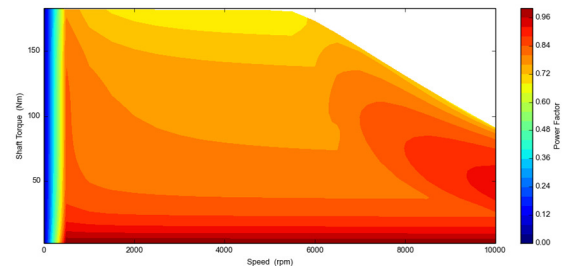


(b)

Slika 5.112 Gubici na faznim strujama I_n (a) i I_{S1} (b)

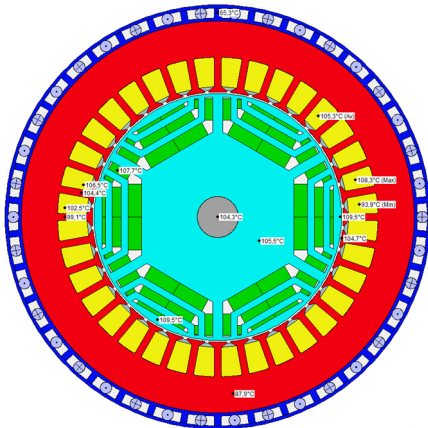


(a)

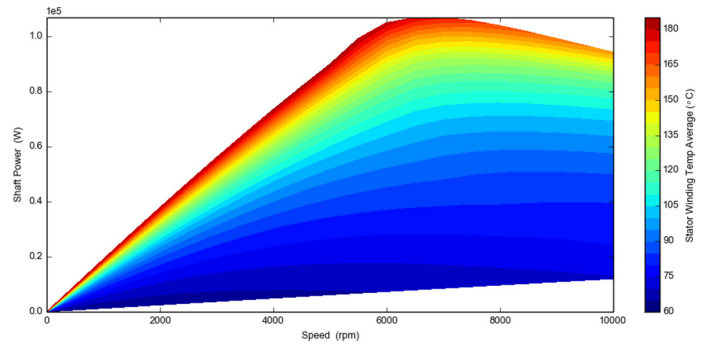


(b)

Slika 5.113 Mape gubitaka (a) i faktora snage (b) u moment–brzina ravnini



(a)



(b)

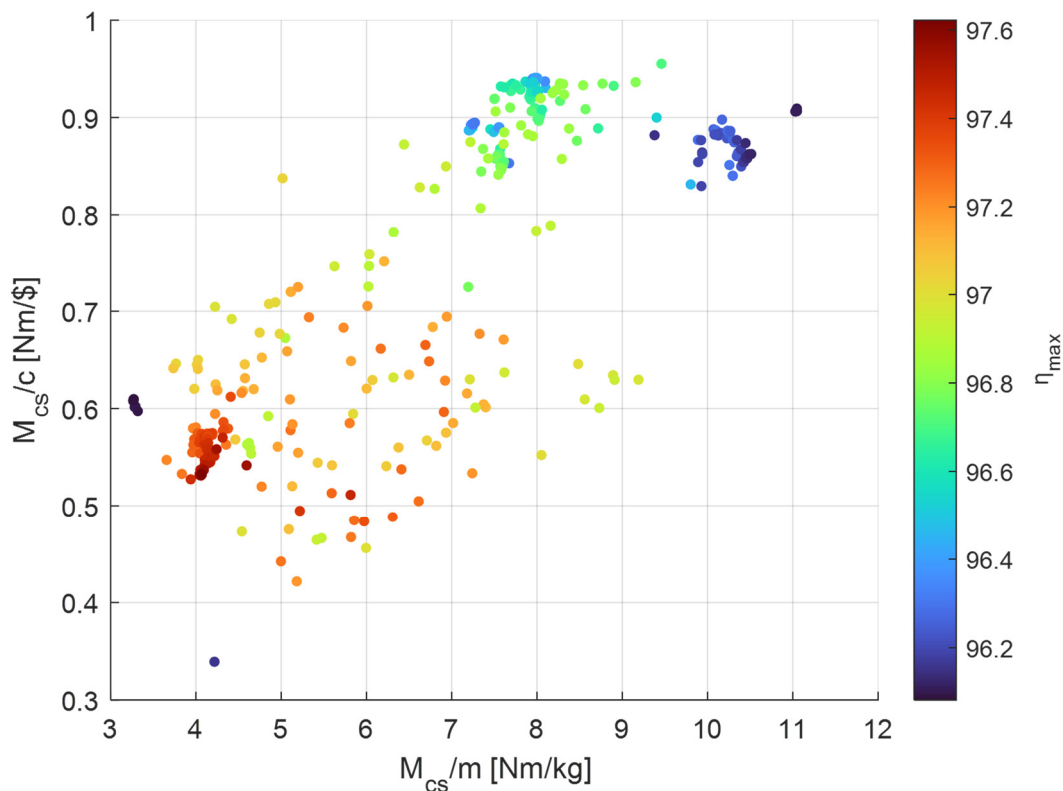
Slika 5.114 Radijalni presjek raspodjele temperatura u trajnom radu (a) i ograničenja snage u trajnom radu s obzirom na maksimalno dozvoljene temperature (b)

6. Usporedba rezultata optimizacije

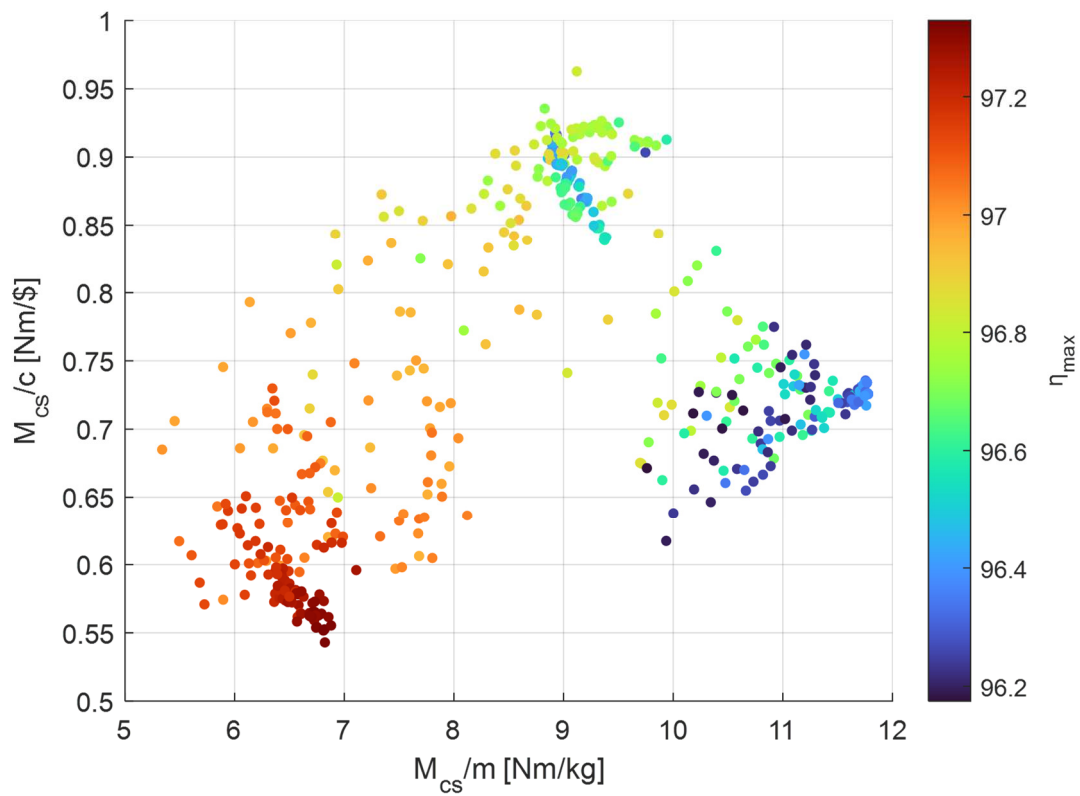
6.1. Ukupni pregled rezultata

Na slikama (Slika 6.1), (Slika 6.2), (Slika 6.3), (Slika 6.4) dani su sumarni prikazi raspodjele ispravnih konfiguracija s obzirom na iznose njihovih ciljnih performansi: omjera momenta i cijene, omjera momenta i mase i maksimalne efikasnosti, za svaku od razmatranih topologija motora.

