

Analiza ciklusa vožnje pogonskog sklopa temeljenog na sinkronom motoru s uzбудnim namotom

Matotek, Andrijan

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:168:446673>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-20**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 149

**ANALIZA CIKLUSA VOŽNJE POGONSKOG SKLOPA
TEMELJENOG NA SINKRONOM MOTORU S UZBUDNIM
NAMOTOM**

Andrijan Matotek

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 149

**ANALIZA CIKLUSA VOŽNJE POGONSKOG SKLOPA
TEMELJENOG NA SINKRONOM MOTORU S UZBUDNIM
NAMOTOM**

Andrijan Matotek

Zagreb, lipanj 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 149

Pristupnik: **Andrijan Matotek (0036522467)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Profil: Elektrostrojarstvo i automatizacija
Mentor: prof. dr. sc. Stjepan Stipetić

Zadatak: **Analiza ciklusa vožnje pogonskog sklopa temeljenog na sinkronom motoru s uzбудnim namotom**

Opis zadatka:

Proučite i opišite trendove razvoja sinkronih motora s uzбудnim namotom za primjenu u električnim vozilima. Pronađite i analizirajte recentne primjere upotrebe. Definirajte i objasnite moguće režime rada sinkronog motora s uzбудnim namotom s obzirom na odnos statorskog i rotorskog protjecanja. Proučite literaturu i suvremene algoritme za analizu ciklusa vožnje. Izradite algoritam za analizu ciklusa vožnje, temeljen na optimalnom upravljanju sinkronim motorom s uzбудnim namotom s obzirom na raspodjelu struje u statorskom i rotorskom namotu, pojedinačne gubitke, ukupne gubitke, korisnost i moment na osovini. Usporedite vlastiti algoritam s odgovarajućim algoritmom u alatu za projektiranje električnih strojeva Ansys Motor-CAD-u s naglaskom na složenost algoritma, vrijeme izvođenja te preciznost u postizanju radne točke s obzirom na standardni proračun radne točke metodom konačnih elemenata.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

VELIKO HVALA profesoru dr. sc. Stjepanu Stipetiću na izrazitoj strpljivosti i srdačnosti svih ovih godina, na izvrsnim zanimljivim i zabavnim predavanjima te lijepim uspomenama sa studija.

Sadržaj

1. Uvod	5
2. Dokumentacija Matlab koda	10
2.1. Mogućnosti i tijek izvođenja koda	10
2.2. Odabir optimizacijske funkcije	10
2.3. Često korištene varijable	12
2.4. Opis funkcija i upute za korištenje	15
3. Demonstracija rezultata <i>Matlab</i> koda	25
3.1. Funkcija OperatingPoint	26
3.1.1. Način rada: Torque	26
3.1.2. Način rada: Maximum Current	30
3.1.3. Način rada: Current/Phase Advance	33
3.2. Funkcija Electromagnetic	34
3.2.1. Način rada: Maximum Torque/Speed Curve	34
3.2.2. Način rada: Efficiency Map	50
3.3. Funkcija DutyCycle	71
4. Usporedba <i>Matlab</i> i <i>Motor-CAD</i> rezultata	84
4.1. Operating Point	84
4.1.1. Način rada: Torque	85
4.1.2. Način rada: Maximum Current	88
4.1.3. Način rada: Current/Phase Advance	91
4.2. Electromagnetic	92
4.2.1. Način rada: Maximum Torque/Speed Curve	93
4.2.2. Način rada: Efficiency Map	118

4.3. Duty Cycle	137
5. Zaključak	158

1. Uvod

Električni strojevi imaju dugu povijest u službi pogona raznih cestovnih i tračničkih vozila, a u novije vrijeme plovila i letjelica. Počevši s istosmjernim kolektorskim strojem postalo je jasno da električni strojevi omogućuju dotad nezabilježenu gustoću momenta, korisnost i dinamiku. Kolektorski stroj zbog svojih problematičnih četkica biva zamijenjen asinkronim strojem koji zahvaljujući svojoj robusnosti i dan danas pogoni mnoga tračnička i cestovna vozila. Razvojem tehnologije poluvodiča i širokom dostupnosti pretvarača napona i frekvencije sve veći tržišni udio počinje zauzimati sinkroni stroj s permanentnim magnetima, zbog svoje superiorne korisnosti i gustoće momenta taj se tip stroja danas dominantno koristi za pogon većine novih vozila. Iako ima izvrsne karakteristike do rubne brzine, pogon automobila vrlo često zahtijeva i dugotrajan rad u području slabljenja polja gdje ovaj tip stroja nije idealan. Neki od problema ovog tipa stroja su: opasnost od trajne demagnetizacije zbog visoke temperature rotora ili zbog djelovanja statorskog protjecanja te uništenje poluvodičkih sklopki zbog visokog inducirano napona ako dođe do greške na pretvaraču u slabljenju polja pri velikim brzinama. Na navedene probleme moguće je utjecati i smanjiti rizik njihovog djelovanja, no nije moguće riješiti glavni problem ovog stroja. To su upravo magneti rijetkih zemalja, proizvode se gotovo isključivo u Kini pa su cijena i dostupnost nestabilni i skloni manipulaciji.

Jedna od mogućih zamjena sinkronog stroja s permanentnim magnetima je već odavno dobro poznati sinkroni stroj s uzbudnim namotom. Ovaj tip stroja povijesno se koristi kao sinkroni generator u elektranama. Izrazito je robusan i pouzdan te napravljen od lako dostupnih materijala. Uočivši potencijal ovog tipa stroja za pogon automobila, proizvođači intenzivno rade na njegovoj primjeni, a već su proizvedeni i prvi automobili s

ovim tipom motora.^{1, 2}

Sinkroni stroj s uzбудnim namotom



Slika 1.1. Primjer pogonskog sklopa temeljenog na sinkronom stroju s uzbudnim namotom u modernom automobilu (BMW iX M60)

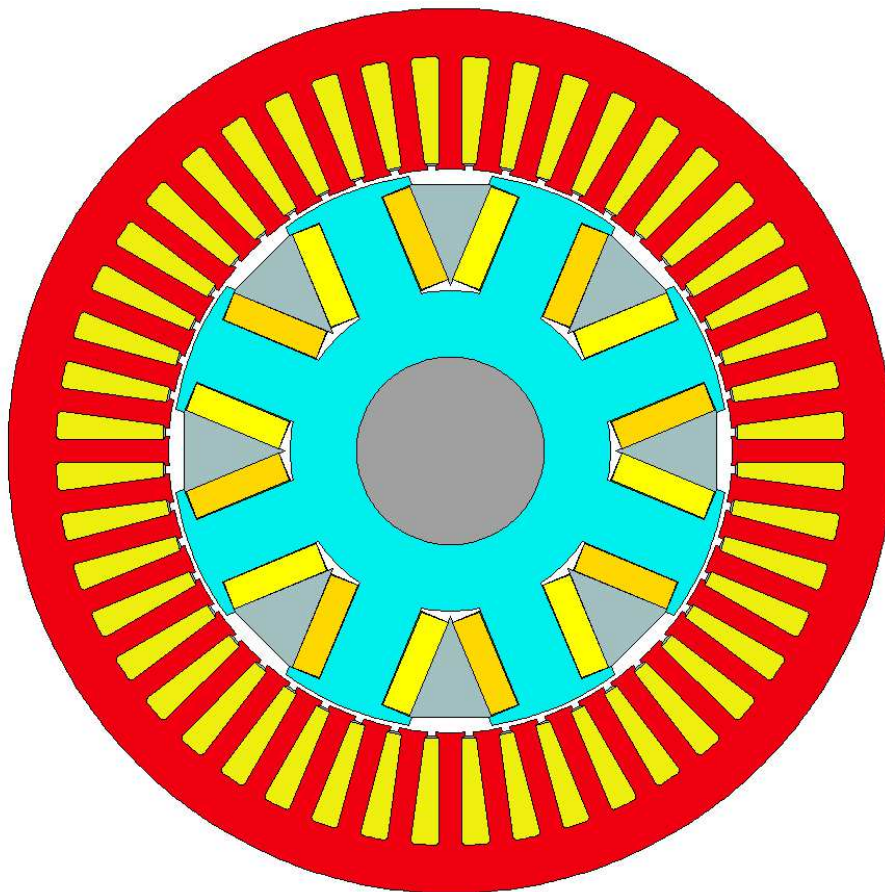
Sinkroni stroj s uzbudnim namotom ima dva namota: armaturni koji se tipično nalazi na statoru i uzbudni koji se tipično nalazi na rotoru. Armaturni namot je najčešće trofazni i standardne je izvedbe (kao i kod drugih tipova sinusno napajanih izmjeničnih strojeva s okretnim magnetskim poljem). Uzbudnim namotom teče istosmjerna struja koja stvara konstantno protjecanje, ali se zbog rotacije rotora ono na statoru vidi kao okretno magnetsko polje. Zbog konstrukcije rotora takve da je omogućeno smještanje uzbudnog namota postoji nesimetrija magnetskog otpora u direktnoj - d osi (osi pola) i poprečnoj - q osi (međupolnoj osi) pa ovaj stroj osim momenta elektromagnetske uzbude razvija i reluktantni moment. Kako je u električnom vozilu glavni izvor električne energije baterija, za napajanje armaturnog namota potreban je izmjenjivač, a za napajanje uzbudnog namota potrebna je neka vrsta reguliranog strujnog izvora ili DC/DC pretvarača (ovisi o naponu baterije i specifikacijama uzbudnog namota). Za prijenos električne energije na rotor najjednostavnije je koristiti klizne kolutove i četkice jer uzevši u obzir

¹<https://www.motortrend.com/news/bmw-ix-m60-brushed-electric-motor-tech-deep-dive/>

²<https://www.renaultgroup.com/en/news-on-air/news/new-zoe-the-manufacturing-secrets-of-a-100-renault-motor/>

da vozilo zbog održavanja drugih sustava mora na periodički servis, zamjena četkica ne predstavlja dodatne komplikacije vlasniku niti narušenje korisničkog iskustva. Energiju je na rotor moguće prenijeti i induktivnom spregom³, međutim takav sustav je kompleksniji.

Ovisno o tome kako se odnose statorsko i rotorsko protjecanje, ovu vrstu strojeva je moguće podijeliti u dvije skupine. U jednu skupinu pripadaju strojevi kod kojih vrijedi $L_f I_{f,max} \leq L_s I_{s,max}$ to jest strojevi kod kojih statorsko protjecanje može nadjačati rotorsko protjecanje i posljedično mogu ostvariti $\Psi_d = 0$, a da rotorskim namotom u tom trenutku teče nazivna struja. U drugu skupinu pripadaju strojevi kod kojih vrijedi obratna jednakost ($L_f I_{f,max} > L_s I_{s,max}$) i posljedično ne mogu ostvariti $\Psi_d = 0$ dok rotorskim namotom teče nazivna struja. U ovom radu će se analizirati ponašanje stroja iz prve skupine jer promatrani stroj (konkretno Renault Fluence WFSM) pripada toj skupini.



Slika 1.2. Model stroja Renault Fluence WFSM u programskom paketu *Motor-CAD*

³https://press.zf.com/press/en/releases/release_60480.html

Simulacijski okvir

Za potrebe izrade ovog rade koriste se programski paketi *ANSYS Motor-CAD* i *Mathworks Matlab*. *Motor-CAD* je programski paket za projektiranje i analizu rotacijskih električnih strojeva. Sadrži četiri modula, *E-Magnetic* za analizu elektromagnetskih prilika u stroju korištenjem metode konačnih elemenata, *Thermal* za provedbu termalnih proračuna, *Lab* za proračune temeljene na korištenju mapa (mape se stvaraju gradnjom modela, automatski se pokreću potrebni proračuni u *E-Magnetic* modulu te vrši obrada dobivenih rezultata) i *Mechanical* za provođenje analize mehaničkih naprezanja u stroju korištenjem metode konačnih elemenata. Moduli *Thermal* i *Mechanical* se neće koristiti u ovom radu. *Matlab* je programski paket za rješavanje širokog spektra matematičkih problema i obradu numeričkih podataka. Osim osnovnih funkcionalnosti moguća su i proširenja korištenjem dodatnih modula (eng. *Toolbox*). U ovom radu će se koristiti *Optimization Toolbox* i *Parallel Computing Toolbox*.

Modeliranje temeljeno na mapama

U ovom se radu stroj modelira korištenjem mapa (preglednih tablica - eng. *Lookup Table*) ulančenih tokova i mapa gubitaka, a potom se iz tih mapa računaju svi drugi željeni parametri. Tijek procesa je da *Motor-CAD Lab* prvo pokreće niz simulacija u svom *E-Magnetic* modulu koji na modelu stroja vrši analizu konačnih elemenata te potom iz dobivenih rezultata stvara i sprema mape (koje kao ulaz primaju narinutu struju): ulančenih tokova u d i q osi te specifičnih vrtložnih i histereznih gubitaka u željezu stroja (za svaki dio stroja zasebno, na primjer za zube rotora). Ti se sirovi podatci potom čitaju *Matlab* skriptom i interpoliraju kako bi se pokrilo područje između dostupnih točaka. Prednost modeliranja temeljenog na mapama je ta što nakon inicijalno dugog procesa proračuna mapa je daljnje korištenje istih izrazito brzo i u vidu procesne moći vrlo nezahtevno. Prilikom stvaranja mapa unose se netočnosti u rezultate u odnosu na provedbu simulacije svake radne točke metodom konačnih elemenata, ali je to kompromis koji je prihvatljiv jer mape osim brzog rada omogućuju i neke funkcionalnosti koje nisu dostupne korištenjem samo metode konačnih elemenata kao što je npr. korištenje optimizacije za pronalazak struje s kojom stroj ostvaruje minimalne gubitke za traženi moment pri nekoj brzini.

```
Sync_psiDModel_Lab[5]=0
PsiDModel_Lab[6]=0
Sync_psiDModel_Lab[6]=0
PsiDModel_Lab[7]=0,120191140948297
Sync_psiDModel_Lab[7]=0,120191140948297
PsiDModel_Lab[8]=0,104923103378849
Sync_psiDModel_Lab[8]=0,104923103378849
PsiDModel_Lab[9]=0,0596619515675991
Sync_psiDModel_Lab[9]=0,0596619515675991
PsiDModel_Lab[10]=-3,01679040852641E-5
Sync_psiDModel_Lab[10]=-3,01679040852641E-5
```

Slika 1.3. Primjer izgleda zapisa mape u *Motor-CAD* datoteci

Simulacije ciklusa vožnje

U današnjem se vremenu svakim danom traži sve veća energetska učinkovitost uređaja. Vozila kao jedan od glavnih energetskih potrošača podliježu tim istim zahtjevima na višu korisnost. S ciljem zadovoljenja tih potraživanja proizvođači vrše ispitivanja performansi svojih vozila na standardiziranim ciklusima vožnje. Kako je izrada prototipa dugotrajna i skupa nastoji se prvo stvoriti model koji će se brzo, lako i jeftino računalno ispitivati prije nego što se krene na testiranje stvarnog vozila. Simulacije omogućuju jednostavnu provjeru ponašanja vozila na danoj dionici uz lake modifikacije dijelova pogona, ako je to potrebno ili željeno. Standardni ciklusi vožnje pojavljuju se još 1970-ih godina s ciljem smanjenja štetnih ispušnih plinova i povećanja kvalitete zraka u gradovima, iako ne naročito indikativni o stvarnim performansama vozila u svakodnevnom prometu ti ciklusi najavljuju novi smjer u kojem će industrija ići. Današnji moderni ciklusi vožnje mnogo bolje predviđaju stvarne performanse vozila, a kao zlatni standard se najčešće koristi *WLTP* ciklus. Ciklusi su najčešće definirani tako da je u svakom vremenskom trenutku zadana određena tražena brzina. Prilikom simulacije je potrebno izračunati moment koji vozilo mora ostvariti da bi zadovoljilo tu traženu brzinu. Na vozilo u nekom vremenskom trenutku djeluju četiri sile: sila akceleracije, sila otpora zraka, sila otpora kotrljanja i gravitacijska sila (najčešće se uzima da se ciklus provodi na ravnom terenu pa se ova sila može zanemariti). Sila akceleracije se računa iz mase vozila i akceleracije koja se dobiva deriviranjem zadane brzine vožnje u nekom trenutku ciklusa. Parametri za proračun sile otpora zraka i otpora kotrljanja procjenjuju se iz stvarnih mjerenja sličnih vozila ili iz specijaliziranih računalnih simulacija modela vozila. Uz poznati traženi moment i brzinu vožnje moguće je izračunati količinu potrošene energije, učinkovitost i druge veličine od interesa na nekom ciklusu.

2. Dokumentacija Matlab koda

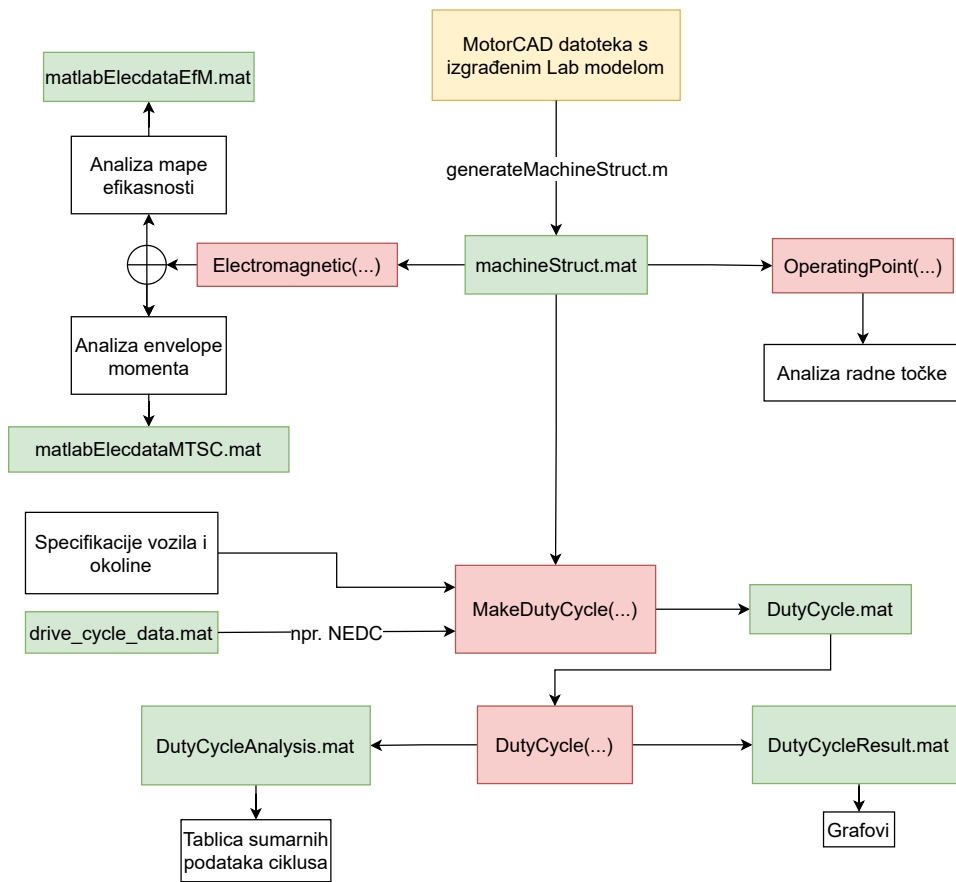
U ovom se poglavlju obrazlaže odabir optimizacijske funkcije, daje opis Matlab funkcija i ukratko predstavlja mogućnosti koda.

2.1. Mogućnosti i tijek izvođenja koda

Na slici 2.1. je prikazan dijagram s funkcionalnostima koda. Prvo je potrebno izgraditi *Motor-CAD Lab* model, potom se ta datoteka sprema i njeno ime predaje *Matlab* skripti *generateMachineStruct.m*, skripta otvara *Motor-CAD* datoteku te iz nje čita relevantne podatke, interpolira sirove podatke iz mapa te stvara *machineStruct* strukturu koja će se dalje koristiti za sve proračune i sprema je u *machineStruct.mat* datoteku. Na dijagramu su crveno označene glavne funkcije, *OperatingPoint* se koristi za analizu radne točke, *Electromagnetic* za analizu envelope momenta ili mape korisnosti, a *MakeDutyCycle* i *DutyCycle* za analizu ciklusa vožnje. Zeleno su označene *Matlab* datoteke s podacima. Datoteka *matlabElecdDataMTSC.mat* sadrži rezultate analize envelope momenta, *matlabElecdDataEfM.mat* sadrži rezultate analize mape korisnosti. *drive_cycle_data.mat* sadrži spremljene standardne cikluse vožnje kao što su na primjer NEDC ili WLTP. *MakeDutyCycle* na temelju zadanog ciklusa vožnje te podataka o vozilu i okolini stvara datoteku *DutyCycle.mat* koju će funkcija *DutyCycle* koristiti za analizu ciklusa vožnje. *DutyCycleResult.mat* sadrži rezultate analize ciklusa vožnje, a *DutyCycleAnalysis.mat* sadrži sumarne podatke tog ciklusa.

2.2. Odabir optimizacijske funkcije

Za pronalaženje minimuma (ili maksimuma) koristi se Matlab funkcija *fmincon*. Funkcija *fmincon* pronalazi lokalni minimum ciljne funkcije i pritom nastoji zadovoljiti funkcije ograničenja nejednakosti i jednakosti (na primjer minimizacija ukupnih gubitaka u



Slika 2.1. Dijagram s prikazom funkcionalnosti koda

stroju uz zadovoljenje traženog momenta). Maksimizacija se radi tako da se ciljna funkcija pomnoži s -1 , tada maksimumi funkcije postaju postaju minimumi te ih `fmincon` uspješno pronalazi. Za algoritam koji će `fmincon` koristiti odabran je *interior-point* jer poštuje zadane dozvoljene granice minimalnih i maksimalnih vrijednosti varijabli i ima dobre performanse za konveksne probleme.

Stare razvojne verzije ovog programskog koda koristile su i alate globalne optimizacije iz *Global Optimization Toolbox* paketa (konkretno *Multi Start* i *Global Search*), ali se postupnim unaprjeđivanjem koda došlo do zaključka da to ipak nije potrebno jer ne poboljšavaju rezultate, a unose dodatnu kompleksnost i greške pa je takvo rješenje odbačeno.

2.3. Često korištene varijable

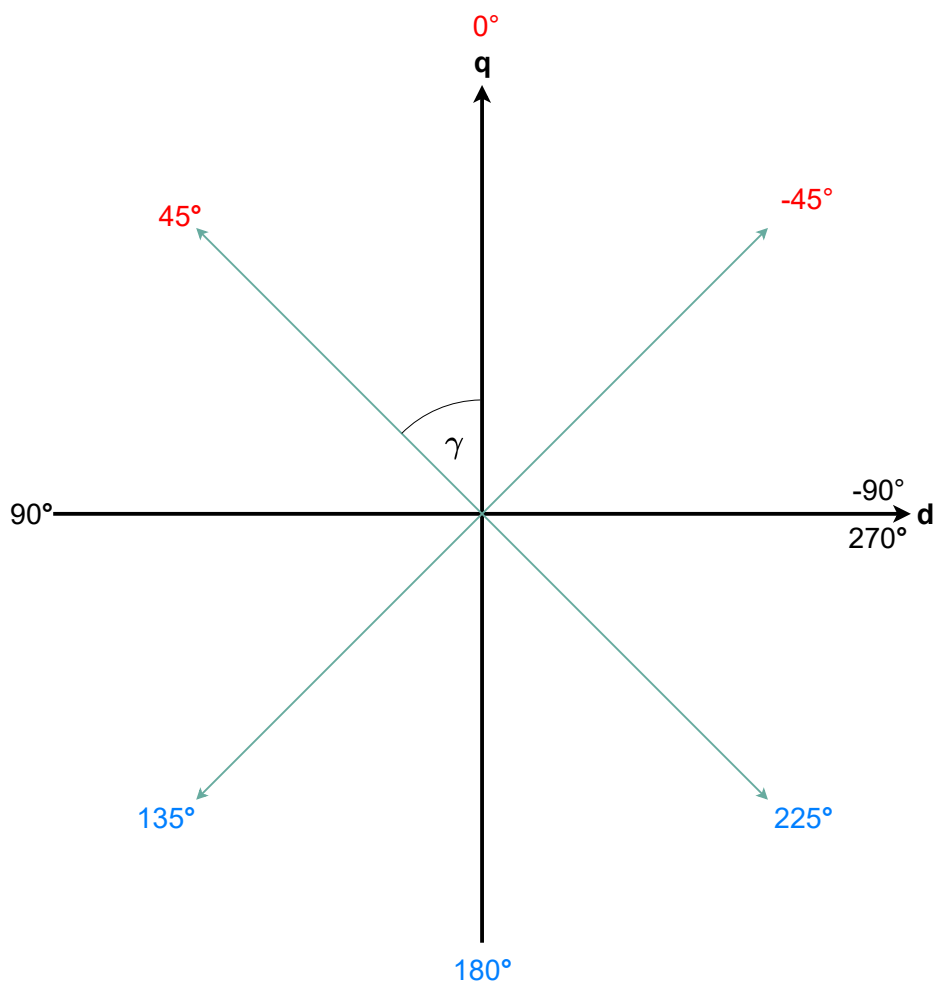
Mnoge funkcije koriste iste varijable pa je ovdje dan opis tih varijabli.

current

Varijabla *current* predstavlja vektor struje. Oblika je $[\hat{I}_s \quad \gamma \quad I_f]$. \hat{I}_s je vršna vrijednost fazne statorske struje, takav se oblik koristi jer su tako zapisane mape koje *Motor-CAD Lab* stvara. Varijabla γ predstavlja kut vektora struja koji je definiran između -90 i 270 stupnjeva (sirovi podatci iz programa *Motor-CAD* su dostupni u intervalu od -90° do 90° , interval je proširen preslikavanjem dostupnih podataka u sva četiri kvadranta), razlog za ovakvu neobičnu definiciju intervala je taj što se željelo osigurati kontinuirane granice za optimizacijske funkcije i izbjeći diskontinuitet na grafovima prilikom prelaska iz jednog kvadranta u drugi (vidljivo u generatorskom režimu na primjer na slici 4.25.). Definicija predznaka prati *Motor-CAD* konvenciju i suprotna je od konvencije s tipičnih FER predavanja na kolegiju *Sinkroni i asinkroni strojevi*, na primjer kad γ poprimi vrijednost od 45° tad je struja I_d negativnog predznaka. Na slici 2.2. je prikazan dijagram s različitim vrijednostima kuta vektora struje, na slici su crveno označeni kutevi vektora struje u motorskom režimu, a plavo u generatorskom režimu. Varijabla I_f predstavlja vrijednost istosmjerne struje koja teče rotorskim namotom. Referentni smjer uzbudne struje je odabran tako da kad je I_f pozitivna, ona stvara protjecanje u smjeru pozitivne d osi.

machineStruct

Varijabla *machineStruct* predstavlja strukturu koja sadrži potrebne podatke o stroju za sve proračune u programskom kodu. Strukturu stvara skripta *generateMachineStruct.m* i sprema u datoteku *machineStruct.mat* na temelju *Motor-CAD* datoteke koja mora sadržavati izgrađen *Lab* model. Struktura sadrži iznos najveće dozvoljene vršne fazne statorske struje i najveće dozvoljene istosmjerne rotorske struje, otpore oba namota, broj pari polova, maksimalni dozvoljeni napon istosmjernog međukruga pretvarača s kojeg stroj smije biti napajan, je li namot spojen u trokut ili zvijezdu te interpolirane mape gubitaka i ulančenih tokova u d i q osi.



Slika 2.2. Dijagram kuta vektora struje (γ)

f

Varijabla f predstavlja električnu frekvenciju:

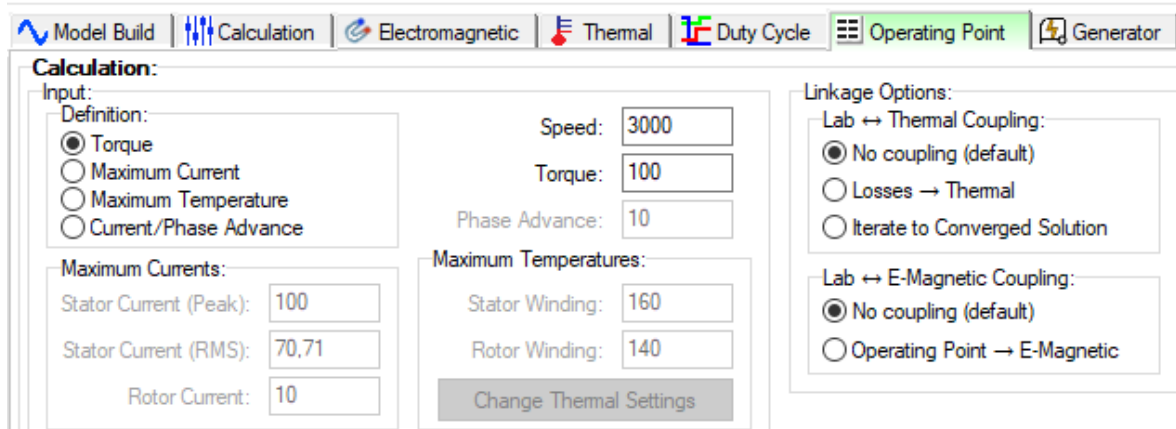
$$f = \frac{np}{60} \quad (2.1)$$

pri čemu je n brzina vrtnje vratila, a p broj pari polova.

functionMode

Funkcije su pisane da idejno i funkcionalno budu slične karticama iz modula *Lab* u programskom paketu *Motor-CAD*. Varijabla *functionMode* služi za odabir načina rada funkcije. Na primjer funkcija *OperatingPoint* ima tri moguća načina rada, to su *Torque*, *Maximum Current* i *Current/Phase Advance*. Ti načini rada odgovaraju mogućnostima iz

Motor-CAD Lab kartice *Operating Point* (*Maximum Temperature* je izostavljen jer Matlab kod ne vrši termalni proračun). Slika 2.3. prikazuje karticu *Operating Point*.



Slika 2.3. Motor-CAD Lab, Operating Point

controlStrategy

Za minimiziranje su na raspolaganju s tri vrste gubitaka (biraju se preko varijable *controlStrategy*): ukupni gubitci u stroju koji uključuju i gubitke u bakru i gubitke u željezu (*MinTotalLoss*), ukupni gubitci u bakru koji uključuju gubitke u bakru i rotora i statora (*MinTotalCopperLoss*) te gubitci u bakru samo rotora (*MinRotorCopperLoss*). U tablici 2.1. je dan tablični prikaz gubitaka u stroju u istoj radnoj točki za različite strategije upravljanja. Preporučuje se uvijek koristiti minimizaciju ukupnih gubitaka u stroju (*MinTotalLoss*) jer se tada postiže optimalno rješenje.

Tablica 2.1. Primjer gubitaka u stroju za različite strategije upravljanja, 100 Nm pri 3000 min⁻¹

	<i>MinTotalLoss</i>	<i>MinTotalCopperLoss</i>	<i>MinRotorCopperLoss</i>
Gubitci u bakru statora, W	652	815	4548
Gubitci u bakru rotora, W	643	432	0
Gubitci u željezu, W	648	752	1194
Ukupni gubitci, W	1943	1999	5742

2.4. Opis funkcija i upute za korištenje

Kratki popis često korištenih simbola:

p - broj pari polova, Ψ - ulančeni magnetski tok, \hat{I}_s - vršna vrijednost fazne statorske struje, γ - kut vektora struje, I_f - istosmjerna vrijednost uzbudne struje, R_a - otpor armaturnog namota, R_f - otpor uzbudnog namota, f - frekvencija, $\omega_{el} = 2\pi f$ - električna kružna frekvencija, $\omega_m = \frac{\omega_{el}}{p}$ - mehanička kružna frekvencija

InputLoop

Funkcija *InputLoop* služi za čitanje parametara iz *Motor-CAD* datoteke koji su zapisani u obliku liste. Na primjer $\Psi_d(\hat{I}_s, \gamma, I_f)$ je funkcija tri varijable, ali je u *Motor-CAD* datoteci zapisana kao jednodimenzionalna lista, *InputLoop* čita jednodimenzionalnu listu i pretvara je u trodimenzionalnu listu koja će dalje biti korištena u *Matlab* kodu. Funkcija preko varijable *rawText* prima tekstualnu listu (pročitana *Motor-CAD* datoteka i pretvorena u tekstualnu listu). Preko vektora *dimension* se prosljeđuje dimenzija *Motor-CAD Lab* modela, prvi broj označava broj vrijednosti statorske struje, drugi broj označava broj vrijednosti kuteva vektora struje, a treći broj označava broj vrijednosti rotorske struje. Preko varijable *string* se funkciji prenosi ime *Motor-CAD* parametra koji se želi pročitati.

PsiDCalc

Funkcija *PsiDCalc* vraća ulančeni tok u d osi tako da čita vrijednost iz mape (uz zrcaljenje u traženi kvadrant ako je potrebno). Kao ulaz redom prima varijable *current* i *machineStruct*.

PsiQCalc

Funkcija *PsiQCalc* vraća ulančeni tok u q osi tako da čita vrijednost iz mape (uz zrcaljenje u traženi kvadrant ako je potrebno). Kao ulaz redom prima varijable *current* i *machineStruct*.

Vector2dqf

Funkcija *Vector2dqf* vrši pretvorbu ulaznog vektora struje iz oblika $[\hat{I}_s \ \gamma \ I_f]$ u izlazni oblik $[I_d \ I_q \ I_f]$ prema izrazima

$$I_d = -\hat{I}_s \sin(\gamma) \quad I_q = \hat{I}_s \cos(\gamma) \quad I_f = I_f \quad (2.2)$$

I_f ostaje nepromijenjen jer je istosmjerna veličina. Kao ulaz funkcija prima varijablu *current*.

LineCurrentCalc

Funkcija *LineCurrentCalc* računa vršnu vrijednost linijske struje. Kao ulaz redom prima varijable *current* i *machineStruct*.

VCalc

Funkcija *VCalc* računa vršnu vrijednost faznog napona na stezaljkama stroja prema izrazima

$$U_d = R_a I_d - \omega_{el} \Psi_q \quad (2.3)$$

$$U_q = R_a I_q + \omega_{el} \Psi_d \quad (2.4)$$

$$\hat{U} = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} \quad (2.5)$$

Kao ulaz redom prima varijable *current*, *machineStruct* i *f*.

VCalcLine

Funkcija *VCalcLine* računa vršnu vrijednost linijskog napona na stezaljkama stroja. Kao ulaz redom prima varijable *current*, *machineStruct* i *f*.

IronLossCalc

Funkcija *IronLossCalc* računa gubitke u željezu stroja u radnoj točki prema izrazima

$$P_{Fe,eddy} = p_{Fe,edd}f^2 \quad (2.6)$$

$$P_{Fe,hys} = p_{Fe,hys}f \quad (2.7)$$

$$P_{Fe} = P_{Fe,eddy} + P_{Fe,hys} \quad (2.8)$$

pri čemu su $p_{Fe,eddy}$ gubitci vrtložnih struja ovisni o frekvenciji, a $p_{Fe,hys}$ gubitci histereze ovisni o frekvenciji. Kao ulaz redom prima varijable *current*, *machineStruct* i *f*.

StatorCopperLossCalc

Funkcija *StatorCopperLossCalc* računa gubitke u bakru statorskog namota stroja u radnoj točki prema izrazu

$$P_{Cu,s} = 3 R_a \left(\frac{\hat{I}_s}{\sqrt{2}} \right)^2 \quad (2.9)$$

Kao ulaz redom prima varijable *current* i *machineStruct*.

RotorCopperLossCalc

Funkcija *RotorCopperLossCalc* računa gubitke u bakru rotorskog (uzbudnog) namota stroja u radnoj točki prema izrazu

$$P_{Cu,f} = R_f I_f^2 \quad (2.10)$$

Kao ulaz redom prima varijable *current* i *machineStruct*.

TotalCopperLossCalc

Funkcija *TotalCopperLossCalc* računa ukupne gubitke u bakru oba namota stroja u radnoj točki prema izrazu

$$P_{Cu} = P_{Cu,s} + P_{Cu,f} \quad (2.11)$$

pri čemu su $P_{Cu,s}$ gubitci u bakru statorskog namota, a $P_{Cu,f}$ gubitci u bakru uzbudnog namota. Kao ulaz redom prima varijable *current* i *machineStruct*.

TotalLossCalc

Funkcija *TotalLossCalc* računa ukupne gubitke stroja u radnoj točki prema izrazu

$$P_{loss} = P_{Cu} + P_{Fe} \quad (2.12)$$

pri čemu su P_{Cu} ukupni gubitci u bakru stroja, a P_{Fe} ukupni gubitci u željezu stroja. Kao ulaz redom prima varijable *current*, *machineStruct* i *f*.

TEMCalc

Funkcija *TEMCalc* računa elektromagnetski moment koji stroj ostvaruje u radnoj točki prema izrazu

$$M_{em} = \frac{3}{2} p (\Psi_d I_q - \Psi_q I_d) \quad (2.13)$$

Kao ulaz redom prima varijable *current* i *machineStruct*.

TSHCalc

Funkcija *TSHCalc* računa moment koji stroj ostvaruje na vratilu u radnoj točki prema izrazu

$$M_{sh} = M_{em} - M_{loss} \quad (2.14)$$

$$M_{loss} = \frac{P_{Fe}}{\omega_m} \quad (2.15)$$

pri čemu je M_{em} elektromagnetski moment, a M_{loss} moment izgubljen do vratila zbog gubitaka u stroju. Kao ulaz redom prima varijable *current*, *machineStruct* i *f*.

PSHCalc

Funkcija *PSHCalc* računa mehaničku snagu koju stroj ostvaruje na vratilu u radnoj točki prema izrazu

$$P_{sh} = M_{sh}\omega_m \quad (2.16)$$

pri čemu je M_{sh} moment koji stroj ostvaruje na vratilu. Kao ulaz redom prima varijable *current*, *machineStruct* i *f*.

PECalc

Funkcija *PECalc* računa električnu snagu koju stroj ostvaruje na terminalima u radnoj točki prema izrazu

$$P_e = P_{sh} + P_{loss} \quad (2.17)$$

pri čemu je P_{sh} snaga koju stroj ostvaruje na vratilu, a P_{loss} ukupni gubitci u stroju. Kao ulaz redom prima varijable *current*, *machineStruct* i *f*.

EfficiencyCalc

Funkcija *EfficiencyCalc* računa korisnost stroja u radnoj točki prema izrazu

$$\eta = P_{sh}/P_e \quad (2.18)$$

ako stroj radi kao motor ili prema izrazu

$$\eta = P_e/P_{sh} \quad (2.19)$$

ako stroj radi kao generator. Kao ulaz redom prima varijable *current*, *machineStruct* i *f*.

OperatingPoint

Funkcija *OperatingPoint* je idejno slična kartici *Operating Point* iz *Motor-CAD Lab-a*. Kao ulaz redom prima varijable *functionMode*, *controlStrategy*, *current*, *machineStruct*, *n*,

demandedTorque i *displayOption*. Funkcija ima tri načina rada, to su *Torque*, *Maximum Current* i *Current/Phase Advance*, način rada se odabire preko varijable *functionMode*.

Varijabla *displayOption* služi za odabir želi li se detaljno ispisati izračunate veličine u danoj radnoj točki (skrivanje detaljnog ispisa se koristi kad na primjer funkcija *DutyCycle* poziva funkciju *OperatingPoint* za proračun radne točke. Kad korisnik direktno koristi *OperatingPoint* preporučuje se upotreba detaljnog ispisa na način da se varijabli preda vrijednost *Display*).

U načinu rada *Torque* funkcija za traženi moment na vratilu (*demandedTorque*) pri mehaničkoj brzini (n) pronalazi struju s kojom će se ostvariti traženi moment (ako ga je moguće ostvariti, inače pronalazi struju s kojom se ostvaruje maksimalni mogući moment koji napon dozvoljava) i pritom minimizira odabrane gubitke (*controlStrategy*). U ovom načinu rada nebitno je što je funkciji predano preko varijable *current* jer se ona ne koristi.

U načinu rada *Maximum Current* funkcija za zadani iznos statorske i rotorske struje (*current*, ali unesena vrijednost γ se zanemaruje) pri mehaničkoj brzini (n) pronalazi γ pri kojoj stroj ostvaruje maksimalni mogući moment na vratilu. U ovom načinu rada se preko varijable *demandedTorque* bira radi li stroj kao motor ili kao generator na način da ako je predana vrijednost pozitivna radi kao motor, a ako je predana vrijednost negativna radi kao generator, sam iznos je nebitan, koristi se samo predznak broja. Nebitno je što se funkciji preda preko varijable *controlStrategy* jer je ciljna funkcija moment koji se nastoji maksimizirati, a ne gubitci koje se nastoji minimizirati.

U načinu rada *Current/Phase Advance* funkcija za zadanu vrijednost vektora struje (*current*) pri mehaničkoj brzini (n) računa i ispisuje određene veličine. U ovom načinu rada nebitno je što je funkciji predano preko varijabli *controlStrategy* i *demandedTorque* jer se one ne koriste. Ovaj način rada ne provodi optimizaciju već samo direktno čita iz mapa te na temelju toga računa parametre od interesa.

Electromagnetic

Funkcija *Electromagnetic* je idejno slična kartici *Electromagnetic* iz *Motor-CAD Lab-a*. Kao ulaz redom prima varijable *functionMode*, *controlStrategy*, *operatingMode*, *maxS-*

tatorCurrent, *maxRotorCurrent*, *numIncrements*, *machineStruct*, *maxSpeed*, *stepSpeed*, *minSpeed*, *effModeRefSelect* i *mcadEfMapResult*. Funkcija ima dva načina rada, to su *Maximum Torque/Speed Curve* i *Efficiency Map*, način rada se odabire preko varijable *functionMode*.

Preko varijable *operatingMode* se odabire režim rada stroja, unosom *Motor* stroj radi kao motor, unosom *Generator* radi kao generator, a unosom *MotGen* vrši se objedinjeni proračun i za motorski i za generatorski režim rada. Preko varijabli *maxStatorCurrent* i *maxRotorCurrent* se postavlja maksimalni iznos statorske odnosno rotorske struje za korištenje u proračunu. Varijabla *minSpeed* služi za postavljanje početne brzine od koje se vrši proračun, varijabla *maxSpeed* za postavljanje konačne brzine proračuna, a varijabla *stepSpeed* za postavljanje iznosa koraka brzine.

U načinu rada *Maximum Torque/Speed Curve* funkcija proračunava parametre envelope momenta i proračunate vektore sprema u datoteku imena *matlabElecdataMTSC.mat*. Nebitno je što se predaje varijablama *controlStrategy* (nastoji se maksimizirati moment pa ciljna funkcija nije funkcija gubitaka nego funkcija momenta), *effModeRefSelect* i *mcadEfMapResult* jer se njihove vrijednosti ne koriste.