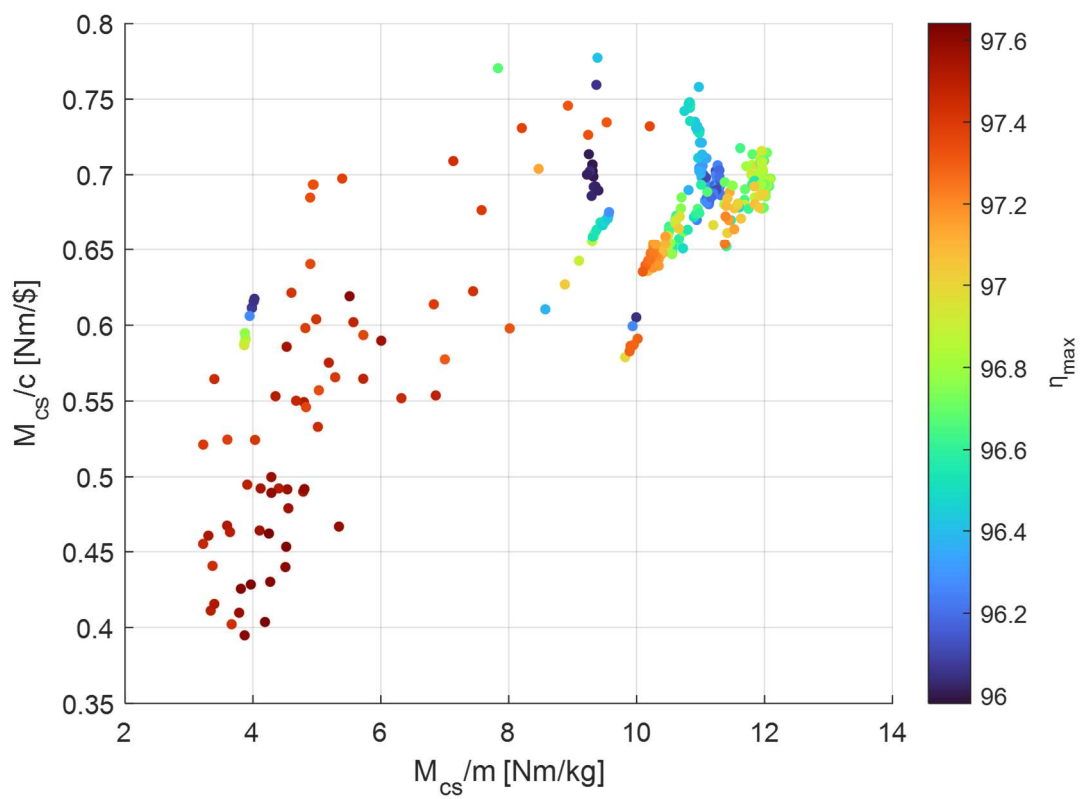
Sve optimizacije svojim su rezultatima naznačile općenitu zakonitost u vidu srazmjernosti omjera momenta i cijene i omjera momenta i mase, kao i obrnute srazmjernosti efikasnosti s navedenim karakteristikama. Optimizacije su pronašle manji broj konfiguracija koje imaju dobar iznos svojstava u svim navedenim kategorijama i koje bi vjerojatno bile dobar izbor u praksi. Najveći potencijal u tom smislu pokazala je D topologija IPM motora. S druge strane UII topologija PMSynRM motora je od navedenih topologija pokazala najviši stupanj praćenja te zakonitosti.



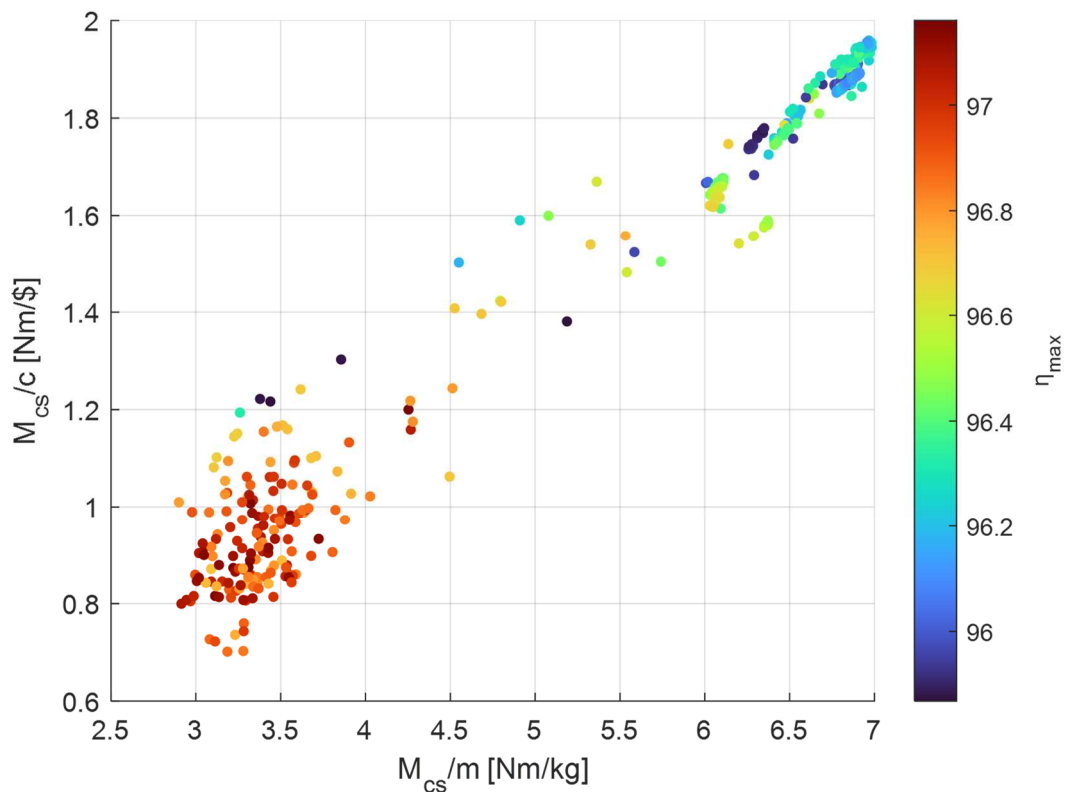
Slika 6.1 Pregled ciljnih performansi svih ispravnih konfiguracija IMP motora I topologije



Slika 6.2 Pregled ciljnih performansi svih ispravnih konfiguracija IMP motora V topologije



Slika 6.3 Pregled ciljnih performansi svih ispravnih konfiguracija IMP motora D topologije



Slika 6.4 Pregled ciljnih performansi svih ispravnih konfiguracija PMSynRM motora UII topologije

U tablici (Tablica 6.1) naveden je pregled rezultata svih optimizacija. Navedene su vrijednosti ciljnih performansi konfiguracija dobivenih optimizacijom: omjer momenta na rubnoj brzini i cijene, omjer momenta na rubnoj brzini i mase te maksimalna efikasnost, zajedno s drugim karakteristikama: moment na rubnoj brzini, maksimalna snaga, maksimalna snaga u S1 pogonu, cijena, masa, promjer, duljina. Ciljne performanse pojedine optimizacije označene su podebljanim slovima.

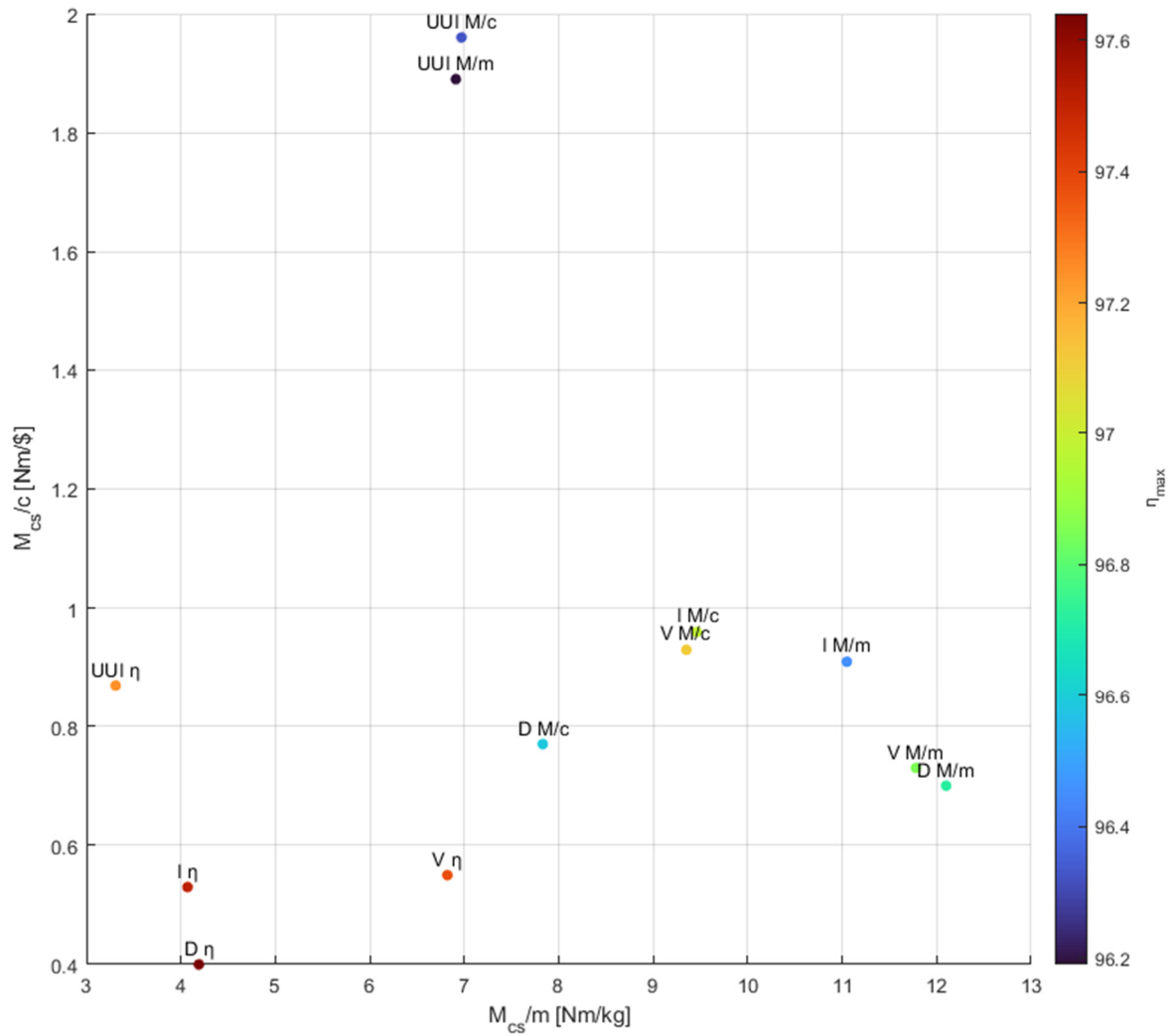
Tablica 6.1 Pregled rezultata svih optimizacija

	M_{cs}/c	M_{cs}/m	η_{max}	M_{cs}	P_{max}	P_{S1max}	c	m	D	L	
	[Nm/\$]	[Nm/kg]	[%]	[Nm]	[kW]	[kW]	[\$]	[kg]	[mm]	[mm]	
I	M_{cs}/c	0,96	9,46	96,56	216,6	116,3	76,4	226,8	22,9	174,9	251,2
	M_{cs}/m	0,91	11,05	96,23	238,5	128,3	70,2	263,1	21,6	175,0	240,4
	η_{max}	0,53	4,07	97,59	216,1	130,7	100,0	406,0	53,2	259,0	247,5
V	M_{cs}/c	0,93	9,35	96,60	189,6	104,8	66,2	204,6	20,3	173,8	233,9
	M_{cs}/m	0,73	11,78	96,37	237,2	125,5	68,2	326,9	20,1	170,6	242,9

	η_{max}	0,55	6,82	97,33	214,7	137,3	103,9	388,5	31,5	200,9	256,5
	M_{cs}/c	0,77	7,83	96,30	180,0	112,5	65,7	233,6	23,0	185,9	232,4
D	M_{cs}/m	0,70	12,10	96,31	234,4	126,6	65,4	336,0	19,4	170,4	236,0
	η_{max}	0,40	4,19	97,64	234,7	146,0	101,6	581,4	56,0	258,0	260,0
	M_{cs}/c	1,96	6,97	96,20	188,0	108,1	67,0	96,4	27,1	221,1	206,3
UUI	M_{cs}/m	1,89	6,91	96,19	188,3	108,0	68,9	99,5	27,2	219,9	210,3
	η_{max}	0,87	3,31	97,13	181,1	111,6	94,3	207	54,7	259,3	259,6

Na slici (Slika 6.5) dan je sumarni prikaz iznosa ciljnih performansi za svaku od optimizacija. Optimizacije koje su postigle najviše iznose ciljnih performansi su:




- Maksimalni iznos omjera momenta i cijene: optimizacija po momentu i cijeni za UUI topologiju PMSynRM motora.
- Maksimalni iznos omjera momenta i mase: optimizacija po momentu i masi za D topologiju IPM motora.
- Maksimalni iznos maksimalne efikasnosti: optimizacija po maksimalnoj efikasnosti za D topologiju IPM motora

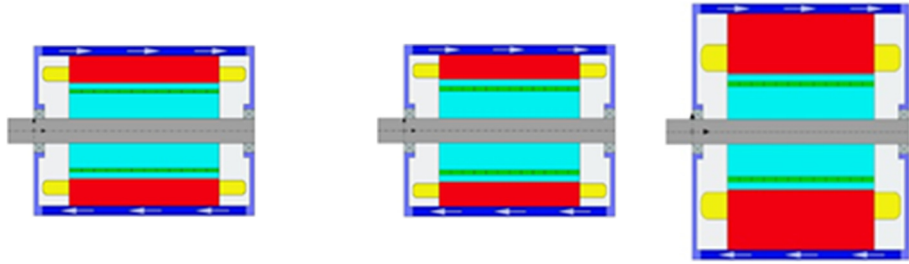


Slika 6.5 Sumarni prikaz iznosa ciljnih performansi za svaku od optimizacija

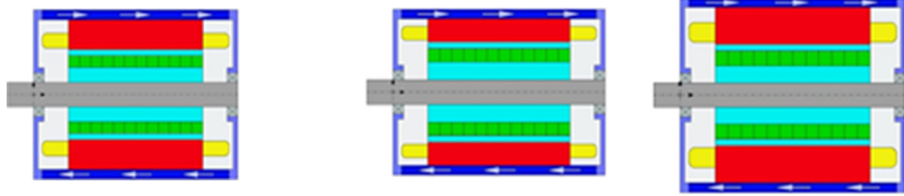
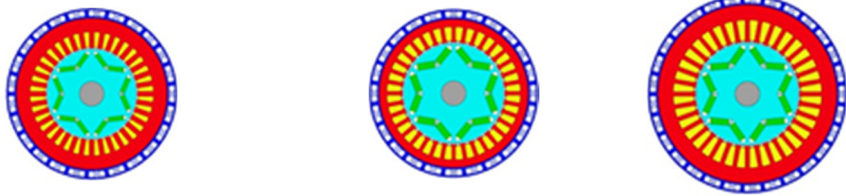
U tablici (Tablica 6.2) prikazan je radijalni i aksijalni presjek svih rješenja u zajedničkom mjerilu, kako bi se mogle usporediti vanjske dimenzije motora.