U načinu rada *Efficiency Map* funkcija proračunava parametre za mapu više momenta u rasponu zadanih brzina i proračunate vektore sprema u datoteku imena *matlabElecdataEfM.mat*. Preko varijable *effModeRefSelect* je moguće odabrati kako će se rasporediti točke između maksimalnog i minimalnog momenta. U tablici 2.2. je dan primjer rasporeda traženog momenta za različite načine distribucije. Opcija *linear* točke raspoređuje tako da su međusobno jednako razmaknute, a *logarithmic* tako da one prate logaritamsku razdiobu. Vidljivo je da maksimalni traženi moment opada u slabljenu polja jer bi bilo besmisleno zahtijevati moment koji nije ostvariv unutar naponske granice. Opcija *Motor-CAD* omogućava preuzimanje referenci momenta iz *Motor-CAD Lab* rezultata (varijabli *mcadEfMapResult* je tada potrebno predati *MotorLAB_elecdata.mat* datoteku koju automatski stvara *Motor-CAD Lab* prilikom provedbe *Efficiency Map* analize). Ako se kao referencu momenta ne koristi način *Motor-CAD* nebitno je što se predaje varijabli *mcadEfMapResult* jer se ona ne koristi. Na slici 2.4. je dan primjer izgleda mapa korisnosti za različite distribucije momenta. Vidljivo je da linearna distribucija daje izgledom sličniju mapu korisnosti kao kad je referenca momenta rezultat iz programa *Motor-CAD*

Tablica 2.2. Primjer rasporeda momenta u Nm, objedinjeni motorski i generatorski režim s 5 inkremenata

Linear	Logarithmic	Motor-CAD
234,02	234,02	229,07
181,34	92,10	131,37
128,66	36,24	61,56
75,98	14,26	19,70
23,30	5,61	5,74
-29,38	-5,76	-5,87
-82,06	-14,63	-20,19
-134,74	-37,19	-63,20
-187,42	-94,49	-134,84
-240,10	-240,10	-235,13

(a) pri 1000 min^{-1}

Linear	Logarithmic	Motor-CAD
57,32	57,32	55,80
43,99	22,56	33,99
30,66	8,88	18,25
17,32	3,49	8,87
3,99	1,38	5,74
-9,34	-1,50	-5,87
-22,67	-3,82	-9,27
-36,01	-9,71	-19,49
-49,34	-24,66	-36,53
-62,67	-62,67	-60,36

(b) pri 10000 min^{-1}

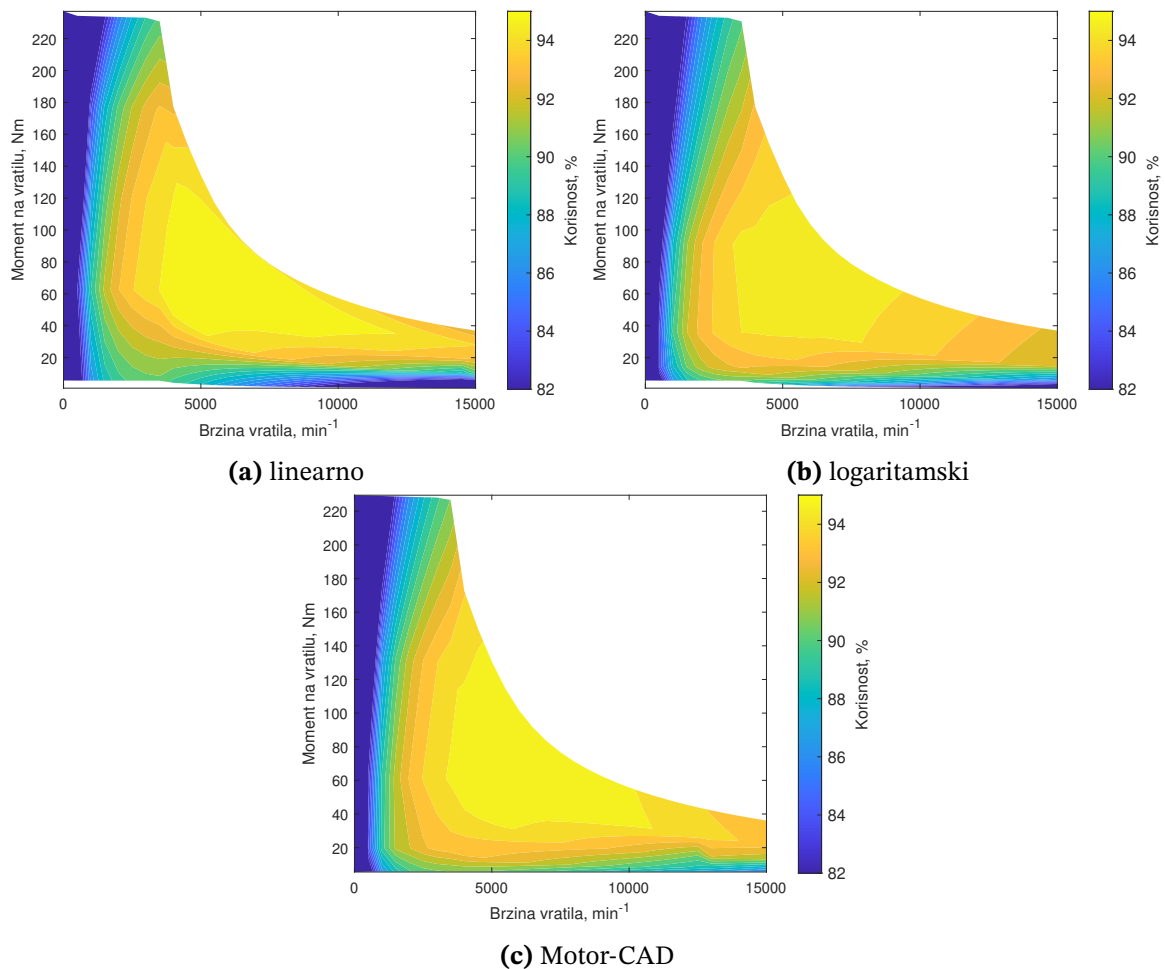
od logaritamske distribucije. Motor-CAD izvorno koristi razdiobu momenata koja nalikuje eksponencijalnoj funkciji, ali je se ne može aproksimirati s jednom ili kombinacijom dvije eksponencijalne funkcije (zato postoji opcija Motor-CAD da se reference momenta direktno preuzmu kad se međusobno želi usporediti rezultate mapa korisnosti).

MakeDutyCycle

Funkcija *MakeDutyCycle* služi za stvaranje datoteke imena *dutyCycle* koja sadrži podatke potrebne za provedbu analize ciklusa vožnje. Kao ulaz funkcija redom prima varijable *inputMode*, *userInputVehicleStruc*, *userInputEnv* i *cycle*.

U automatskom načinu unosa se koriste u programu pretpostavljeni parametri vozila i okoline. Nebitno je što je predano varijablama *userInputVehicleStruc*, *userInputEnv* i *cycle* jer se one ne koriste (pretpostavljene podatke je moguće izmijeniti u kodu).

U ručnom načinu unosa je potrebno funkciji dati strukturu koja sadrži podatke o vozilu (*userInputEnv*), strukturu koja sadrži podatke o okolini (*userInputEnv*) i podatke o ciklusu (*cycle*). Struktura *userInputEnv* mora sadržavati prednju površinu vozila (*CA*), koeficijent otpora kotrljanja (*Cr*), koeficijent otpora zraka (*Cd*), masu vozila (*M*, u kilogramima), korekcijski faktor inercijskih masa (*m_in*), gradijent (*grad*, u stupnjevima), radijus kotača (*R_wheel*, u metrima), broj motora (*no_mot*) i prijenosni omjer (*gear_ratio*). Struktura *userInputEnv* mora sadržavati gustoću zraka (*rho*, u kilogramima po metru kubnom) i gravitacijsku konstantu (*g*, u metrima po sekundi kvadratnoj). Vektor *cycle*



Slika 2.4. Primjer izgleda mape korisnosti za različite distribucije momenta

treba sadržavati brzine (u metrima po sekundi, standardni ciklusi vožnje koji dolaze uz programski kod već su u potrebnim mjernim jedinicama).

Ukupna sila (F_{total}) koja djeluje na vozilo u nekom trenutku jednaka je sumi sila otpora zraka (F_{aero}), otpora kotrljanja (F_{roll}), inercije (F_{inert}) i gravitacijske sile (F_{grav}).

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho C_d C_A v^2 \quad (2.20)$$

$$F_{roll} = M g C_r \cos(\text{grad}) \quad (2.21)$$

$$F_{inert} = m_{in} M a \quad (2.22)$$

$$F_{grav} = M g \sin(\text{grad}) \quad (2.23)$$

Moment koji pojedini motor mora ostvariti jednak je

$$M_{mot} = \frac{F_{total} R_{wheel}}{gear_ratio\ no_mot} \quad (2.24)$$

pri čemu su v - brzina vozila i a - akceleracija vozila. Brzina vrtnje ($u \text{ min}^{-1}$) pri kojoj motor mora ostvariti traženi moment računa se prema izrazu

$$n_{mot} = \frac{60 v \text{ gear_ratio}}{2 \pi R_wheel} \quad (2.25)$$

S podacima o traženom momentu i pripadnoj brzini moguće je provesti analizu ciklusa vožnje.

DutyCycle

Funkcija *DutyCycle* je idejno slična kartici *Duty Cycle* iz *Motor-CAD Lab-a*. Funkcija provodi analizu ciklusa vožnje (predanog preko varijable *dutyCycle*) i stvara dvije datoteke s rezultatima imena *dutyCycleResult* i *dutyCycleAnalysis*, prva datoteka sadrži podatke potrebne za crtanje grafova, a druga sumarne podatke proračuna ciklusa vožnje (ako se koristi više od jednog motora onda se rezultati odnose samo na jedan motor). Kao ulaz funkcija redom prima varijable *driveCycleFile*, *controlStrategy* i *machineStruct*.

TorqueAndVoltageConstraint

Funkcija *TorqueAndVoltageConstraint* je ograničavajuća funkcija koja se koristi u *fmincon-u* kada je potrebno osigurati traženi moment, a da se pritom ne premaši maksimalni dozvoljeni napon u radnoj točki. Kao ulaz funkcija redom prima varijable *current*, *machineStruct*, *f* i *wantedTorque*. Funkcionalnost je omogućena i za pozitivne i za negativne momente.

VoltageConstraint

Funkcija *VoltageConstraint* je ograničavajuća funkcija koja se koristi u *fmincon-u* kada je potrebno osigurati da se u radnoj točki ne premaši maksimalni dozvoljeni napon. Kao ulaz funkcija redom prima varijable *current*, *machineStruct* i *f*.

3. Demonstracija rezultata *Matlab* koda

U ovom su poglavlju dani rezultati dobiveni korištenjem *Matlab* funkcija. Specifikacije modela su dane u tablici 3.1., a u tablici 3.2. su dane specifikacije računala na kojem su provedeni proračuni. U proračunu je moguće koristiti grublje i finije mape, finoću mape se mijenja izborom broja točaka od kojih je izgrađen model. Standardni model je model tvorničkih postavki u *Motor-CAD Lab* modulu te bi trebao omogućiti dobar kompromis između točnosti proračuna i brzine izvođenja programa. Prošireni model je odabran kao primjer korištenja finije mape, trebao bi omogućiti veću točnost proračuna, ali će se zato izvoditi sporije. Eksperimentalno se pokazuje da broj različitih vrijednosti statorske struje i kuteva vektora struje više utječu na kvalitetu mape u odnosu na broj različitih vrijednosti rotorske struje pa je njihov iznos povećan u značajno većoj mjeri od broja vrijednosti rotorske struje. Na slici 3.1. je vidljiv izgled envelope momenta u

Tablica 3.1. Specifikacije modela stroja

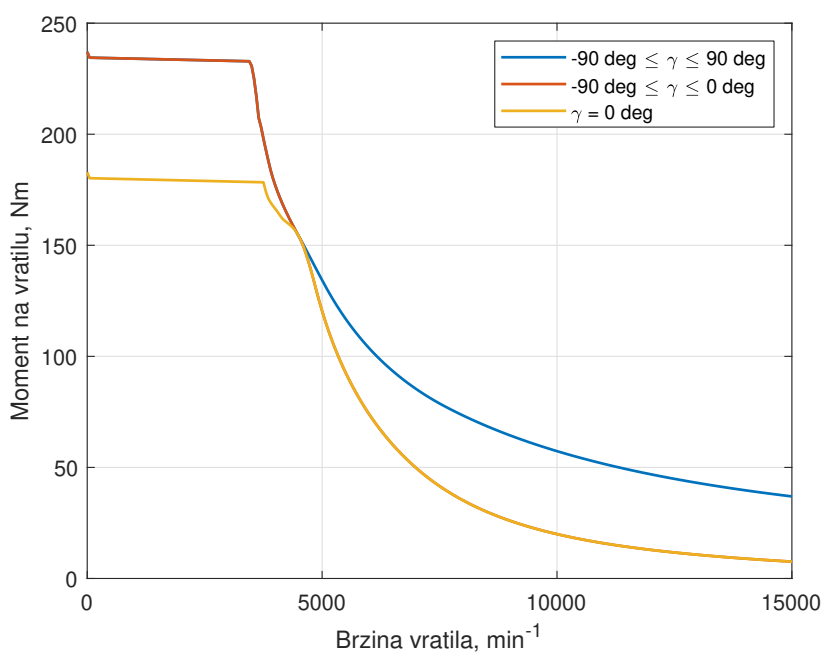
Parametar	Standardni model	Prošireni model
Broj vrijednosti statorske struje	5	10
Broj vrijednosti γ	7	21
Broj vrijednosti rotorske struje	5	7
Ukupan broj točaka	175	1470
Maksimalna brzina stroja, min^{-1}	15000	
Maksimalna vršna fazna statorska struja, A	565	
Maksimalna istosmjerna rotorska struja, A	16	
Maksimalni vršni linijski napon, V	430	

ovisnosti o dozvoljenom području kuta vektora struje za primjer motorskog rada. Plava linija označava slučaj kad je statorskom protjecanju dozvoljeno djelovati zajedno s i suprotno od rotorskog protjecanja, crvena linija označava slučaj kad je statorskom protjecanju dozvoljeno pojačavati rotorsko protjecanje, ali ne i slabiti njegovo djelovanje, žutom

Tablica 3.2. Specifikacije računala

Procesor	AMD EPYC 7713 64-Core (16 jezgri dostupno)
Radna memorija	32 GB
Operativni sustav	Windows 10 Enterprise
Matlab verzija	R2024a
Broj paralelnih radnika u Matlab-u	16
Motor-CAD verzija	v2024.1.3

linijom je označen slučaj kad se slabljenje polja vrši isključivo smanjivanjem rotorskog protjecanja. Iz slike je jasno vidljivo da onemogućavanje slabljenja ili pojačavanja polja statorskim protjecanjem daje suboptimalne rezultate pa se takvi slučajevi neće dalje razmatrati, nego će statorskom protjecanju u svim narednim primjerima biti omogućen rad u sva četiri kvadranta (odnosno neće biti ograničenja na iznos kuta vektora struje).



Slika 3.1. Moment u ovisnosti o dozvoljenom kutu vektora struje

3.1. Funkcija OperatingPoint

U ovom su potpoglavlju dani rezultati Matlab funkcije *OperatingPoint*.

3.1.1. Način rada: Torque

U svim proračunima je korištena strategija minimizacije ukupnih gubitaka (*MinTotalLoss*) jer daje najbolje rješenje što je već ranije prikazano u tablici 2.1. Prikazani su re-

zultati analize četiri radne točke, dvije od kojih su motorske i dvije koje su generatorske, za svaki režim odabrana je jedna točka koju je moguće ostvariti i jedna koju nije moguće ostvariti bez premašivanja dozvoljene naponske razine. U tablici 3.3. su dani rezultati proračuna radne točke u motorskom režimu koju je moguće ostvariti s raspoloživim naponom. U tablici 3.4. su dani rezultati proračuna radne točke u generatorskom režimu koju je moguće ostvariti s raspoloživim naponom. Iz tablica 3.3. i 3.4. je vidljivo da je uspješno je zadovoljen korisnički zahtjev za momentom. U tablici 3.5. su dani rezultati proračuna radne točke u motorskom režimu koju je nemoguće ostvariti bez premašivanja maksimalne dozvoljene naponske razine. U tablici 3.6. su dani rezultati proračuna radne točke u generatorskom režimu koju je nemoguće ostvariti bez premašivanja maksimalne dozvoljene naponske razine. Iz tablica 3.5. i 3.6. je vidljivo da traženi moment nije ostvaren, već je ostvaren najveći moment koji je moguće postići bez probijanja naponskog ograničenja. Omjer trajanja je definiran kao količnik vremena proteklog za proračun s proširenim modelom i proračun sa standardnim modelom.

Tablica 3.3. Traženo 100 Nm pri 3000 min⁻¹, ostvarivi moment pri zadanoj brzini

Parametar	Standardni model	Prošireni model
Brzina motora, min ⁻¹	3000	3000
Moment na vratilu, Nm	100,0	100,0
Snaga na vratilu, kW	31,42	31,42
Korisnost, %	94,18	94,30
Vršna fazna statorska struja, A	179,0	185,5
Kut vektora struje (γ), °	-5,5	-8,3
Uzbudna struja (I_f), A	14,0	12,9
Vršni fazni napon, V	148,4	149,9
Ulančeni tok u d osi (Ψ_d), mVs	101,1	101,4
Ulančeni tok u q osi (Ψ_q), mVs	58,0	59,8
Ukupni gubitci, W	1943	1900
Gubitci u bakru statora, W	652	700
Gubitci u bakru rotora, W	643	544
Gubitci u željezu, W	648	656
Elektromagnetska snaga, kW	32,06	32,07
Elektromagnetski moment, Nm	102,1	102,1
Električna snaga, kW	33,36	33,32
Trajanje proračuna, s	0,08	0,08
Omjer trajanja	1	

Tablica 3.4. Traženo -100 Nm pri 3000 min⁻¹, ostvarivi moment pri zadanoj brzini

Parametar	Standardni model	Prošireni model
Brzina motora, min ⁻¹	3000	3000
Moment na vratilu, Nm	-100,0	-100,0
Snaga na vratilu, kW	-31,42	-31,42
Korisnost, %	94,11	94,23
Vršna fazna statorska struja, A	174,7	180,3
Kut vektora struje (γ), °	-173,1	-170,7
Uzbudna struja (I_f), A	13,4	12,4
Vršni fazni napon, V	143,8	145,0
Ulančeni tok u d osi (Ψ_d), mVs	101,0	101,3
Ulančeni tok u q osi (Ψ_q), mVs	-56,9	-58,4
Ukupni gubitci, W	1851	1812
Gubitci u bakru statora, W	621	661
Gubitci u bakru rotora, W	592	506
Gubitci u željezu, W	638	645
Elektromagnetska snaga, kW	-30,78	-30,77
Elektromagnetski moment, Nm	-98,0	-98,0
Električna snaga, kW	-29,57	-29,60
Trajanje proračuna, s	0,09	0,12
Omjer trajanja	1,3	

Tablica 3.5. Traženo 100 Nm pri 10000 min⁻¹, neostvarivi moment pri zadanoj brzini

Parametar	Standardni model	Prošireni model
Brzina motora, min ⁻¹	10000	10000
Moment na vratilu, Nm	57,3	56,5
Snaga na vratilu, kW	60,03	59,12
Korisnost, %	94,27	94,73
Vršna fazna statorska struja, A	181,0	178,9
Kut vektora struje (γ), °	44,6	43,8
Uzbudna struja (I_f), A	16,0	16,0
Vršni fazni napon, V	248,3	248,3
Ulančeni tok u d osi (Ψ_d), mVs	23,8	23,4
Ulančeni tok u q osi (Ψ_q), mVs	53,7	53,9
Ukupni gubitci, W	3647	3288
Gubitci u bakru statora, W	667	651
Gubitci u bakru rotora, W	839	839
Gubitci u željezu, W	2141	1799
Elektromagnetska snaga, kW	62,17	60,91
Elektromagnetski moment, Nm	59,4	58,2
Električna snaga, kW	63,67	62,41
Trajanje proračuna, s	0,44	0,44
Omjer trajanja	1	

Tablica 3.6. Traženo -100 Nm pri 10000 min⁻¹, neostvarivi moment pri zadanoj brzini

Parametar	Standardni model	Prošireni model
Brzina motora, min ⁻¹	10000	10000
Moment na vratilu, Nm	-62,7	-61,1
Snaga na vratilu, kW	-65,63	-63,96
Korisnost, %	94,30	94,75
Vršna fazna statorska struja, A	183,9	181,2
Kut vektora struje (γ), °	136,1	137,0
Uzbudna struja (I_f), A	16,0	16,0
Vršni fazni napon, V	248,3	248,3
Ulančeni tok u d osi (Ψ_d), mVs	23,0	23,2
Ulančeni tok u q osi (Ψ_q), mVs	-55,2	-55,1
Ukupni gubitci, W	3740	3354
Gubitci u bakru statora, W	688	668
Gubitci u bakru rotora, W	839	839
Gubitci u željezu, W	2213	1848
Elektromagnetska snaga, kW	-63,42	-62,11
Elektromagnetski moment, Nm	-60,6	-59,3
Električna snaga, kW	-61,89	-60,61
Trajanje proračuna, s	0,45	0,41
Omjer trajanja	0,9	

3.1.2. Način rada: Maximum Current

Kao i za prethodni način rada prikazani su rezultati analize četiri radne točke, dvije od kojih su motorske i dvije koje su generatorske, za svaki režim odabrana je jedna točka koju je moguće ostvariti i jedna koju nije moguće ostvariti bez premašivanja dozvoljene naponske razine. U tablici 3.7. su dani rezultati proračuna radne točke u motorskom režimu koju je moguće ostvariti s raspoloživim naponom. U tablici 3.8. su dani rezultati proračuna radne točke u generatorskom režimu koju je moguće ostvariti s raspoloživim naponom. Iz tablica 3.7. i 3.8. je vidljivo da je uspješno je zadovoljen korisnički zahtjev za strujom. U tablici 3.9. su dani rezultati proračuna radne točke u motorskom režimu koju je nemoguće ostvariti bez premašivanja maksimalnog dozvoljenog napona. U tablici 3.10. su dani rezultati proračuna radne točke u generatorskom režimu koju je nemoguće ostvariti bez premašivanja maksimalnog dozvoljenog napona. Iz tablica 3.9. i 3.10. je vidljivo da tražena struja nije ostvarena, već je ostvarena najveća struja koju je moguće postići bez probijanja naponskog ograničenja.

Tablica 3.7. Traženo $I_s = 565$ A i $I_f = 16$ A Nm pri 3000 min^{-1} , motorski režim

Parametar	Standardni model	Prošireni model
Brzina motora, min^{-1}	3000	3000
Moment na vratilu, Nm	233,1	231,7
Snaga na vratilu, kW	73,22	72,78
Korisnost, %	89,50	89,43
Vršna fazna statorska struja, A	565,0	565,0
Kut vektora struje (γ), °	-23,9	-23,4
Uzbudna struja (I_f), A	16,0	16,0
Vršni fazni napon, V	215,9	215,9
Ulančeni tok u d osi (Ψ_d), mVs	126,3	125,0
Ulančeni tok u q osi (Ψ_q), mVs	112,6	114,1
Ukupni gubitci, W	8588	8601
Gubitci u bakru statora, W	6493	6493
Gubitci u bakru rotora, W	839	839
Gubitci u željezu, W	1256	1269
Elektromagnetska snaga, kW	74,47	74,05
Elektromagnetski moment, Nm	237,1	235,7
Električna snaga, kW	81,81	81,39
Trajanje proračuna, s	0,11	0,10
Omjer trajanja	0,9	

Tablica 3.8. Traženo $\hat{I}_s = 565$ A i $I_f = 16$ A Nm pri 3000 min^{-1} , generatorski režim

Parametar	Standardni model	Prošireni model
Brzina motora, min^{-1}	3000	3000
Moment na vratilu, Nm	-241,1	-239,8
Snaga na vratilu, kW	-75,73	-75,32
Korisnost, %	88,66	88,58
Vršna fazna statorska struja, A	565,0	565,0
Kut vektora struje (γ), °	203,9	203,3
Uzbudna struja (I_f), A	16,0	16,0
Vršni fazni napon, V	209,6	209,5
Ulančeni tok u d osi (Ψ_d), mVs	126,3	124,8
Ulančeni tok u q osi (Ψ_q), mVs	-112,7	-114,2
Ukupni gubitci, W	8588	8602
Gubitci u bakru statora, W	6493	6493
Gubitci u bakru rotora, W	839	839
Gubitci u željezu, W	1256	1270
Elektromagnetska snaga, kW	-74,47	-74,05
Elektromagnetski moment, Nm	-237,1	-235,7
Električna snaga, kW	-67,14	-66,72
Trajanje proračuna, s	0,12	0,10
Omjer trajanja	0,8	

Tablica 3.9. Traženo $\hat{I}_s = 565$ A i $I_f = 16$ A Nm pri 10000 min^{-1} , motorski režim

Parametar	Standardni model	Prošireni model
Brzina motora, min^{-1}	10000	10000
Moment na vratilu, Nm	57,3	56,5
Snaga na vratilu, kW	60,03	59,12
Korisnost, %	94,27	94,73
Vršna fazna statorska struja, A	181,0	178,9
\hat{I}_{sl} , A	181,0	178,9
Kut vektora struje (γ), °	44,6	43,8
Uzbudna struja (I_f), A	16,0	16,0
Vršni fazni napon, V	248,2	248,2
Ulančeni tok u d osi (Ψ_d), mVs	23,8	23,4
Ulančeni tok u q osi (Ψ_q), mVs	53,7	53,9
Ukupni gubitci, W	3647	3289
Gubitci u bakru statora, W	667	651
Gubitci u bakru rotora, W	839	839
Gubitci u željezu, W	2141	1799
Elektromagnetska snaga, kW	62,17	60,92
Elektromagnetski moment, Nm	59,4	58,2
Električna snaga, kW	63,67	62,41
Trajanje proračuna, s	0,12	0,11
Omjer trajanja	0,9	

Tablica 3.10. Traženo $\hat{I}_s = 565$ A i $I_f = 16$ A Nm pri 10000 min^{-1} , generatorski režim

Parametar	Standardni model	Prošireni model
Brzina motora, min^{-1}	10000	10000
Moment na vratilu, Nm	-62,7	-61,1
Snaga na vratilu, kW	-65,63	-63,96
Korisnost, %	94,30	94,75
Vršna fazna statorska struja, A	183,9	181,2
Kut vektora struje (γ), °	136,1	137,0
Uzbudna struja (I_f), A	16,0	16,0
Vršni fazni napon, V	248,2	248,2
Ulančeni tok u d osi (Ψ_d), mVs	23,0	23,2
Ulančeni tok u q osi (Ψ_q), mVs	-55,2	-55,1
Ukupni gubitci, W	3740	3355
Gubitci u bakru statora, W	688	668
Gubitci u bakru rotora, W	839	839
Gubitci u željezu, W	2213	1848
Elektromagnetska snaga, kW	-63,42	-62,11
Elektromagnetski moment, Nm	-60,6	-59,3
Električna snaga, kW	-61,89	-60,61
Trajanje proračuna, s	0,12	0,12
Omjer trajanja	1	

3.1.3. Način rada: Current/Phase Advance

U ovom načinu rada nema optimizacije nego se za zadanu struju računaju određene veličine. Primjer motorske radne točke je dan u tablici 3.11., a primjer generatorske radne točke u tablici 3.12.

Tablica 3.11. Traženo $\hat{I}_s = 141,3$ A, $\gamma = 30^\circ$ i $I_f = 8$ A pri 1000 min^{-1}

Parametar	Standardni model	Prošireni model
Brzina motora, min^{-1}	1000	1000
Moment na vratilu, Nm	28,8	28,9
Snaga na vratilu, kW	3,02	3,02
Korisnost, %	81,06	81,05
Vršna fazna statorska struja, A	141,3	141,3
Kut vektora struje (γ), °	30,0	30,0
Uzbudna struja (I_f), A	8,0	8,0
Vršni fazni napon, V	26,2	26,3
Ulančeni tok u d osi (Ψ_d), mVs	6,1	6,1
Ulančeni tok u q osi (Ψ_q), mVs	59,5	59,6
Ukupni gubitci, W	706	706
Gubitci u bakru statora, W	406	406
Gubitci u bakru rotora, W	210	210
Gubitci u željezu, W	90	90
Elektromagnetska snaga, kW	3,11	3,11
Elektromagnetski moment, Nm	29,7	29,7
Električna snaga, kW	3,73	3,73
Trajanje proračuna, s	0,05	0,04
Omjer trajanja	0,8	

Tablica 3.12. Traženo $\hat{I}_s = 141,3$ A, $\gamma = 150^\circ$ i $I_f = 8$ A pri 1000 min^{-1}

Parametar	Standardni model	Prošireni model
Brzina motora, min^{-1}	1000	1000
Moment na vratilu, Nm	-30,6	-30,6
Snaga na vratilu, kW	-3,20	-3,20
Korisnost, %	77,94	77,94
Vršna fazna statorska struja, A	141,3	141,3
Kut vektora struje (γ), $^\circ$	150,0	150,0
Uzbudna struja (I_f), A	8,0	8,0
Vršni fazni napon, V	24,0	24,0
Ulančeni tok u d osi (Ψ_d), mVs	6,1	6,1
Ulančeni tok u q osi (Ψ_q), mVs	-59,5	-59,6
Ukupni gubitci, W	706	706
Gubitci u bakru statora, W	406	406
Gubitci u bakru rotora, W	210	210
Gubitci u željezu, W	90	90
Elektromagnetska snaga, kW	-3,11	-3,11
Elektromagnetski moment, Nm	-29,7	-29,7
Električna snaga, kW	-2,49	-2,49
Trajanje proračuna, s	0,05	0,05
Omjer trajanja	1	

3.2. Funkcija Electromagnetic

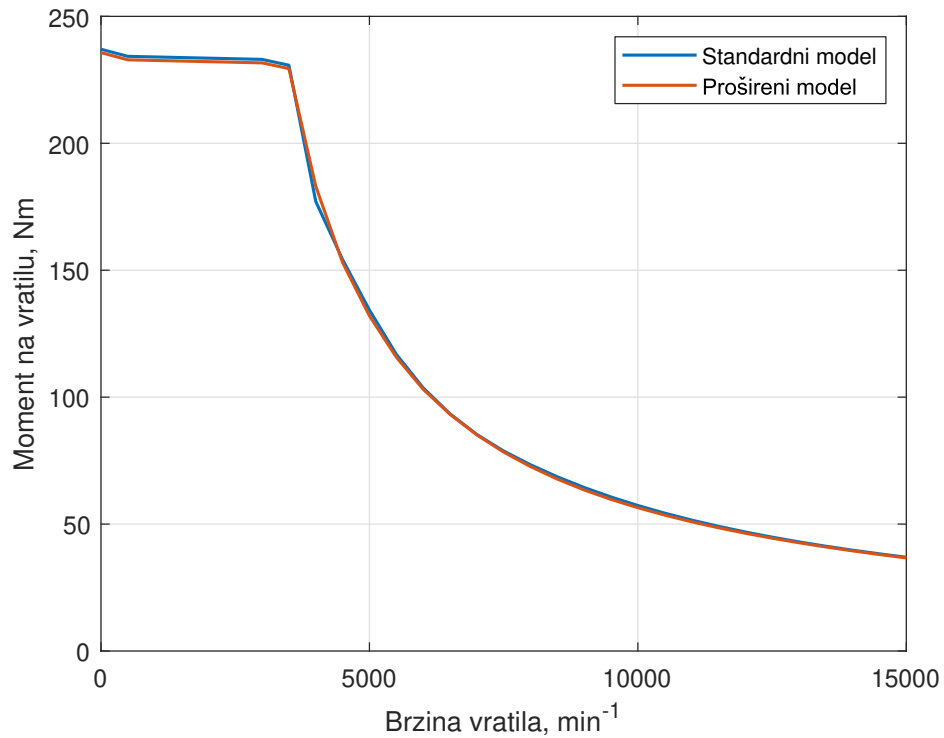
U ovom su potpoglavlju dani rezultati *Matlab* funkcije *Electromagnetic*.

3.2.1. Način rada: Maximum Torque/Speed Curve

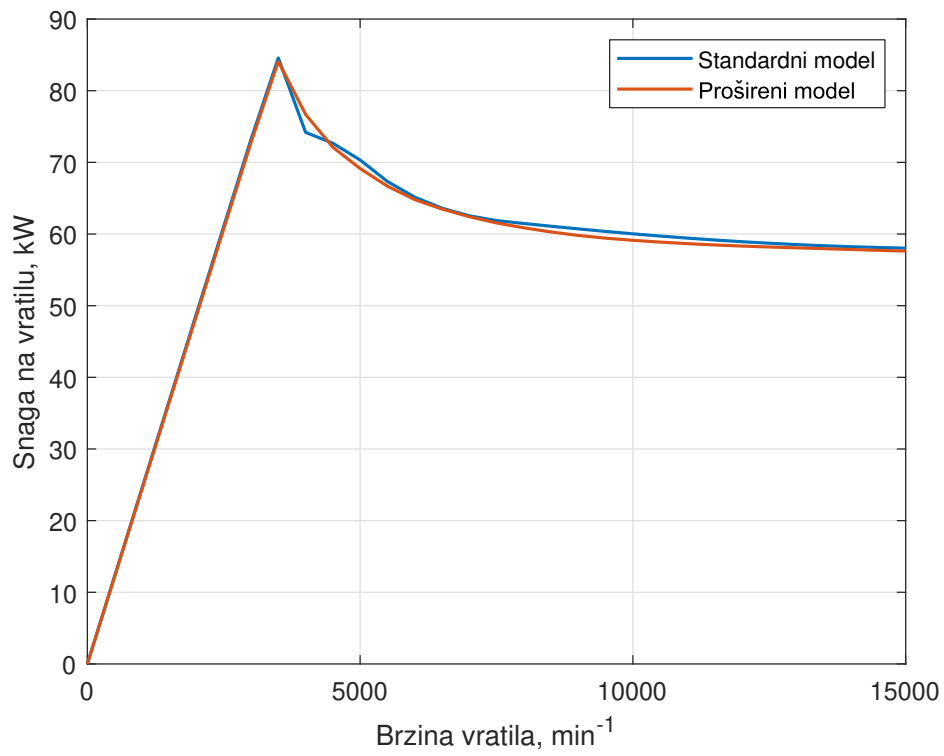
Postavke s kojima je pokrenuta funkcija *Electromagnetic* dane su u tablici 3.13. Prilikom proračuna envelope ciljna funkcija u optimizaciji je moment, a ne gubitci, zato je varijabla *controlStrategy* postavljena u 0 (nebitno je što je proslijeđeno jer se ne uzima u obzir). Ovdje je prikazano nekoliko grafova od interesa. Za motorski režim na slikama od 3.2. do 3.9., za generatorski režim na slikama od 3.11. do 3.18. i za objedinjeni motorski i generatorski režim na slikama od 3.19. do 3.26.

Tablica 3.13. Postavke proračuna - Maximum Torque/Speed Curve

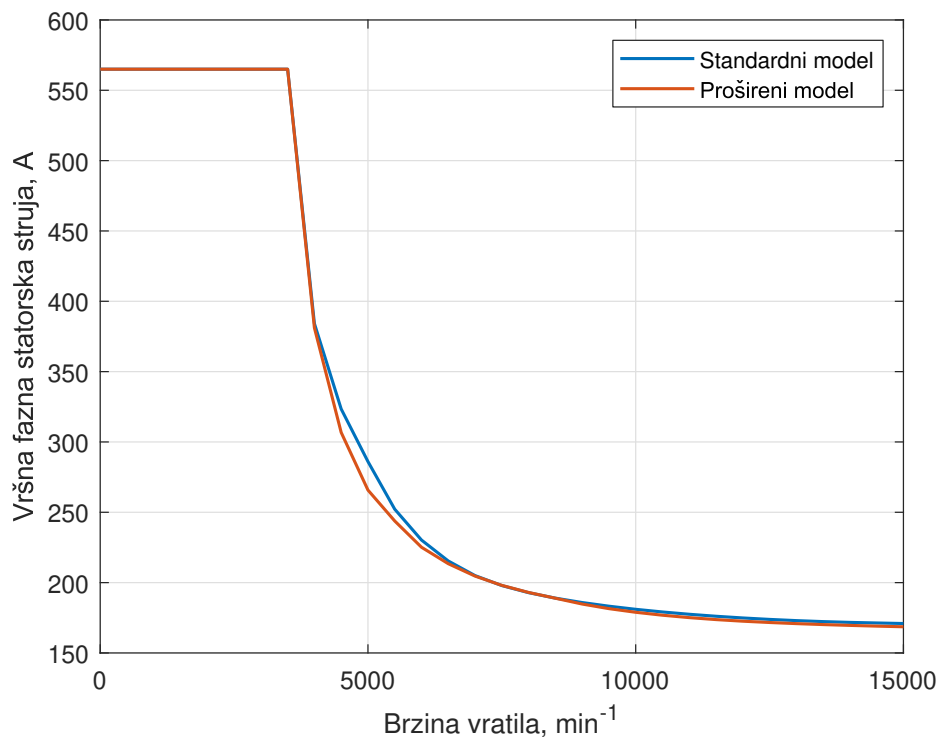
Varijabla	Vrijednost
functionMode	Maximum Torque/Speed Curve
controlStrategy	0
maxStatorCurrent	565 A
maxRotorCurrent	16 A
numIncrements	0
maxSpeed	15000 min ⁻¹
stepSpeed	500 min ⁻¹
minSpeed	0 min ⁻¹
effModeRefSelect	0
mcadEfMapResult	0



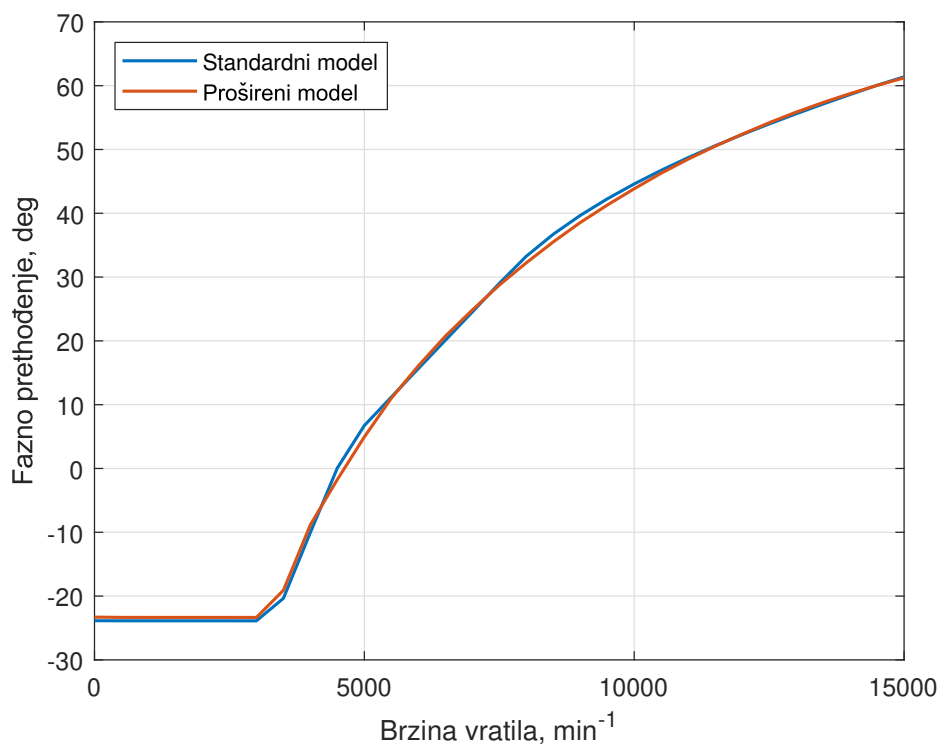
Slika 3.2. Moment na vratilu, motorski rad



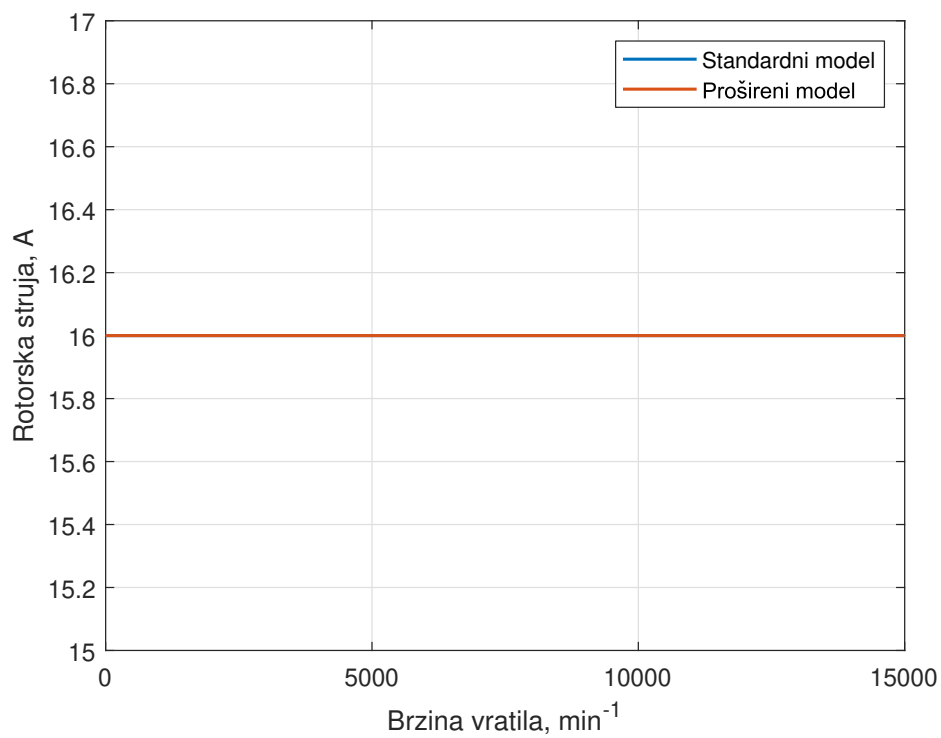
Slika 3.3. Snaga na vratilu, motorski rad



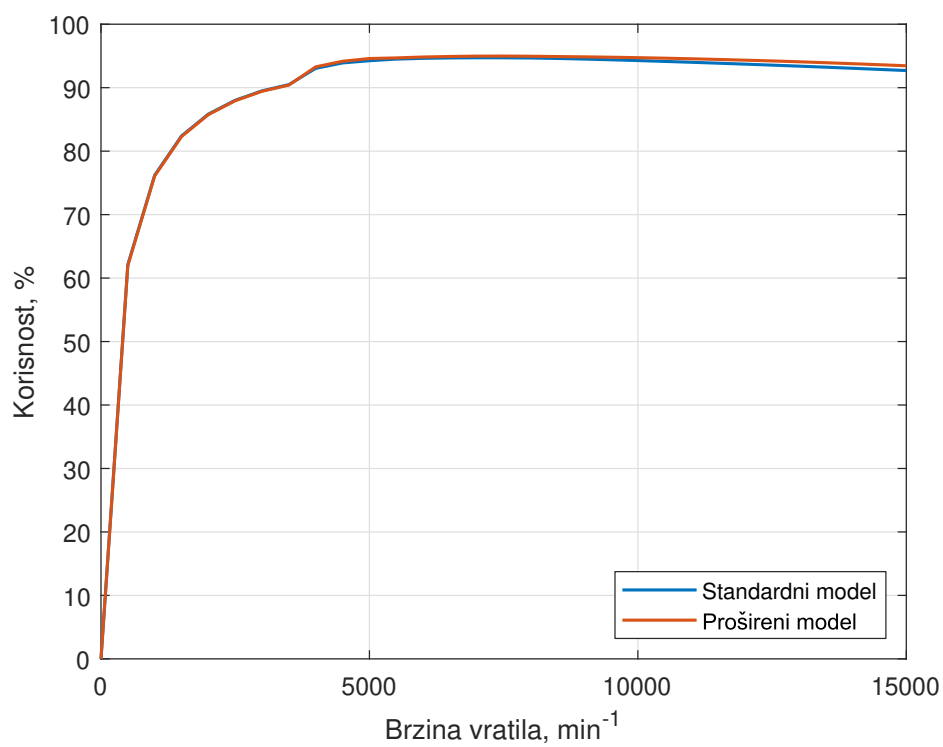
Slika 3.4. Vršna fazna statrorska struja, motorski rad



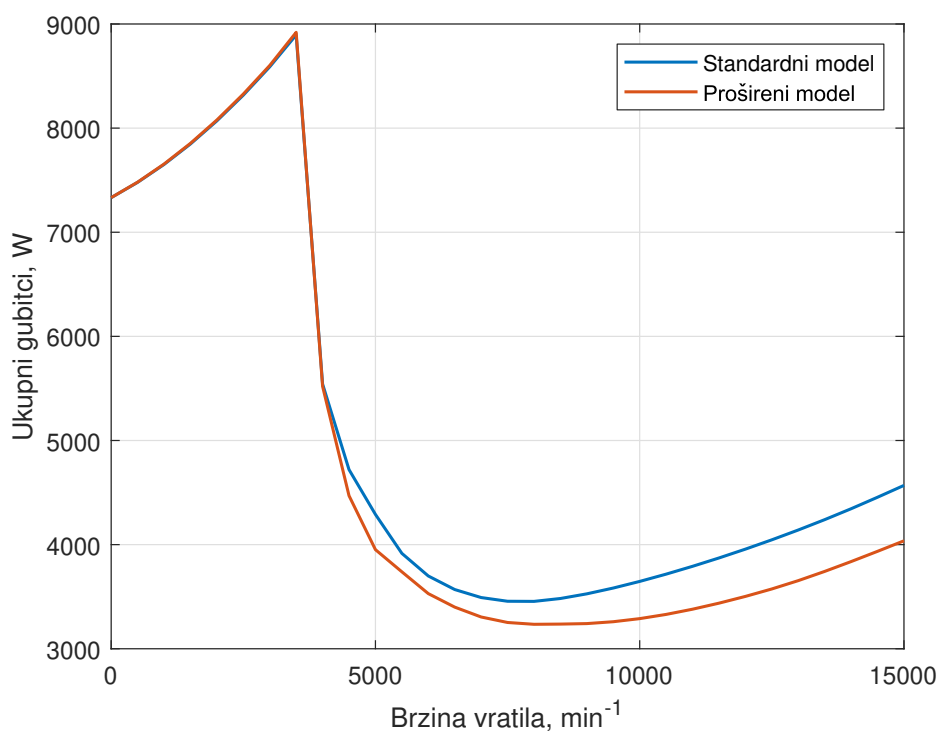
Slika 3.5. Kut vektora struje (γ), motorski rad



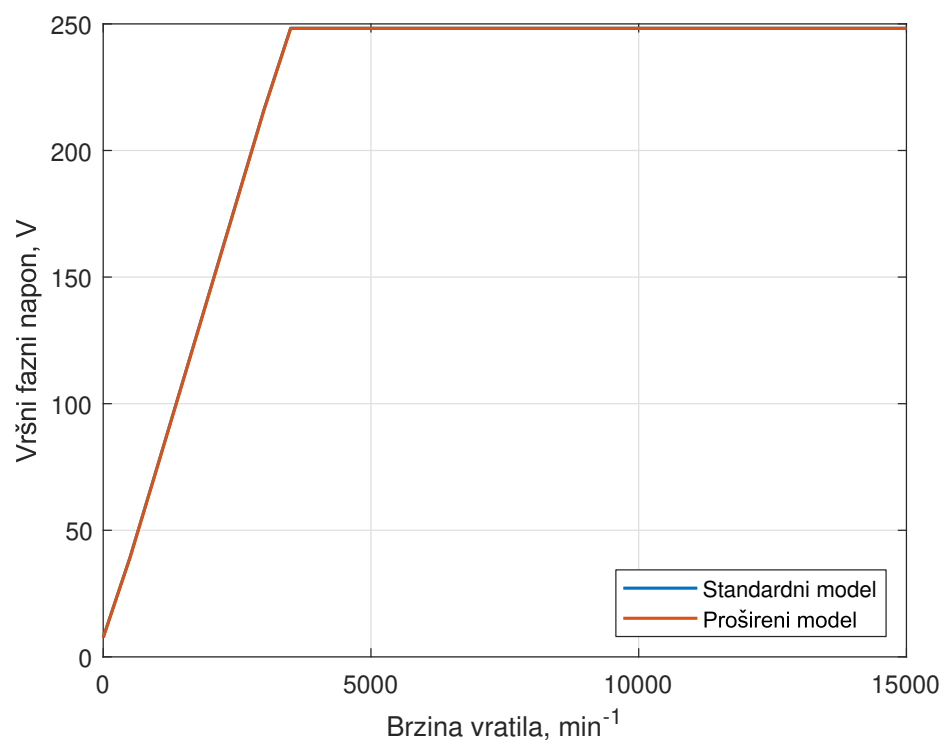
Slika 3.6. Rotorska struja, motorski rad



Slika 3.7. Korisnost, motorski rad



Slika 3.8. Ukupni gubitci, motorski rad



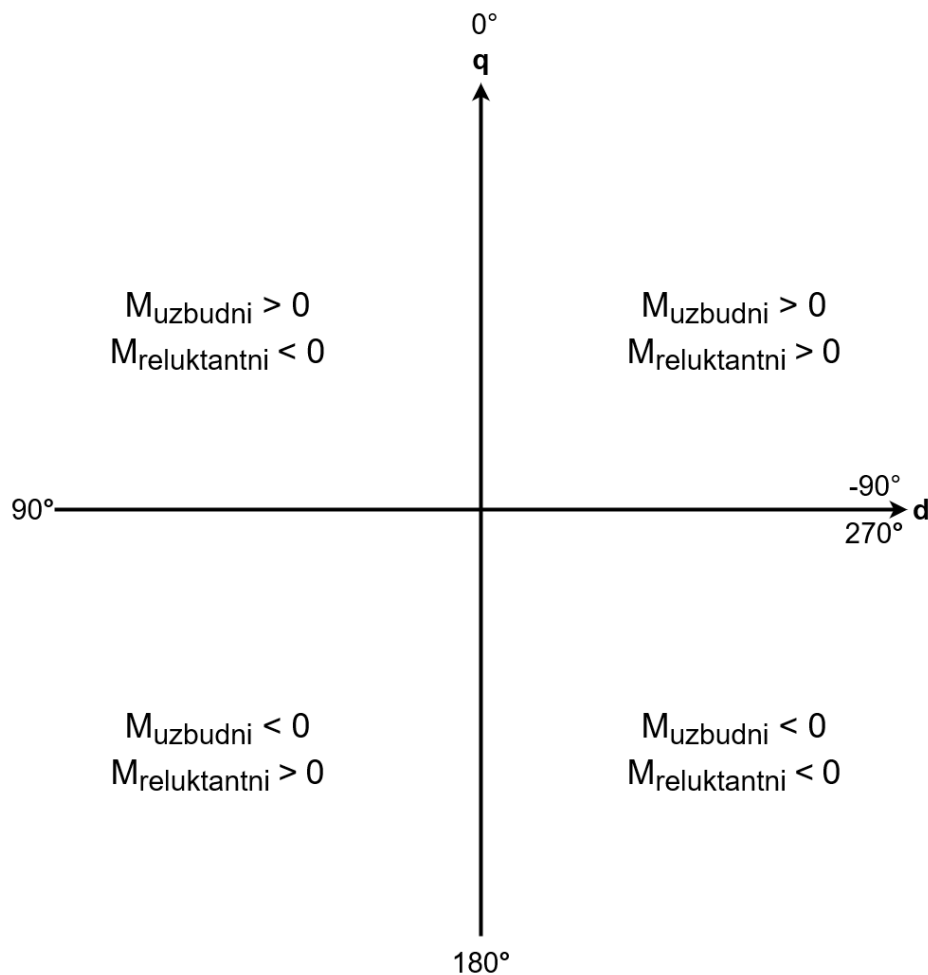
Slika 3.9. Napon, motorski rad

Ovaj stroj ostvaruje najveću korisnost u području iznad rubne brzine jer tada ukupni gubitci izrazito brzo padaju (zbog smanjenja statorske struje gubitci u bakru naglo padaju). Sve većim odmicanjem od tog područja korisnost počinje polako opadati jer su gubitci u bakru svedeni na mali iznos koji se više neće drastično mijenjati, a gubitci u željezu rastu zbog sve veće brzine stroja.