Tablica 6.2 Radijalni i aksijalni presjek svih rješenja u zajedničkom mjerilu

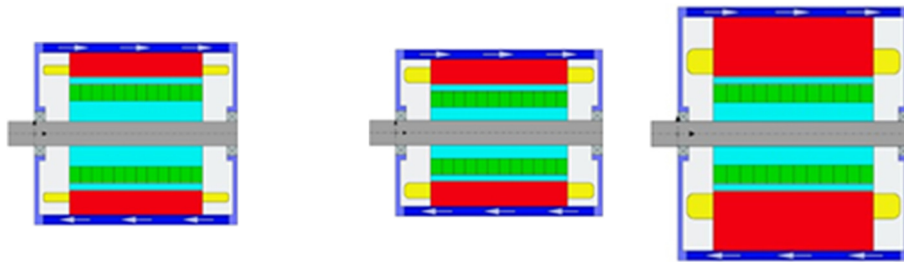
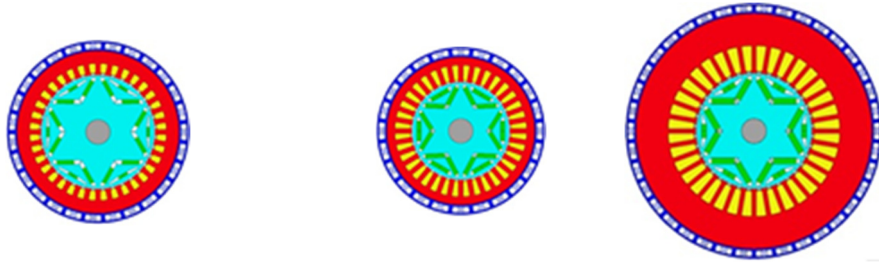
Optimizacija			
	M_{cs}/c	M_{cs}/m	η_{max}
I			



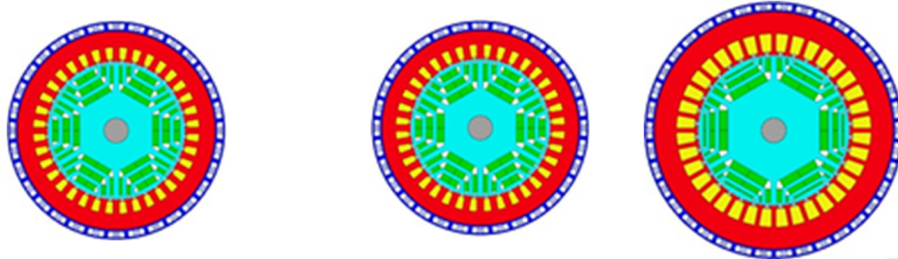
V

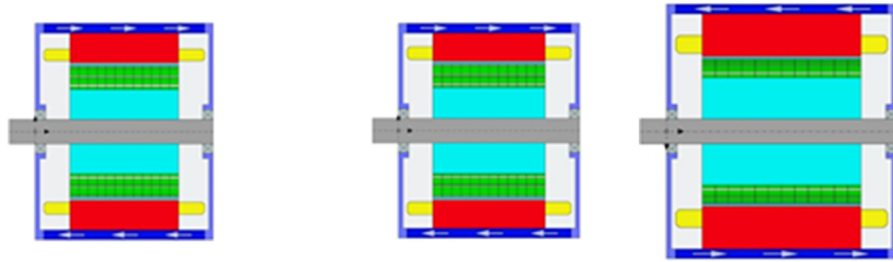


D



UUI





Usporedba optimalnih rješenja optimizacija s ciljem moment/cijena

Usporedbe rješenja optimizacije s ciljem maksimizacije omjera momenta i mase prikazane su na slikama (Slika 6.6) i (Slika 6.7).

Performanse koje se uspoređuju na slici (Slika 6.6):

- Omjer momenta i cijene
- Omjer momenta i mase
- Maksimalna efikasnost
- Moment na rubnoj brzini
- Maksimalna snaga
- Maksimalna snaga u S1 pogonu

Optimalna konfiguracija svake topologija prikazana je šesterokutom čija je površina veća što njene ukupne prikazane performanse bolje.

Karakteristike koje se uspoređuju na slici (Slika 6.7) su:

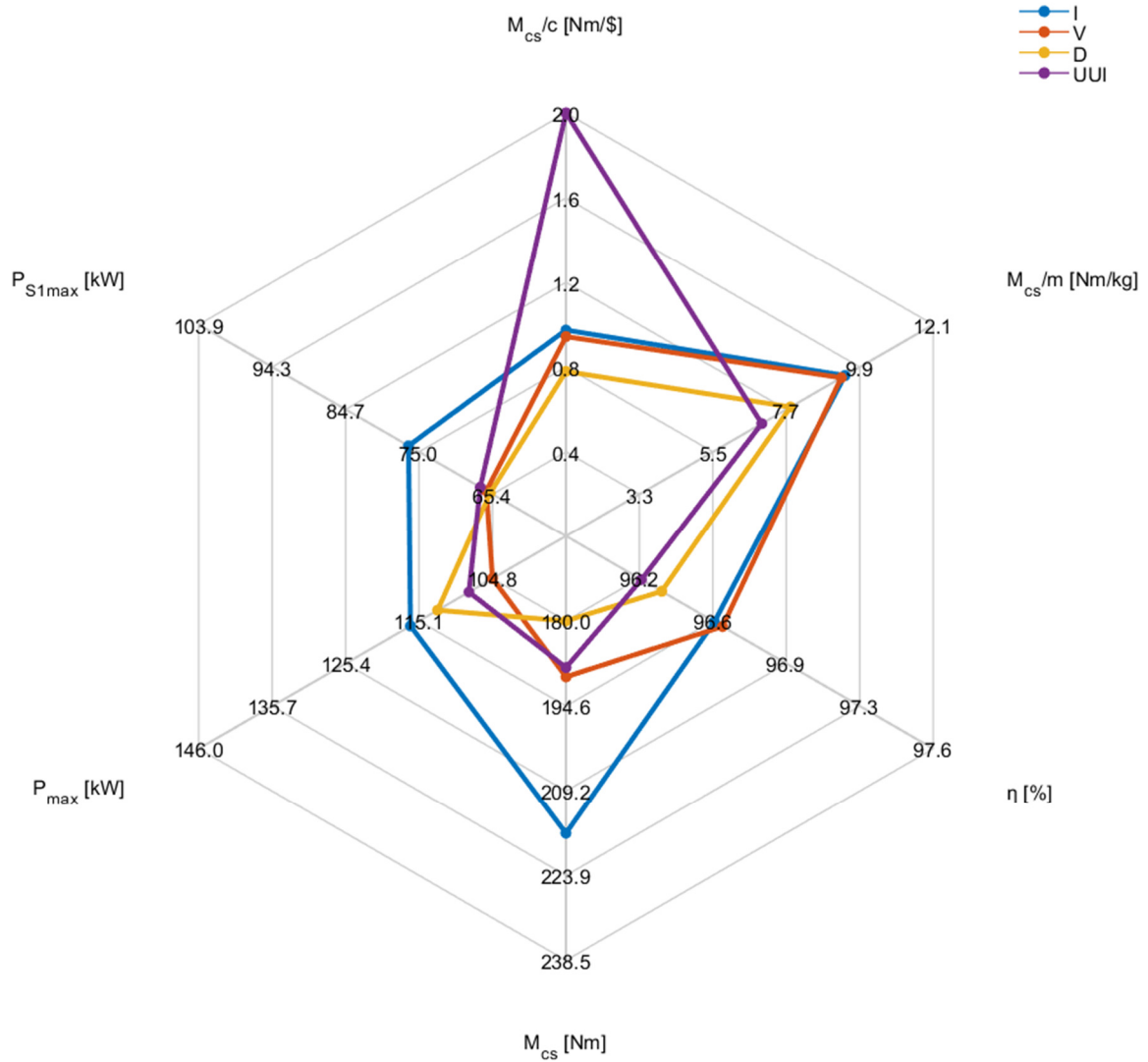
- Cijena
- Masa
- Promjer
- Duljina

Optimalna konfiguracija svake topologije prikazana je četverokutom čija je površina manja što su njene ukupne karakteristike bolje.

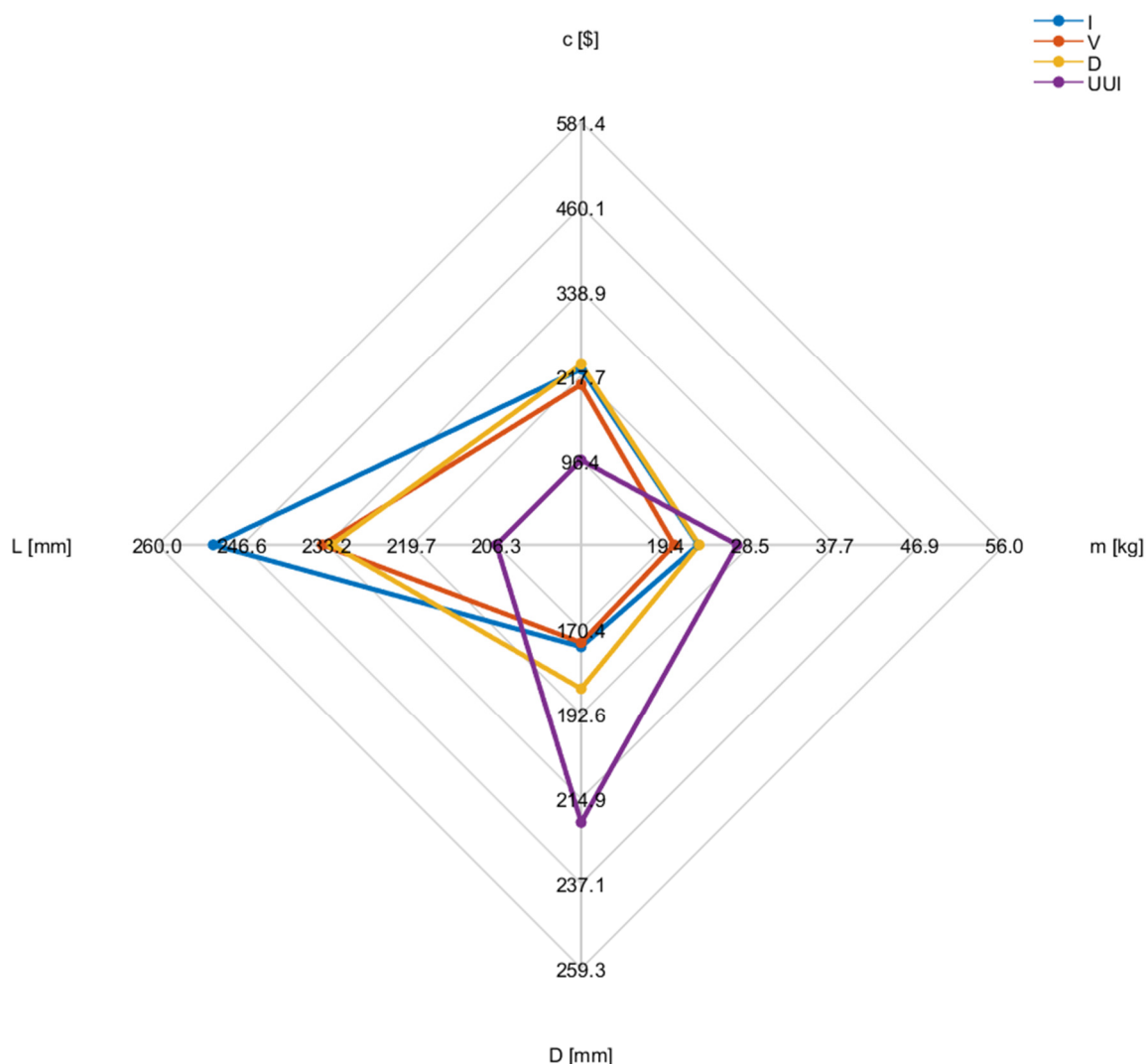
Najviši iznosi omjera momenta i cijene IPM motora postižu se I i V topologijama. Pritom optimalne konfiguracije navedenih topologija postižu podjednake iznose i ostalih ciljnih performansi: omjera momenta i mase i maksimalne efikasnosti. I topologijom postižu se nešto bolji iznosi maksimalne snage, maksimalne snage u S1 pogonu te momenta na rubnoj

brzini od V topologije, ali optimalna konfiguracije V topologije posjeduje niži iznos vanjskih dimenzija i mase.

PMaSynRM motorom s UUI topologijom postiže se daleko bolji iznos omjera momenta i cijene od iznosa kojeg posjeduju odgovarajuće konfiguracije IPM motora. S druge strane iznosi ostalih performansi su niži a masa je značajno veća.



Slika 6.6 Usporedba rješenja optimizacija s ciljem moment/cijena



Slika 6.7 Usporedba rješenja optimizacija s ciljem moment/cijena

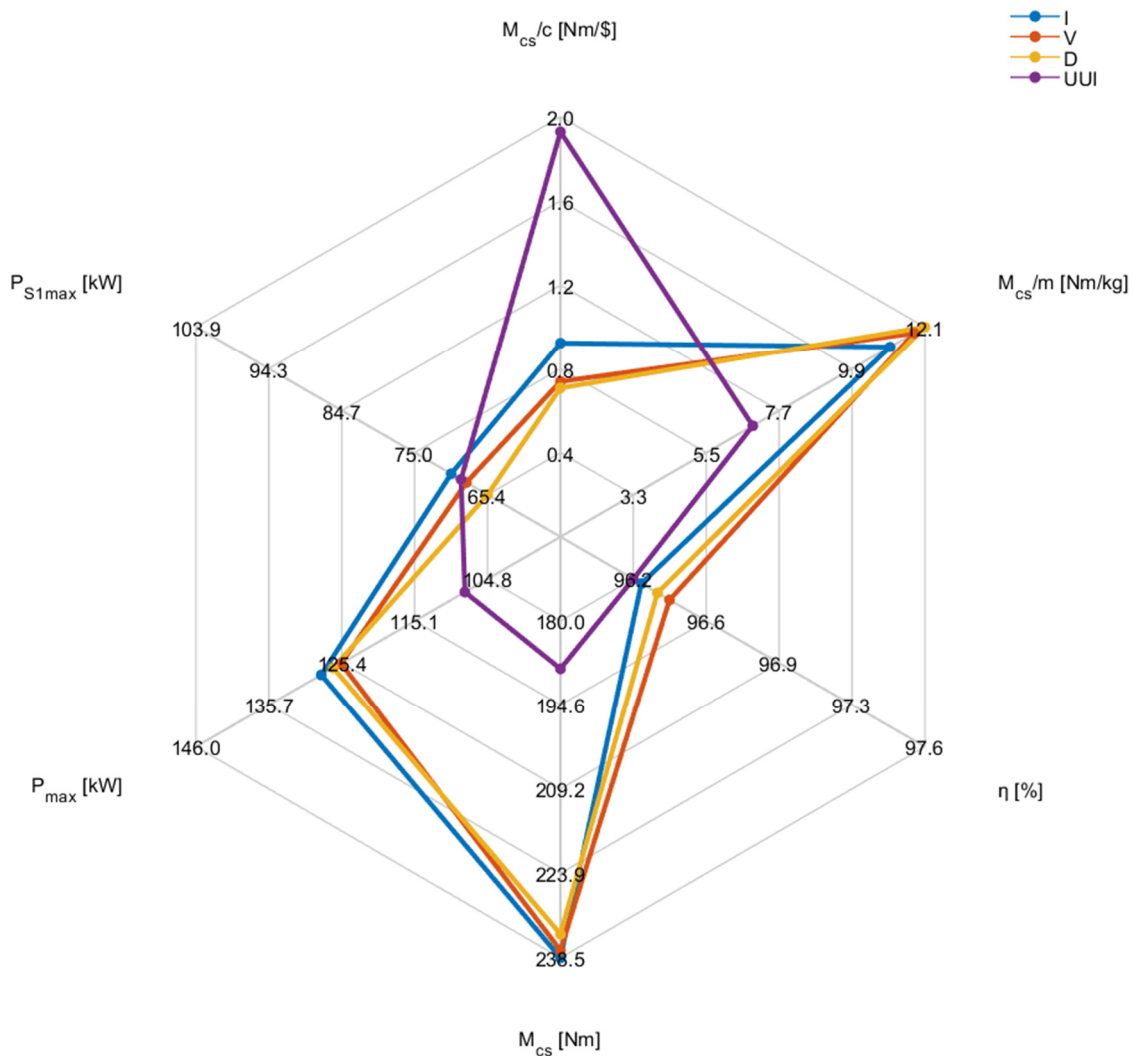
6.2. Usporedba optimalnih rješenja optimizacija s ciljem moment/masa