Do rubne brzine su gubitci u bakru konstantni, a gubitci u željezu rastu s porastom brzine. Pri rubnoj brzini stroj ostvaruje maksimalnu snagu i maksimalne ukupne gubitke. Prelaskom preko rubne brzine počinje se smanjivati iznos statorske struje pa ukupni gubitci počinju padati. Daljnjim porastom brzine vrtnje stroja brzina pada gubitaka u bakru postaje manja od brzine porasta gubitaka u željezu pa se ukupni gubitci u stroju počinju ponovno povećavati te nastavljaju rasti do maksimalne dozvoljene brzine vrtnje stroja.

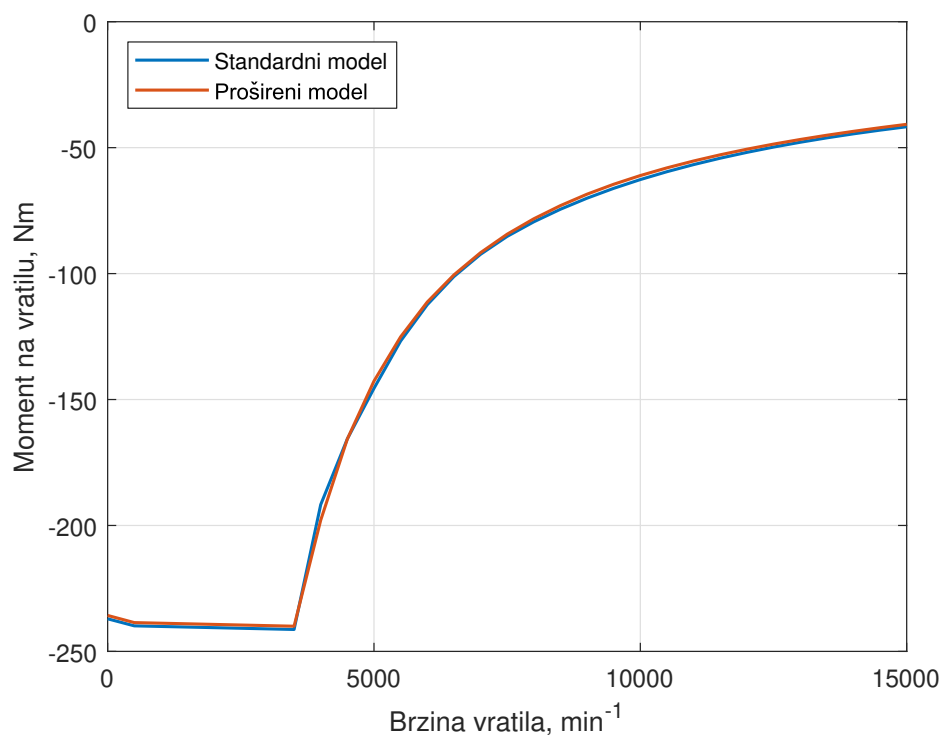
Vrlo je zanimljivo ponašanje rotorske struje i faznog pomaka. Na prvi je pogled neočekivano da rotorska struja ostaje konstantna po cijeloj envelope (inicijalno se njeno djelovanje čak i potpomaže djelovanjem I_d struje) i umjesto smanjivanja rotorske struje slabljenje polja se vrši protudjelovanjem statorske struje (kao kod sinkronog stroja s permanentnim magnetima). Međutim takvo ponašanje je zapravo ispravno kad se traži da stroj radi s maksimalnim momentom. Ovakav tip stroja ostvaruje moment temeljen na elektromagnetskoj uzbudi i moment temeljen na različitom magnetskom otporu u d i q osi (reluktantni moment). Na slici 3.10. su dani predznaci te dvije vrste momenta za različite vrijednosti kuta vektora struje. Kretanje po envelope se započinje u prvom kvadrantu gdje rotorska struja i I_d komponenta statorske struje stvaraju protjecanje u istom smjeru, fazni pomak je konstantan i ostaje takav dok se ne postigne maksimalni dozvoljeni napon (mod 1), obje vrste momenta su do tada pozitivne. Zbog praktičnosti dizajna ovog tipa stroja moment elektromagnetske uzbude je veći od reluktantnog momenta. Bilo bi izrazito nepraktično i ne naročito smisljeno dizajnirati stroj tako da reluktantni moment bude veći od uzbuđenog momenta (takav dizajn zahtjeva egzotičnu geometriju rotora i jako otežava postavljanje uzbuđenog rotorskog namota, tada se također i postavlja pitanje opravdanosti prisutnosti rotorskog namota jer on zahtjeva neki način prijenosa energije, na primjer preko kliznih kolutova i zasebni elektronički sklop za napajanje pa se time smanjuje ukupna pouzdanost, a istovremeno diže cijena i kompleksnost cijelog pogonskog sustava). Iz tog je razloga kad je potrebno ostvariti maksimalni moment u režimu

slabljenja polja bolje kut vektora struje postaviti tako da je reluktantni moment negativan (i napon unutar dozvoljenih granica) nego da se smanjuje uzbudni moment (ovo vrijedi ako je $L_f I_{f,max} \leq L_s I_{s,max}$ to jest kad je moguće djelovanjem statorskog protjecanja ostvariti $\Psi_d = 0$, inače se smanjuje i rotorska struja do ostvarenja prethodne nejednakosti, a potom se slabljenje polja nastavlja kako je navedeno u tekstu) smanjivanjem uzbudne struje (ovo vrijedi kad se zahtjeva maksimalni ostvarivi moment, pri manjim momentima se mijenja i iznos uzbudne struje, više o tome u potpoglavlju 4.2.2.). Mod 2 (konstantna statorska struja i promjenjiv kut vektora struje) se ne koristi kod ove vrste stroja, nego se odmah iz moda 1 prelazi u mod 3 u kojem se s porastom brzine smanjuje iznos statorske struje uz promjenu iznosa kuta vektora struje.

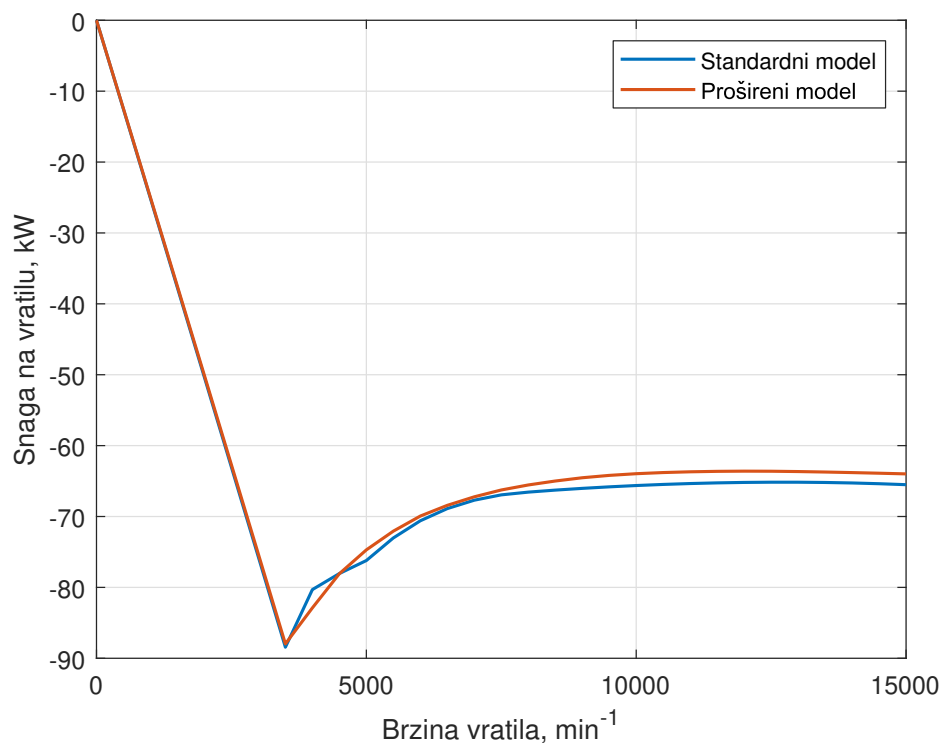


Slika 3.10. Predznaci momenta u različitim kvadrantima

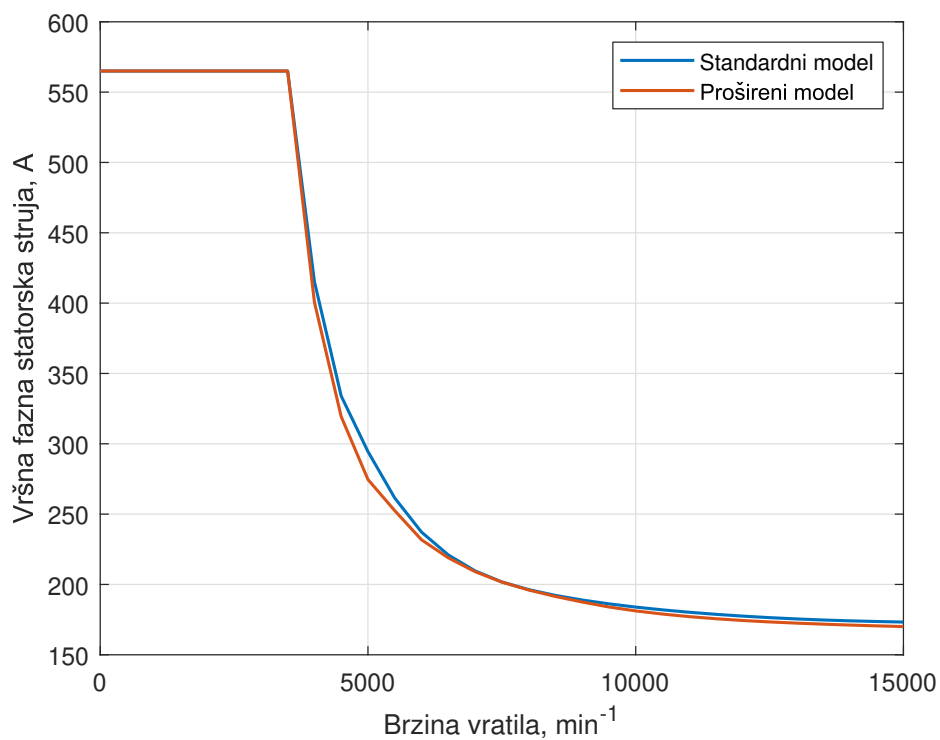
U generatorskom režimu je ponašanje faznog pomaka i rotorske struje identično kao i u motorskom režimu (naravno uz zrcaljenje faznog pomaka u četvrti i treći kvadrant).



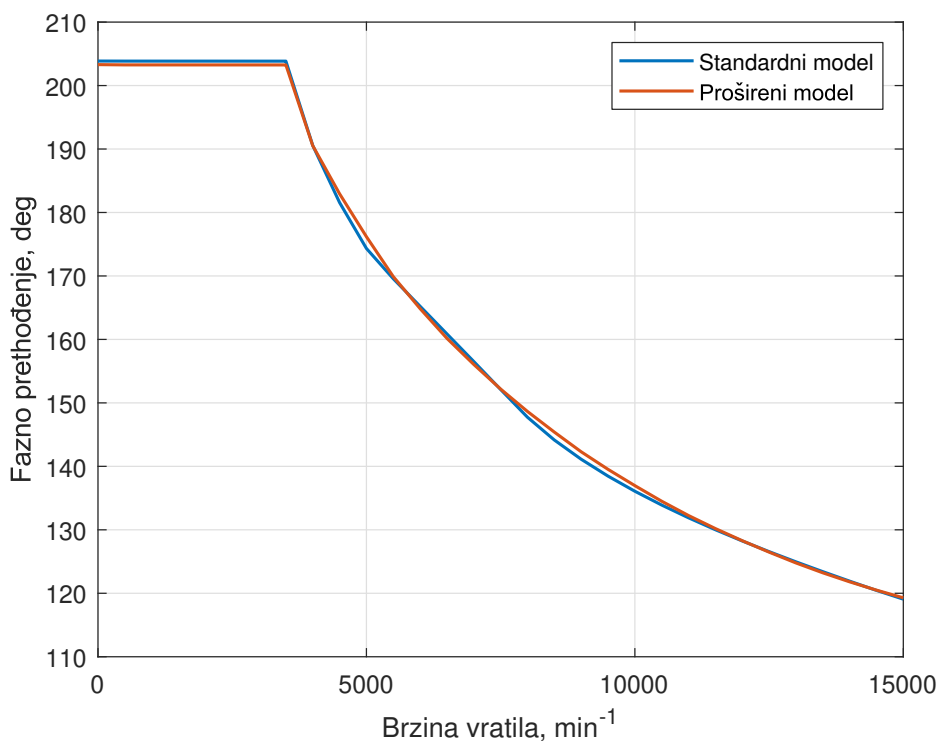
Slika 3.11. Moment na vratilu, generatorski rad



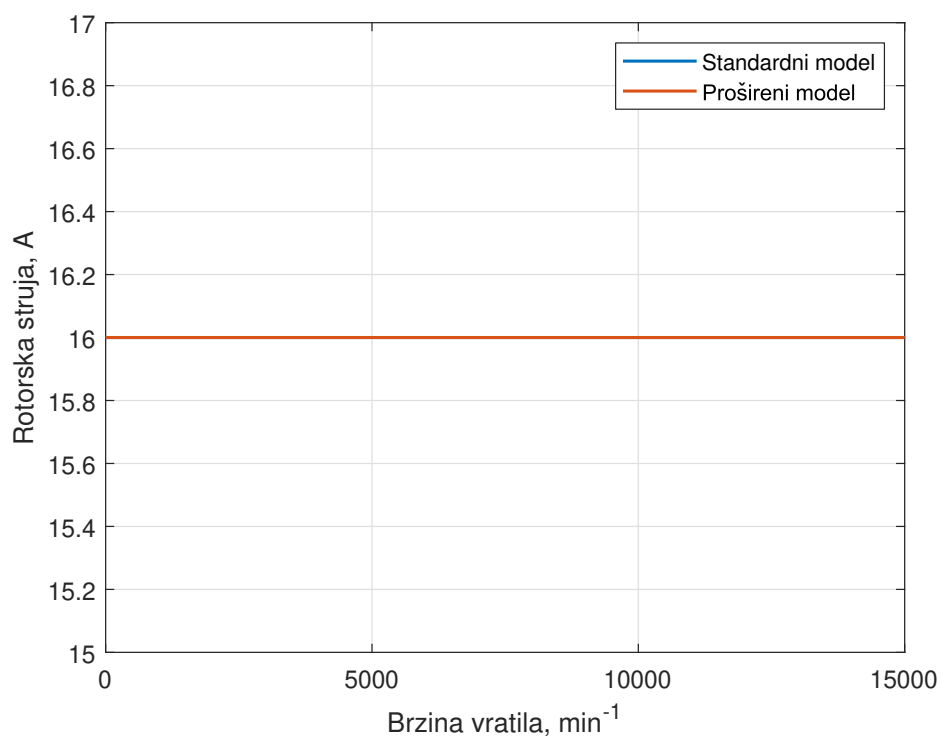
Slika 3.12. Snaga na vratilu, generatorski rad



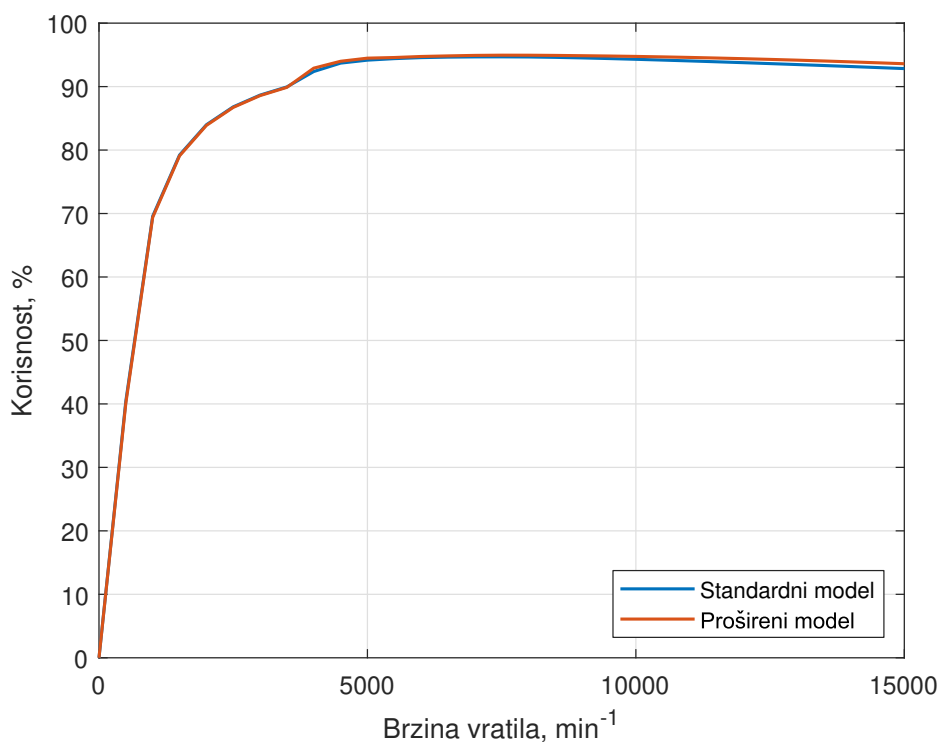
Slika 3.13. Vršna fazna statrorska struja, generatorski rad



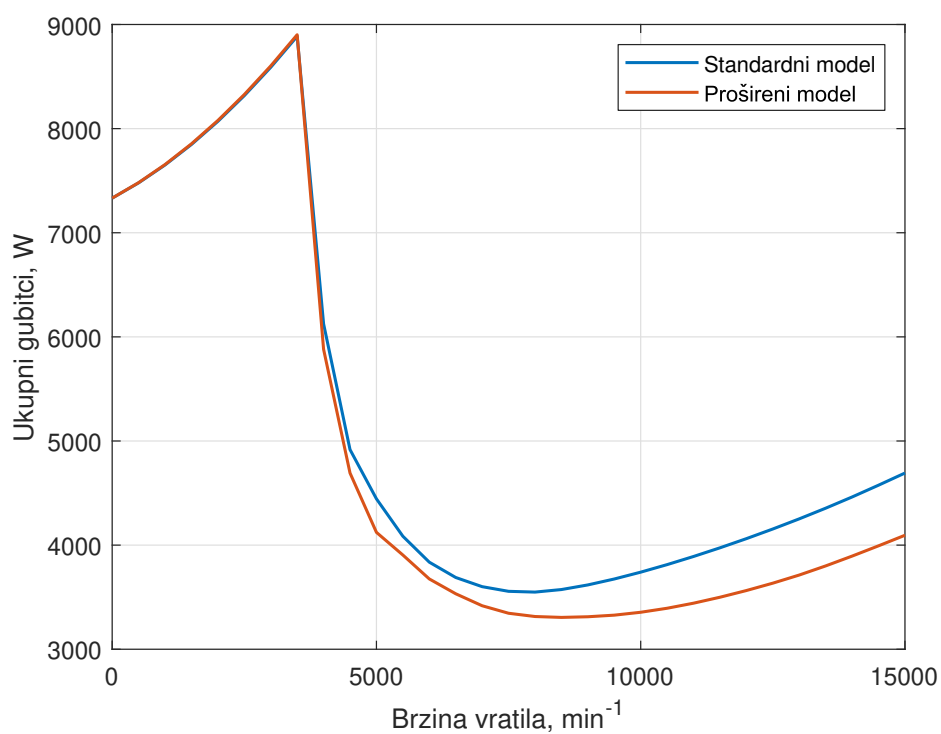
Slika 3.14. Kut vektora struje (γ), generatorski rad



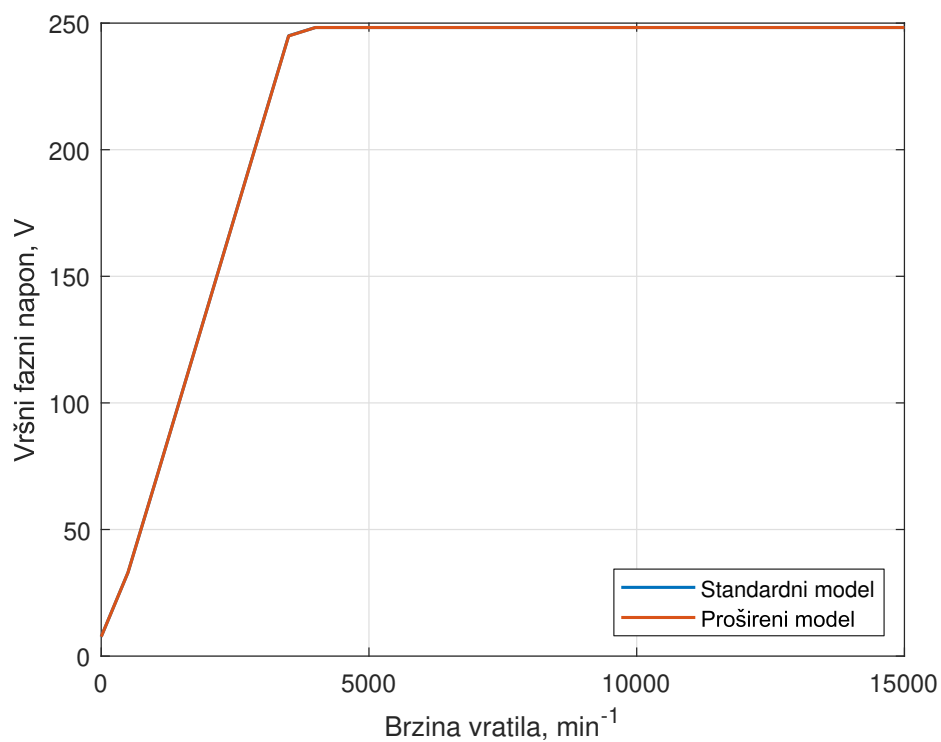
Slika 3.15. Rotorska struja, generatorski rad



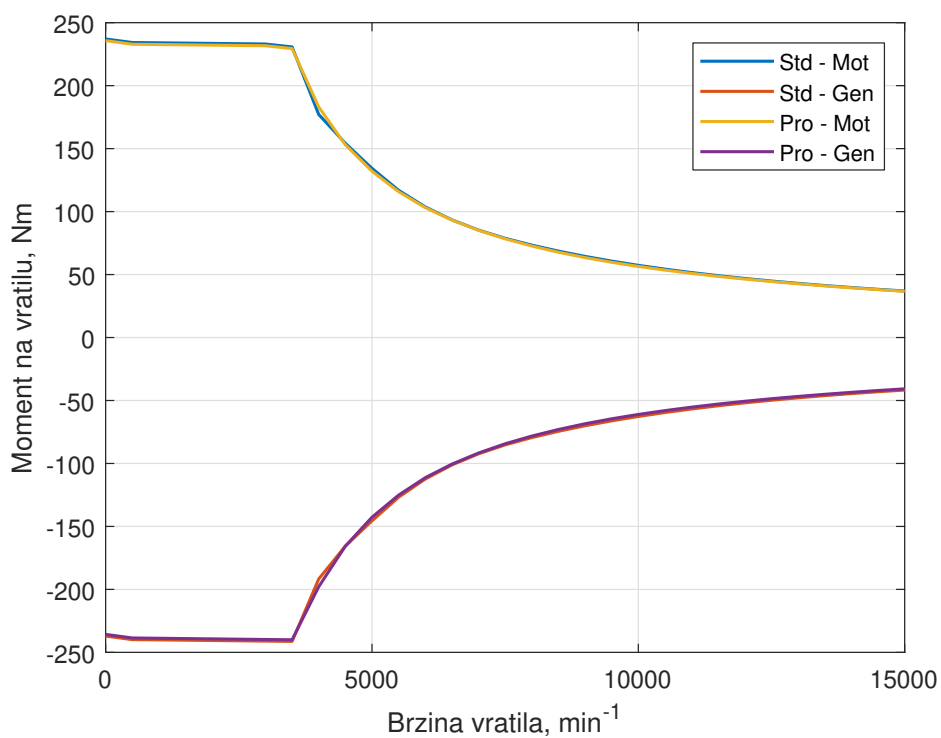
Slika 3.16. Korisnost, generatorski rad



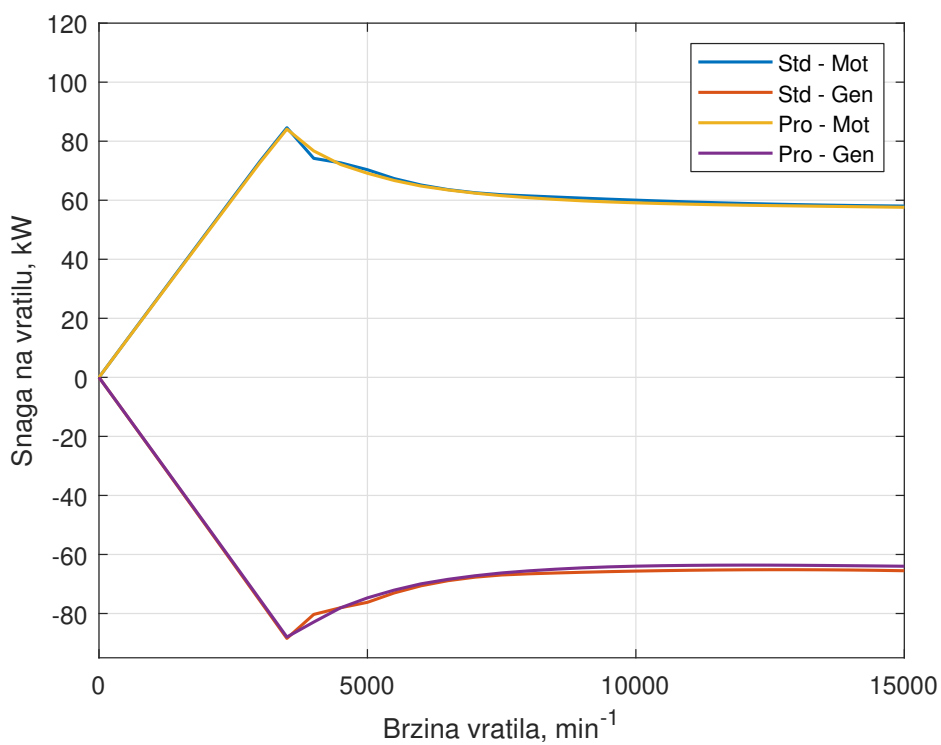
Slika 3.17. Ukupni gubitci, generatorski rad



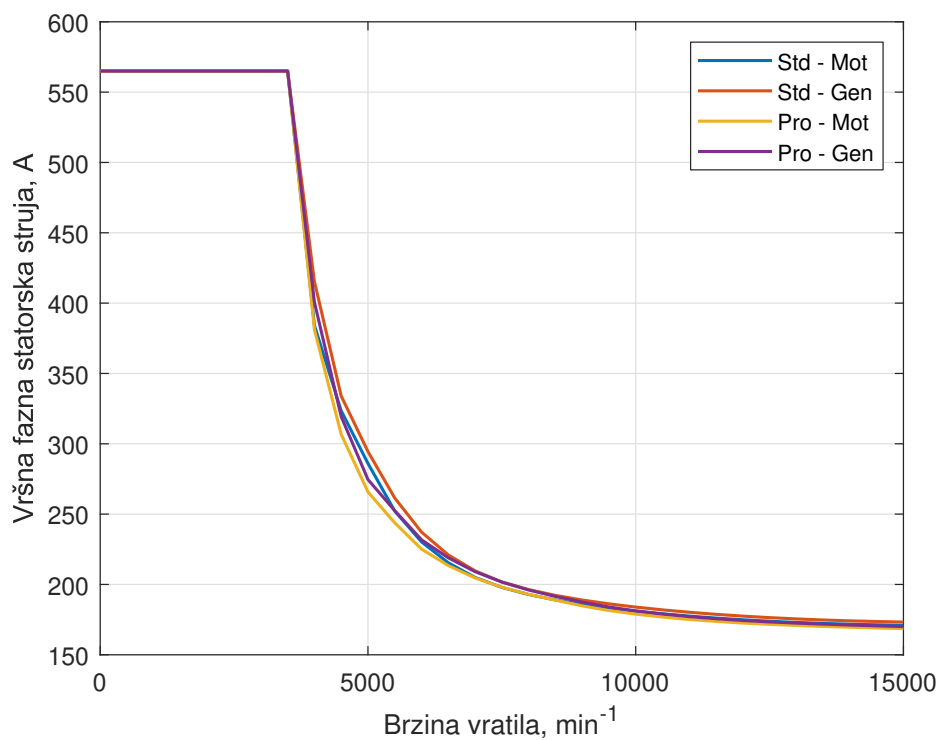
Slika 3.18. Napon, generatorski rad



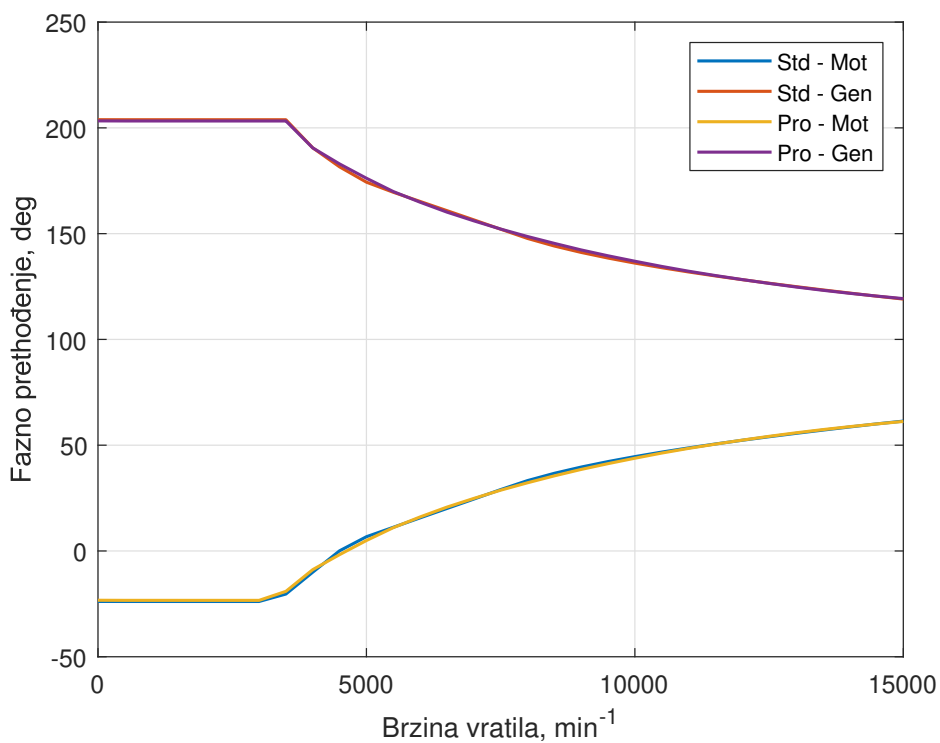
Slika 3.19. Moment na vratilu, objedinjeni motorski i generatorski rad



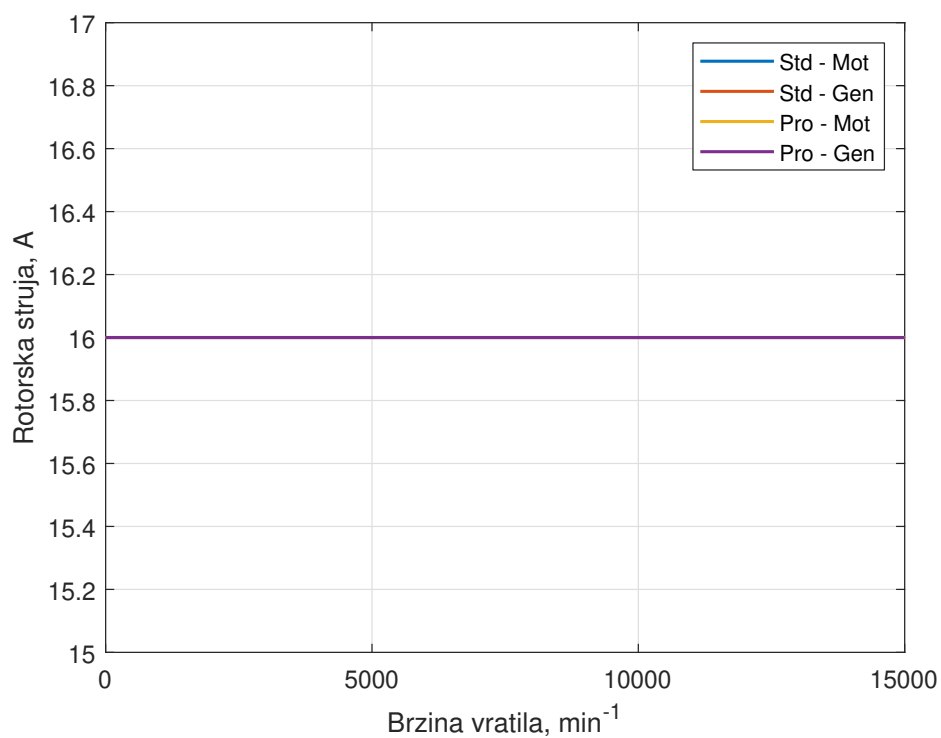
Slika 3.20. Snaga na vratilu, objedinjeni motorski i generatorski rad



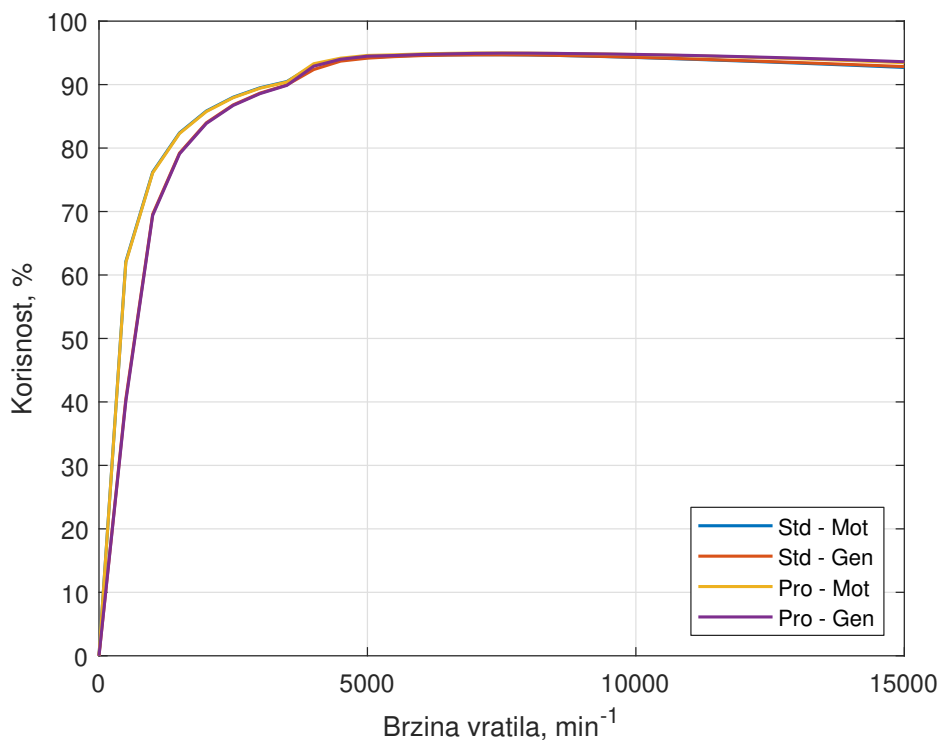
Slika 3.21. Vršna fazna statrorska struja, objedinjeni motorski i generatorski rad



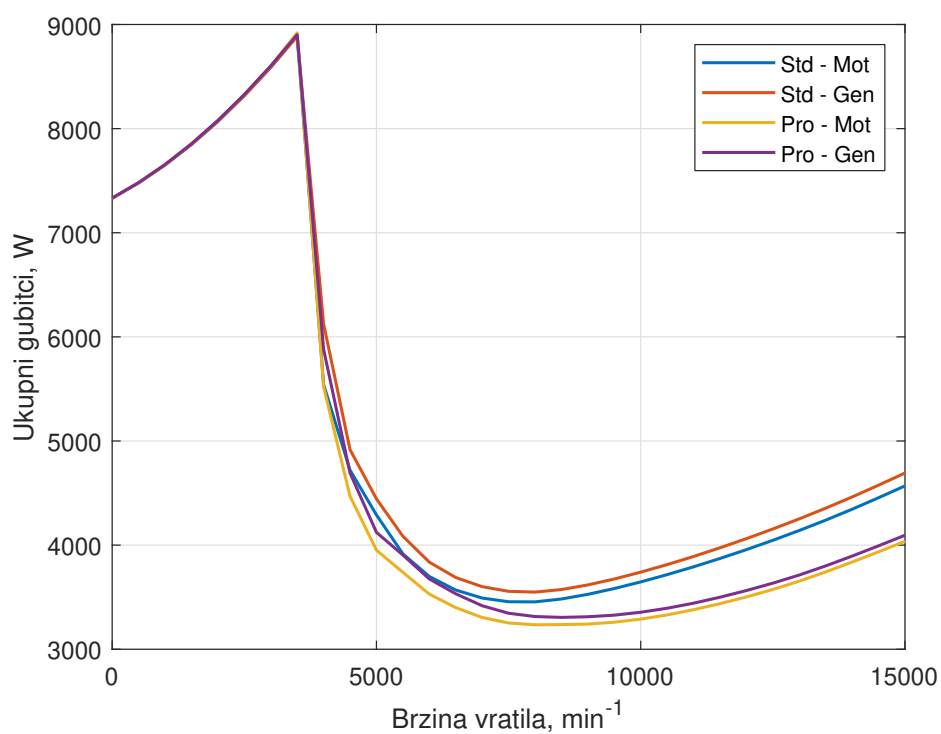
Slika 3.22. Kut vektora struje (γ), objedinjeni motorski i generatorski rad



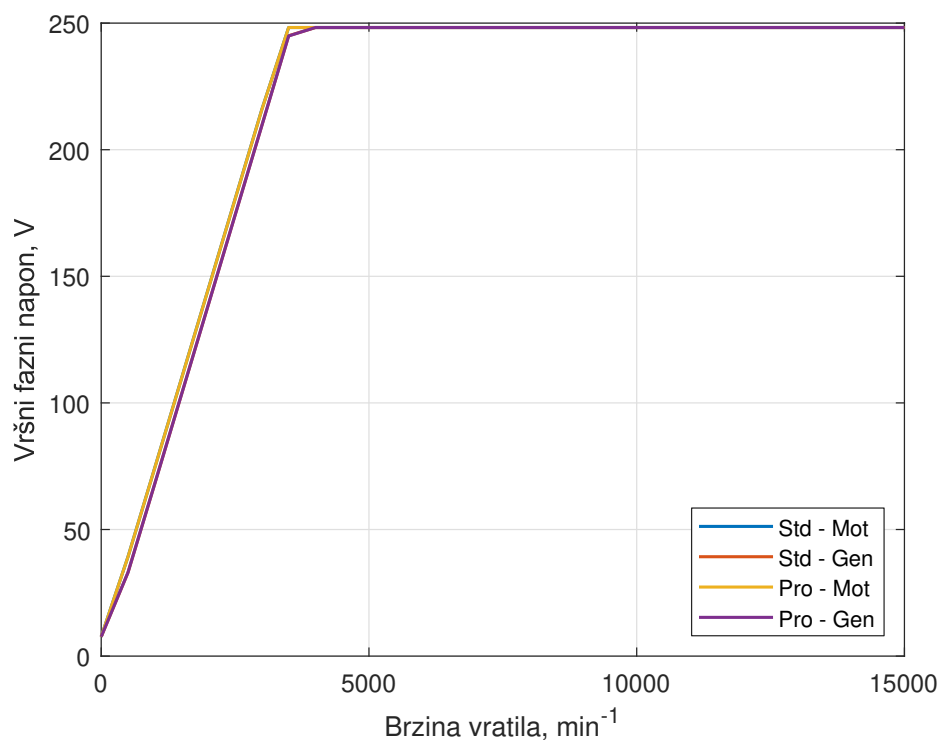
Slika 3.23. Rotorska struja, objedinjeni motorski i generatorski rad



Slika 3.24. Korisnost, objedinjeni motorski i generatorski rad



Slika 3.25. Ukupni gubitci, objedinjeni motorski i generatorski rad



Slika 3.26. Napon, objedinjeni motorski i generatorski rad

Tablica 3.14. Trajanje proračuna, *Maximum Torque/Speed Curve*

Režim rada	Standardni model	Prošireni model	Omjer trajanja
Motor	0,6 s	1,3 s	2,2
Generator	0,7 s	1,8 s	2,6
MotGen	0,9 s	2,0 s	2,2

Stroj ostvaruje nešto veće vršne gubitke kad radi kao generator u slabljenju polja u odnosu na motorski režim jer radi s većim iznosom statorske struje (smjer struje je takav da pad napona na otporu namota statora omogućuje rad s većom strujom unutar dozvoljene naponske granice).

Općeniti zaključak je da prošireni model za iste postavke simulacije daje glađe krivulje, a cijena koja se za to plaća je nešto dulje vrijeme izvođenja proračuna. Još je moguće primijetiti da postoji vidljiva razlika u ukupnim gubiticima između modela koja se povećava s porastom brzine vrtnje stroja (zbog različitih gubitaka u željezu, gubici u bakru su vrlo slični, prošireni model ima više točaka iz kojih se stvara krivulja gubitaka u željezu).

3.2.2. Način rada: Efficiency Map

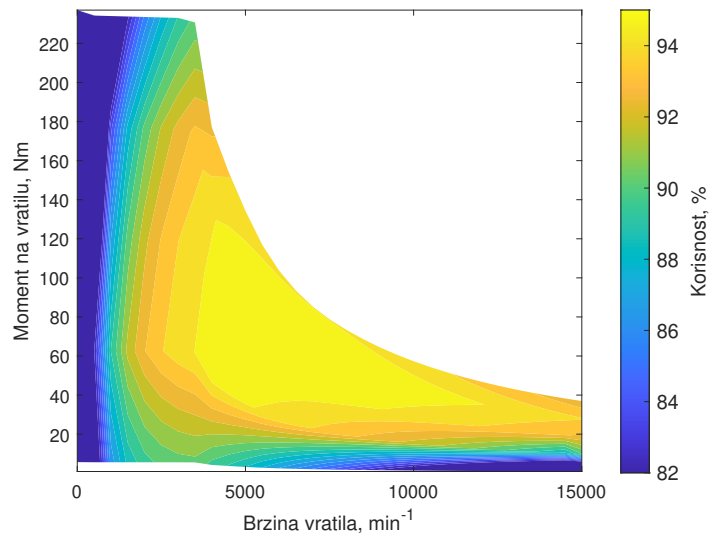
Postavke s kojima je pokrenuta funkcija *Electromagnetic* dane su u tablici 3.15. Ovdje je prikazano nekoliko grafova od interesa. Za motorski režim na slikama od 3.27. do 3.32., za generatorski režim na slikama od 3.33. do 3.38. i za objedinjeni motorski i generatorski režim na slikama od 3.39. do 3.44. Razlika je izračunata na način da se od vrijednosti dobivene za standardni model oduzme vrijednost dobivena za prošireni model (osim za proračun razlike faznog pomaka, zbog promjenjivosti predznaka ove veličine oduzima se apsolutna vrijednost svake komponente).

Ova vrsta stroja ostvaruje najveću korisnost na brzinama većim od rubne brzine pri širokom rasponu traženih momenata koji su značajno manji od maksimalnog momenta, ovaj režim vožnje je vrlo blizak na primjer vožnji konstantnom brzinom na autoputu. Upravo je taj režim rada nepovoljan za strojeve s permanentnim magnetima pa proizvođači ako vozilo ima instalirano više vrsta strojeva u ovom režimu često isključuju stroj s permanentnim magnetima. Sinkroni je stroj s uzбудnim namotom iz tog razloga bolji izbor za vozila koja većinu vremena prometuju autoputom od stroja s permanentnim magnetima.

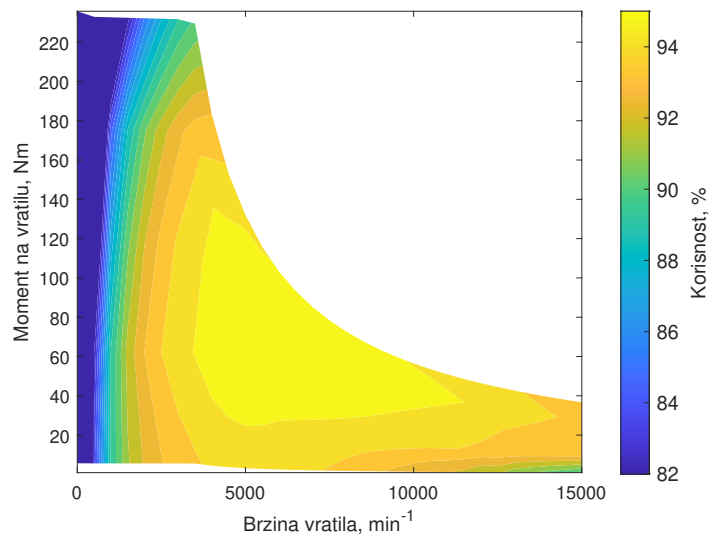
U režimu konstantnog momenta s porastom traženog momenta raste i iznos statorske struje. Maksimalni moment se postiže za maksimalni iznos statorske struje. Kad stroj radi s momentima manjim od maksimalnog postoji upravljanje rotorskom strujom (što nije bio slučaj kad se promatrala samo envelope momenta, što je i vidljivo na slici 3.6.), upravljanje nije linearno. Ako se promatra rad konstantnom brzinom povećanjem traženog momenta se povećava i iznos uzbudne struje do određenog trenutka kad se dostiže maksimalna vrijednost. Ako se promatra konstantan moment pri različitim brzinama, s porastom brzine raste i iznos uzbudne struje (pri nižim brzinama stroj može lako ostvariti traženi moment unutar dozvoljenog napona, gubitci su manji kad je iznos uzbudne struje manji, kako brzina raste taj moment predstavlja sve veći postotak maksimalnog ostvarivog momenta unutar dostupnog napona pa se nužno mora povećati iznos uzbudne struje)

Tablica 3.15. Postavke proračuna - Efficiency Map

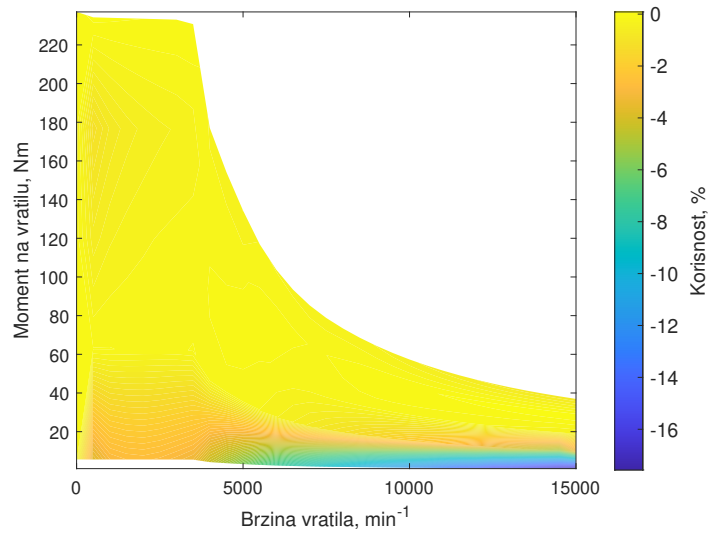
Varijabla	Vrijednost
functionMode	Efficiency Map
controlStrategy	MinTotalLoss
maxStatorCurrent	565 A
maxRotorCurrent	16 A
numIncrements	5
maxSpeed	15000 min ⁻¹
stepSpeed	500 min ⁻¹
minSpeed	0 min ⁻¹
effModeRefSelect	linear
mcadEfMapResult	0



(a) Standardni model

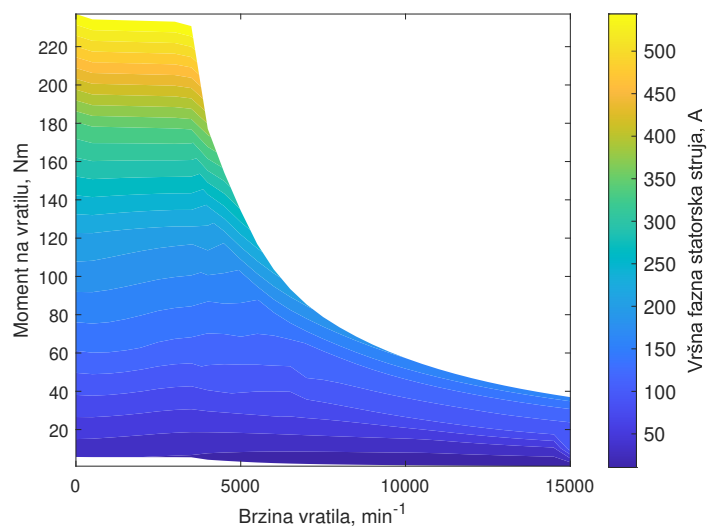


(b) Prošireni model

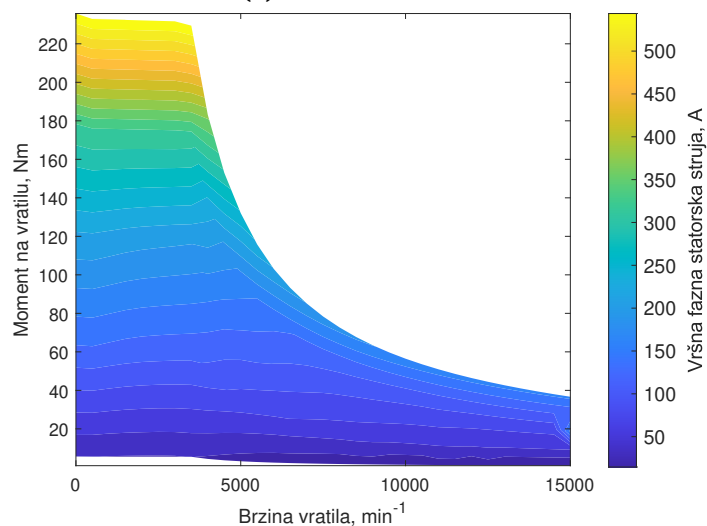


(c) Razlika

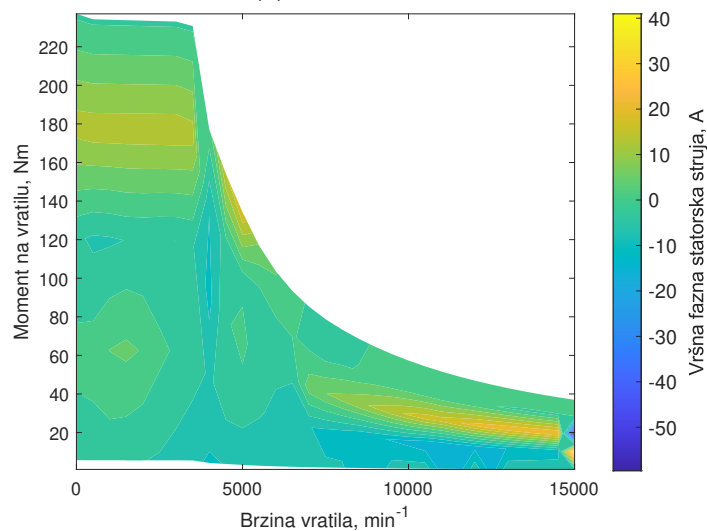
Slika 3.27. Korisnost, motorski režim



(a) Standardni model

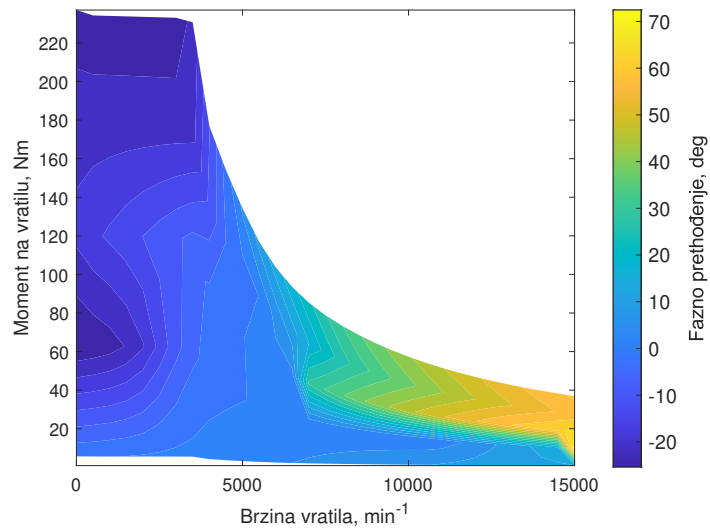


(b) Prošireni model

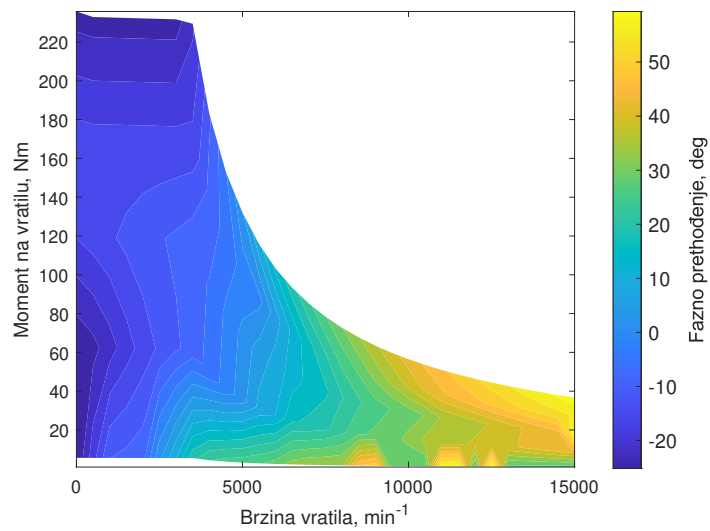


(c) Razlika

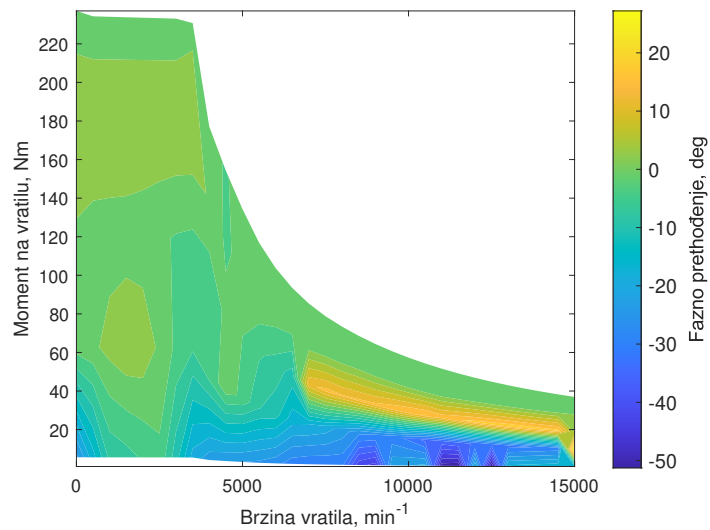
Slika 3.28. Vršna fazna statorska struja, motorski režim



(a) Standardni model

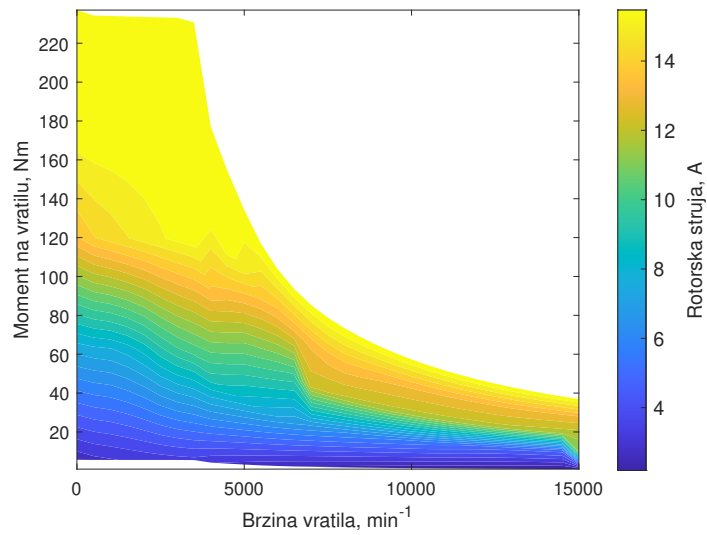


(b) Prošireni model

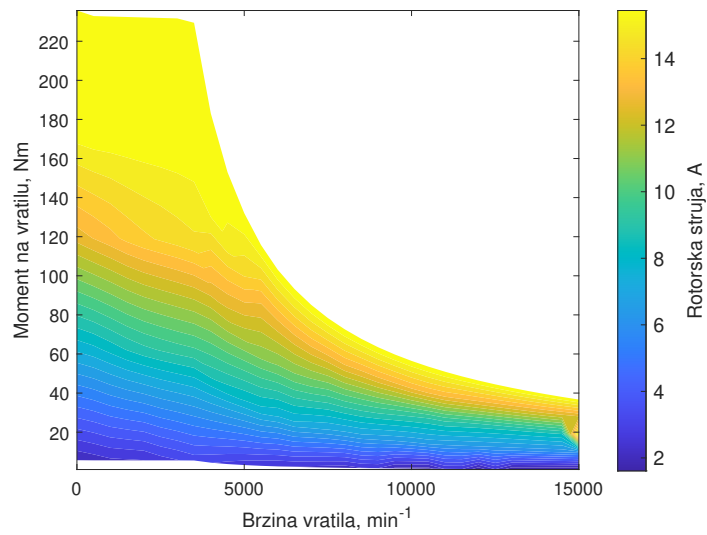


(c) Razlika

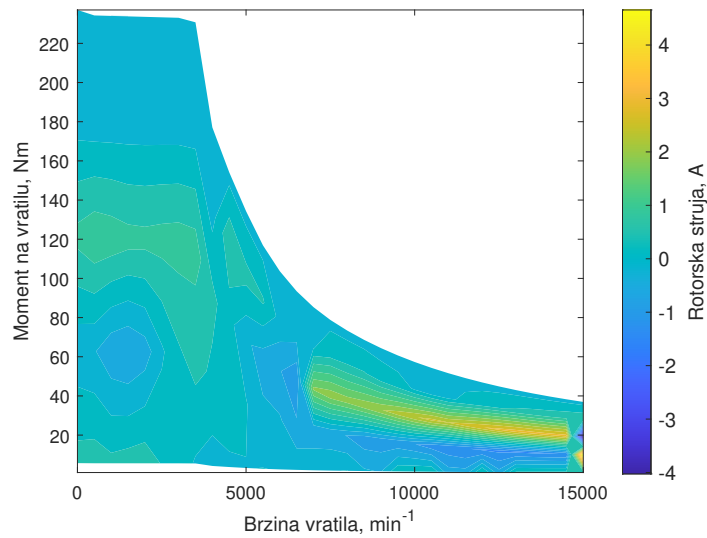
Slika 3.29. Kut vektora struje (γ), motorski režim



(a) Standardni model

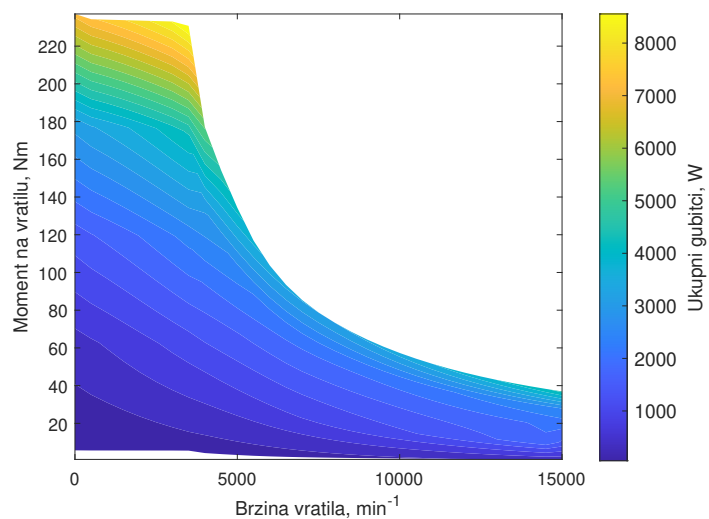


(b) Prošireni model

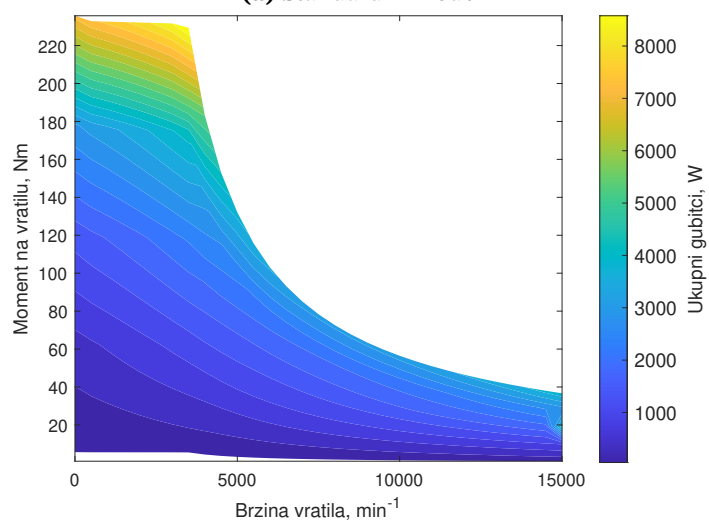


(c) Razlika

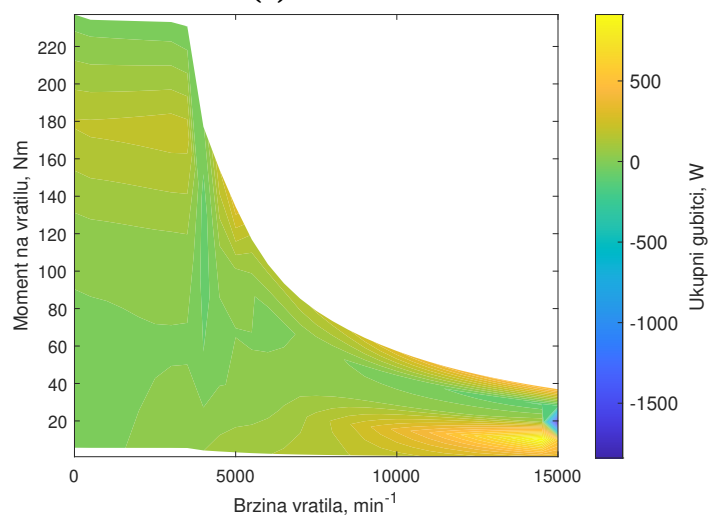
Slika 3.30. Rotorska struja, motorski režim



(a) Standardni model

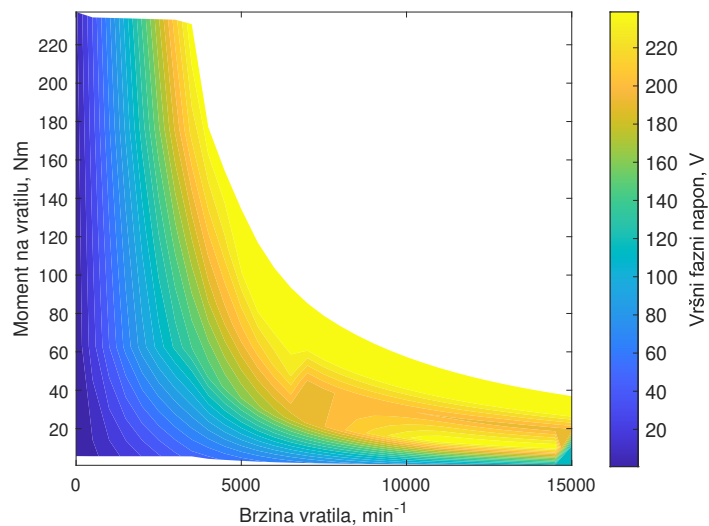


(b) Prošireni model

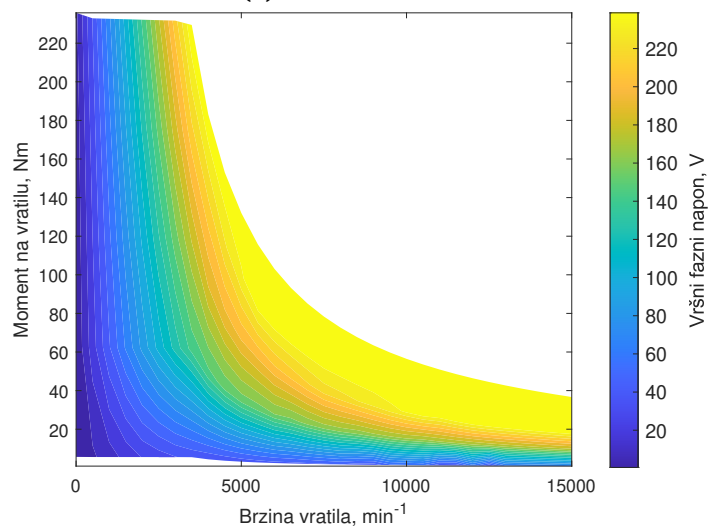


(c) Razlika

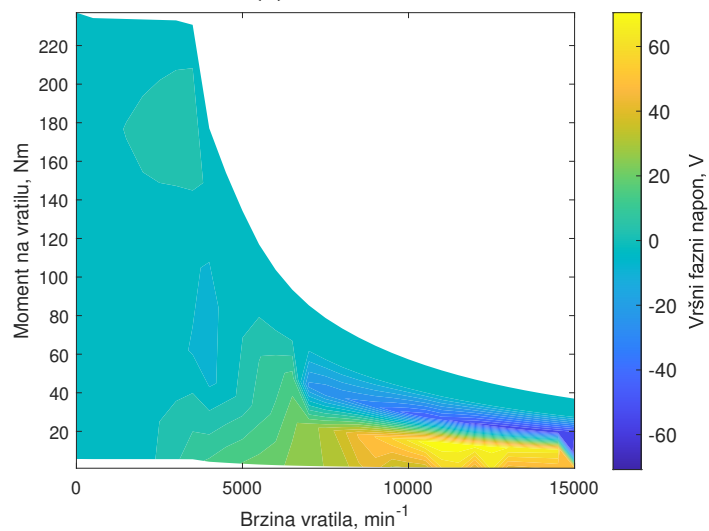
Slika 3.31. Ukupni gubici, motorski režim



(a) Standardni model



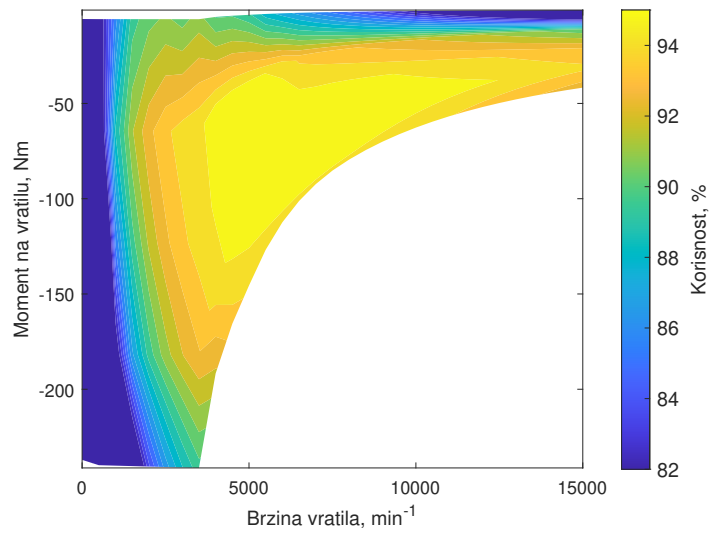
(b) Prošireni model



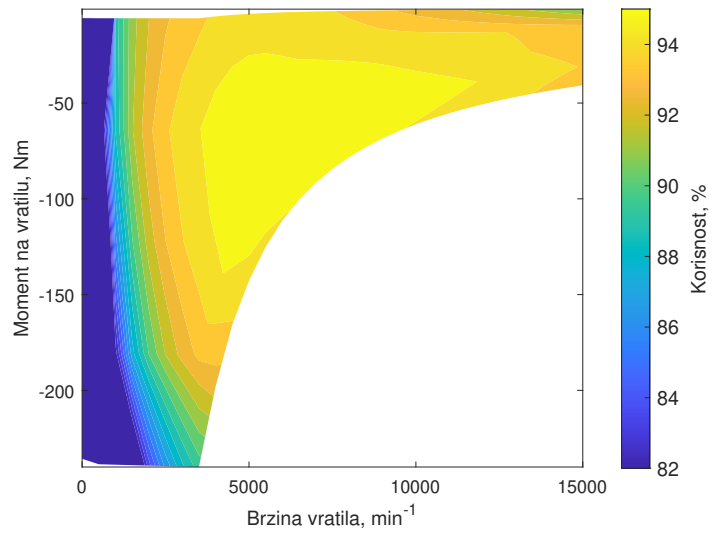
(c) Razlika

Slika 3.32. Vršni fazni napon, motorski režim

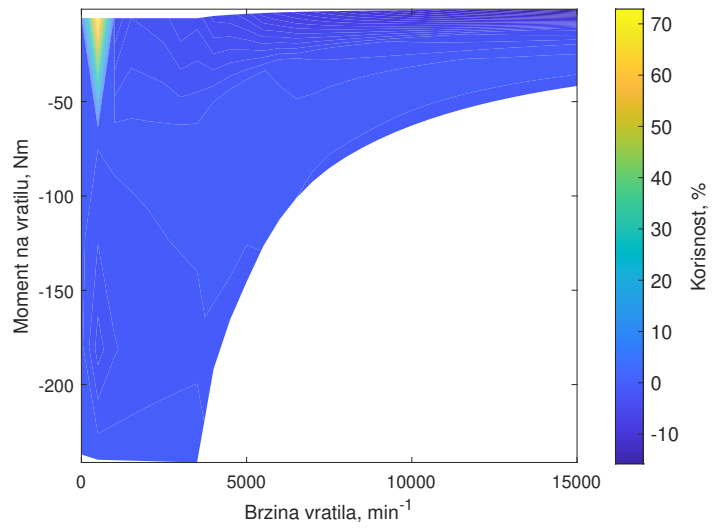
Sljedeće se slike odnose na generatorski režim. Na slikama je moguće vidjeti problem koji se ponekad javlja kod proširenog modela (isključivo u generatorskom režimu rada, pri malom traženom momentu). Optimizacijska metoda zna zalutati u radnu točku koja je s aspekta gubitaka neoptimalna, ali momentom bliska traženom momentu. Na primjer na slici 3.33. pri 500 min^{-1} apsolutnim iznosom najmanji traženi moment iznosi $-5,73 \text{ Nm}$, a metoda pronalazi radnu točku u kojoj stroj ostvaruje moment u iznosu od $-5,85 \text{ Nm}$. Problem je numeričke prirode, možda dolazi iz *Matlabovog* optimizacijskog algoritma, a možda iz *Motor-CAD Lab* modela, ako se traženi moment promijeni u na primjer $-5,75 \text{ Nm}$ problem nestaje i algoritam pronalazi adekvatnu radnu točku. Korisnost u toj radnoj točki iznosi $7,7\%$, do niske korisnosti dolazi jer je pronađena rotorska struja prevelika što za direktnu posljedicu ima velike gubitke u bakru rotora i ostvareni moment koji je veći od traženog.



(a) Standardni model

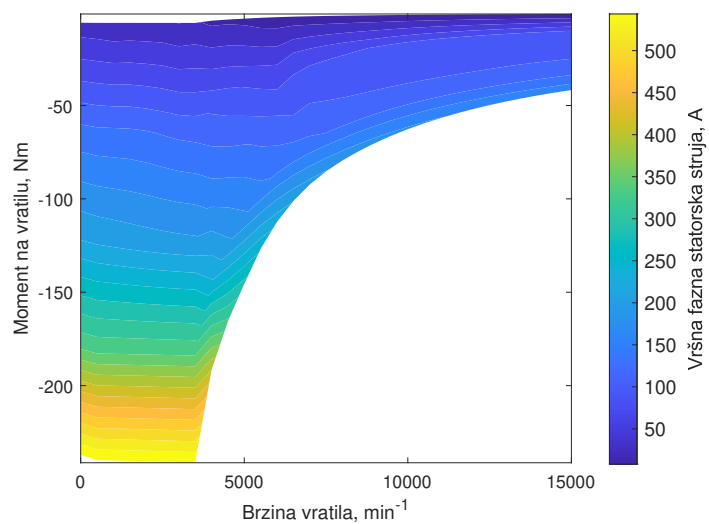


(b) Prošireni model

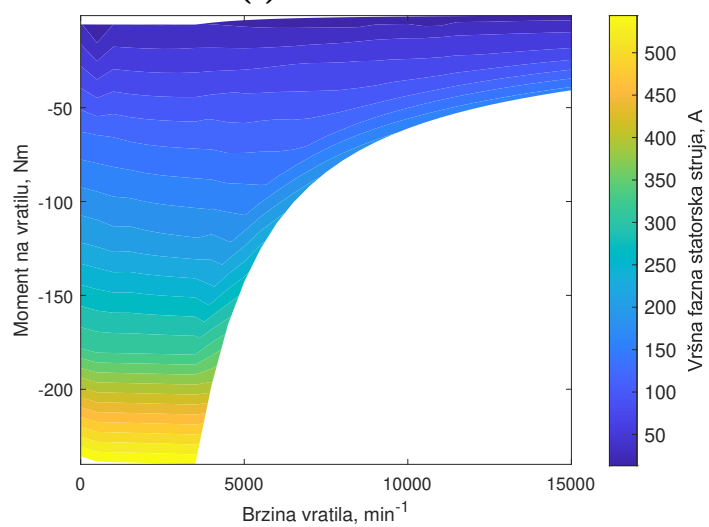


(c) Razlika

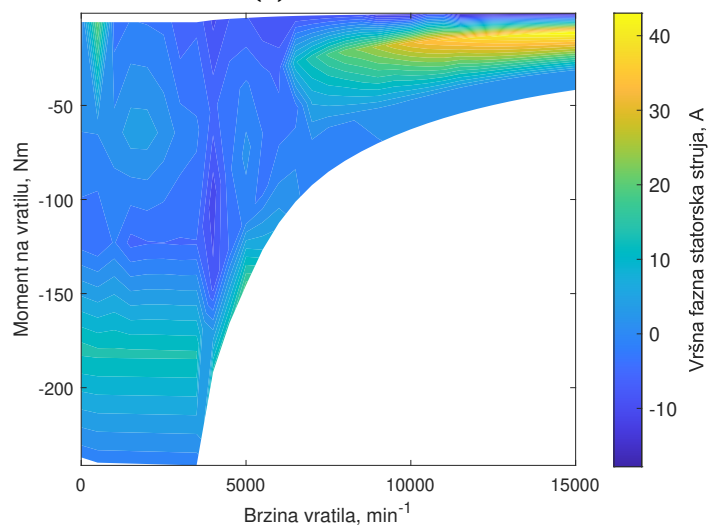
Slika 3.33. Korisnost, generatorski režim



(a) Standardni model

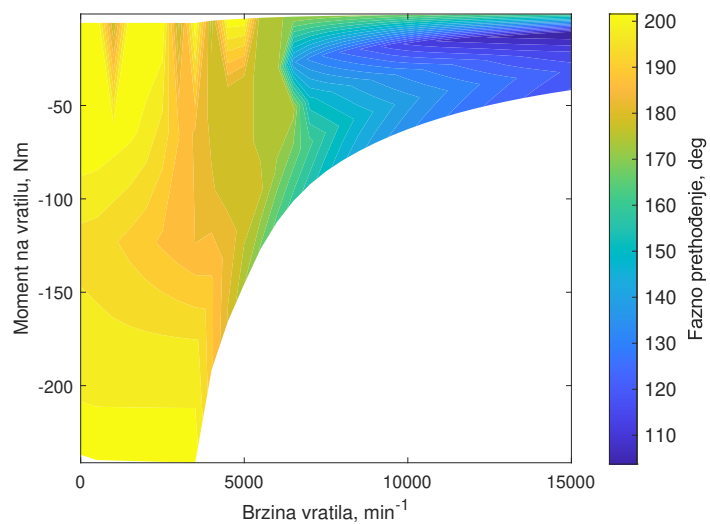


(b) Prošireni model

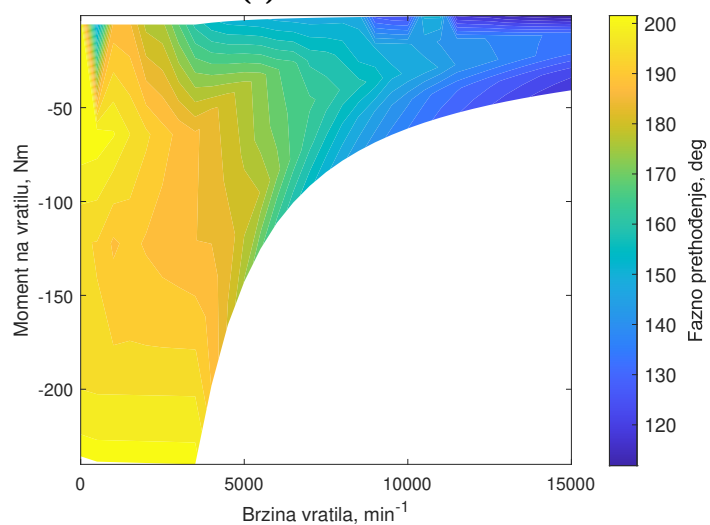


(c) Razlika

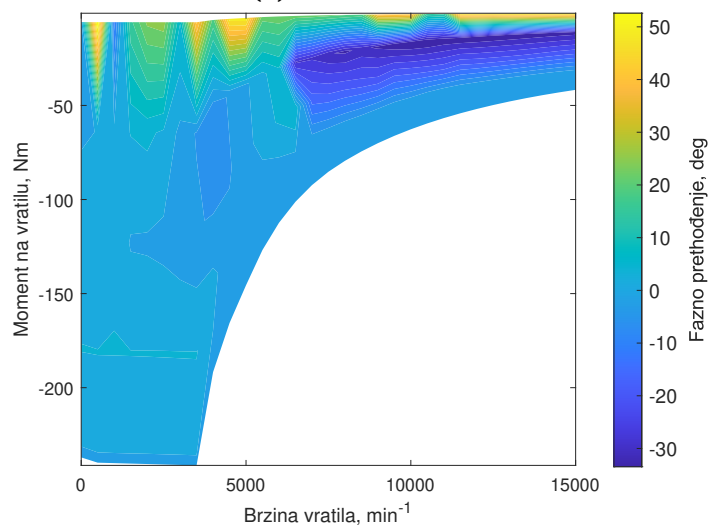
Slika 3.34. Vršna fazna statorska struja, generatorski režim



(a) Standardni model

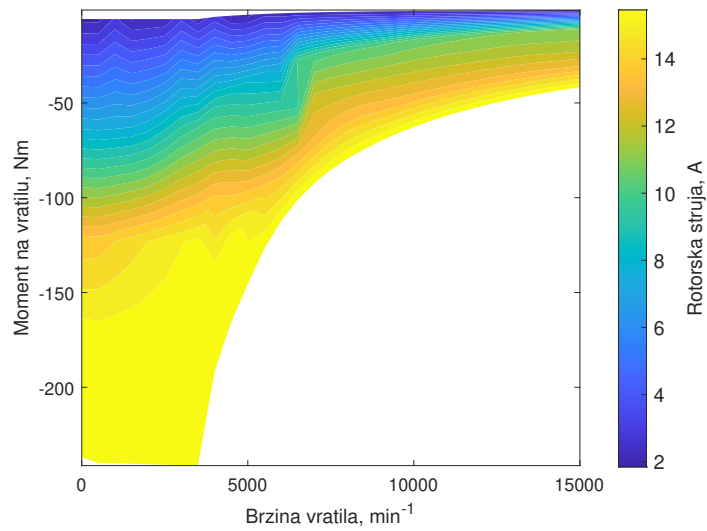


(b) Prošireni model

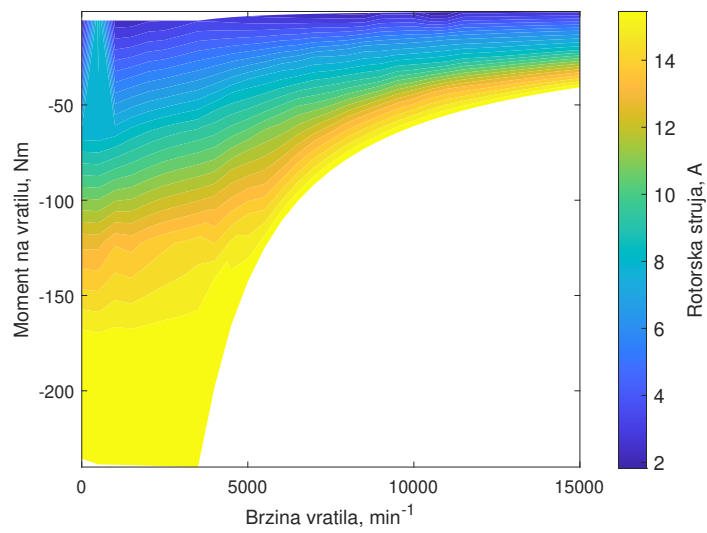


(c) Razlika

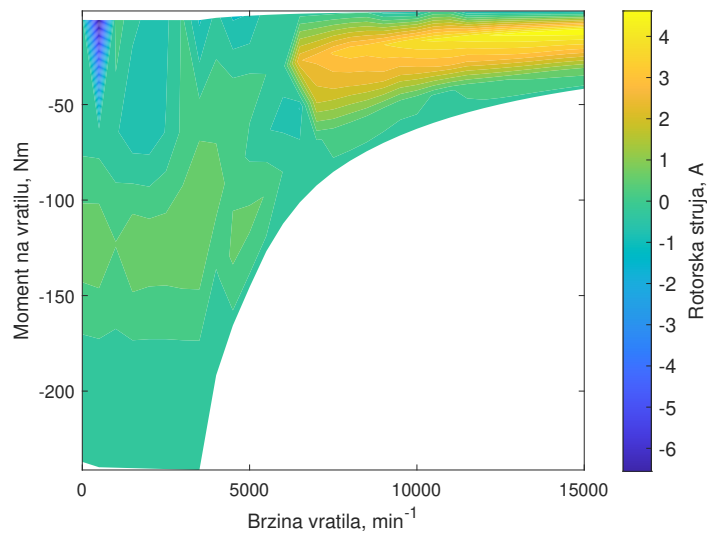
Slika 3.35. Kut vektora struje (γ), generatorski režim



(a) Standardni model

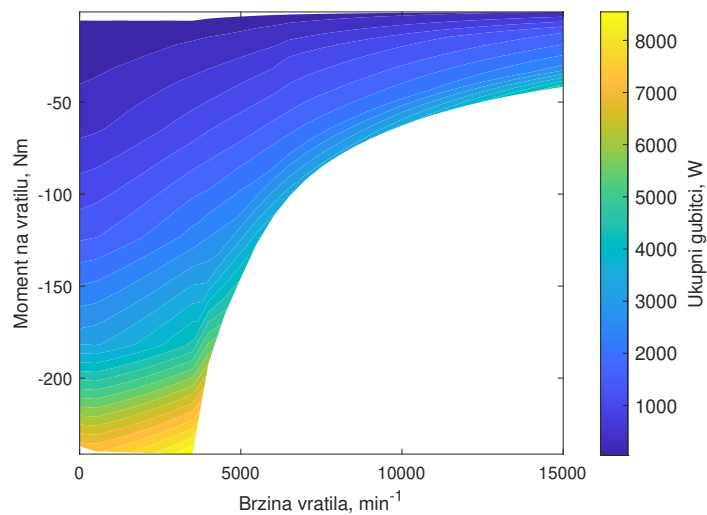


(b) Prošireni model

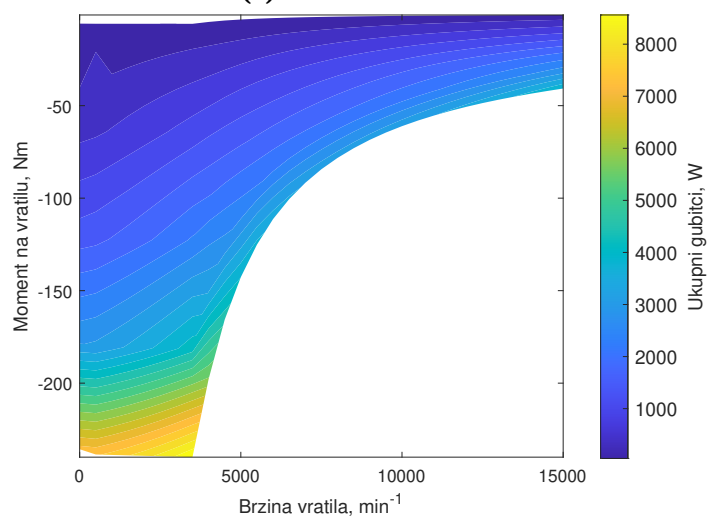


(c) Razlika

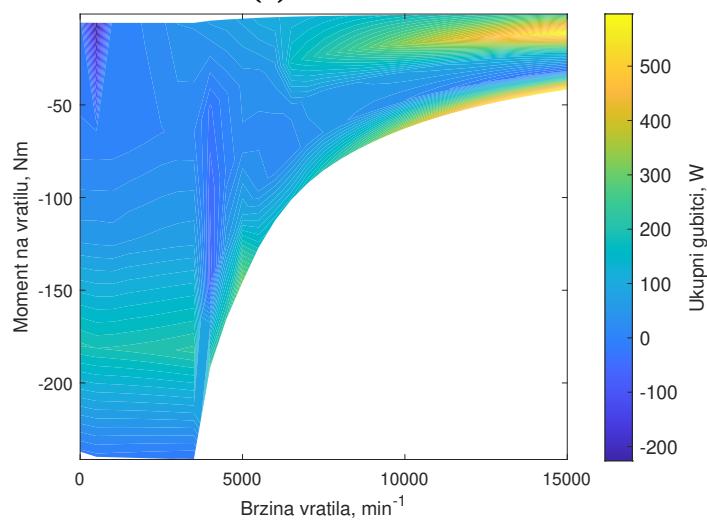
Slika 3.36. Rotorska struja, generatorski režim



(a) Standardni model

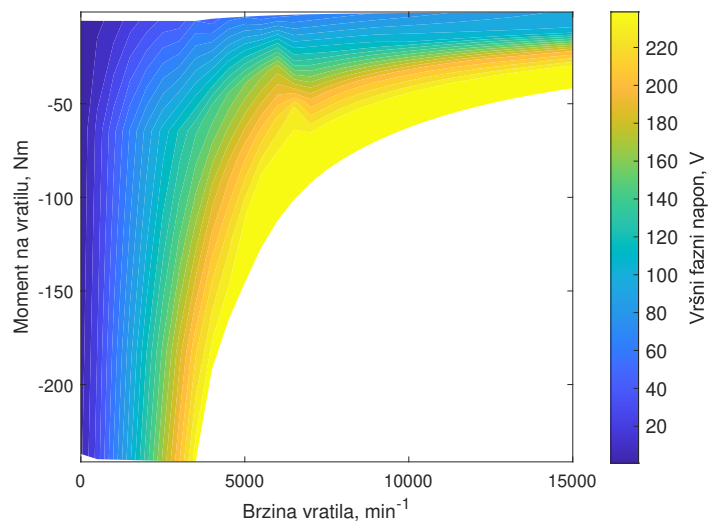


(b) Prošireni model

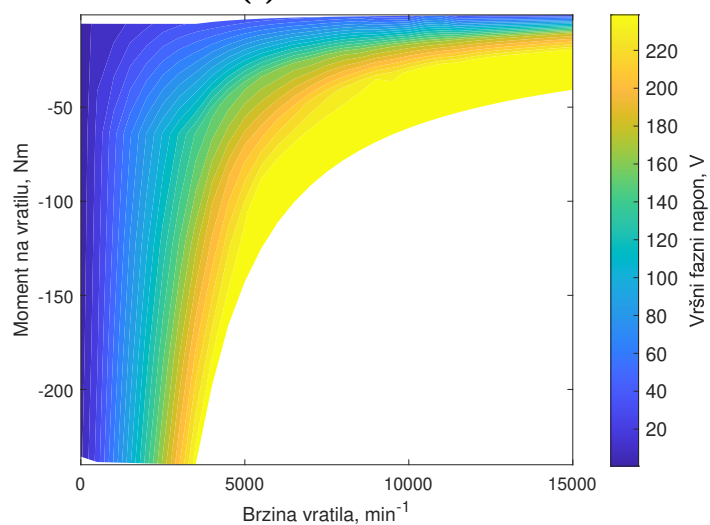


(c) Razlika

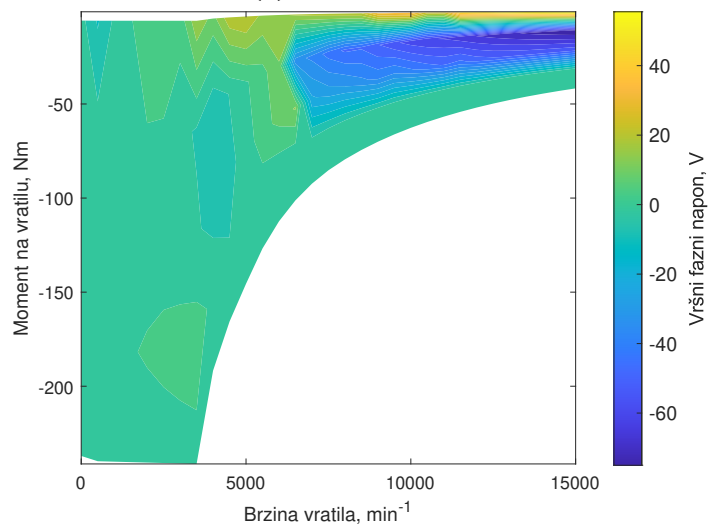
Slika 3.37. Ukupni gubitci, generatorski režim



(a) Standardni model



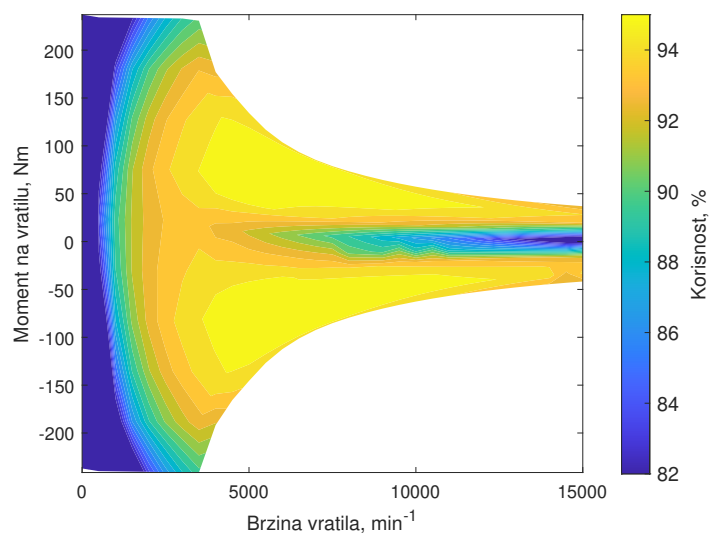
(b) Prošireni model



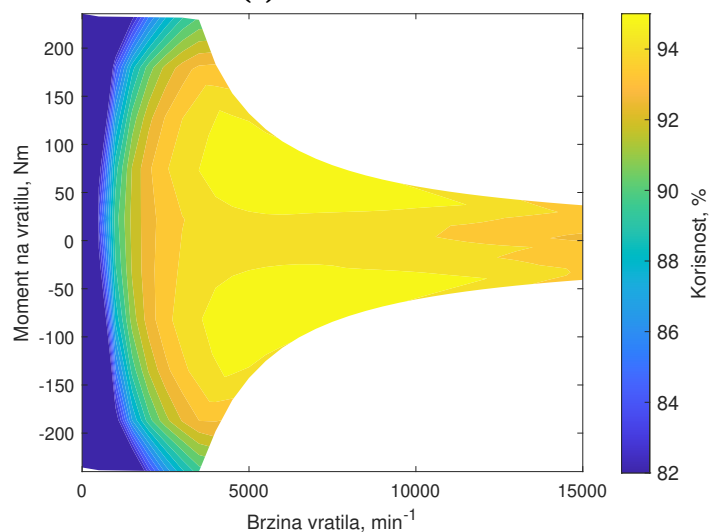
(c) Razlika

Slika 3.38. Vršni fazni napon, generatorski režim

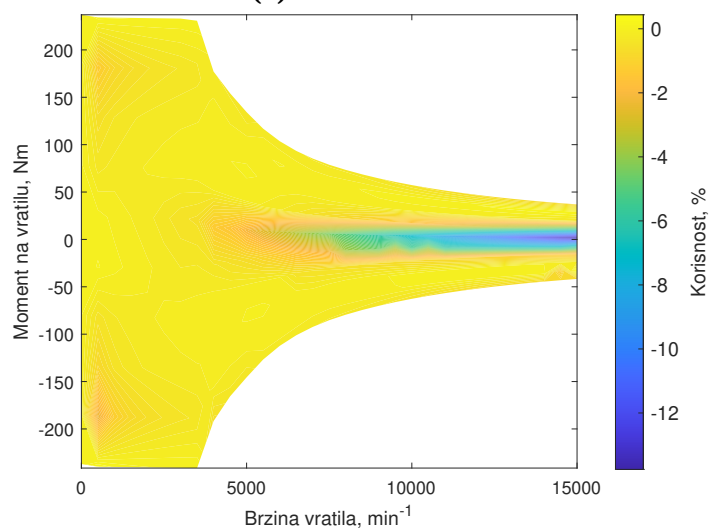
Sljedeće se slike odnose na objedinjeni motorski i generatorski režim.