Usporedbe rješenja optimizacije s ciljem maksimizacije omjera momenta i mase prikazane su na slikama (Slika 6.8) i (Slika 6.9).

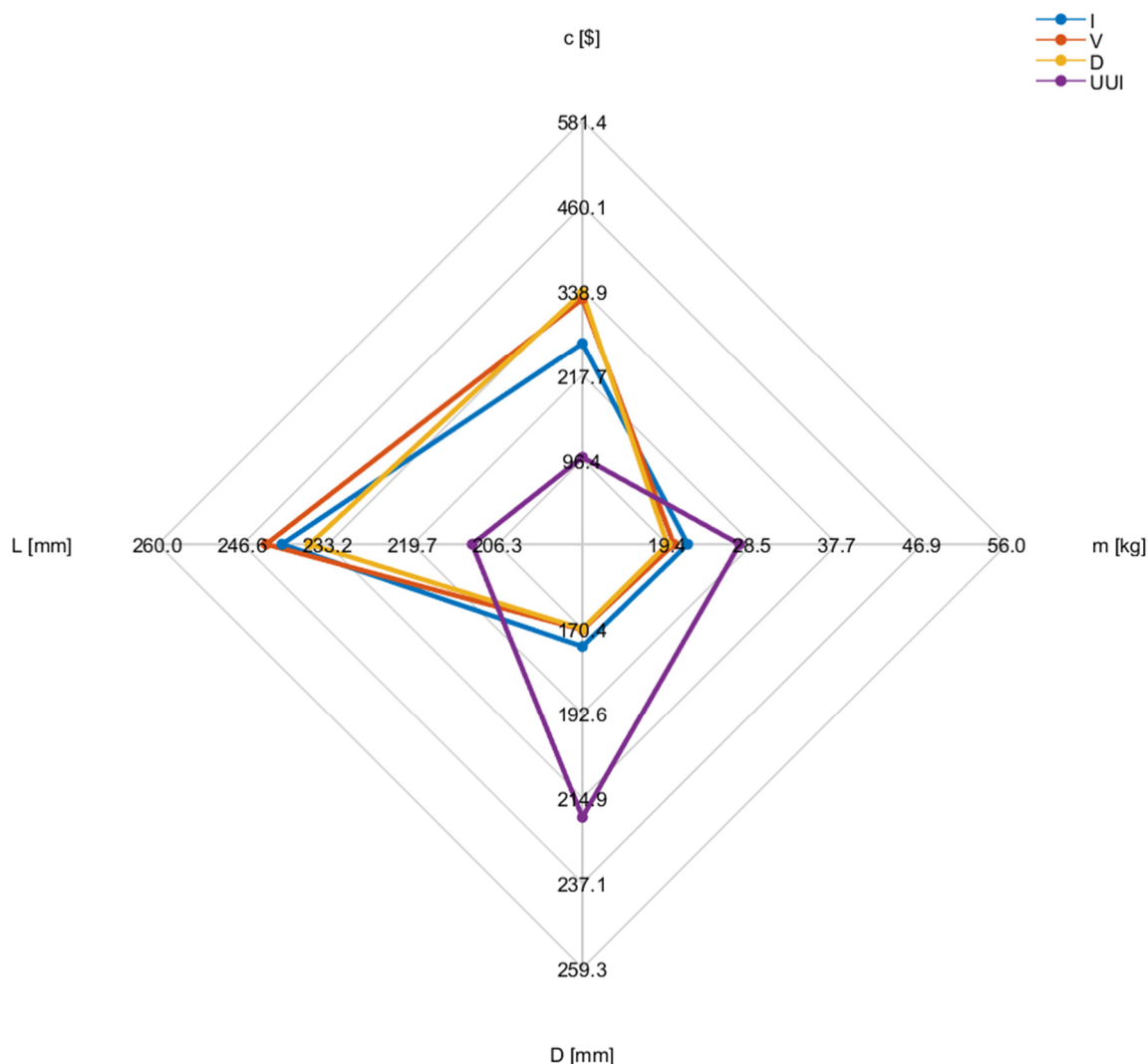
Najviši iznosi omjera momenta i mase IPM motora postižu se V i D topologijama. Pritom optimalne konfiguracije navedenih topologija postižu gotovo jednake iznose ostalih performansi. Konfiguracija V topologije postiže nešto viši iznos efikasnosti, ali su masa i dimenzije također nešto veće.

PMaSynRM motorom s UUI topologijom postižu se značajno lošiji iznosi omjera momenta i mase. Osim maksimalne snage u S1 pogonu, ostale performanse su lošije a masa je

značajno veća. Iznos omjera momenta i cijene značajno je bolji od iznosa koji se postižu drugim topologijama.