(a) Standardni model

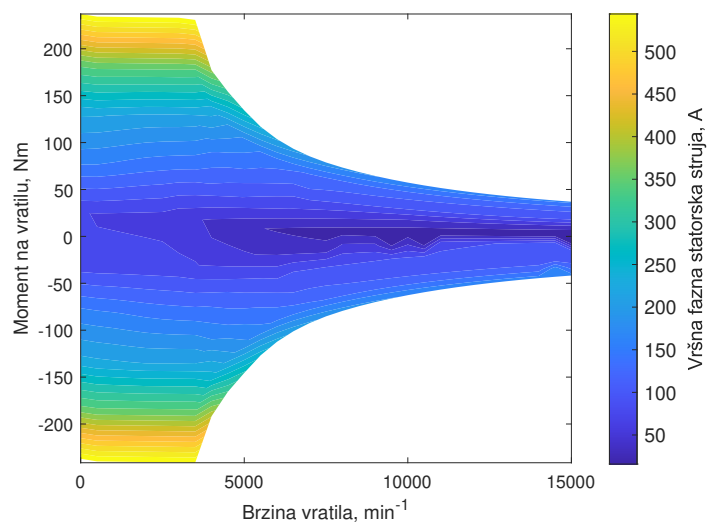


(b) Prošireni model

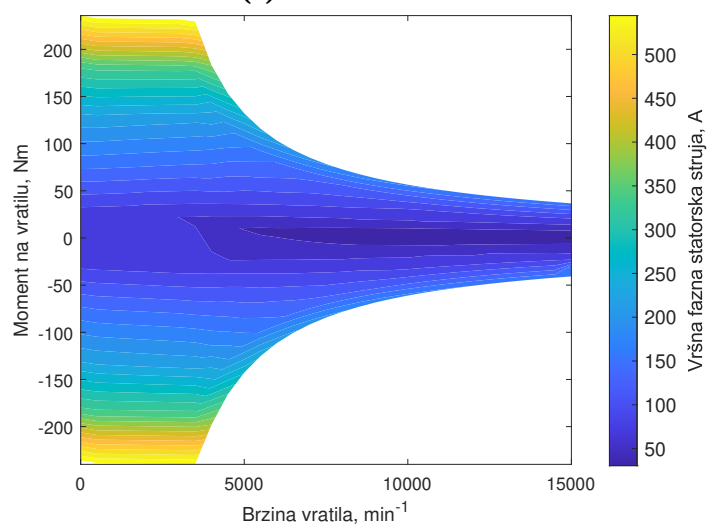


(c) Razlika

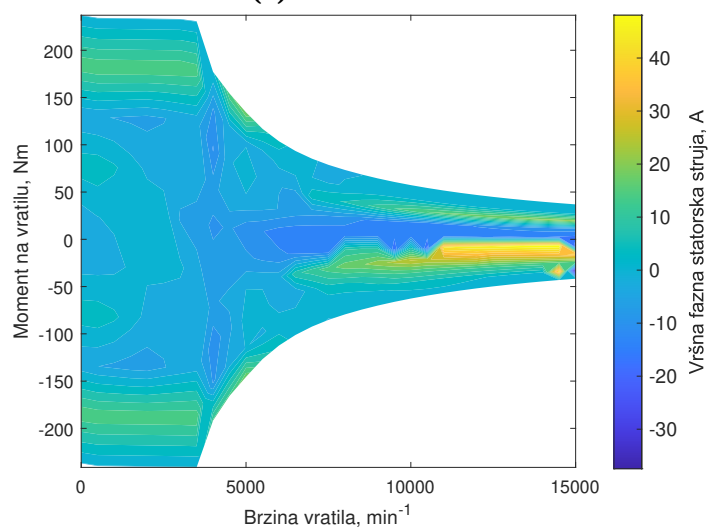
Slika 3.39. Korisnost, objedinjeni motorski i generatorski režim



(a) Standardni model

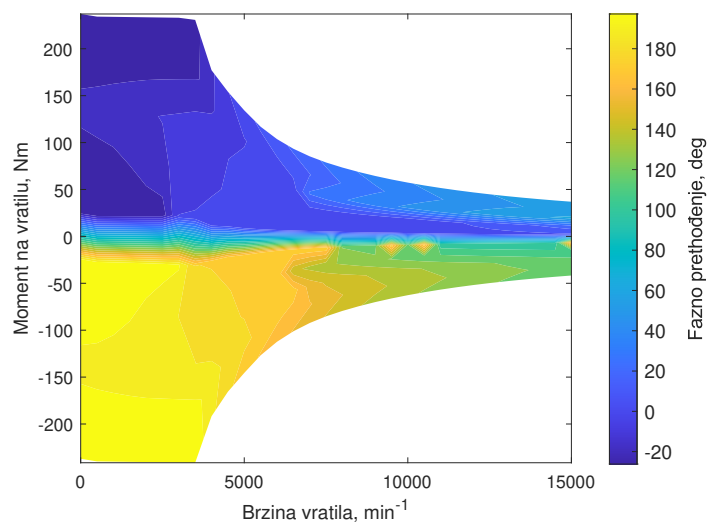


(b) Prošireni model

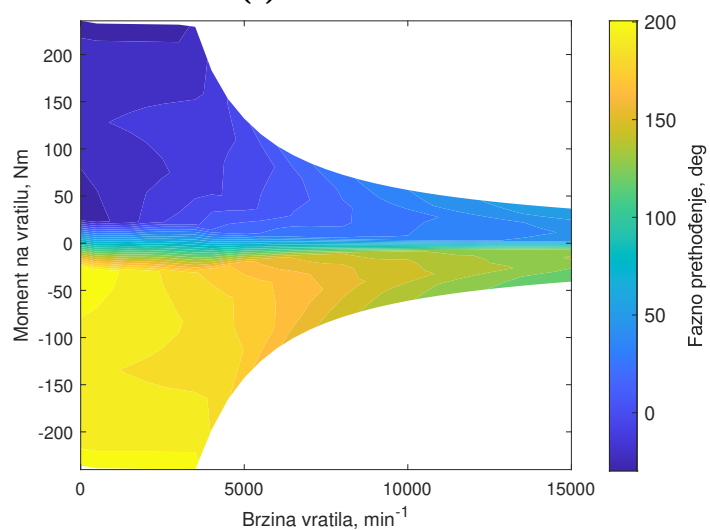


(c) Razlika

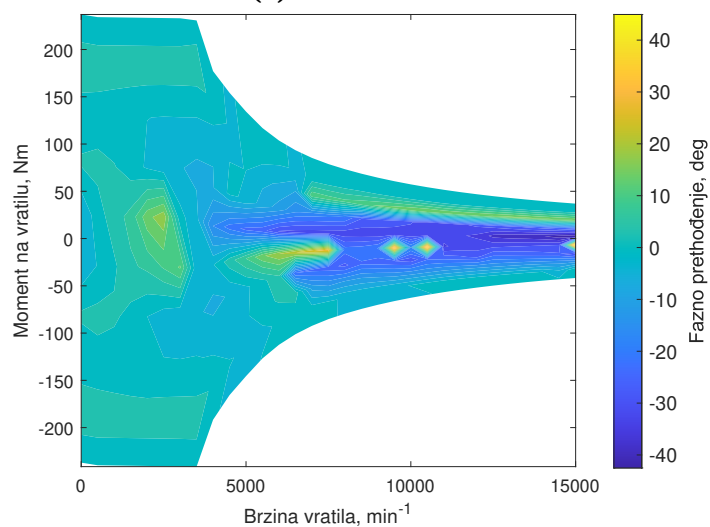
Slika 3.40. Vršna fazna statorska struja, objedinjeni motorski i generatorski režim



(a) Standardni model

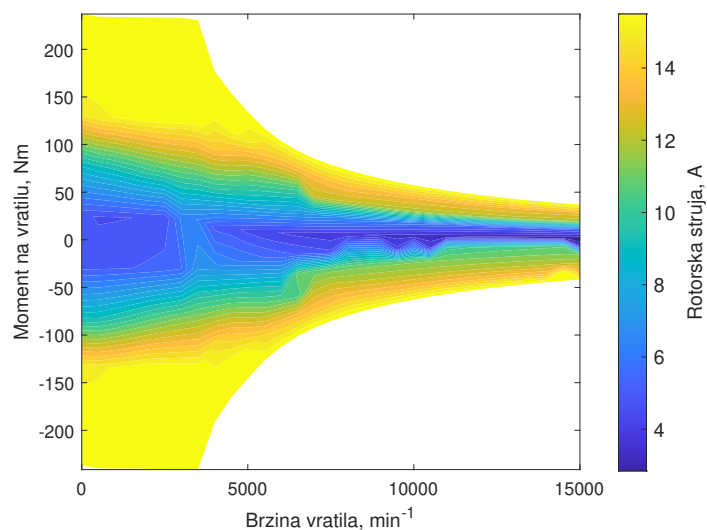


(b) Prošireni model

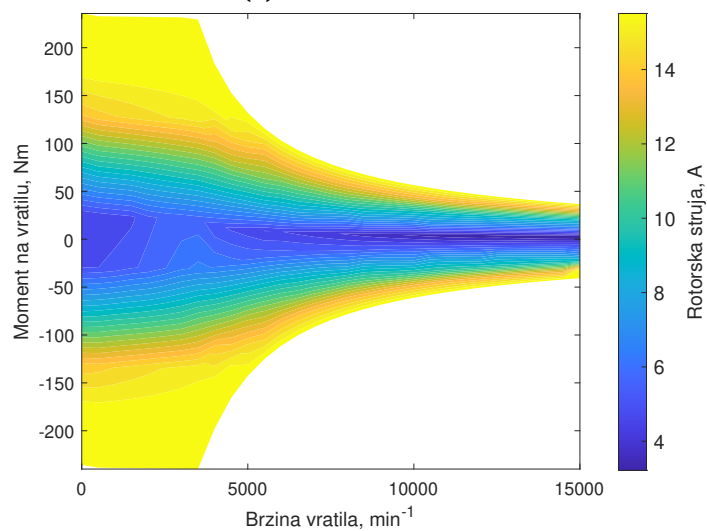


(c) Razlika

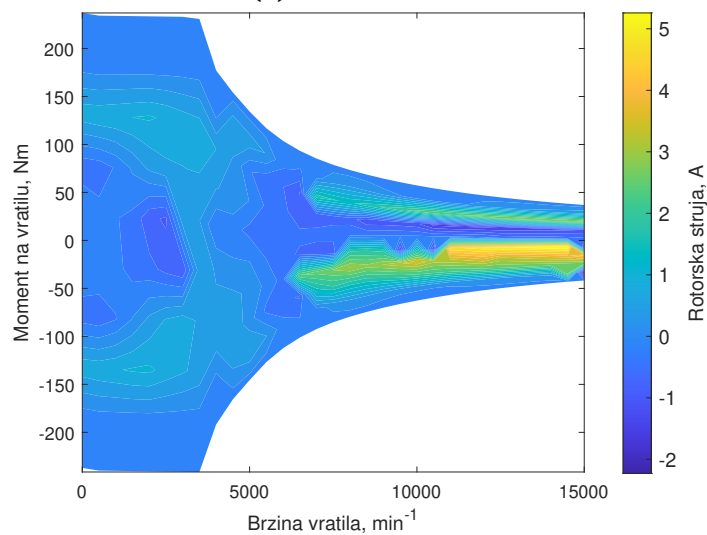
Slika 3.41. Kut vektora struje (γ), objedinjeni motorski i generatorski režim



(a) Standardni model

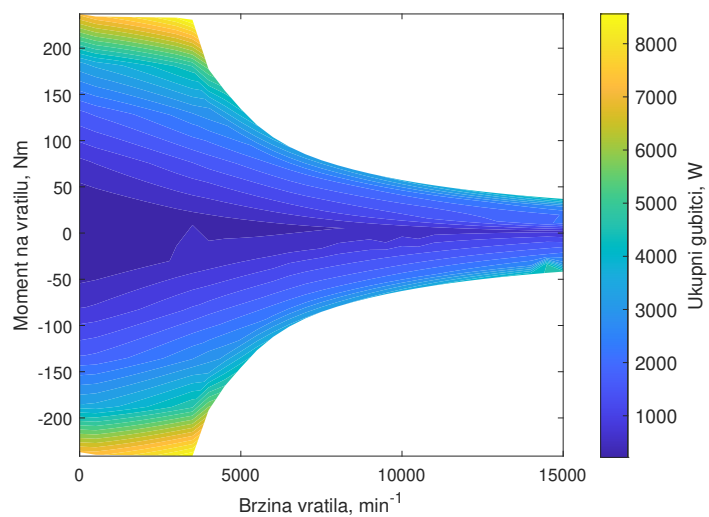


(b) Prošireni model

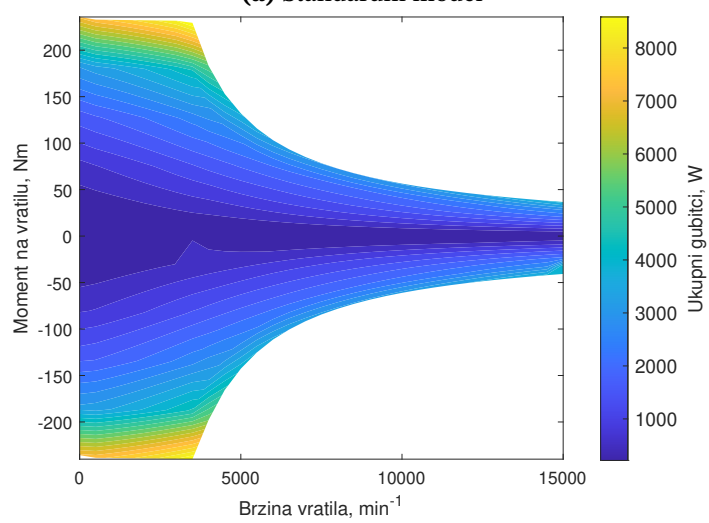


(c) Razlika

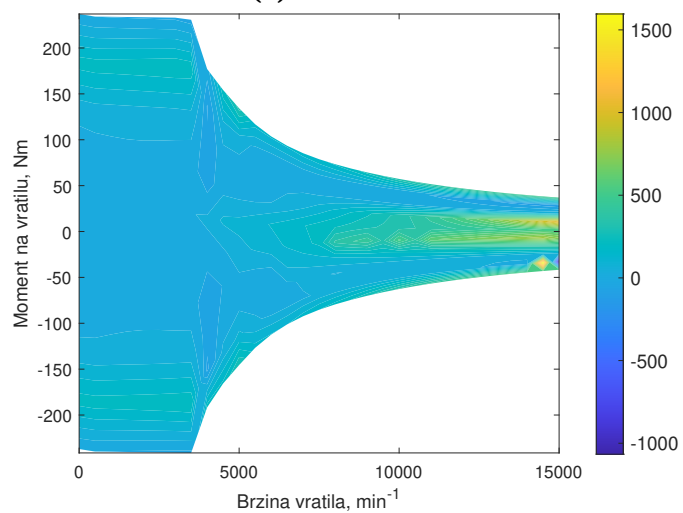
Slika 3.42. Rotorska struja, objedinjeni motorski i generatorski režim



(a) Standardni model

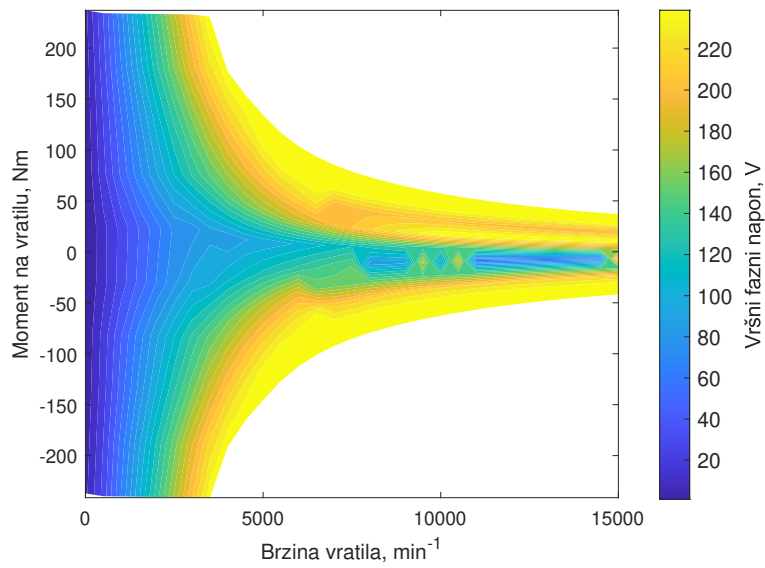


(b) Prošireni model

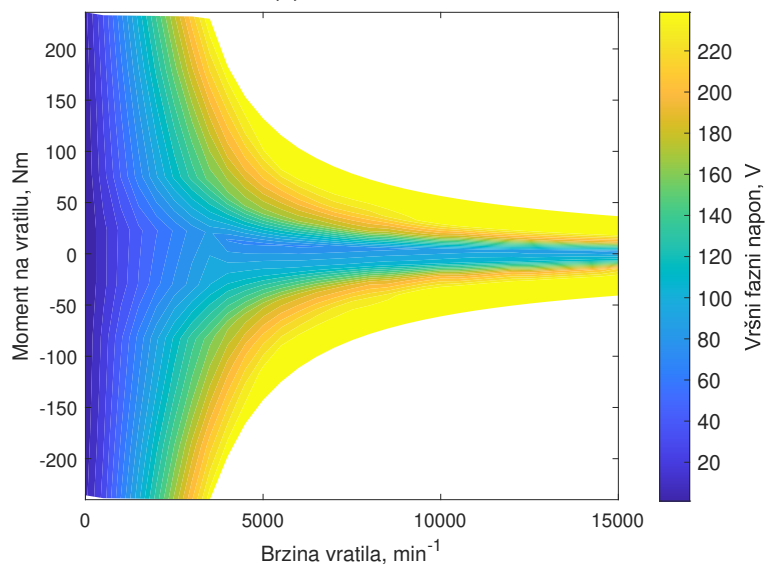


(c) Razlika

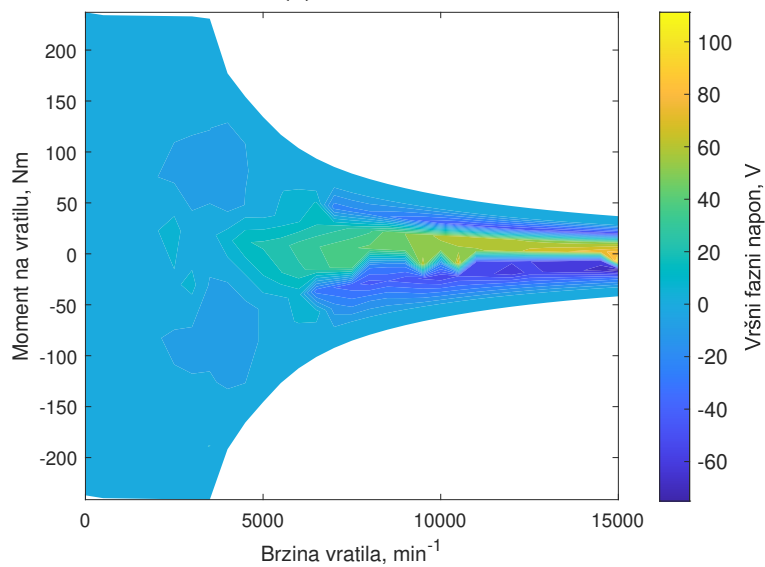
Slika 3.43. Ukupni gubici, objedinjeni motorski i generatorski režim



(a) Standardni model



(b) Prošireni model



(c) Razlika

Slika 3.44. Vršni fazni napon, objedinjeni motorski i generatorski režim

Tablica 3.16. Trajanje proračuna, *Efficiency Map*

Režim rada	Standardni model	Prošireni model	Omjer trajanja
Motor	6,6 s	31,5 s	4,8
Generator	7,0 s	36,4 s	5,2
MotGen	8,6 s	36,2 s	4,2

Ponovno je zaključak da prošireni model za iste postavke simulacije daje nešto gladi izgled obojenih kontura, a cijena koja se za to plaća je dulje vrijeme izvođenja proračuna. Postoje vidljive razlike između modela i većinski se pojavljuju na velikim brzinama pri malom momentu. Prošireni model u vrlo rijetkim slučajevima u generatorskom režimu daje radnu točku koja je nekvalitetna.

3.3. Funkcija *DutyCycle*

U ovom su potpoglavlju dani rezultati *Matlab* funkcije *DutyCycle*. Prvo je potrebno stvoriti ciklus vožnje korištenjem funkcije *MakeDutyCycle*. Korišteni podaci o vozilu i okolini dani su u tablici 3.17.

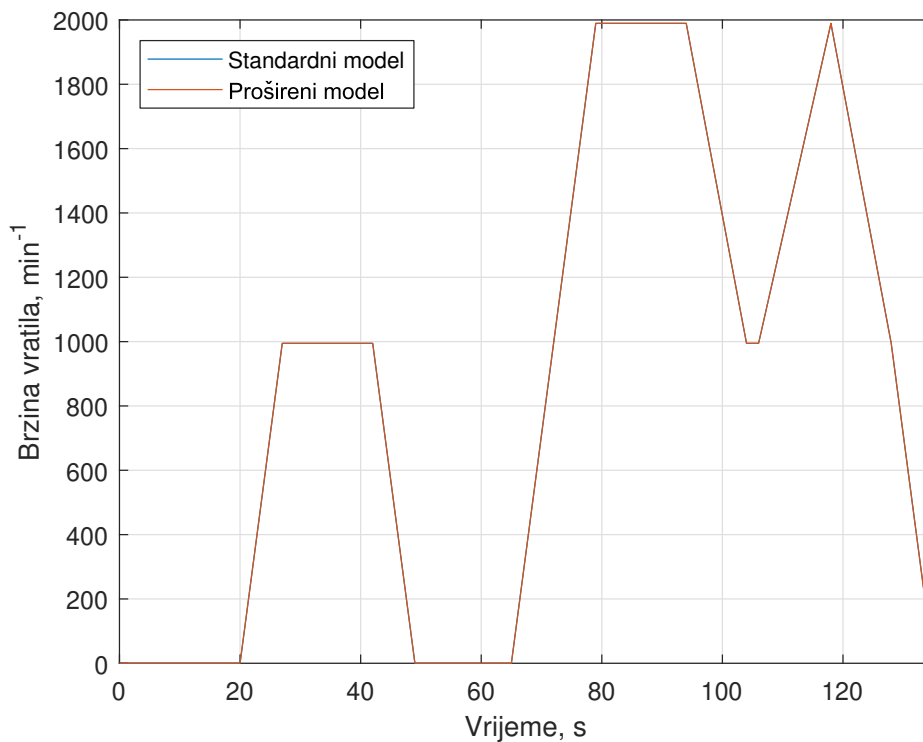
Tablica 3.17. Parametri vozila i okoline

Frontalna površina (CA), m^2	2
Koeficijent otpora kotrljanja (Cr)	0,01
Koeficijent otpora zraka (Cd)	0,35
Masa vozila (M), kg	1200
Korekcijski faktor inercijskih masa (m_in)	1
Gradijent (grad), °	0
Radijus kotača (R_wheel), m	0,32
Broj motora (no_mot)	1
Prijenosni omjer (gear_ratio)	6
Gustoća zraka (rho), kg/m^3	1,29
Gravitacijska konstanta (g), m/s^2	9,807

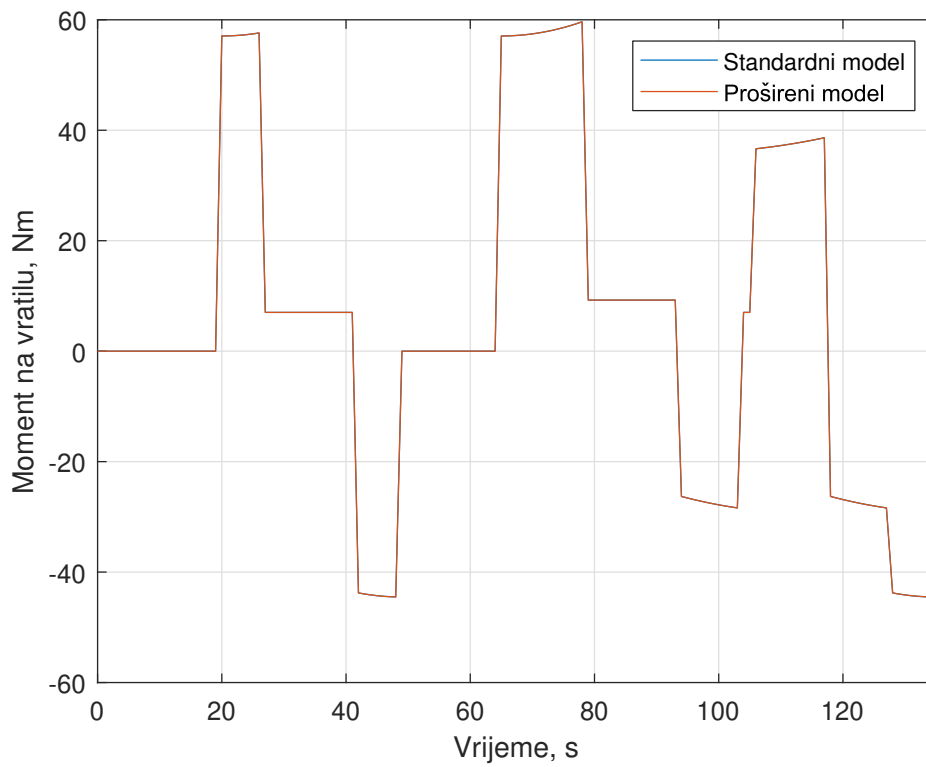
U ovom se dokumentu daju rezultati analize ciklusa vožnje *JNP10* i *WLTP Class 3*. *JNP10* je odabran jer je jednostavan i vrlo zoran ciklus, a *WLTP Class 3* jer predstavlja jedan od modernih zlatnih standarda pri testiranju vozila. Na slikama od 3.45. do 3.53. dani su rezultati analize ciklusa vožnje *JNP10*, a u tablici 3.18. dan je sumarni prikaz analize tog ciklusa. U tablici 3.20. su dana protekla vremena tijekom izvođenja proračuna.

Na slici 3.48. je vidljiv povremeni mali pad korisnosti (na primjer između 25. i 42. sekunde), nema fizikalnog objašnjenja za taj pad nego on predstavlja manjkavost pri korištenju standardnog modela. Kao što je vidljivo s iste slike korištenjem proširenog modela se taj problem ne pojavljuje.

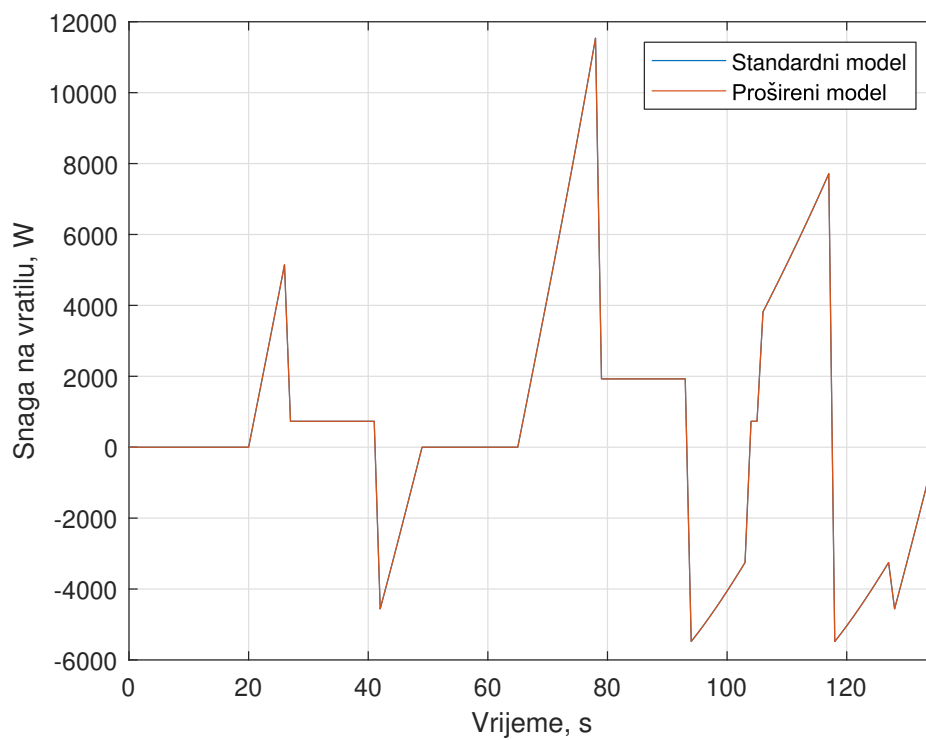
Otprije je poznato da se proračunati gubitci u željezu standardnog i proširenog modela vidljivo razlikuju: prošireni model se sastoji od većeg broja točaka pa je njegova krivulja gubitaka u željezu točnija od standardnog modela. Nema značajnih razlika u gubitcima u bakru između standardnog i proširenog modela što je i očekivano jer su u oba modela proračunate struje vrlo bliske, a otpor namota ne ovisi o broju točaka od kojih je stvoren model.



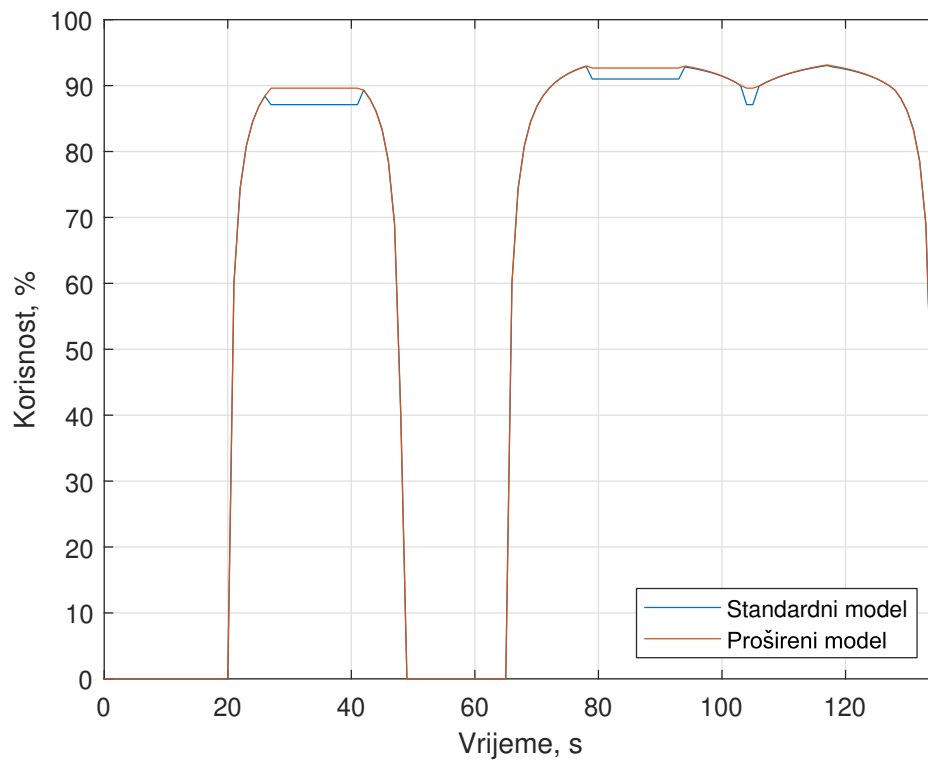
Slika 3.45. Brzina vratila



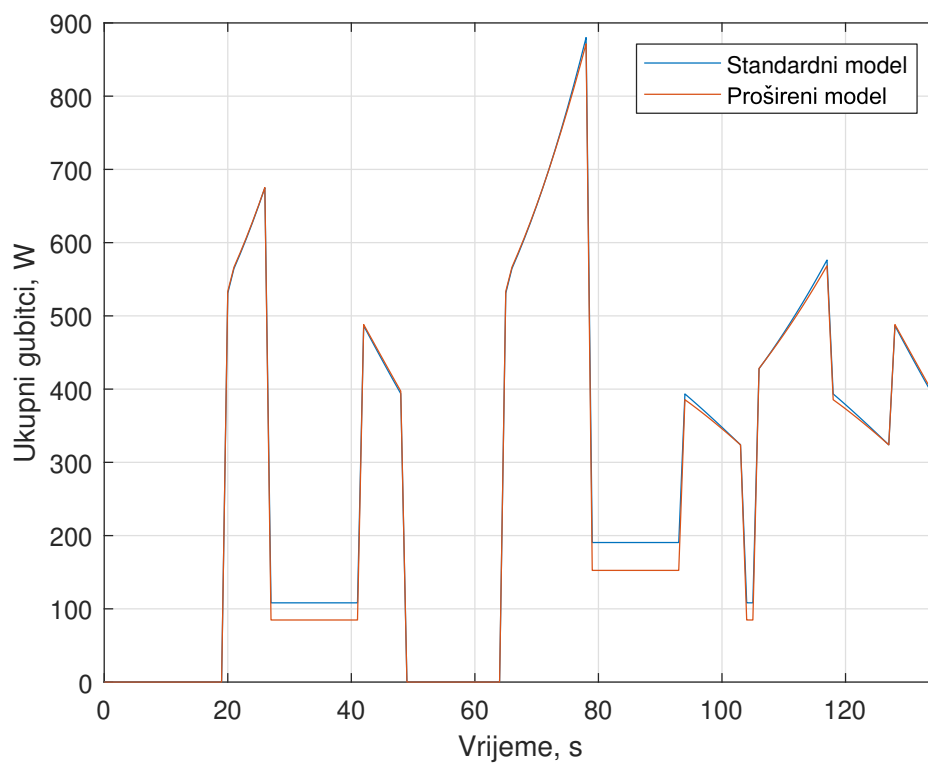
Slika 3.46. Moment na vratilu



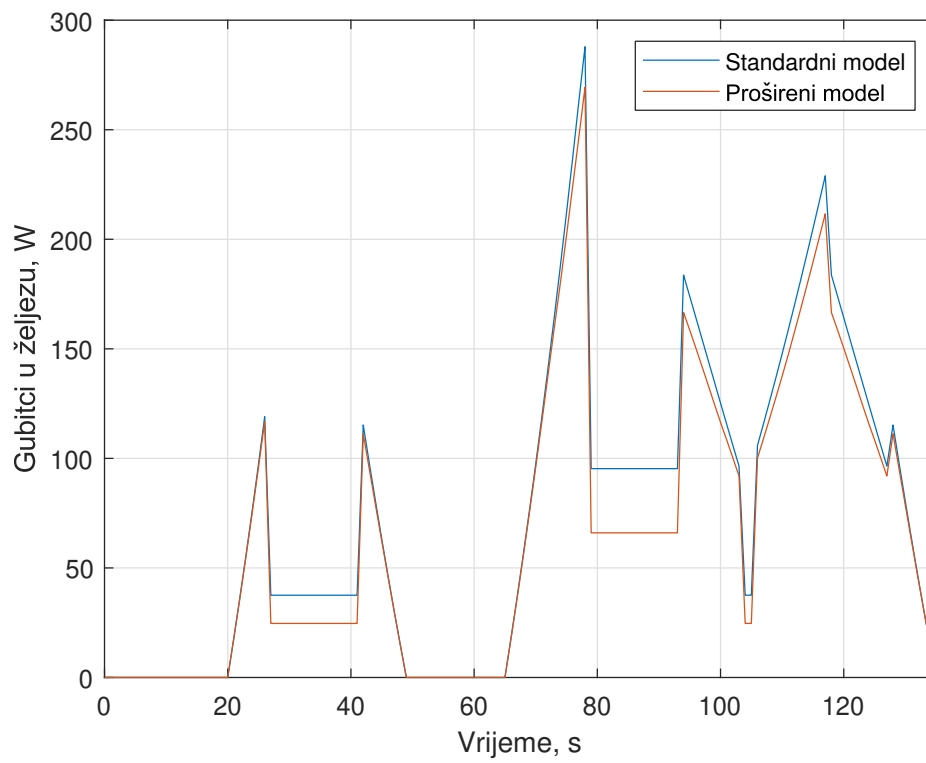
Slika 3.47. Snaga na vratilu



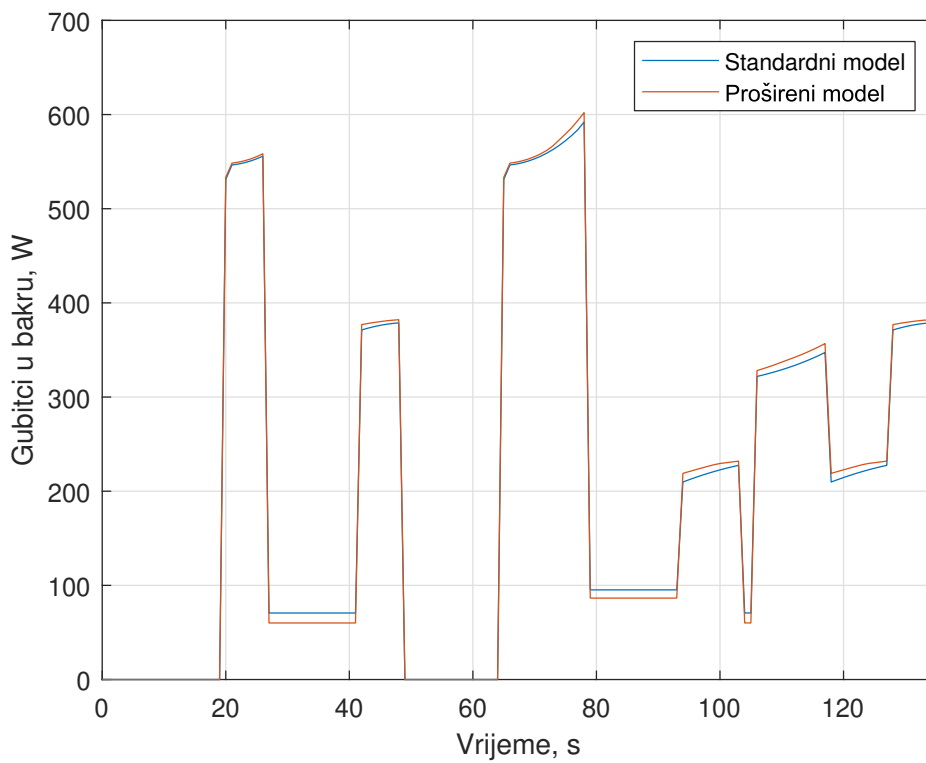
Slika 3.48. Korisnost



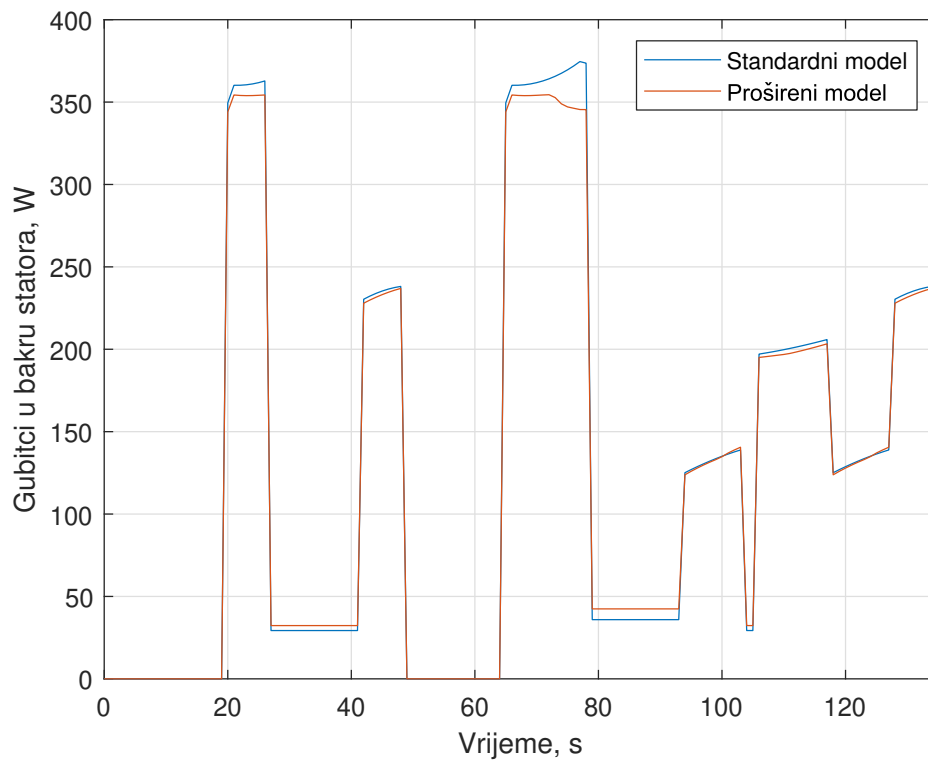
Slika 3.49. Ukupni gubitci



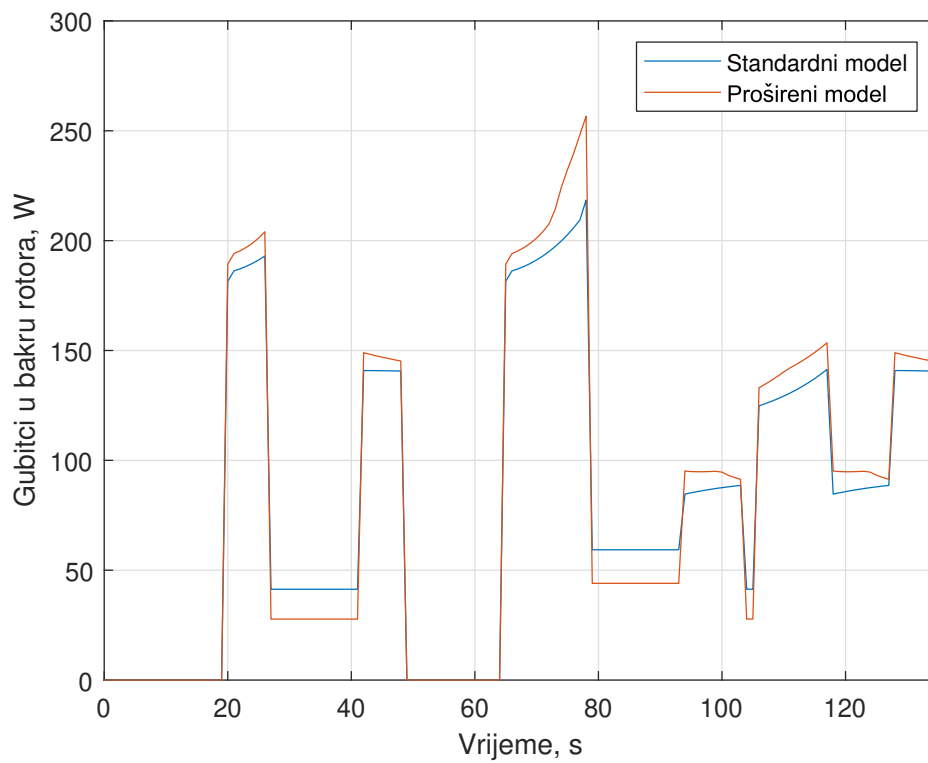
Slika 3.50. Gubitci u željezu



Slika 3.51. Gubitci u bakru



Slika 3.52. Gubitci u bakru statora

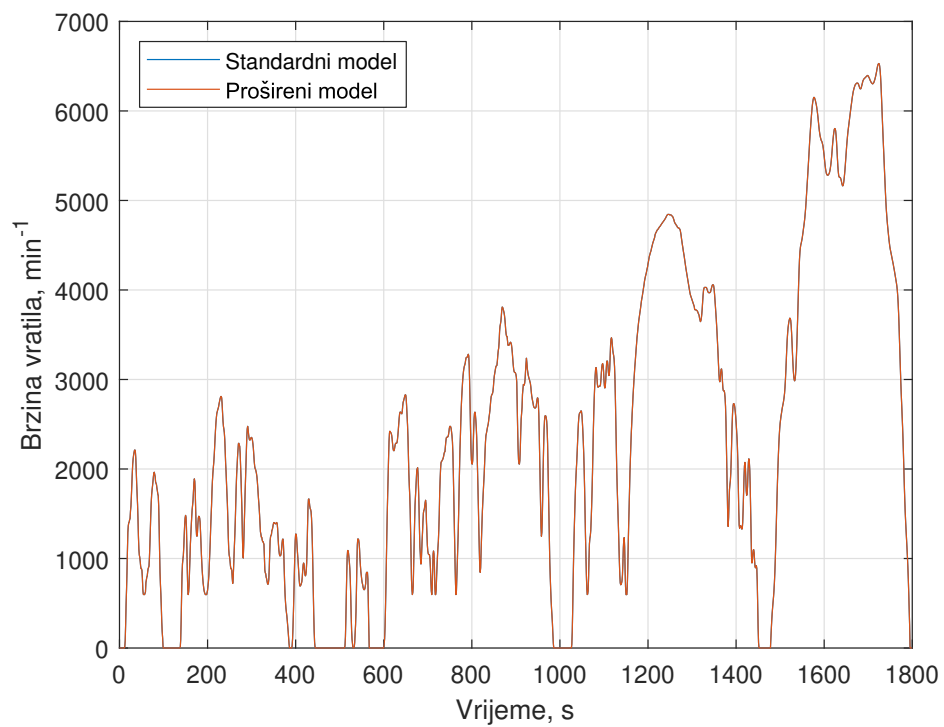


Slika 3.53. Gubitci u bakru rotora

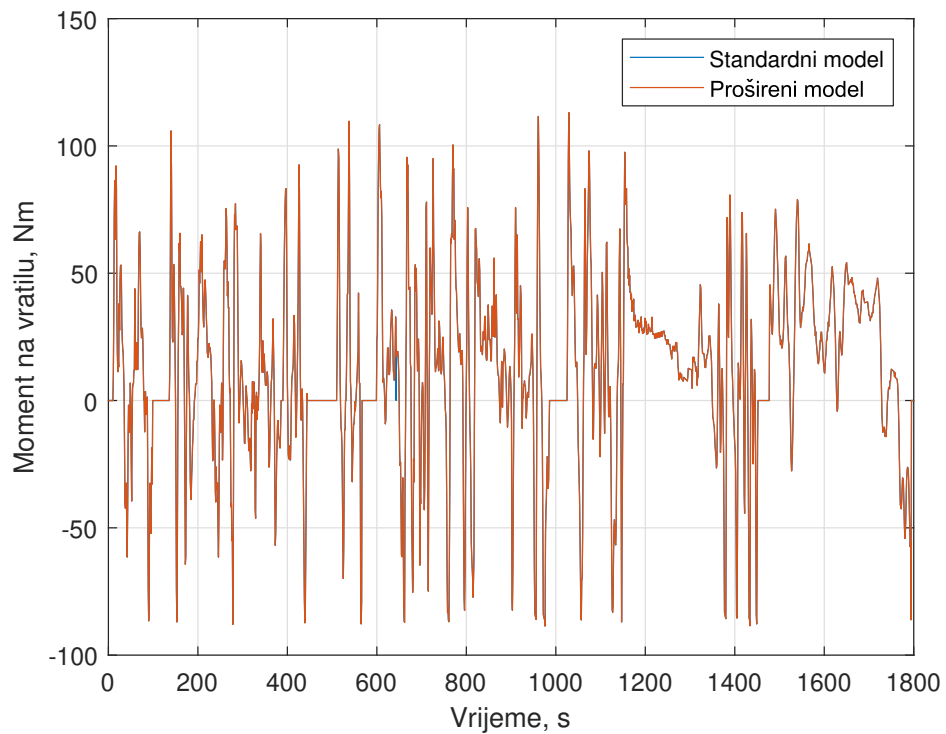
Tablica 3.18. Sumarni prikaz analize ciklusa JPN10

Parametar	Standardni model	Prošireni model
Prosječna korisnost (po potrošnji energije), %	89,34	89,61
Prosječna korisnost (točka po točka), %	87,03	87,72
Ulazna električna energija, Wh	64,38	64,09
Motorska energija na vratilu, Wh	57,53	57,53
Vraćena električna energija, Wh	31,00	31,01
Generatorska energija na vratilu, Wh	34,70	34,70
Ukupni gubitci, Wh	10,56	10,27
Gubitci u bakru statora, Wh	4,72	4,68
Gubitci u željezu, Wh	2,79	2,48
Gubitci u bakru rotora, Wh	3,04	3,10
Udio motorskog rada, %	65,66	65,66
Udio generatorskog rada, %	34,34	34,34

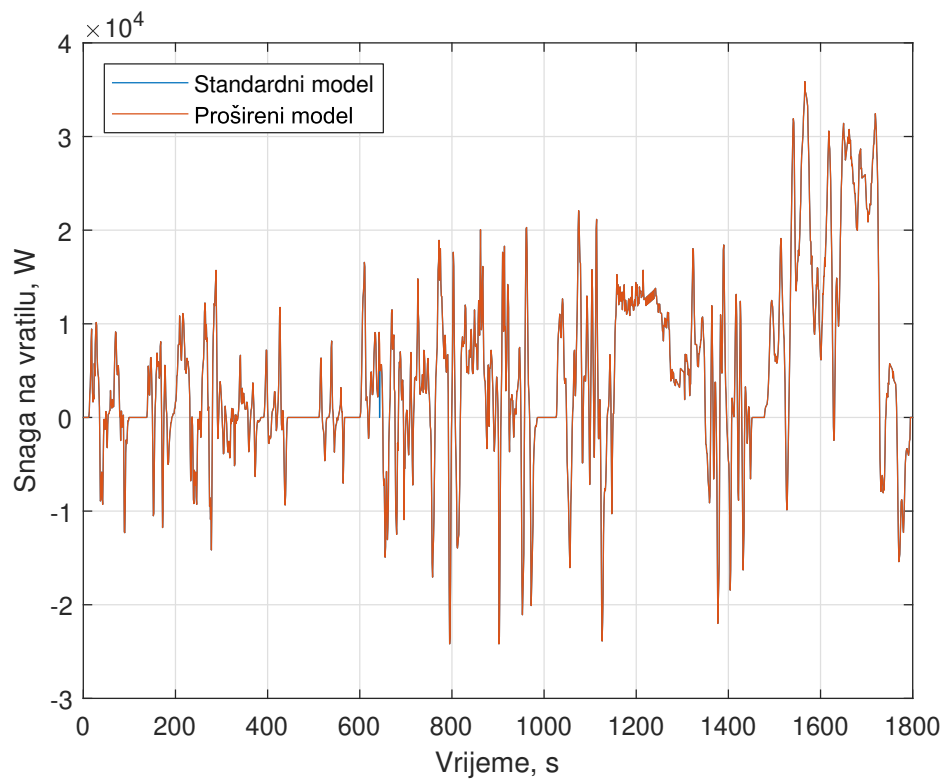
Sljedeći se grafovi odnose na analizu ciklusa vožnje WLTP Class 3.



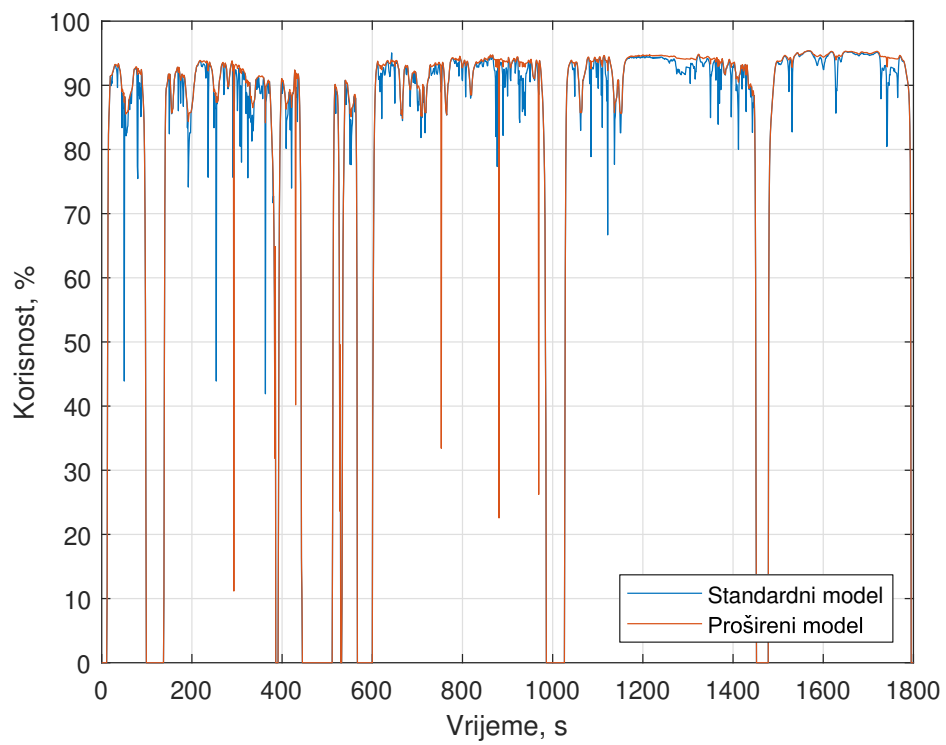
Slika 3.54. Brzina vratila



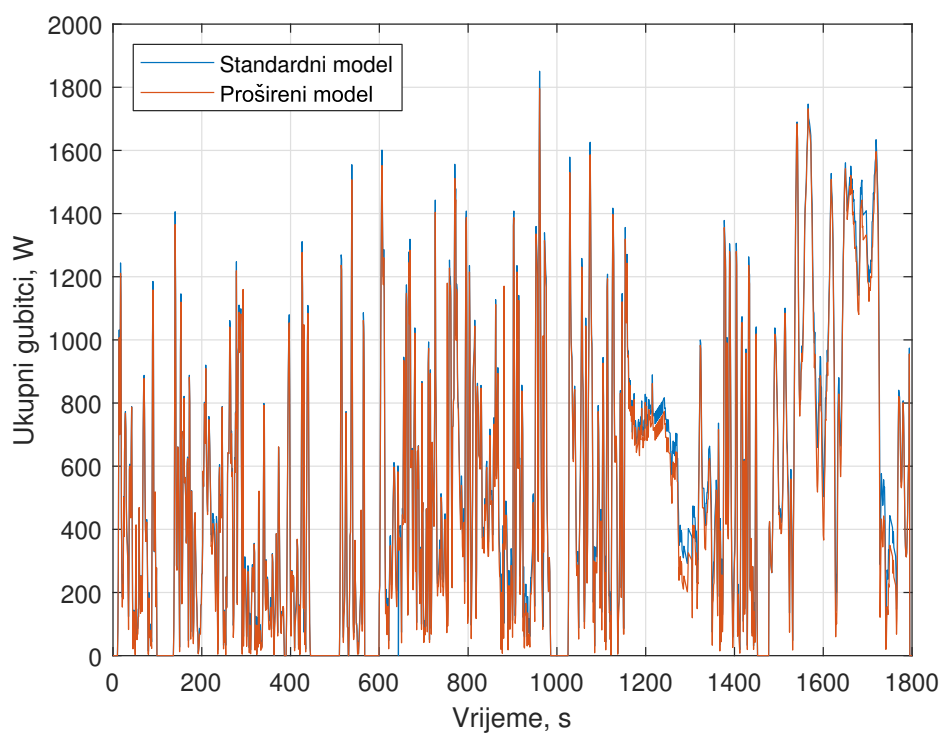
Slika 3.55. Moment na vratilu



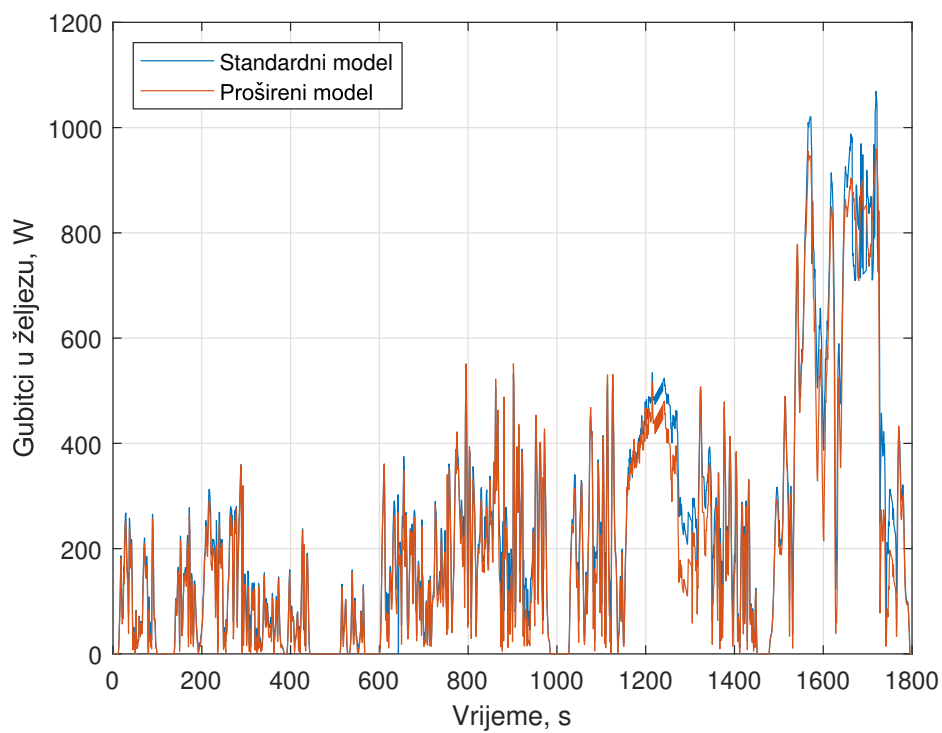
Slika 3.56. Snaga na vratilu



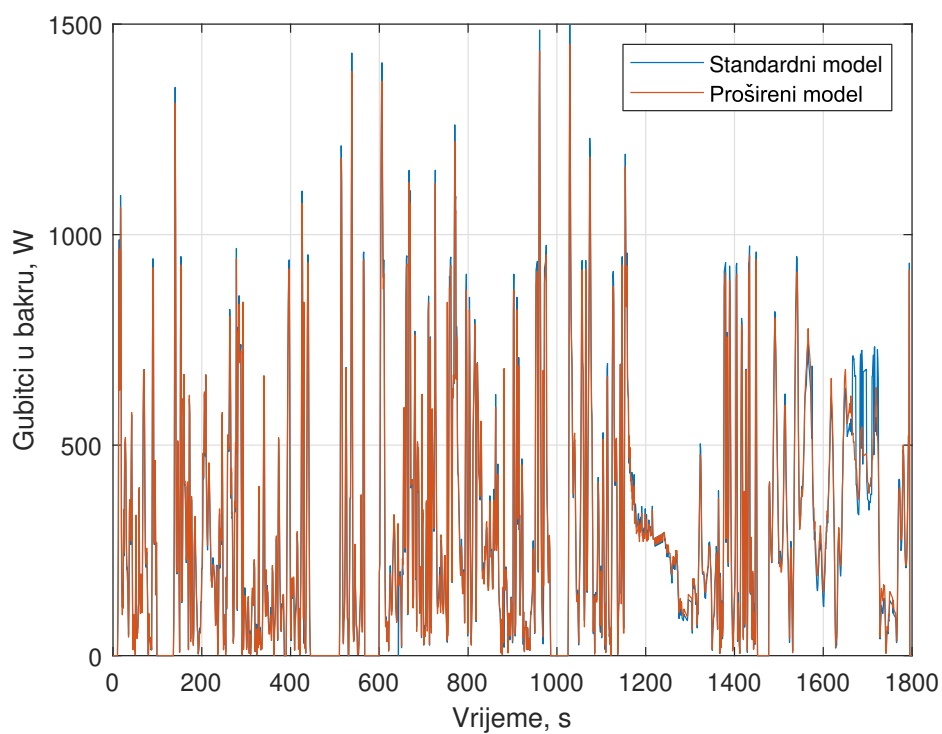
Slika 3.57. Korisnost



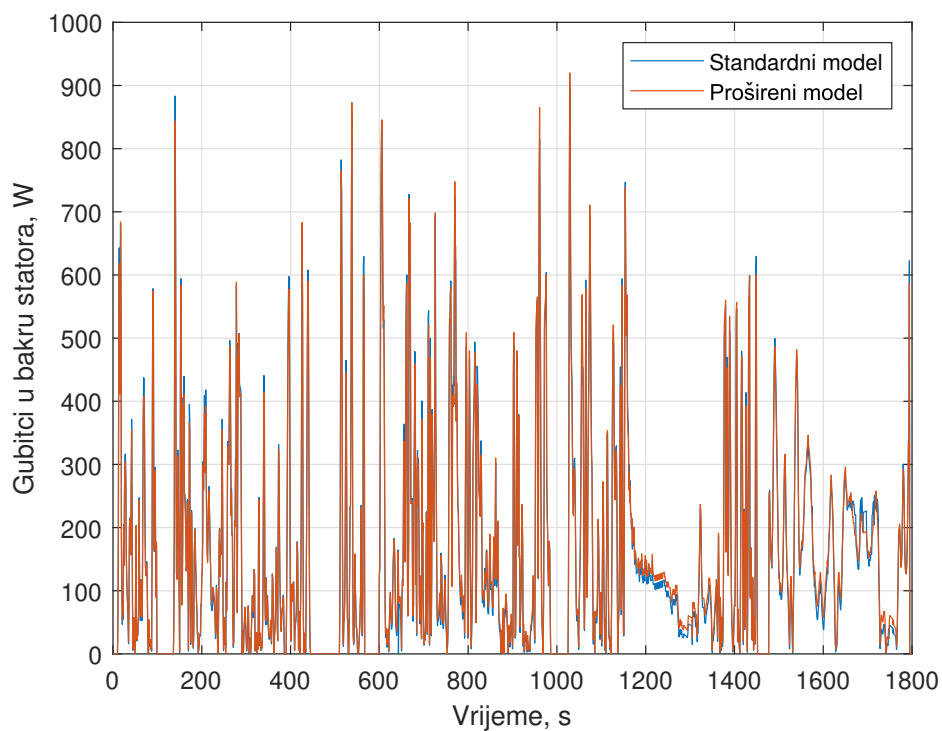
Slika 3.58. Ukupni gubitci



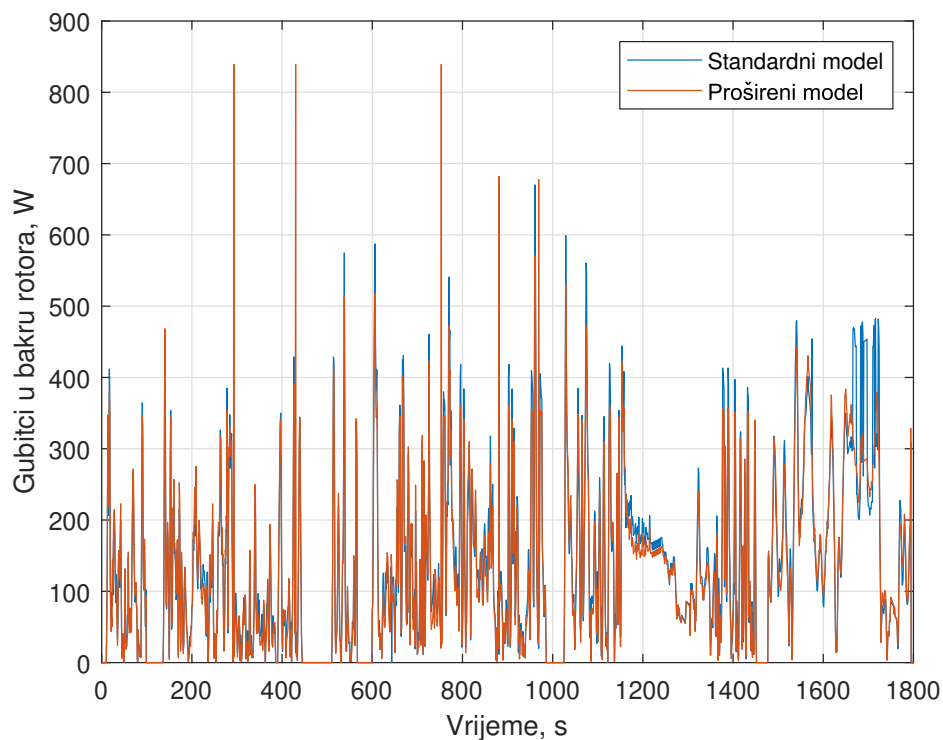
Slika 3.59. Gubitci u željezu



Slika 3.60. Gubitci u bakru



Slika 3.61. Gubitci u bakru statora



Slika 3.62. Gubitci u bakru rotora

Tablica 3.19. Sumarni prikaz analize ciklusa WLTP Class 3

Parametar	Standardni model	Prošireni model
Prosječna korisnost (po potrošnji energije), %	93,13	93,43
Prosječna korisnost (točka po točka), %	89,97	90,85
Ulazna električna energija, Wh	3061,90	3053,40
Motorska energija na vratilu, Wh	2860,90	2863,10
Vraćena električna energija, Wh	627,15	628,41
Generatorska energija na vratilu, Wh	683,67	683,72
Ukupni gubitci, Wh	257,50	245,67
Gubitci u bakru statora, Wh	75,41	76,48
Gubitci u željezu, Wh	115,15	103,67
Gubitci u bakru rotora, Wh	66,94	65,52
Udio motorskog rada, %	71,92	71,92
Udio generatorskog rada, %	28,08	28,08

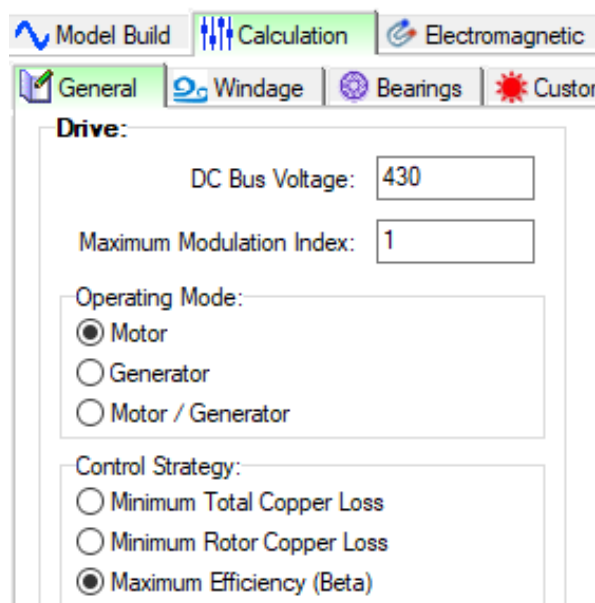
Tablica 3.20. Trajanje proračuna

Ciklus	Standardni model	Prošireni model	Omjer trajanja
JPN10	1,3 s	7,5 s	5,8
WLTP Class 3	14,8 s	1m 12s	4,9

Ponovno su vidljive od već ranije poznate razlike između standardnog i proširenog modela. Ukupne razlike u na primjer ulaznoj električnoj energiji između modela su ispod 0,5% pa je ako je potrebno izrazito brzo vrijeme izvođenja algoritma dovoljno koristiti standardni model (vrlo vjerojatno i za većinu drugih primjena).

4. Usporedba *Matlab* i *Motor-CAD* rezultata

U ovom se poglavlju daje usporedba rezultata dobivenih *Matlab* kodom i korištenjem *Motor-CAD Lab-a*. Specifikacije modela stroja dane su u tablici 3.1., a specifikacije računala u tablici 3.2. Vrijeme proračuna *Matlab* funkcija je mjereno funkcijama *tic* i *toc*, a vrijeme proračuna *Motor-CAD* kartica zapornom urom od pritiska na gumb *Calculate Performance* do kraja proračuna (pojava prozora koji pokreće crtanje grafova ili u slučaju *Operating Point-a* do pojave rezultata).



Slika 4.1. Odabir režima rada i kontrolne strategije u *Motor-CAD Lab-u*

4.1. Operating Point

U ovom se potpoglavlju uspoređuju rezultati *Motor-CAD* kartice *Operating Point* i *Matlab* funkcije *OperatingPoint*. Slika *Motor-CAD Lab Operating Point* kartice već je prije dana na slici 2.3.

4.1.1. Način rada: Torque

U svim proračunima je korištena strategija minimizacije ukupnih gubitaka (*MinTotalLoss*) jer daje najbolje rješenje. U tablici 2.1. su dani gubici koje *Matlab* računa za različite strategije upravljanja, a u tablici 4.1. su dani gubici koje računa *Motor-CAD Lab* za različite strategije upravljanja. Iz tablica je vidljivo da je razlika u gubiticima u programu *Motor-CAD* manja za različite strategije upravljanja nego u *Matlab-u*. Prikazani su rezultati analize četiri radne točke, dvije od kojih su motorske i dvije koje su generatorske, za svaki režim odabrana je jedna točka koju je moguće ostvariti i jedna koju nije moguće ostvariti bez premašivanja dozvoljene naponske razine. U tablici 4.2. su dani rezultati proračuna radne točke u motorskom režimu koju je moguće ostvariti s raspoloživim naponom. U tablici 4.3. su dani rezultati proračuna radne točke u generatorskom režimu koju je moguće ostvariti s raspoloživim naponom. Iz tablica 4.2. i 4.3. je vidljivo da je uspješno je zadovoljen korisnički zahtjev za momentom. U tablici 4.4. su dani rezultati proračuna radne točke u motorskom režimu koju je nemoguće ostvariti bez premašivanja maksimalne dozvoljene naponske razine. U tablici 4.5. su dani rezultati proračuna radne točke u generatorskom režimu koju je nemoguće ostvariti bez premašivanja maksimalne dozvoljene naponske razine. Iz tablica 4.4. i 4.5. je vidljivo da traženi moment nije ostvaren, već je ostvaren najveći moment koji je moguće postići bez probijanja naponskog ograničenja. Omjer trajanja je definiran kao količnik proteklog vremena za proračun programa *Motor-CAD* i *Matlab* koda.

Tablica 4.1. Primjer gubitaka u stroju za različite strategije upravljanja u programu *Motor-CAD*, 100 Nm pri 3000 min⁻¹

	<i>MinTotalLoss</i>	<i>MinTotalCopperLoss</i>	<i>MinRotorCopperLoss</i>
Gubici u bakru statora, W	602	670	4517
Gubici u bakru rotora, W	736	602	0
Gubici u željezu, W	635	704	1221
Ukupni gubici, W	1973	1976	5738

Tablica 4.2. Traženo 100 Nm pri 3000 min⁻¹, ostvarivi moment pri zadanoj brzini

Parametar	Standardni model		Prošireni model	
	<i>Matlab</i>	<i>Motor-CAD</i>	<i>Matlab</i>	<i>Motor-CAD</i>
Brzina motora, min ⁻¹	3000	3000	3000	3000
Moment na vratilu, Nm	100,0	100,0	100,0	100,1
Snaga na vratilu, kW	31,42	31,43	31,42	31,45
Korisnost, %	94,18	94,09	94,30	94,23
Vršna fazna statorska struja, A	179,0	172,0	185,5	175,7
Kut vektora struje (γ), °	-5,5	-2,1	-8,3	-1,2
Uzbudna struja (I_f), A	14,0	15,0	12,9	14,5
Vršni fazni napon, V	148,4	146,7	149,9	144,6
Ulančeni tok u d osi (Ψ_d), mVs	101,1	101,0	101,4	98,0
Ulančeni tok u q osi (Ψ_q), mVs	58,0	55,3	59,8	57,0
Ukupni gubitci, W	1943	1972	1900	1926
Gubitci u bakru statora, W	652	601	700	628
Gubitci u bakru rotora, W	643	736	544	690
Gubitci u željezu, W	648	635	656	608
Elektromagnetska snaga, kW	32,06	32,06	32,07	32,06
Elektromagnetski moment, Nm	102,1	102,1	102,1	102,1
Električna snaga, kW	33,36	33,40	33,32	33,38
Trajanje proračuna	0,1 s	17,3 s	0,1 s	1m 46s
Omjer trajanja	173		1060	

Tablica 4.3. Traženo -100 Nm pri 3000 min⁻¹, ostvarivi moment pri zadanoj brzini

Parametar	Standardni model		Prošireni model	
	<i>Matlab</i>	<i>Motor-CAD</i>	<i>Matlab</i>	<i>Motor-CAD</i>
Brzina motora, min ⁻¹	3000	3000	3000	3000
Moment na vratilu, Nm	-100,0	-100,1	-100,0	-100,0
Snaga na vratilu, kW	-31,42	-31,43	-31,42	-31,42
Korisnost, %	94,11	94,05	94,23	94,16
Vršna fazna statorska struja, A	174,7	168,1	180,3	171,1
Kut vektora struje (γ), °	186,9	-176,3	189,3	-177,3
Uzbudna struja (I_f), A	13,4	14,3	12,4	13,9
Vršni fazni napon, V	143,8	142,2	145,0	140,1
Ulančeni tok u d osi (Ψ_d), mVs	101,0	101	101,3	98,3
Ulančeni tok u q osi (Ψ_q), mVs	-56,9	54,7	-58,4	55,9
Ukupni gubitci, W	1851	1870	1812	1833
Gubitci u bakru statora, W	621	575	661	595
Gubitci u bakru rotora, W	592	666	506	637
Gubitci u željezu, W	638	629	645	601
Elektromagnetska snaga, kW	-30,78	-30,80	-30,77	-30,82
Elektromagnetski moment, Nm	-98,0	-98,1	-98,0	-98,1
Električna snaga, kW	-29,57	-29,56	-29,60	-29,59
Trajanje proračuna	0,1 s	17,5 s	0,1 s	1m 44s
Omjer trajanja	175		1040	

Tablica 4.4. Traženo 100 Nm pri 10000 min⁻¹, neostvarivi moment pri zadanoj brzini

Parametar	Standardni model		Prošireni model	
	<i>Matlab</i>	<i>Motor-CAD</i>	<i>Matlab</i>	<i>Motor-CAD</i>
Brzina motora, min ⁻¹	10000	10000	10000	10000
Moment na vratilu, Nm	57,3	55,8	56,5	56,0
Snaga na vratilu, kW	60,03	58,43	59,12	58,64
Korisanost, %	94,27	93,92	94,73	94,47
Vršna fazna statorska struja, A	181,0	187,9	178,9	187,5
Kut vektora struje (γ), °	44,6	45,8	43,8	44,8
Uzbudna struja (I_f), A	16,0	16,0	16,0	16,0
Vršni fazni napon, V	248,3	248,4	248,3	248,4
Ulančeni tok u d osi (Ψ_d), mVs	23,8	15,4	23,4	16,4
Ulančeni tok u q osi (Ψ_q), mVs	53,7	56,7	53,9	56,5
Ukupni gubitci, W	3647	3784	3289	3434
Gubitci u bakru statora, W	667	718	651	715
Gubitci u bakru rotora, W	839	839	839	839
Gubitci u željezu, W	2141	2227	1799	1880
Elektromagnetska snaga, kW	62,17	60,66	60,92	60,52
Elektromagnetski moment, Nm	59,4	57,9	58,2	57,8
Električna snaga, kW	63,67	62,21	62,41	62,07
Trajanje proračuna	0,5 s	16,6 s	0,5 s	1m 42s
Omjer trajanja	33,2		204,0	

Tablica 4.5. Traženo -100 Nm pri 10000 min⁻¹, neostvarivi moment pri zadanoj brzini

Parametar	Standardni model		Prošireni model	
	<i>Matlab</i>	<i>Motor-CAD</i>	<i>Matlab</i>	<i>Motor-CAD</i>
Brzina motora, min ⁻¹	10000	10000	10000	10000
Moment na vratilu, Nm	-62,7	-60,4	-61,1	-59,9
Snaga na vratilu, kW	-65,63	-63,21	-63,96	-62,73
Korisanost, %	94,30	94,02	94,75	94,52
Vršna fazna statorska struja, A	183,9	187,6	181,2	187,3
Kut vektora struje (γ), °	136,1	134,5	137,0	135,5
Uzbudna struja (I_f), A	16,0	16,0	16,0	16,0
Vršni fazni napon, V	248,3	248,4	248,3	248,4
Ulančeni tok u d osi (Ψ_d), mVs	23,0	16,1	23,2	17,0
Ulančeni tok u q osi (Ψ_q), mVs	-55,2	56,8	-55,1	56,5
Ukupni gubitci, W	3740	3782	3355	3436
Gubitci u bakru statora, W	688	716	668	714
Gubitci u bakru rotora, W	839	839	839	839
Gubitci u željezu, W	2213	2227	1848	1883
Elektromagnetska snaga, kW	-63,42	-60,99	-62,11	-60,84
Elektromagnetski moment, Nm	-60,6	-58,2	-59,3	-58,1
Električna snaga, kW	-61,89	-59,43	-60,61	-59,29
Trajanje proračuna	0,5 s	17,1 s	0,4 s	1m 43s
Omjer trajanja	34,2		257,5	

4.1.2. Način rada: Maximum Current

Kao i za prethodni način rada prikazani su rezultati analize četiri radne točke, dvije od kojih su motorske i dvije koje su generatorske, za svaki režim odabrana je jedna točka koju je moguće ostvariti i jedna koju nije moguće ostvariti bez premašivanja dozvoljene naponske razine. U tablici 4.6. su dani rezultati proračuna radne točke u motorskom režimu koju je moguće ostvariti s raspoloživim naponom. U tablici 4.7. su dani rezultati proračuna radne točke u generatorskom režimu koju je moguće ostvariti s raspoloživim naponom. Iz tablica 4.6. i 4.7. je vidljivo da je uspješno je zadovoljen korisnički zahtjev za strujom. U tablici 4.8. su dani rezultati proračuna radne točke u motorskom režimu koju je nemoguće ostvariti bez premašivanja maksimalnog dozvoljenog napona. U tablici 4.9. su dani rezultati proračuna radne točke u generatorskom režimu koju je nemoguće ostvariti bez premašivanja maksimalnog dozvoljenog napona. Iz tablica 4.8. i 4.9. je vidljivo da tražena struja nije ostvarena, već je ostvarena najveća struja koju je moguće postići bez probijanja naponskog ograničenja.

Tablica 4.6. Traženo $I_s = 565$ A i $I_f = 16$ A Nm pri 3000 min^{-1} , motorski režim

Parametar	Standardni model		Prošireni model	
	<i>Matlab</i>	<i>Motor-CAD</i>	<i>Matlab</i>	<i>Motor-CAD</i>
Brzina motora, min^{-1}	3000	3000	3000	3000
Moment na vratilu, Nm	233,1	228,2	231,7	230,4
Snaga na vratilu, kW	73,22	71,68	72,78	72,40
Korisnost, %	89,50	89,3	89,43	89,39
Vršna fazna statorska struja, A	565,0	565,0	565,0	565,0
Kut vektora struje (γ), °	-23,9	-27,0	-23,4	-26,1
Uzbudna struja (I_f), A	16,0	16,0	16,0	16,0
Vršni fazni napon, V	215,9	217,3	215,9	217,3
Ulančeni tok u d osi (Ψ_d), mVs	126,3	131,8	125,0	130,6
Ulančeni tok u q osi (Ψ_q), mVs	112,6	108	114,1	109,4
Ukupni gubitci, W	8588	8585	8601	8591
Gubitci u bakru statora, W	6493	6493	6493	6493
Gubitci u bakru rotora, W	839	839	839	839
Gubitci u željezu, W	1256	1253	1269	1259
Elektromagnetska snaga, kW	74,47	72,94	74,05	73,66
Elektromagnetski moment, Nm	237,1	232,2	235,7	234,5
Električna snaga, kW	81,81	80,27	81,39	80,99
Trajanje proračuna	0,1 s	20,5 s	0,1 s	1m 45s
Omjer trajanja	205		1050	

Tablica 4.7. Traženo $\hat{I}_s = 565$ A i $I_f = 16$ A Nm pri 3000 min^{-1} , generatorski režim

Parametar	Standardni model		Prošireni model	
	<i>Matlab</i>	<i>Motor-CAD</i>	<i>Matlab</i>	<i>Motor-CAD</i>
Brzina motora, min^{-1}	3000	3000	3000	3000
Moment na vratilu, Nm	-241,1	-236,1	-239,8	-238,4
Snaga na vratilu, kW	-75,73	-74,19	-75,32	-74,90
Korisnost, %	88,66	88,43	88,58	88,53
Vršna fazna statorska struja, A	565,0	565,0	565,0	565,0
Kut vektora struje (γ), °	203,9	-153,0	203,3	-153,9
Uzbudna struja (I_f), A	16,0	16,0	16,0	16,0
Vršni fazni napon, V	209,6	206,6	209,5	206,6
Ulančeni tok u d osi (Ψ_d), mVs	126,3	131,8	124,8	130,7
Ulančeni tok u q osi (Ψ_q), mVs	-112,7	107,9	-114,2	109,3
Ukupni gubitci, W	8588	8585	8602	8591
Gubitci u bakru statora, W	6493	6493	6493	6493
Gubitci u bakru rotora, W	839	839	839	839
Gubitci u željezu, W	1256	1253	1270	1259
Elektromagnetska snaga, kW	-74,47	-72,93	-74,05	-73,64
Elektromagnetski moment, Nm	-237,1	-232,2	-235,7	-234,4
Električna snaga, kW	-67,14	-65,60	-66,72	-66,31
Trajanje proračuna	0,1 s	17,8 s	0,1 s	1m 46s
Omjer trajanja	178		1060	

Tablica 4.8. Traženo $\hat{I}_s = 565$ A i $I_f = 16$ A Nm pri 10000 min^{-1} , motorski režim

Parametar	Standardni model		Prošireni model	
	<i>Matlab</i>	<i>Motor-CAD</i>	<i>Matlab</i>	<i>Motor-CAD</i>
Brzina motora, min^{-1}	10000	10000	10000	10000
Moment na vratilu, Nm	57,3	55,8	56,5	56,0
Snaga na vratilu, kW	60,03	58,43	59,12	58,64
Korisnost, %	94,27	93,92	94,73	94,47
Vršna fazna statorska struja, A	181,0	187,9	178,9	187,5
Kut vektora struje (γ), °	44,6	45,8	43,8	44,8
Uzbudna struja (I_f), A	16,0	16,0	16,0	16,0
Vršni fazni napon, V	248,3	248,4	248,3	248,4
Ulančeni tok u d osi (Ψ_d), mVs	23,8	15,4	23,4	16,4
Ulančeni tok u q osi (Ψ_q), mVs	53,7	56,7	53,9	56,5
Ukupni gubitci, W	3647	3784	3289	3435
Gubitci u bakru statora, W	667	718	651	7153
Gubitci u bakru rotora, W	839	839	839	8392
Gubitci u željezu, W	2141	2227	1799	1880
Elektromagnetska snaga, kW	62,17	60,66	60,92	60,52
Elektromagnetski moment, Nm	59,4	57,9	58,2	57,8
Električna snaga, kW	63,67	62,21	62,41	62,07
Trajanje proračuna	0,1 s	17,9 s	0,1 s	1m 43s
Omjer trajanja	179		1030	

Tablica 4.9. Traženo $\hat{I}_s = 565$ A i $I_f = 16$ A Nm pri 10000 min^{-1} , generatorski režim

Parametar	Standardni model		Prošireni model	
	<i>Matlab</i>	<i>Motor-CAD</i>	<i>Matlab</i>	<i>Motor-CAD</i>
Brzina motora, min^{-1}	10000	10000	10000	10000
Moment na vratilu, Nm	-62,7	-60,4	56,5	-59,9
Snaga na vratilu, kW	-65,63	-63,21	59,12	-62,73
Korisnost, %	94,30	94,02	94,73	94,52
Vršna fazna statorska struja, A	183,9	187,6	178,9	187,3
Kut vektora struje (γ), °	136,1	134,5	43,8	135,5
Uzbudna struja (I_f), A	16,0	16,0	16,0	16,0
Vršni fazni napon, V	248,3	248,4	248,3	248,4
Ulančeni tok u d osi (Ψ_d), mVs	23,0	16,1	23,4	17,0
Ulančeni tok u q osi (Ψ_q), mVs	-55,2	56,8	53,9	56,5
Ukupni gubitci, W	3740	3782	3289	3436
Gubitci u bakru statora, W	688	716	651	714
Gubitci u bakru rotora, W	839	839	839	839
Gubitci u željezu, W	2213	2227	1799	1883
Elektromagnetska snaga, kW	-63,42	-60,99	60,92	-60,84
Elektromagnetski moment, Nm	-60,6	-58,2	58,2	-58,1
Električna snaga, kW	-61,89	-59,43	62,41	-59,29
Trajanje proračuna	0,1 s	17,0 s	0,1 s	2m 1s
Omjer trajanja	170		1210	

4.1.3. Način rada: Current/Phase Advance

U ovom načinu rada nema optimizacije nego se za zadanu struju računaju određene veličine. Primjer motorske radne točke je dan u tablici 4.10., a primjer generatorske radne točke u tablici 4.11. U tablici 4.10. je vidljivo da kad je odabrana radna točka direktno prisutna u mapi sirovih podataka da su rezultati *Matlab* koda i programa *Motor-CAD* praktično identični (odabrana točka je prisutna u standardnom modelu) te da se rezultati razlikuju kad točka nije direktno prisutna u mapi sirovih podataka (vidljivo u proširenom modelu). To je zbog razlika u interpolaciji podataka između poznatih točaka. U tablicama 4.3., 4.5., 4.7., 4.9. i 4.11. (sve generatorske radne točke) vidljiva je greška u rezultatima programa *Motor-CAD* jer bi za radnu točku gdje je struja I_q negativna ulančeni tok u q osi trebao biti negativan, greška je samo u predznaku, ali se propagira i u na primjer proračun napona.