Slika 6.8 Usporedba rješenja optimizacija s ciljem moment/ masa



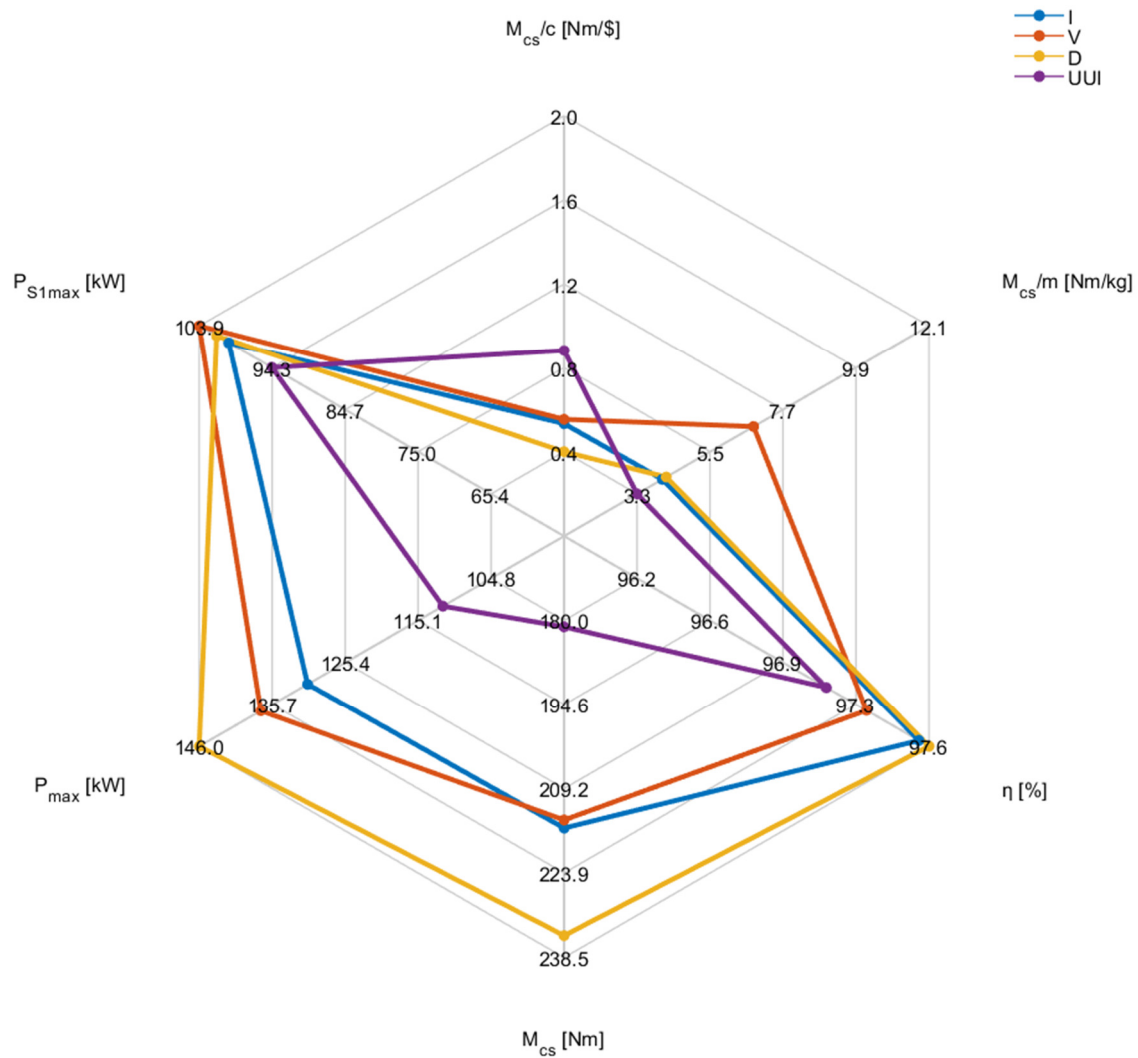
Slika 6.9 Usporedba rješenja optimizacija s ciljem moment/masa

6.3. Usporedba optimalnih rješenja optimizacija s ciljem maksimalna efikasnost

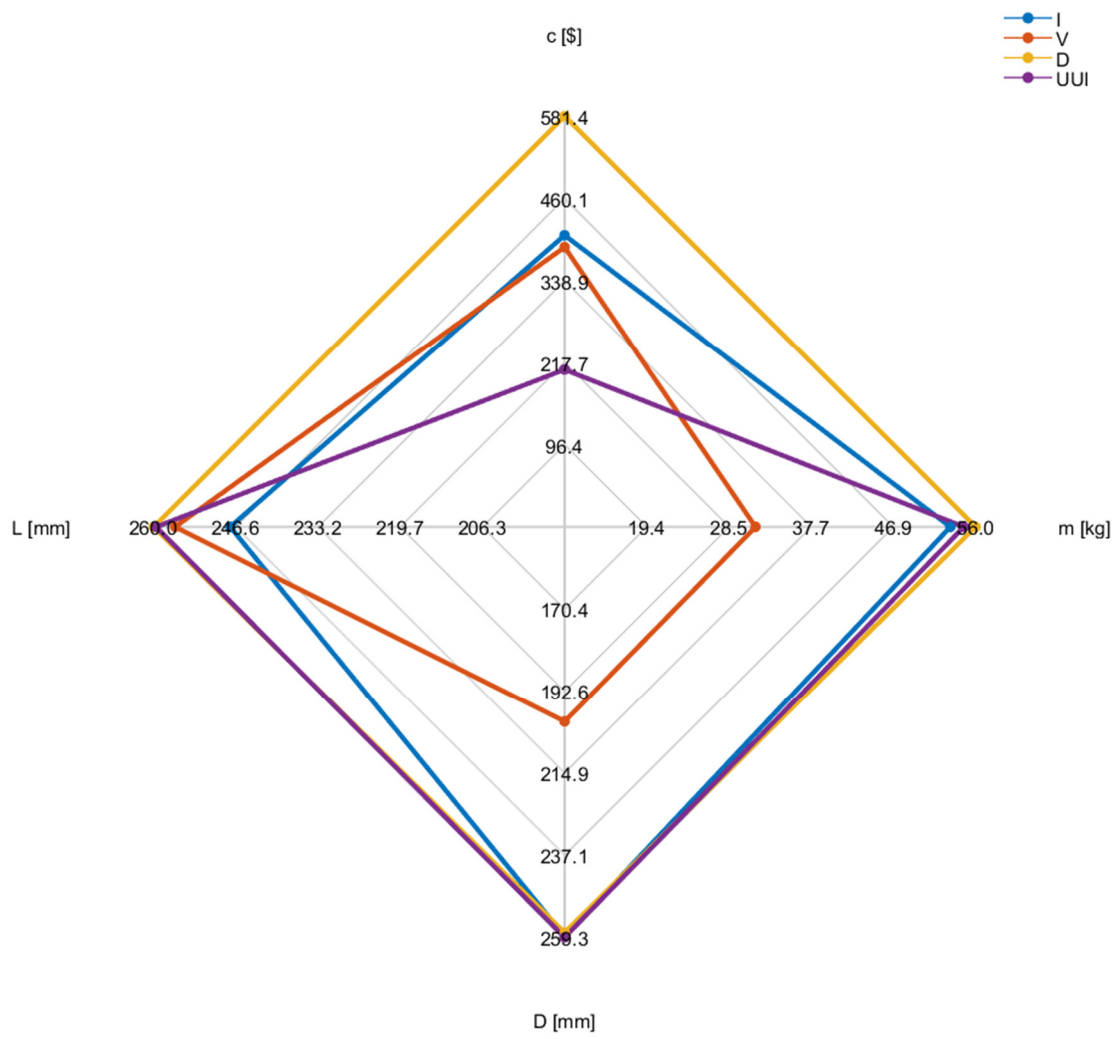
Usporedbe rješenja optimizacije s ciljem maksimizacije maksimalne efikasnosti prikazane su na slikama (Slika 6.10) i (Slika 6.11).

Najviši iznosi maksimalne efikasnosti IPM motora postižu se D i I topologijama. D topologijom postižu se veći iznosi snage i momenta, dok se I topologijom postiže niži iznos cijene te bolji omjer momenta i cijene. Sve optimalne topologije vrlo su visokih iznosa mase i blizu ograničenjima maksimalnih vanjskih dimenzija.

PMSynRM motorom s UUI topologijom postižu se znatno niži iznosi maksimalne efikasnosti. Pritom su i ostale performanse znatno lošije, a dimenzije su, kao i kod IPM motora, blizu ograničenjima maksimalnih vanjskih dimenzija.