Tablica 4.10. Traženo $\hat{I}_s = 141,3 \text{ A}$, $\gamma = 30^\circ$ i $I_f = 8 \text{ A Nm}$ pri 1000 min^{-1}

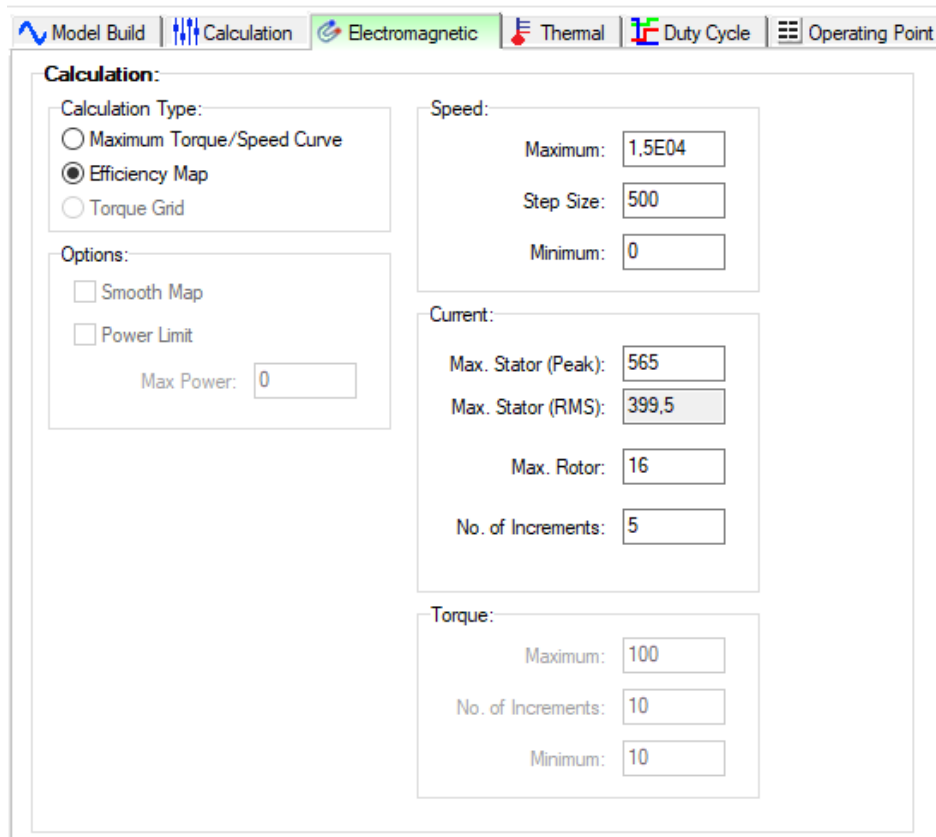
Parametar	Standardni model		Prošireni model	
	<i>Matlab</i>	<i>Motor-CAD</i>	<i>Matlab</i>	<i>Motor-CAD</i>
Brzina motora, min^{-1}	1000	1000	1000	1000
Moment na vratilu, Nm	28,8	28,8	28,9	28,8
Snaga na vratilu, kW	3,02	3,02	3,02	3,01
Korisnost, %	81,06	81,06	81,05	80,99
Vršna fazna statorska struja, A	141,3	141,3	141,3	141,3
Kut vektora struje (γ), °	30,0	30,0	30,0	30,0
Uzbudna struja (I_f), A	8,0	8,0	8,0	8,0
Vršni fazni napon, V	26,2	26,2	26,3	26,3
Ulančeni tok u d osi (Ψ_d), mVs	6,1	6,1	6,1	6,0
Ulančeni tok u q osi (Ψ_q), mVs	59,5	59,5	59,6	59,6
Ukupni gubitci, W	706	706	706	707
Gubitci u bakru statora, W	406	406	406	407
Gubitci u bakru rotora, W	210	210	210	210
Gubitci u željezu, W	90	90	90	91
Elektromagnetska snaga, kW	3,11	3,11	3,11	3,10
Elektromagnetski moment, Nm	29,7	29,7	29,7	29,6
Električna snaga, kW	3,73	3,73	3,73	3,72
Trajanje proračuna	0,1 s	17,2 s	0,1 s	1m 50s
Omjer trajanja	172		1100	

Tablica 4.11. Traženo $I_s = 141,3$ A, $\gamma = 150^\circ$ i $I_f = 8$ A Nm pri 1000 min^{-1}

Parametar	Standardni model		Prošireni model	
	<i>Matlab</i>	<i>Motor-CAD</i>	<i>Matlab</i>	<i>Motor-CAD</i>
Brzina motora, min^{-1}	1000	1000	1000	1000
Moment na vratilu, Nm	-30,6	-30,6	-30,6	-30,5
Snaga na vratilu, kW	-3,20	-3,20	-3,20	-3,20
Korisnost, %	77,94	77,94	77,94	77,87
Vršna fazna statorska struja, A	141,3	141,3	141,3	141,3
Kut vektora struje (γ), °	150,0	150,0	150,0	150,0
Uzbudna struja (I_f), A	8,0	8,0	8,0	8,0
Vršni fazni napon, V	24,0	26,0	24,0	25,9
Ulančeni tok u d osi (Ψ_d), mVs	6,1	6,1	6,1	6,0
Ulančeni tok u q osi (Ψ_q), mVs	-59,5	59,5	-59,6	59,6
Ukupni gubitci, W	706	706	706	707
Gubitci u bakru statora, W	406	406	406	406
Gubitci u bakru rotora, W	210	210	210	210
Gubitci u željezu, W	90	90	90	91
Elektromagnetska snaga, kW	-3,11	-3,11	-3,11	-3,10
Elektromagnetski moment, Nm	-29,7	-29,7	-29,7	-29,6
Električna snaga, kW	-2,49	-2,50	-2,49	-2,49
Trajanje proračuna	0,1 s	16,1 s	0,1 s	1m 59s
Omjer trajanja	161		1190	

4.2. Electromagnetic

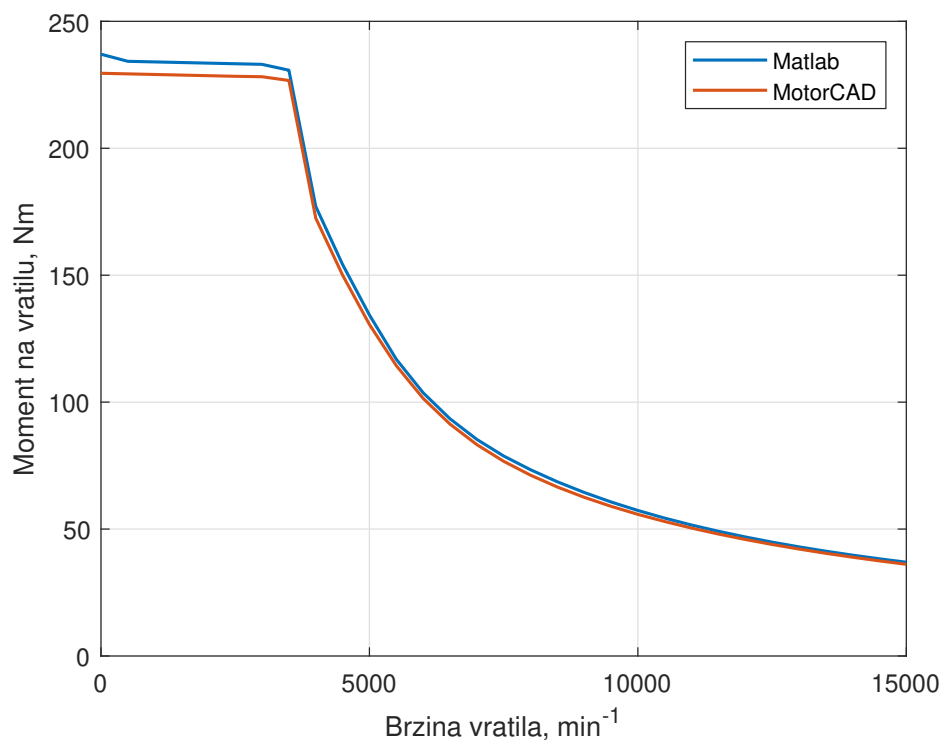
U ovom se potpoglavlju uspoređuju rezultati *Motor-CAD* kartice *Electromagnetic* i *Matlab* funkcije *Electromagnetic*.



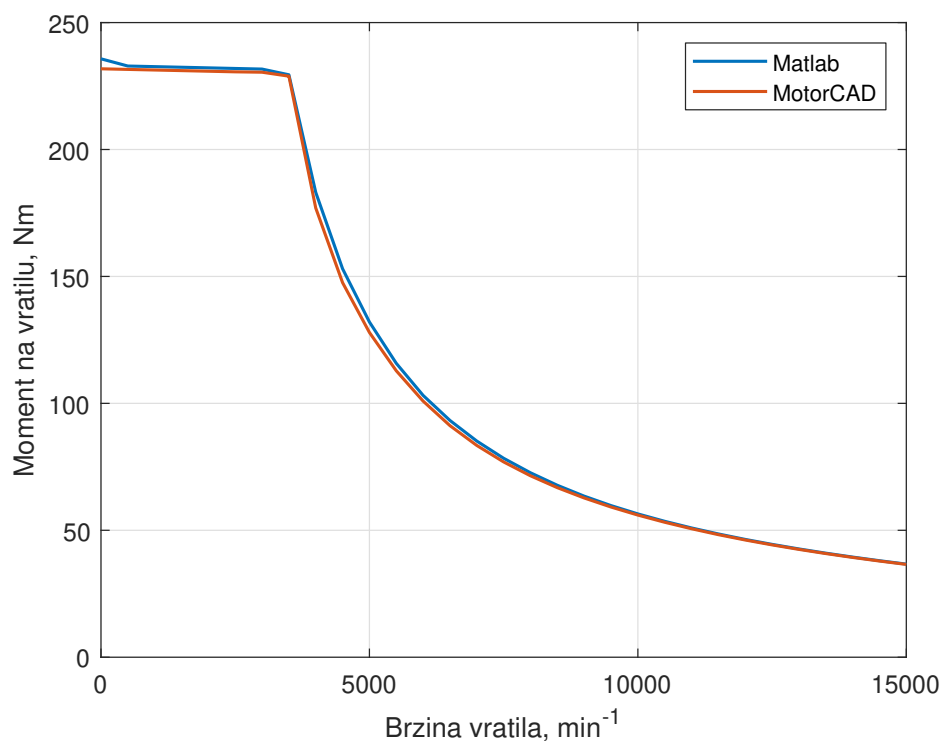
Slika 4.2. Motor-CAD Lab, Electromagnetic

4.2.1. Način rada: Maximum Torque/Speed Curve

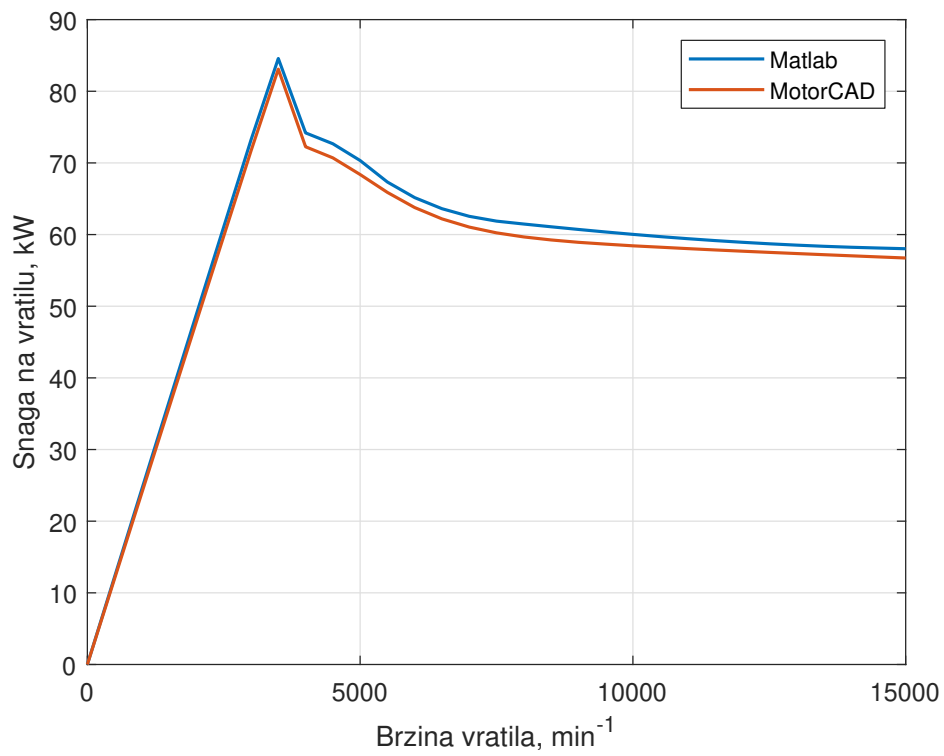
Postavke s kojima je pokrenuta *Matlab* funkcija *Electromagnetic* dane su u tablici 3.13. (nepromijenjeno u odnosu na prošlo poglavlje), *Motor-CAD* je podešen na ekvivalentne postavke. Ovdje je prikazano nekoliko grafova od interesa, motorski režim na slikama od 4.3. do 4.18., generatorski režim na slikama od 4.19. do 4.34. i objedinjeni motorski i generatorski režim na slikama od 4.35. do 4.50. Slike su dane na način da je za svaki parametar prvo dana slika za standardni model, a potom za prošireni. Na slikama 4.25. i 4.26. je vidljiv skok u kutu vektora struje u rezultatima programa *Motor-CAD* dok tog skoka nema u rezultatima *Matlab* koda. Niti jedan pristup nije pogrešan nego je stvar izbora definicije intervala kuta vektora struje. Sljedeće se slike odnose na motorski režim.



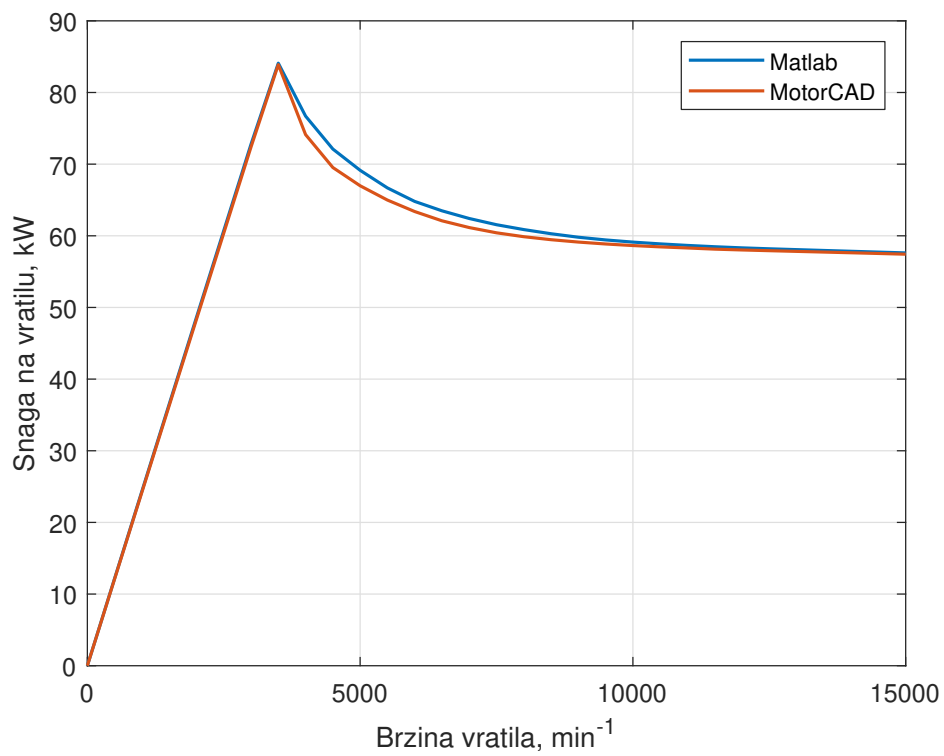
Slika 4.3. Moment na vratilu, standardni model, motorski režim



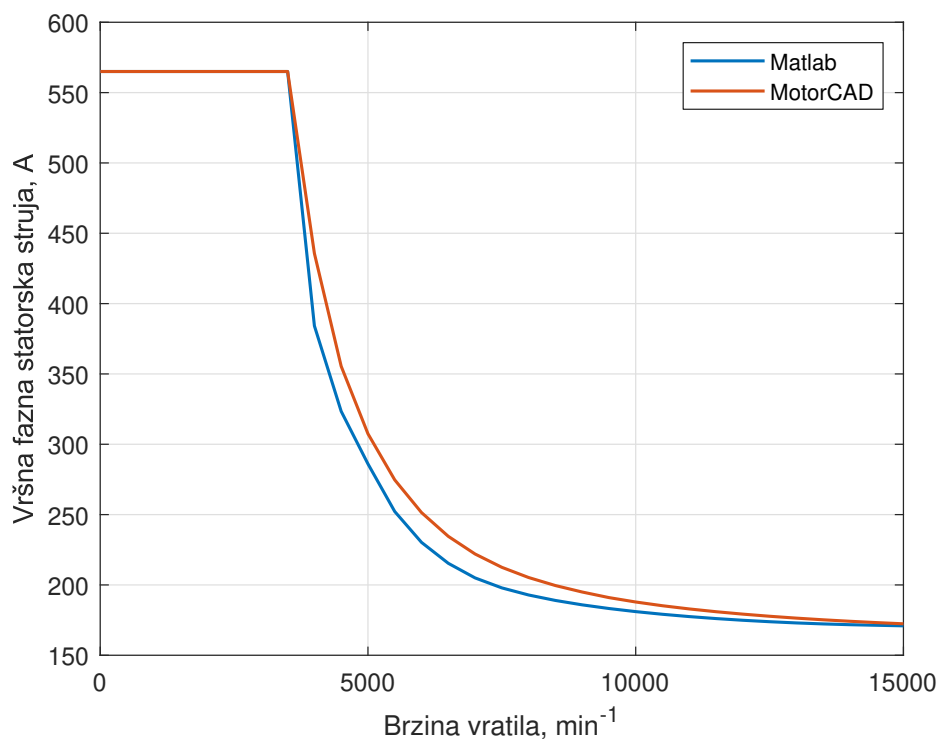
Slika 4.4. Moment na vratilu, prošireni model, motorski režim



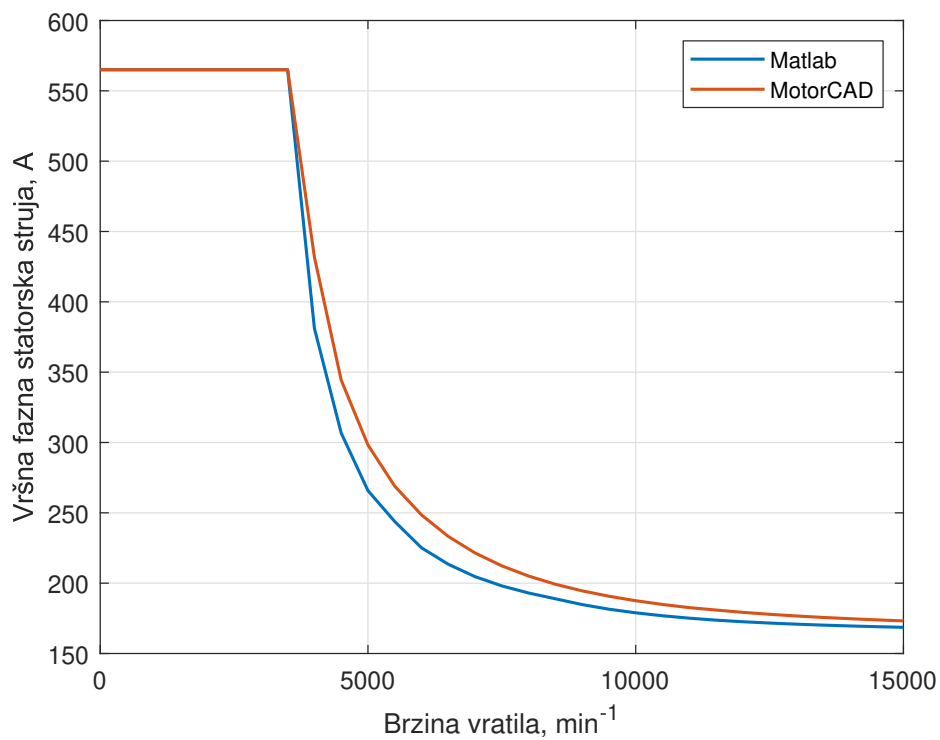
Slika 4.5. Snaga na vratilu, standardni model, motorski režim



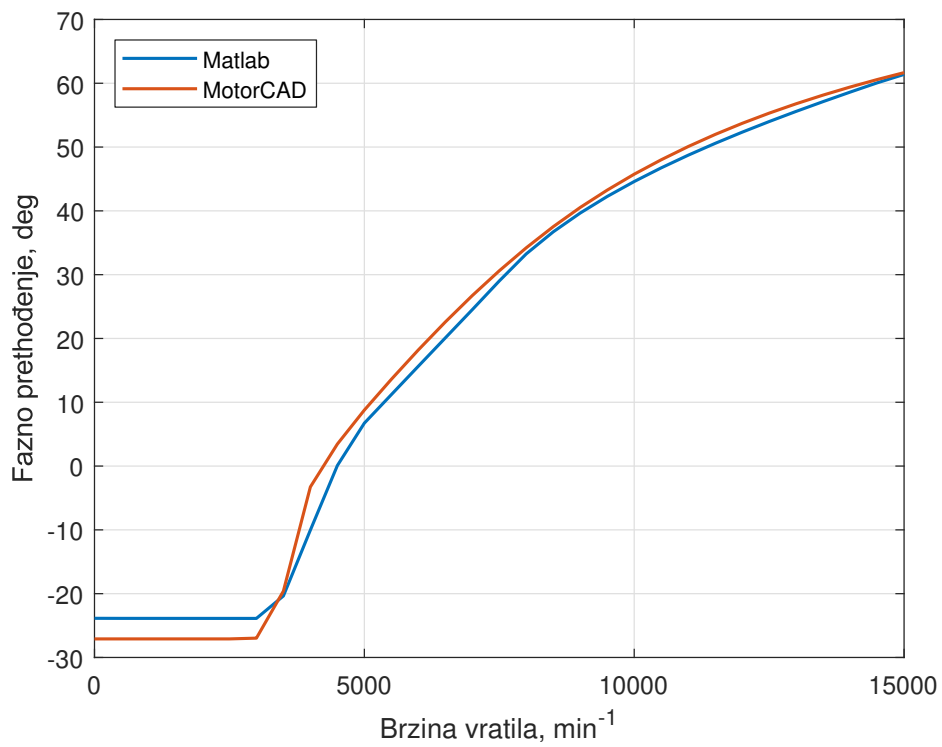
Slika 4.6. Snaga na vratilu, prošireni model, motorski režim



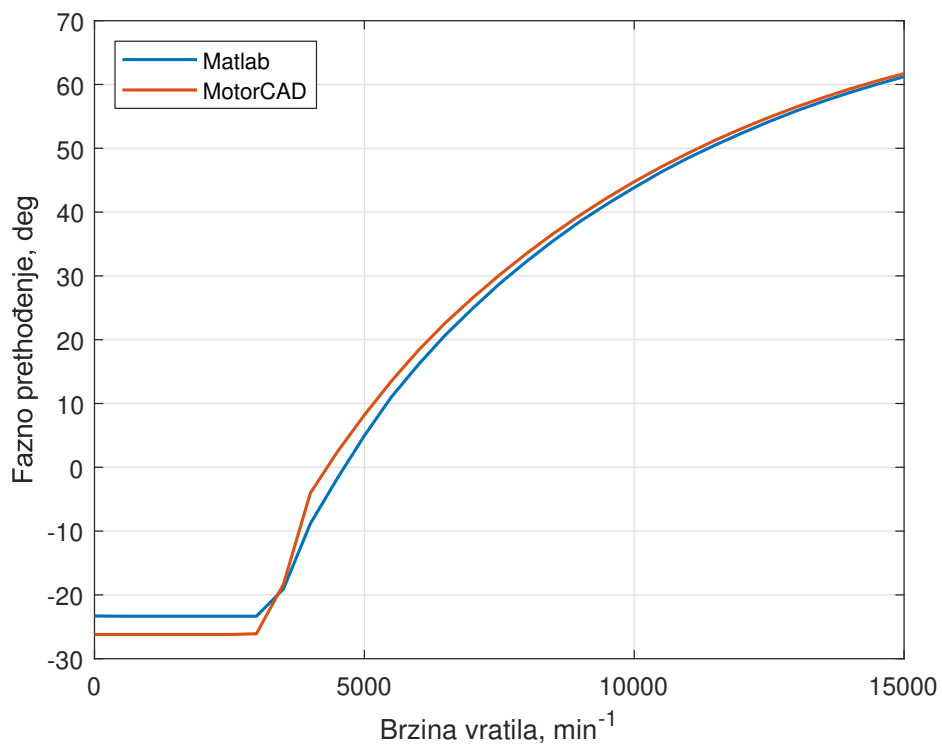
Slika 4.7. Vršna fazna staterska struja, standardni model, motorski režim



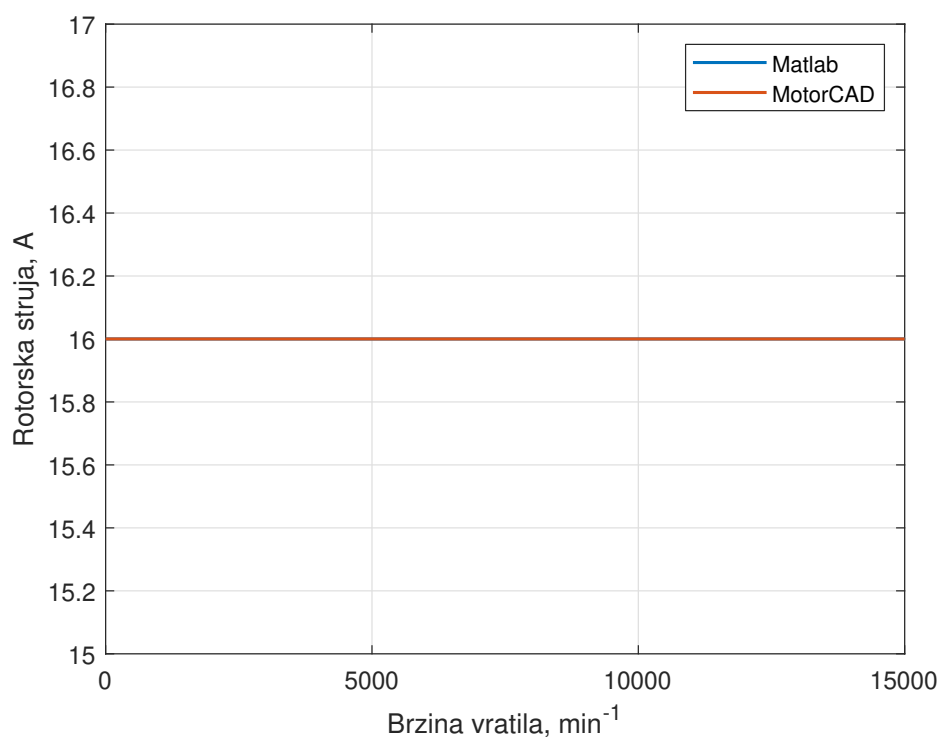
Slika 4.8. Vršna fazna staterska struja, prošireni model, motorski režim



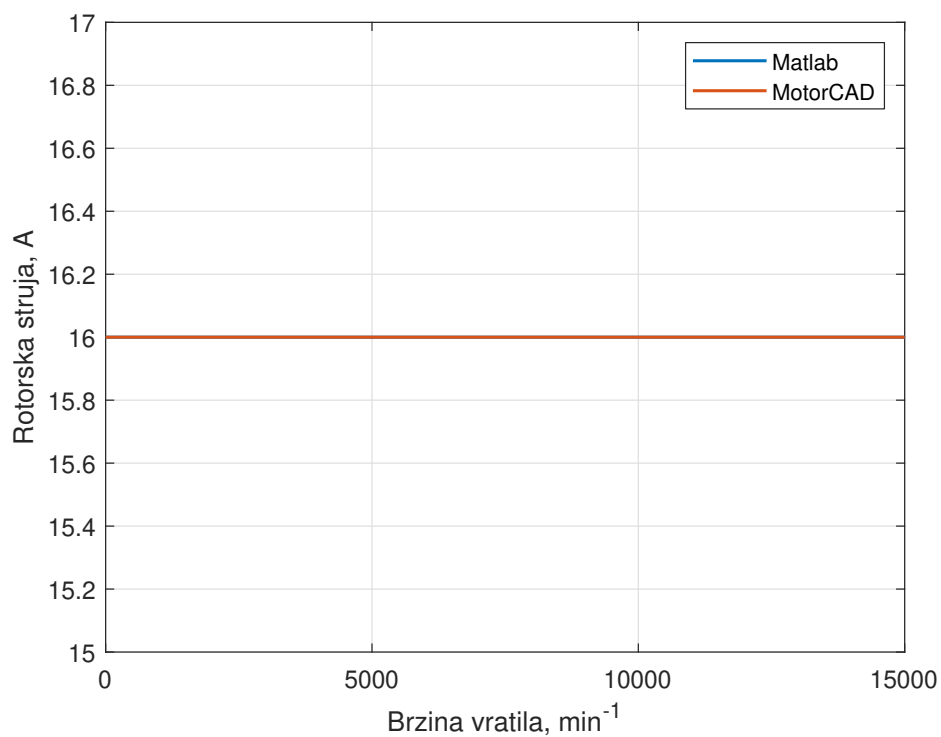
Slika 4.9. Kut vektora struje, standardni model, motorski režim



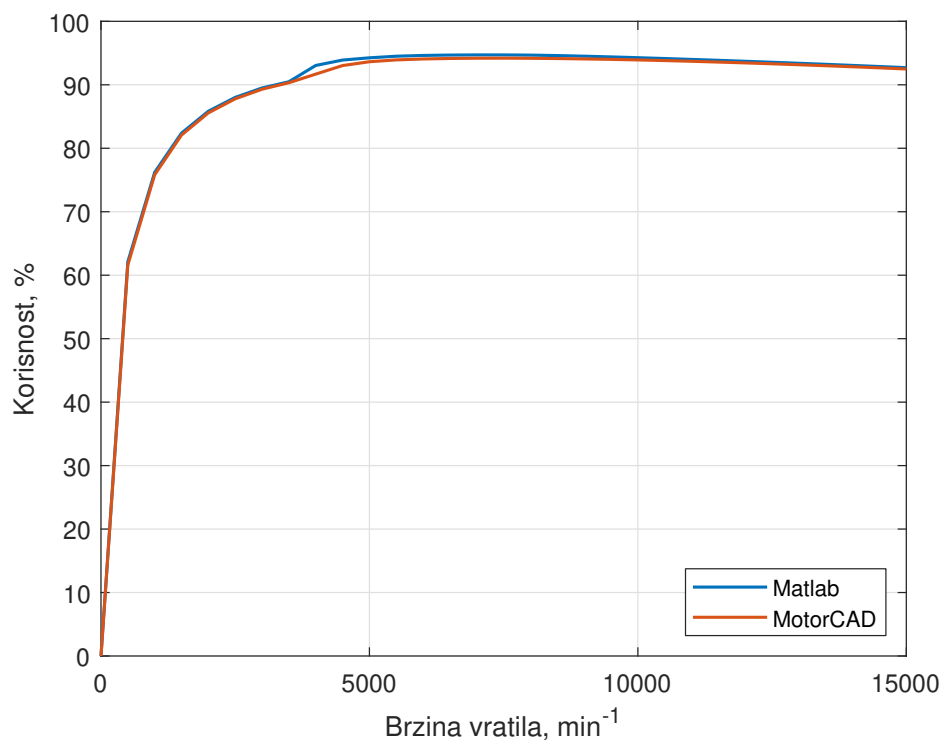
Slika 4.10. Kut vektora struje, prošireni model, motorski režim



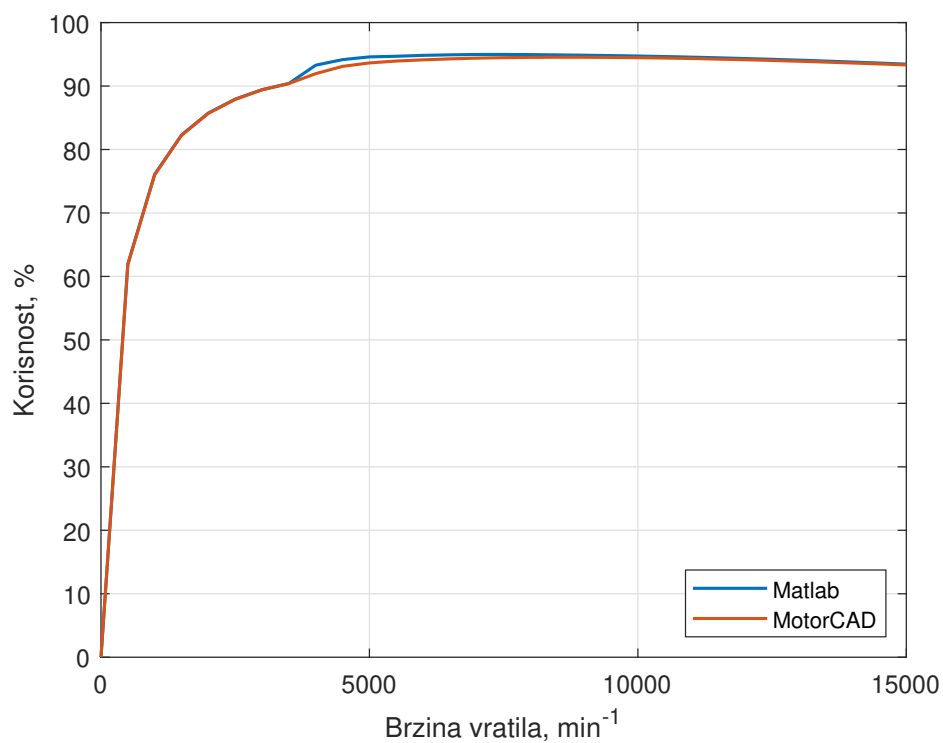
Slika 4.11. Rotorska struja, standardni model, motorski režim



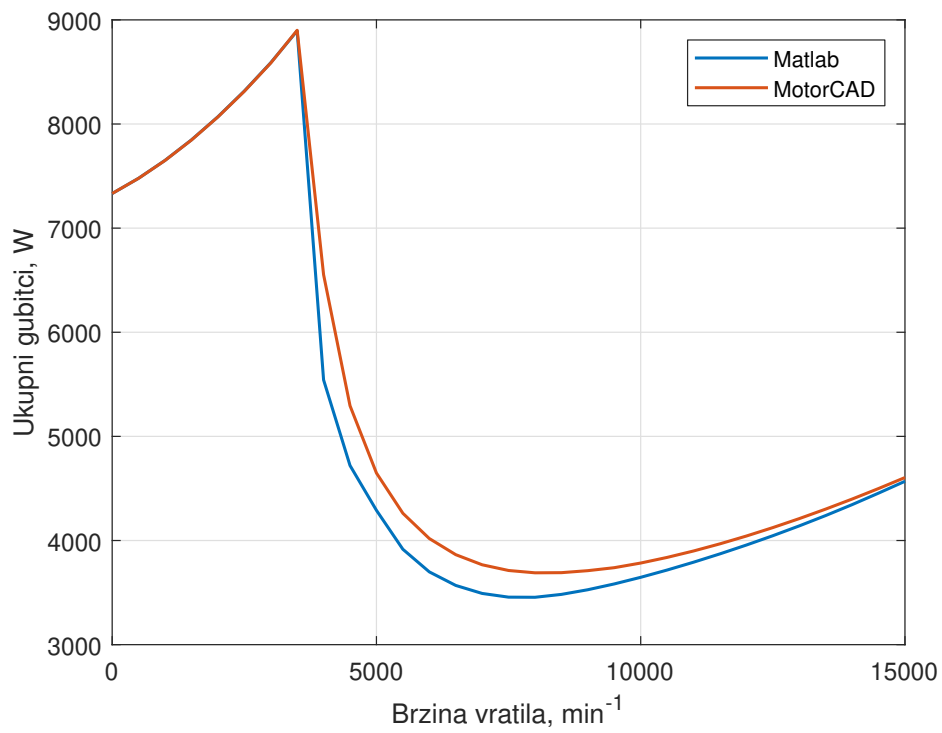
Slika 4.12. Rotorska struja, prošireni model, motorski režim



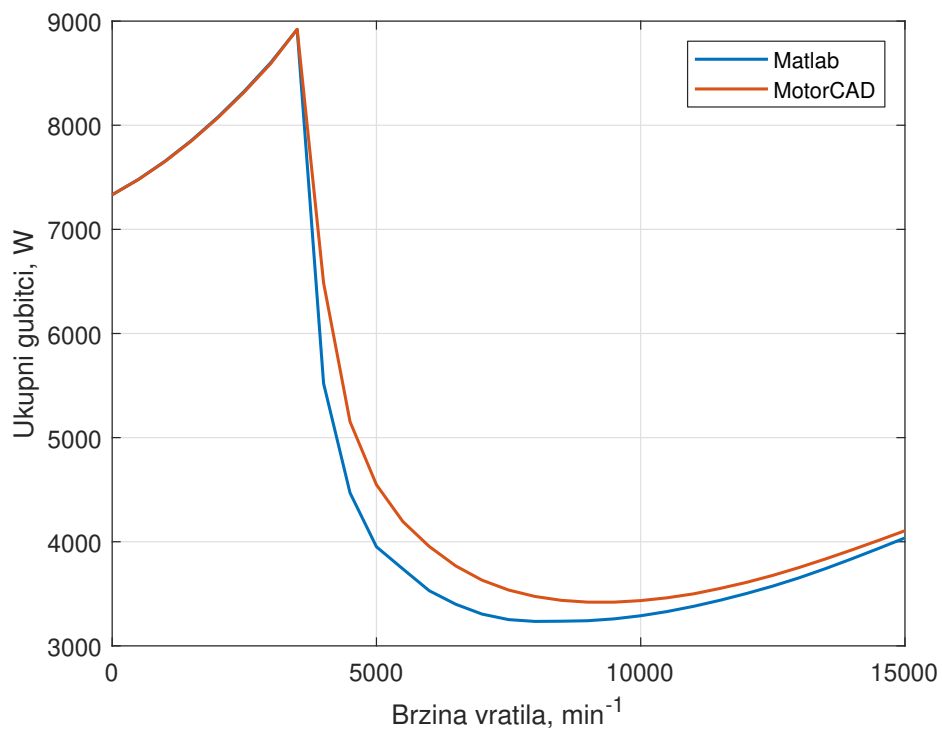
Slika 4.13. Korisnost, standardni model, motorski režim



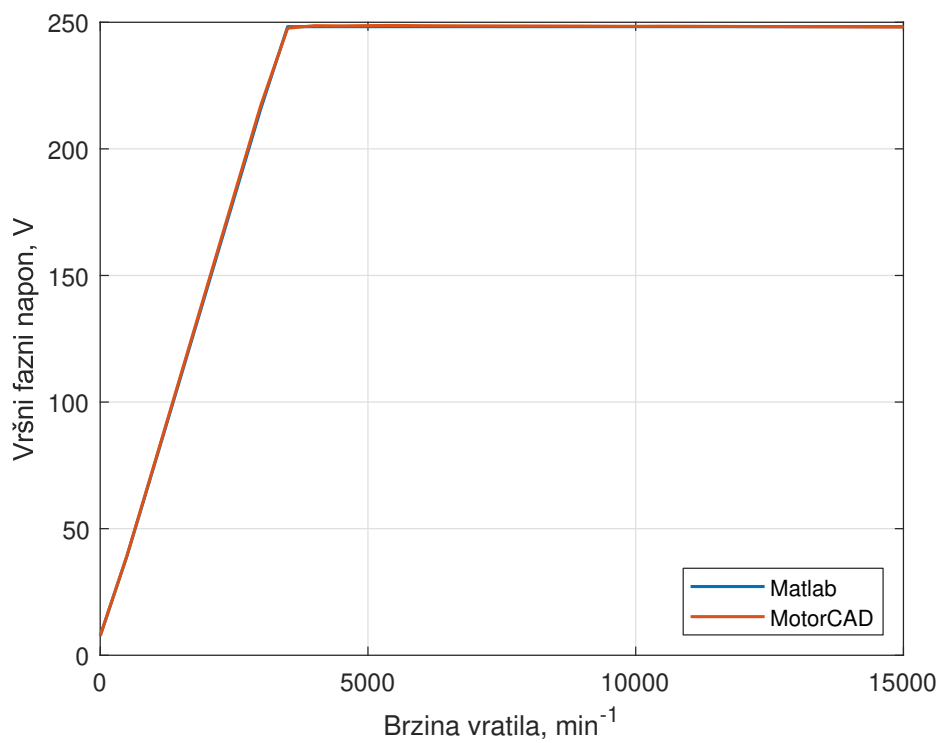
Slika 4.14. Korisnost, prošireni model, motorski režim



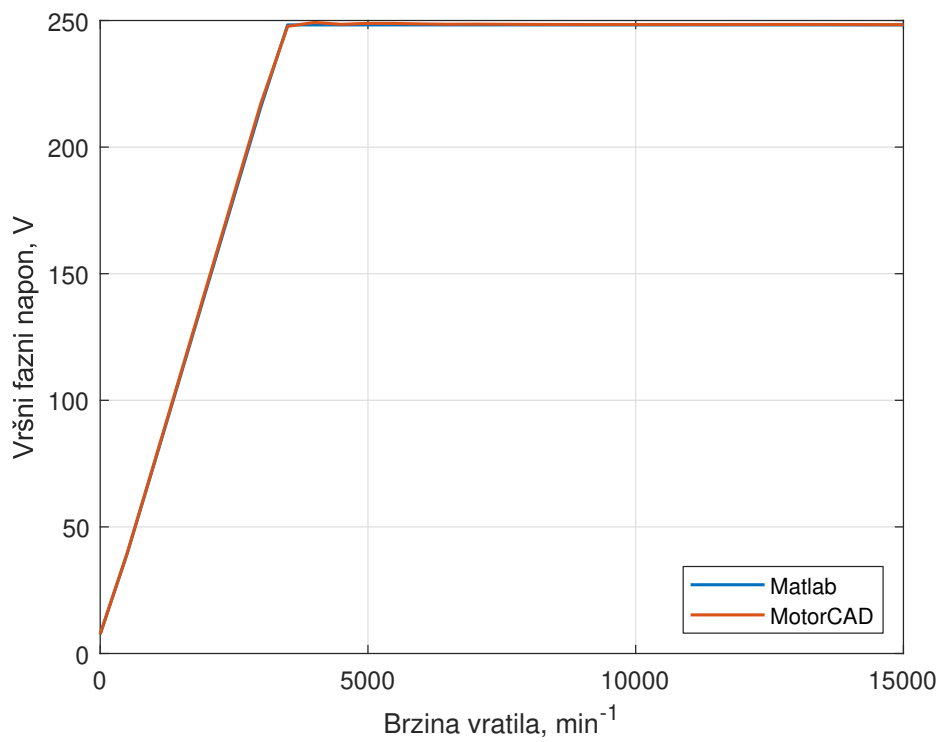
Slika 4.15. Ukupni gubitci, standardni model, motorski režim



Slika 4.16. Ukupni gubitci, prošireni model, motorski režim

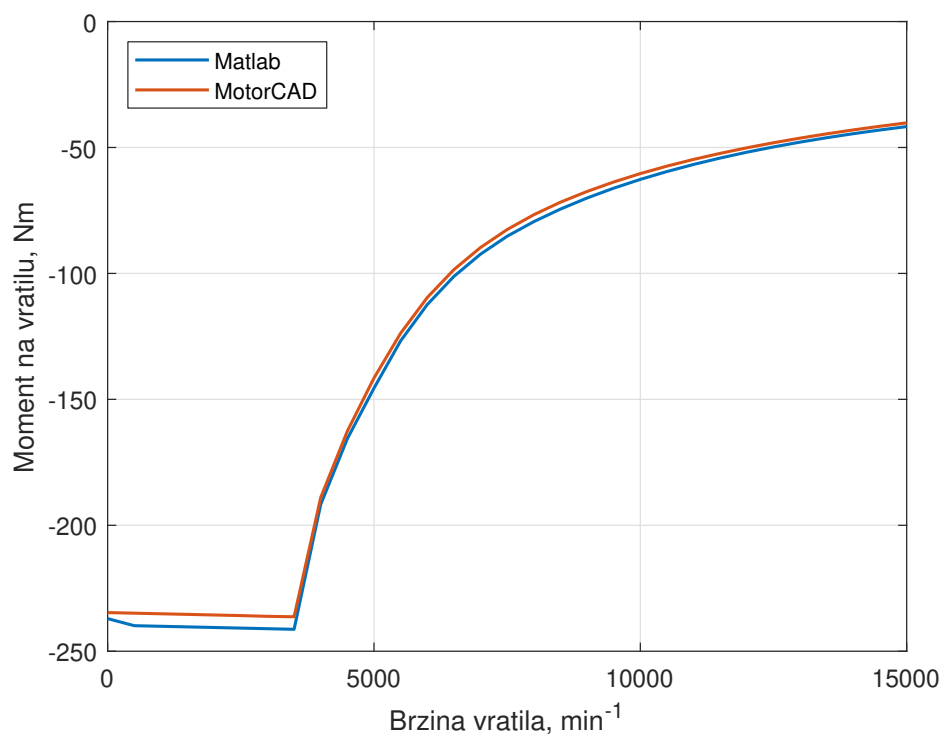


Slika 4.17. Napon, standardni model, motorski režim

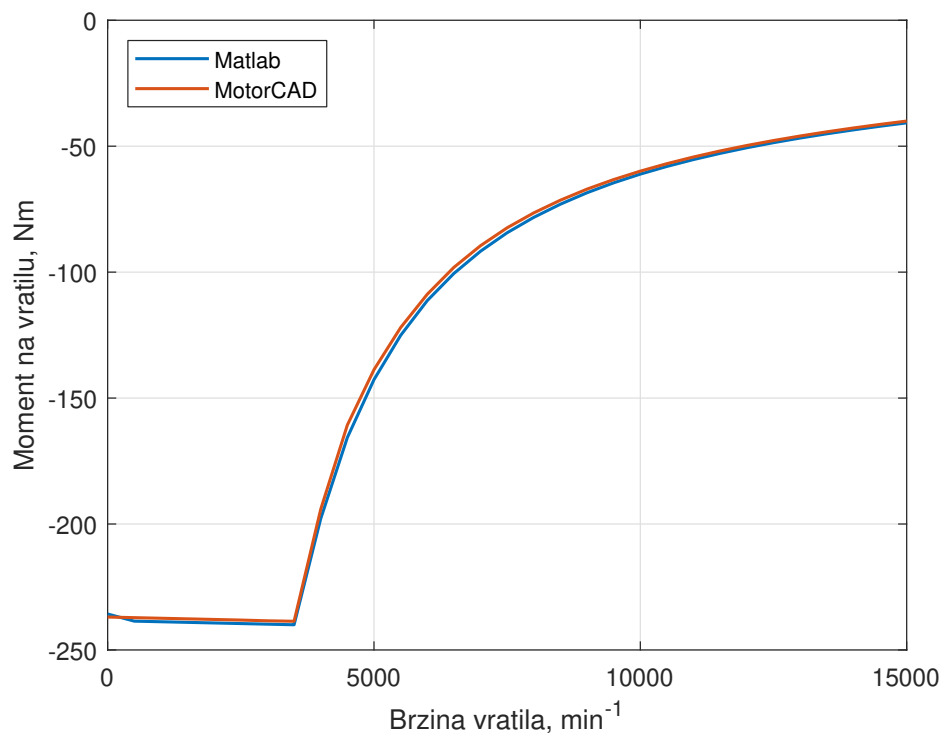


Slika 4.18. Napon, prošireni model, motorski režim

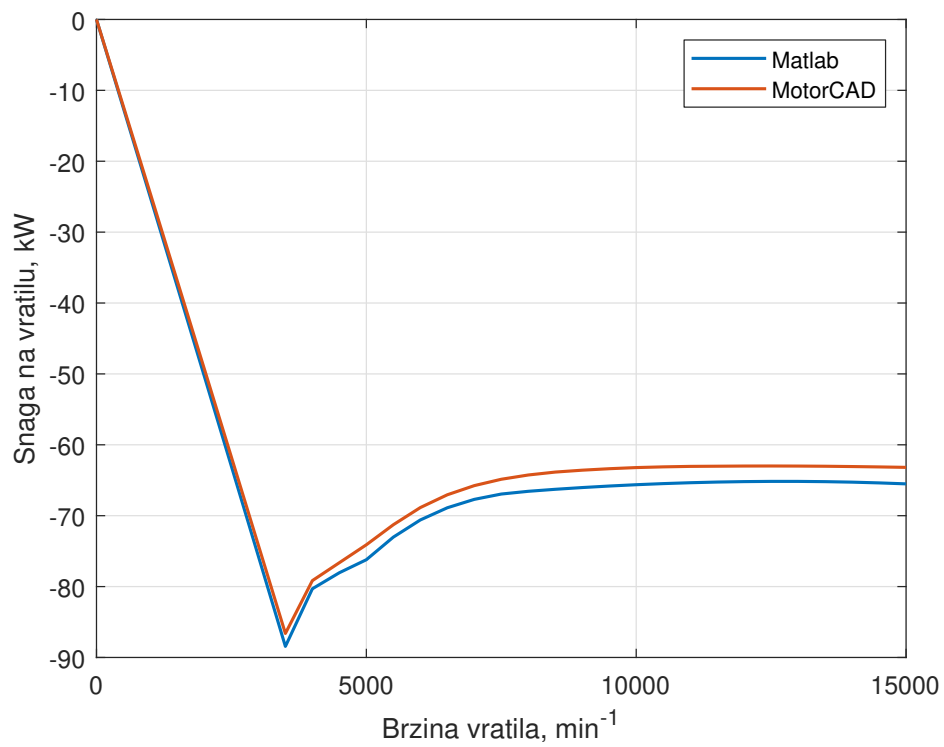
Sljedeće se slike odnose na generatorski režim.