Slika 6.10 Usporedba rješenja optimizacija s ciljem maksimalna efikasnost



Slika 6.11 Usporedba rješenja optimizacija s ciljem maksimalna efikasnost

Zaključak

U ovom se radu nastojalo optimizirati i usporediti performanse dviju vrsta sinkronih motora s permanentnim magnetima: IPM i PMSynRM. Za tu potrebu odabrane su tri topologije za realizaciju IPM motora i jedna topologija za realizaciju PMSynRM. Konfiguracije su modelirane u softverskom alatu Motor-CAD i putem softverskih alata Matlab i MIDACO-SOLVER podvrgnute optimizaciji. Za svaku od odabranih topologija obavljene su po tri optimizacije s različitim ciljevima: maksimizacija omjera momenta i cijene, omjera momenta i mase te maksimalne efikasnosti. Za svaki od ciljeva učinjena je usporedba performansi pojedinih vrsta motora i topologija.

U smislu maksimizacije omjera momenta i cijene kao najbolji izbori pokazali su se PMSynRM motori s UUI topologijom, pogotovo ako su ostale ciljne performanse kao što su efikasnost i omjer momenta i mase u drugom planu. U slučaju da su efikasnost ili omjer momenta i mase važni koliko i cijena, tada IPM motor I ili V topologije ulaze u izbor.

U smislu maksimizacije omjera momenta i mase kao najbolji izbor pokazao se IPM motor V ili D topologije. V topologija ima malu prednost u iznosu postignute efikasnosti, a D topologijom postižu se manje vanjske dimenzije.

U smislu maksimizacije efikasnosti kao najbolji izbor pokazali su se IPM motori s I ili D topologijom. I topologija rezultira konfiguracijama s nižom cijenom, a D topologija konfiguracijama s boljim mehaničkim performansama.

Optimizacije su otkrile razinu potencijala odabranih topologija IPM i PMSynRM motora s obzirom na mogućnost postizanja visokih iznosa pojedinih ciljnih performansi. U praksi bi se tražila rješenja koja najbolje ispunjavaju više ciljeva od jednom, odnosno rješenja dobivena višeciljnim optimizacijama. Prema postignutim rezultatima može se zaključiti da najveći potencijal u postizanju idealnog omjera više ciljnih performansi posjeduju V i D konfiguracije IPM motora. Rezultati optimizacija pokazuju da je PMSynRM s UUI topologijom i feritnim magnetima superioran IPM motorima s neodimijskim magnetima po pitanju cijene. Po svim ostalim pokazateljima IPM motor s neodimijskim magnetima superioran je PMSynRM motoru s feritnim magnetima.

PMSynRM motor s feritnim magnetima predstavljao bi dobar alternativan izbor u pogonima električnih automobila koji ne zahtjevaju vrhunske performanse.

Literatura

- [1] Hanić Z. *Generatori i transformatori, predavanja*, 2022.
- [2] Žarko D. *Sinkroni i asinkroni strojevi, predavanja*, 2022.
- [3] Stipetić S. *Sinkroni i asinkroni strojevi, predavanja*, 2022.
- [4] Hendershot J.R. Jr., Miller T.J.E. *Design of Brushless Permanent-Magnet Machines*, Design Books LLC, 2010.
- [5] Pyrhönen, J., Jokinen, T., Hrabovcová, V. *Design of rotating electrical machines*, Wiley, 2014.
- [6] Hensen J., Negri T., Trost C., Eckstein L. *Comparison of Permanent Magnet Rotor Designs for Different Vehicle Classes and Driving Scenarios: A Simulation Study*, 2021.
- [7] Shen Q., Zhou Z., Li S., Liao X., Wang T., He X., Zhang J. *Design and Analysis of the High-Speed Permanent Magnet Motors: A Review on the State of the Art*, 2022.
- [8] Pellegrino G., Jahns T.M., Bianchi N., Soong W.L., Cupertino F. *The Rediscovery of Synchronous Reluctance and Ferrite Permanent Magnet Motors Tutorial Course Notes*, Springer, 2016.
- [9] Niazi P., *Permanent magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor Design and Performance Improvement*, 2005.
- [10] Ibrahim M.N., Silval B., Sergeant P. *Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Employing a Hybrid Star-Delta Winding for High-Speed Applications*, 2018.
- [11] *Data sheet isovac 235-35A*, dostupno na: https://www.voestalpine.com/division_stahl/content/download/39689/456867/file/D_B_isovac_235-35A_E_281015.pdf
- [12] *N42UH characteristics*, dostupno na: <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/11/N42UH-151021.pdf>
- [13] *BH Curve - Ferrite Y30*, dostupno na: <https://e-magnetsuk.com/ferrite-magnets/grades-of-ferrite/>
- [14] Hofer M., Schrod M. *An Analysis of Ferrite Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machines for Low Power Drives including Flux Weakening*
- [15] Roggia S., Iacchetti M. *Multi-physics analysis of electric vehicles (EV) powertrain*, ICEM
- [16] Schlueter M., Munetomo M. *Introduction to MIDACO-SOLVER Software*, Japan, 2013.

Sažetak

Sinkroni motor s unutrašnjim permanentnim magnetima (engl. *Interior Permanent Magnet Synchronous Motor*, skraćeno IPMSM, odnosno IPM) zbog visokog nivoa efikasnosti, visoke gustoće momenta i snage pogodan je za primjenu u pogonima električnih automobila. Pritom se koriste magneti rijetkih zemalja (engl. *Rare Earth Magnet*), poglavito neodimij-željezo-bor magneti. Alternativni izbor ovoj vrsti motora je permanentnim magnetima potpomognuti sinkroni reluktantni motor (engl. *Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor*, skraćeno PMSynRM) sa feritnim magnetima.

U ovom se radu projektiraju obje vrste motora, podvrgavaju jednakoj metodi optimizacije te se uspoređuju performanse optimalnih konfiguracija.

Za realizaciju IPM motora odabrane su I, V i D topologije, a za realizaciju PMSynRM motora odabrana je UUI topologija. Korištenjem softverskog alata koji za analizu koristi metodu konačnih elemenata (engl. *Finite Element Analysis*, skraćeno FEA) obavio se dizajn i izračun početnih konfiguracija.

Korištenjem softverskog alata zasnovanog na proširenom algoritmu optimizacije mravlje kolonije (engl. *Extended Ant Colony Optimization Algorithm*) za svaku od odabranih topologija obavljene su po tri optimizacije: s ciljem maksimizacije omjera momenta i cijene, omjera momenta i mase te efikasnosti. Svaka iteracija optimizacije sastoji se od pripreme ulaznih parametara, izvršavanja izračuna te vraćanja vrijednosti funkcija cilja i funkcija ograničenja alatu za optimizaciju. Optimizacija se nastavlja dok se ne izvrši zadani broj iteracija. Sve konfiguracije ispunjavaju inicijalno postavljene zahtjeve elektromotornog pogona.

Usporedbom rezultata utvrdile su se pogodnosti konkretne vrste motora i njegove topologije s obzirom na zahtjeve u performansama.

Summary

Due to its high level of efficiency, high torque density, and power, the Interior Permanent Magnet Synchronous Motors are suitable for use in electric car drives. They utilise rare earth magnets, mainly neodymium-iron-boron magnets. An alternative choice to this type of motor in electric car drives are the Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motors with ferrite magnets.

In this thesis, both types of motors are designed, both are subjected to the same optimisation methods, and the performances of the resulting configurations are compared.

I, V and D topologies were chosen for the implementation of the IPM motor, and the UUI topology was chosen for the PMA SynRM motor. Using a software tool based on Finite Element Analysis (FEA), the design and calculation of the initial configurations have been performed.

Using the software optimisation tool based on the Extended Ant Colony Optimization Algorithm for each of the chosen topologies, three optimisations are performed: optimisation with the objective of maximising torque to price ratio, torque to mass ratio, and efficiency. Every optimisation iteration consists of input parameter preparation, calculation execution, and objective and constraint function values that are returned to the optimisation software. The optimisation continues until a given number of iterations are performed. All configurations fulfil the initial set of requirements for the electric car drive.

Results are compared, and the suitability of the motor type and its specific topology is determined with respect to the requirements.