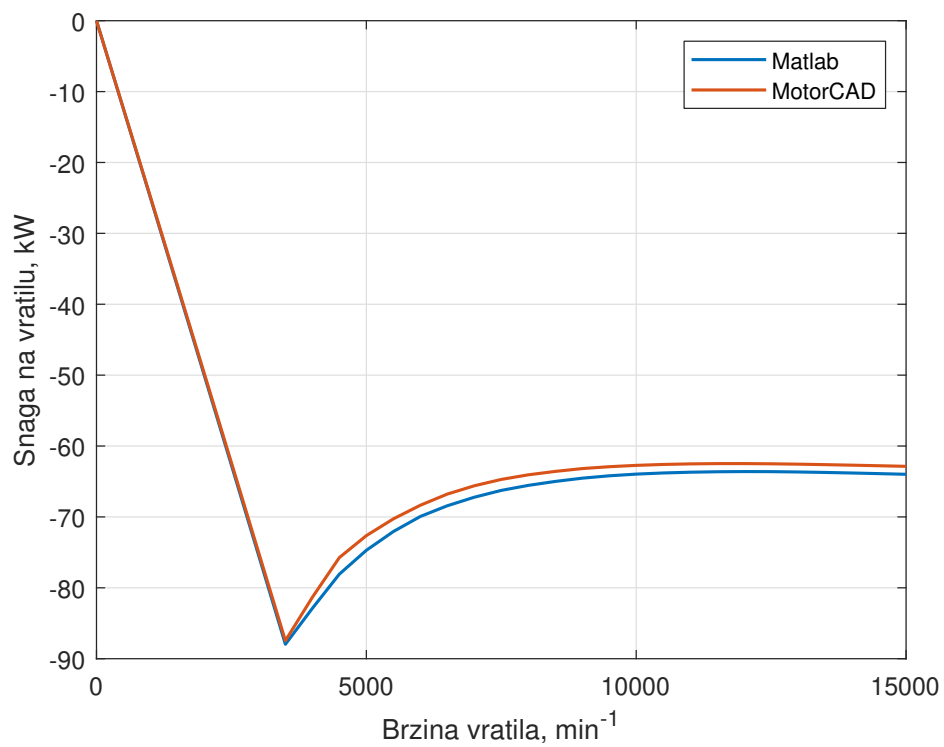
Slika 4.19. Moment na vratilu, standardni model, generatorski režim



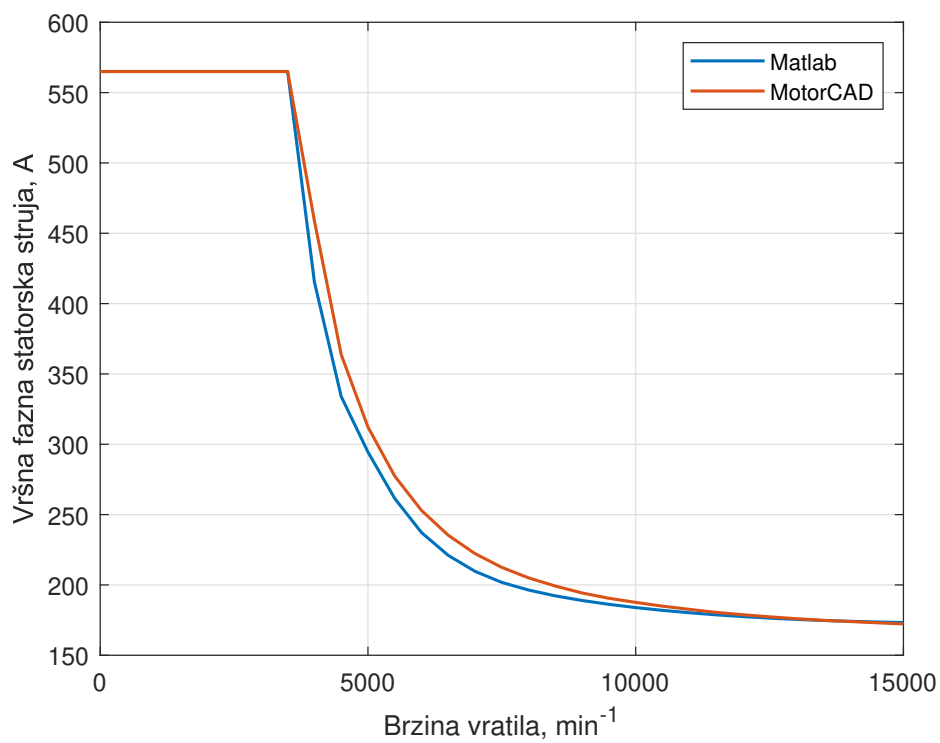
Slika 4.20. Moment na vratilu, prošireni model, generatorski režim



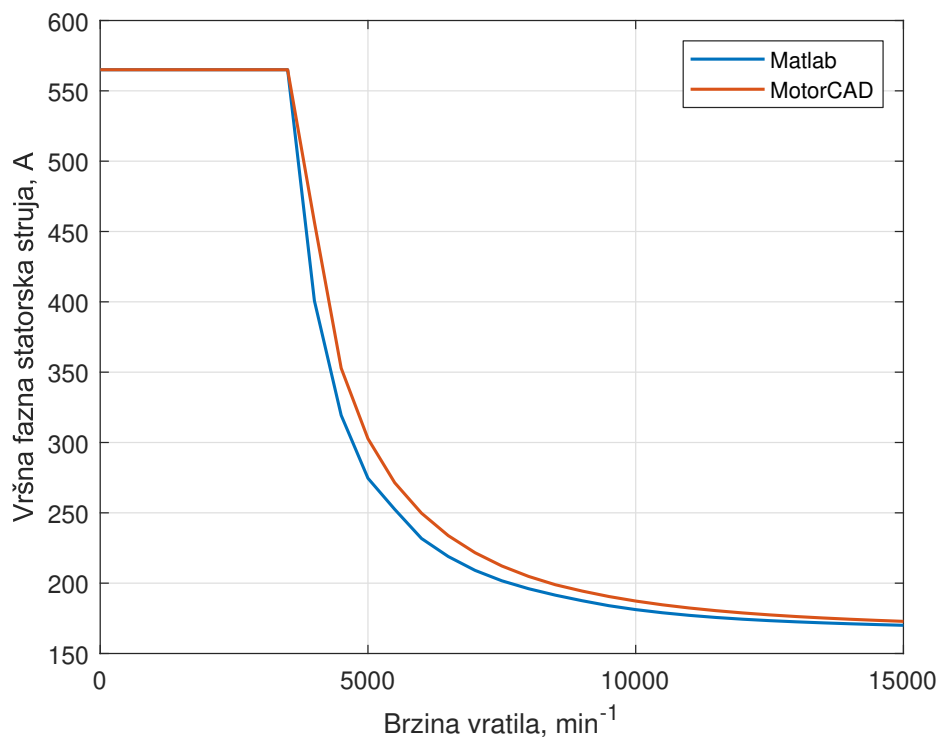
Slika 4.21. Snaga na vratilu, standardni model, generatorski režim



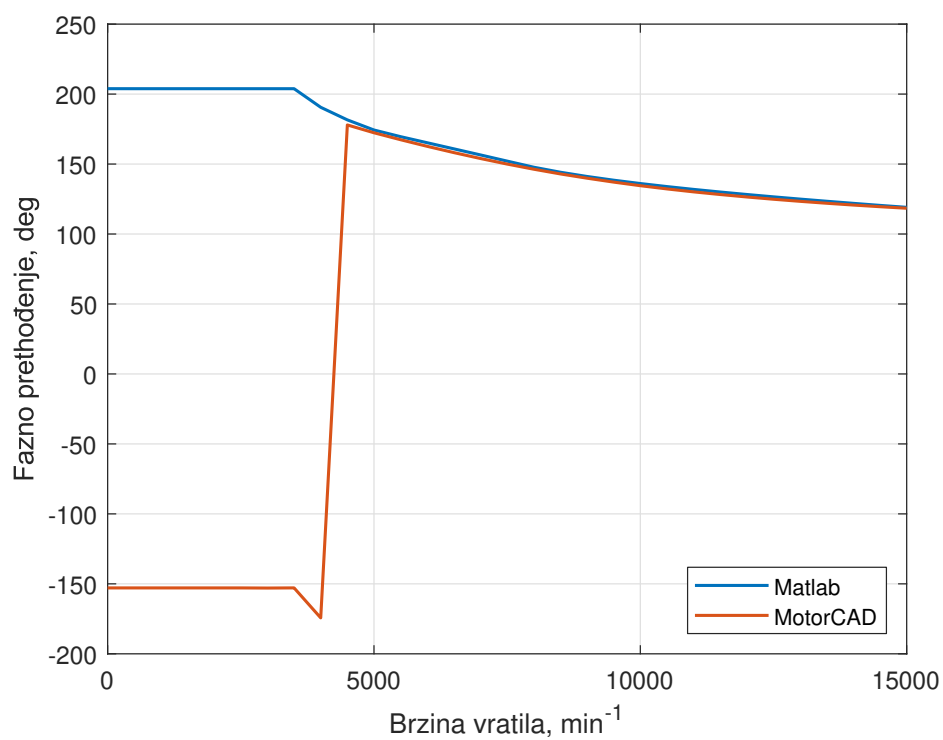
Slika 4.22. Snaga na vratilu, prošireni model, generatorski režim



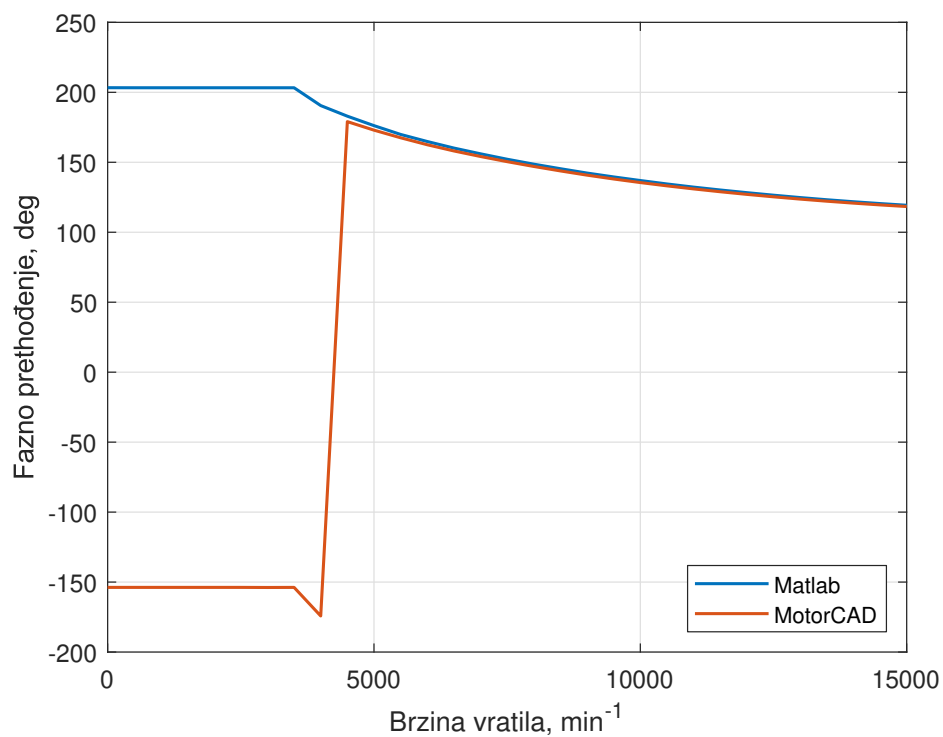
Slika 4.23. Vršna fazna staterska struja, standardni model, generatorski režim



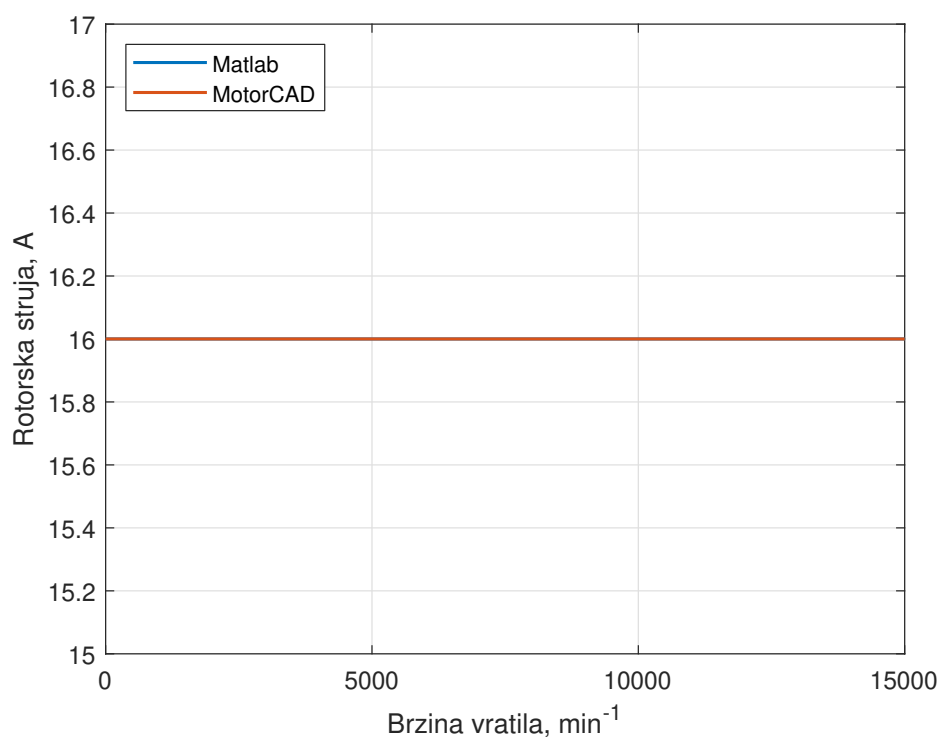
Slika 4.24. Vršna fazna staterska struja, prošireni model, generatorski režim



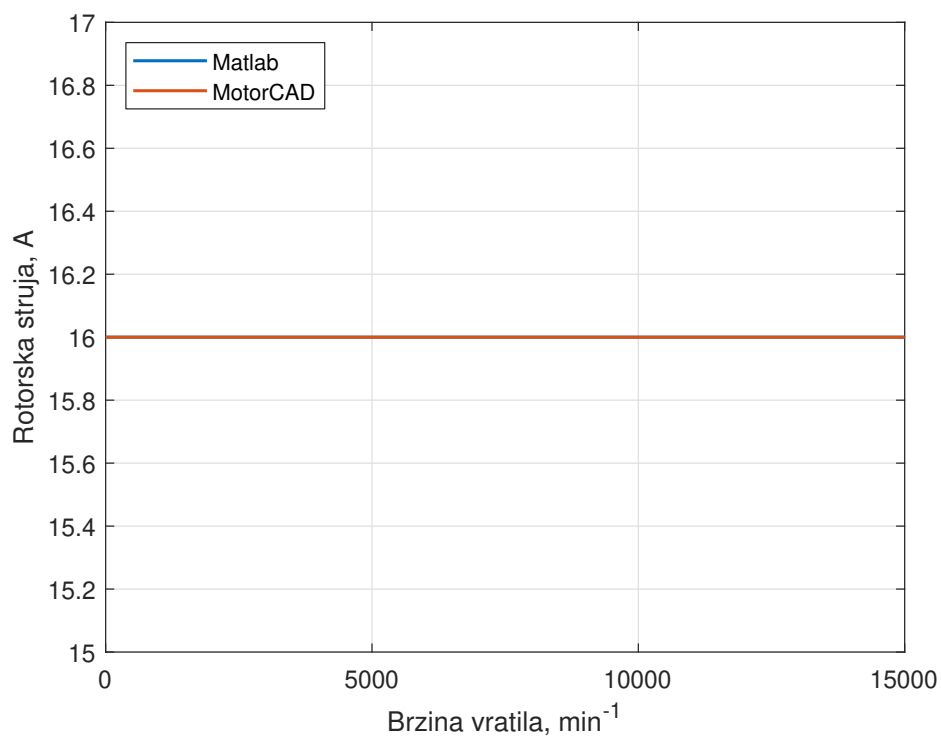
Slika 4.25. Kut vektora struje, standardni model, generatorski režim



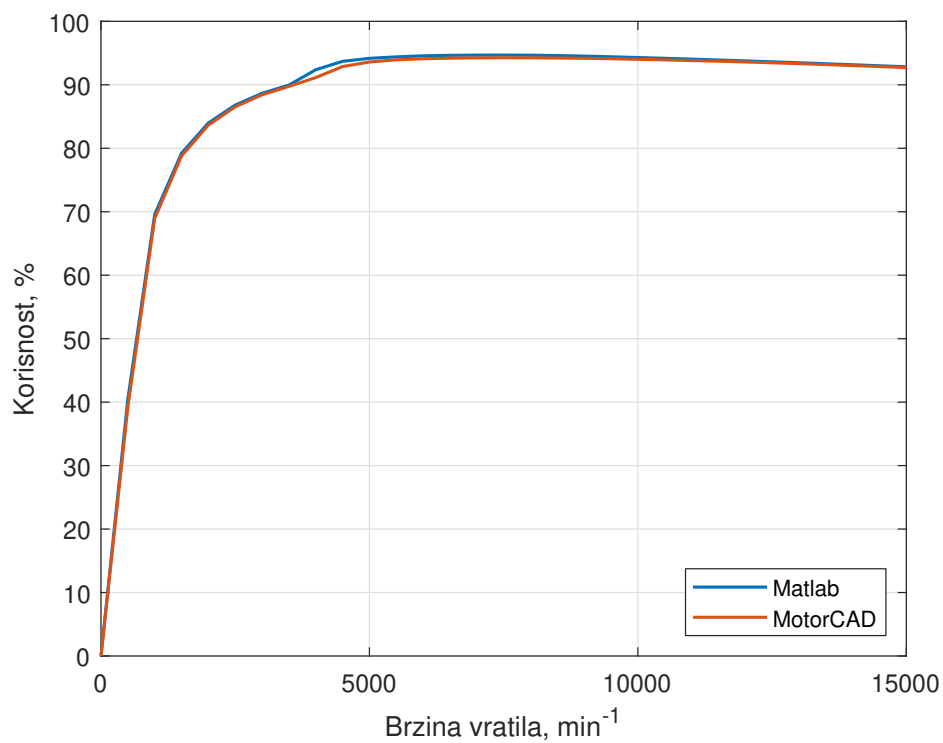
Slika 4.26. Kut vektora struje, prošireni model, generatorski režim



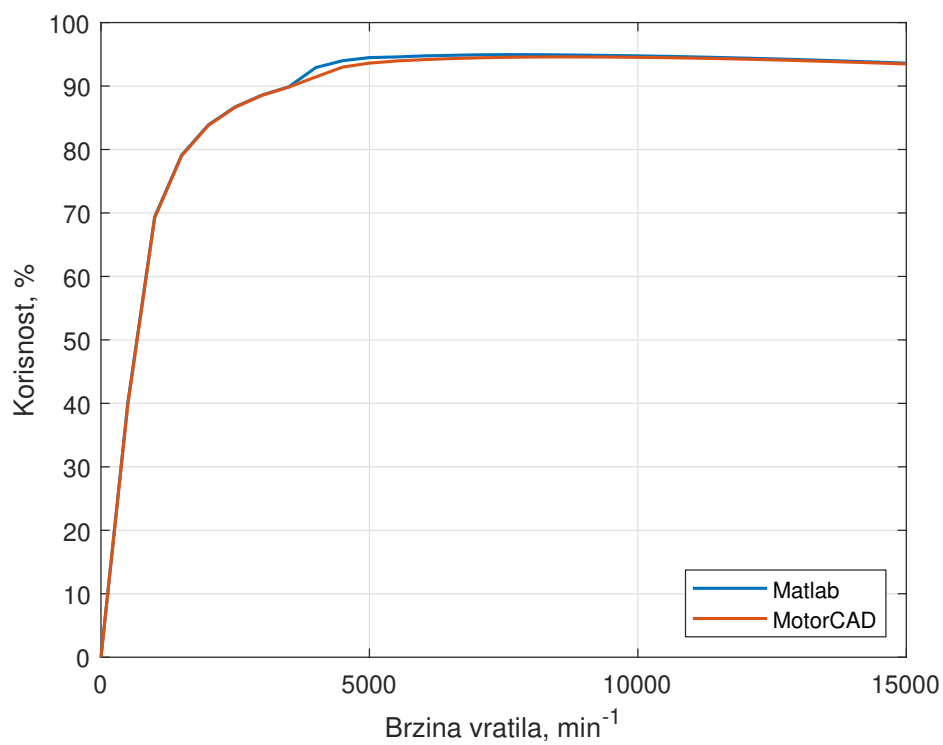
Slika 4.27. Rotorska struja, standardni model, generatorski režim



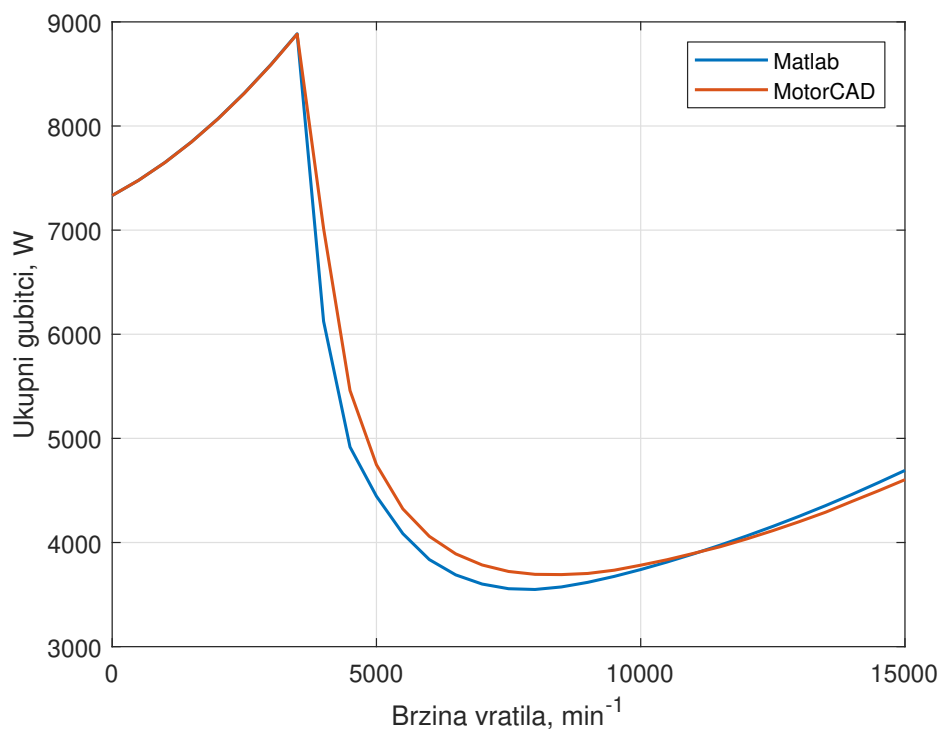
Slika 4.28. Rotorska struja, prošireni model, generatorski režim



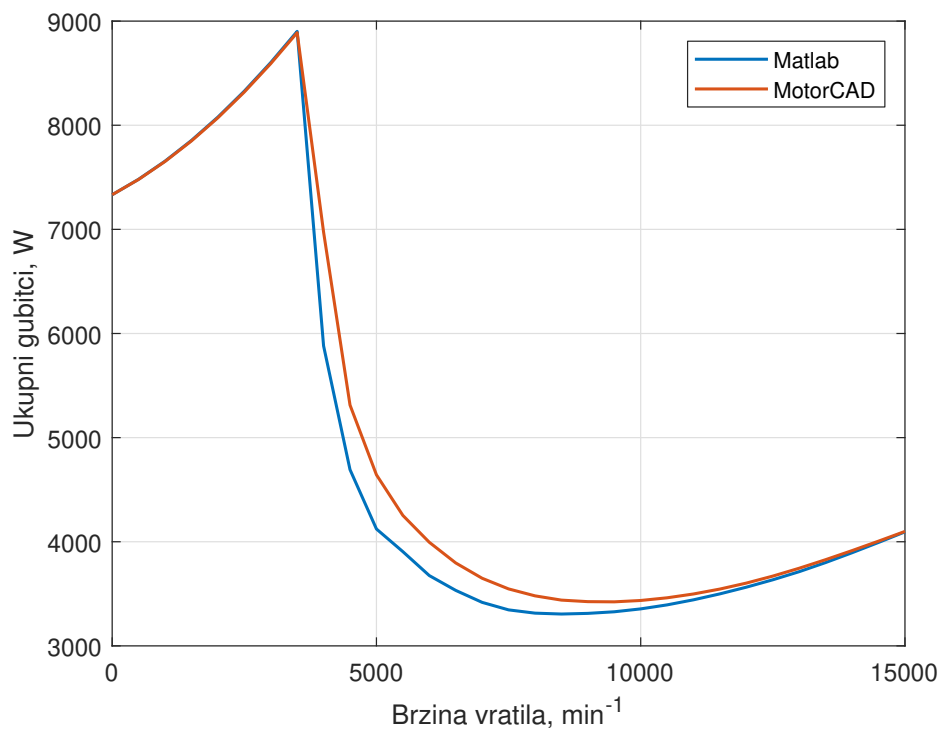
Slika 4.29. Korisnost, standardni model, generatorski režim



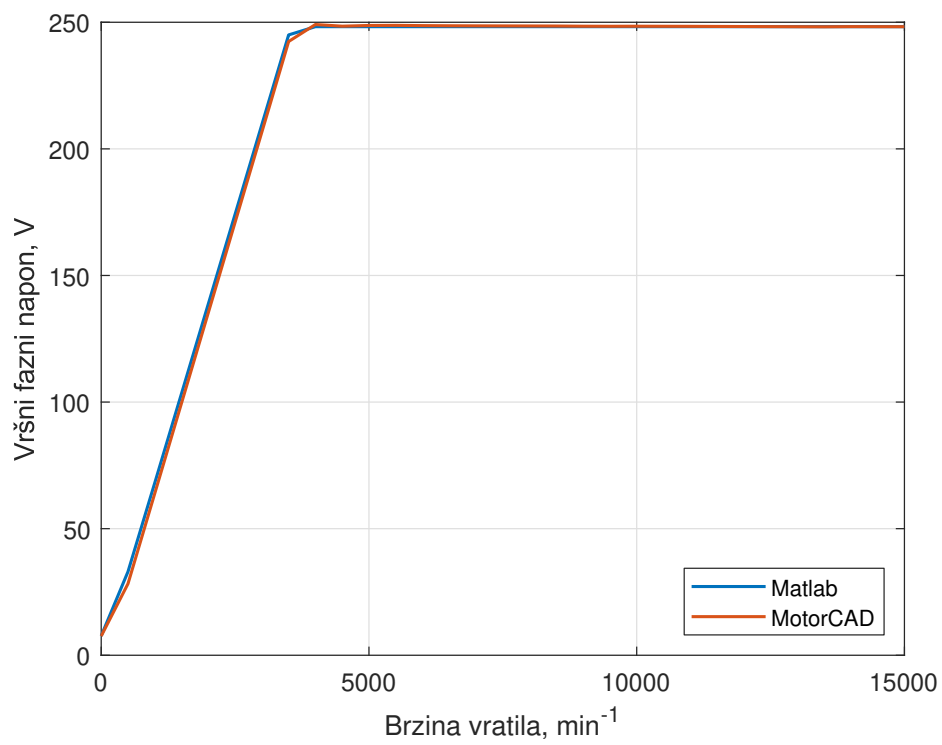
Slika 4.30. Korisnost, prošireni model, generatorski režim



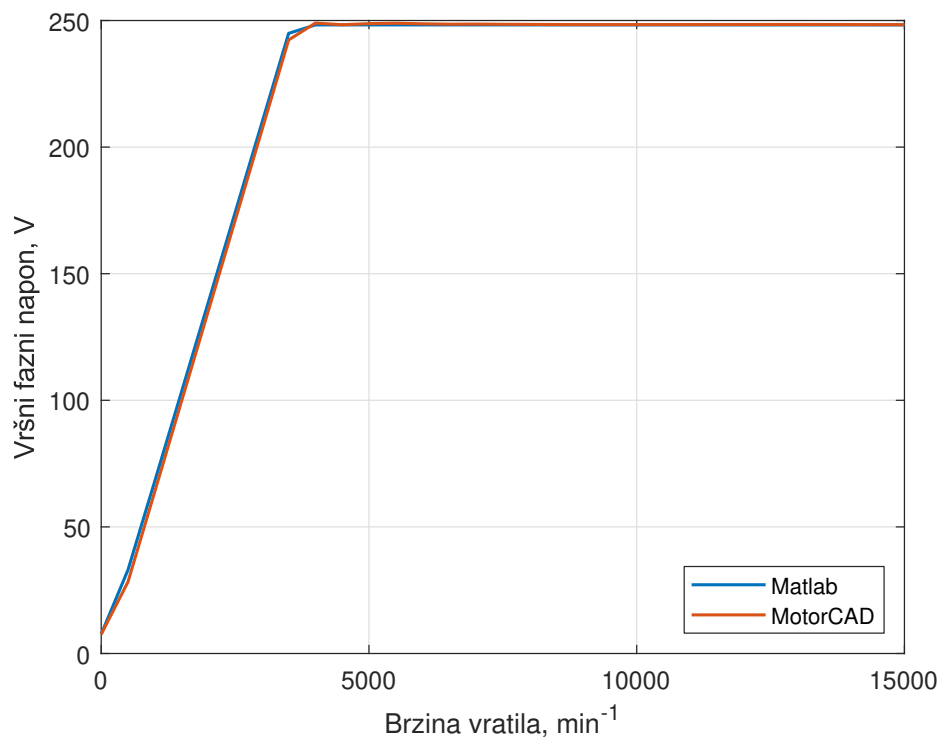
Slika 4.31. Ukupni gubitci, standardni model, generatorski režim



Slika 4.32. Ukupni gubitci, prošireni model, generatorski režim

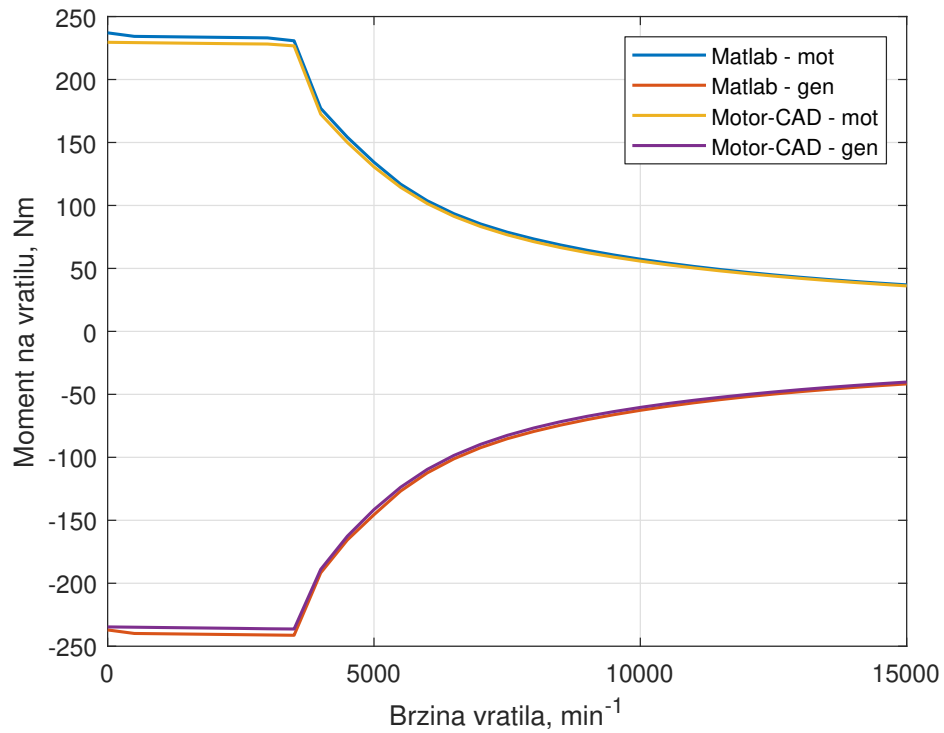


Slika 4.33. Napon, standardni model, generatorski režim

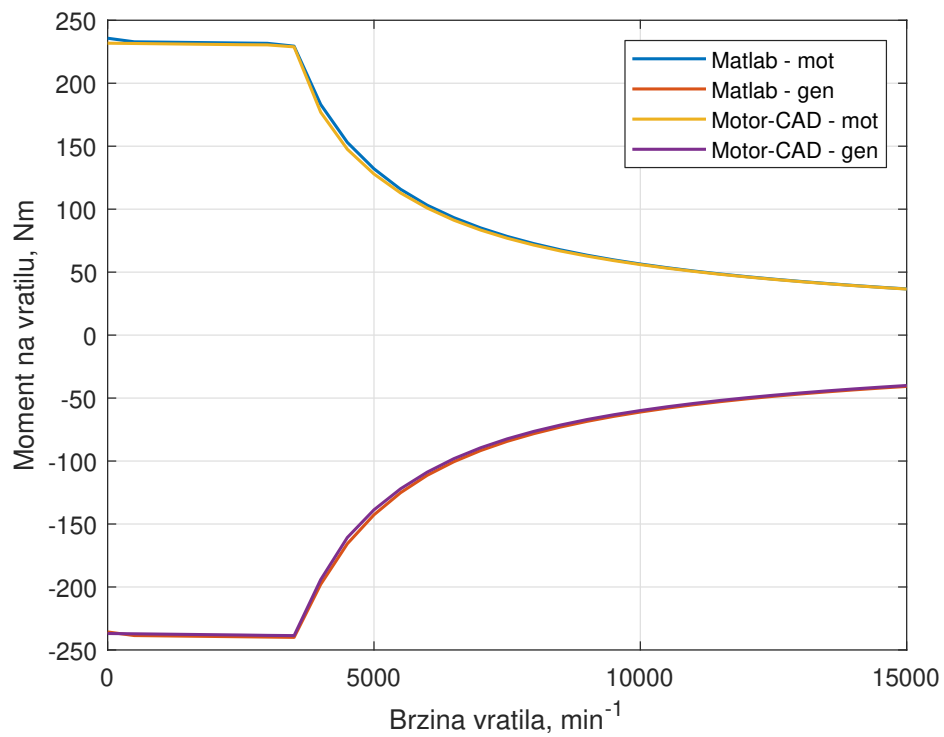


Slika 4.34. Napon, prošireni model, generatorski režim

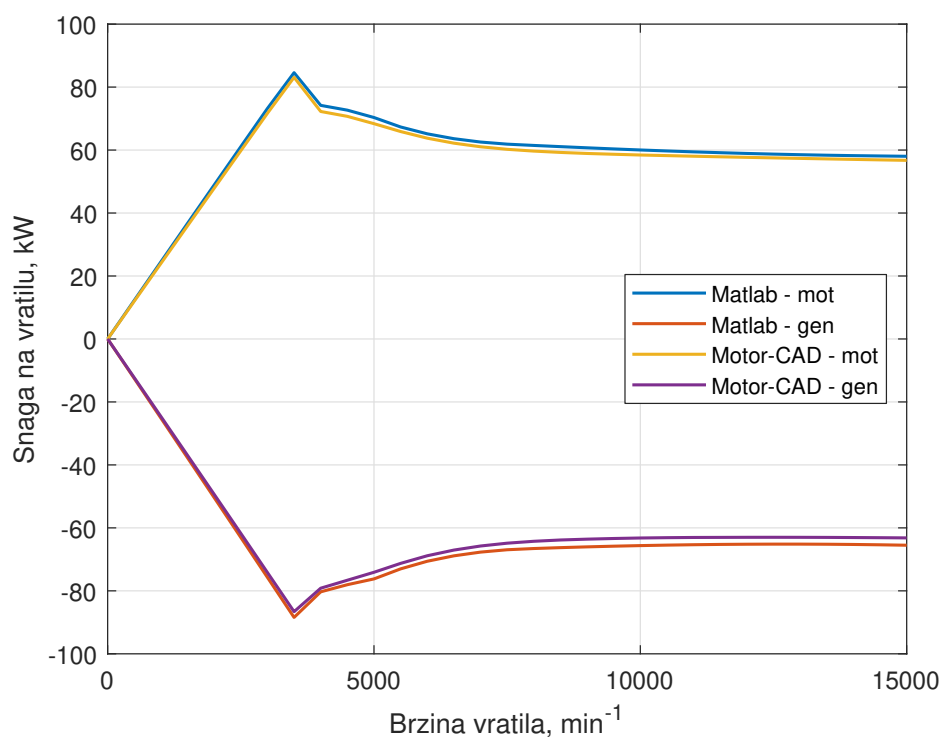
Sljedeće se slike odnose na objedinjeni motorski i generatorski režim.



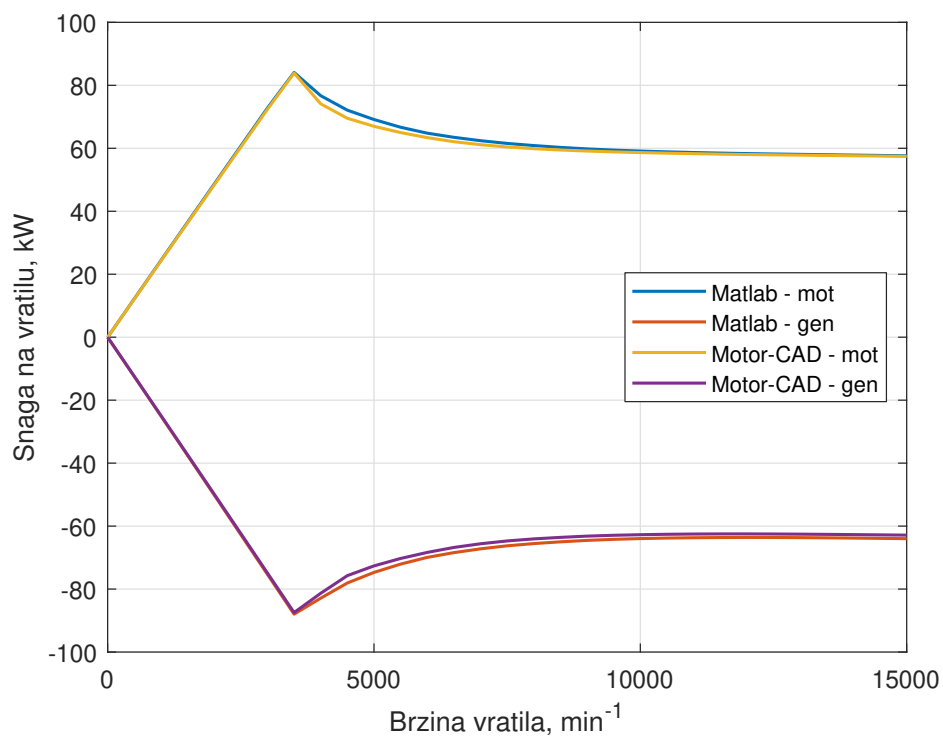
Slika 4.35. Moment na vratilu, standardni model, objedinjeni motorski i generatorski režim



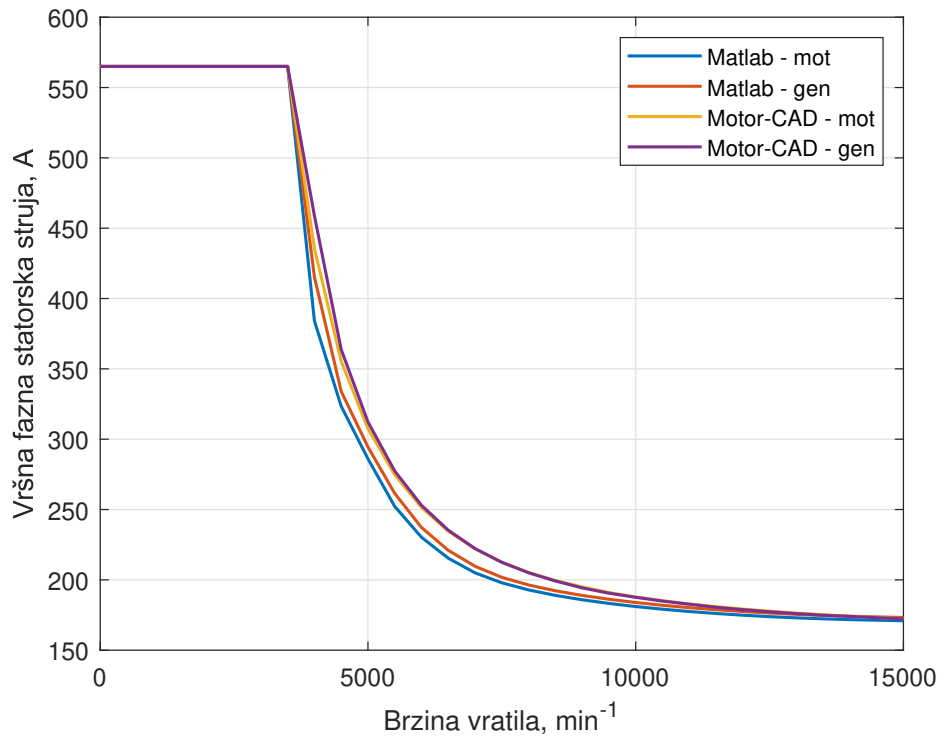
Slika 4.36. Moment na vratilu, prošireni model, objedinjeni motorski i generatorski režim



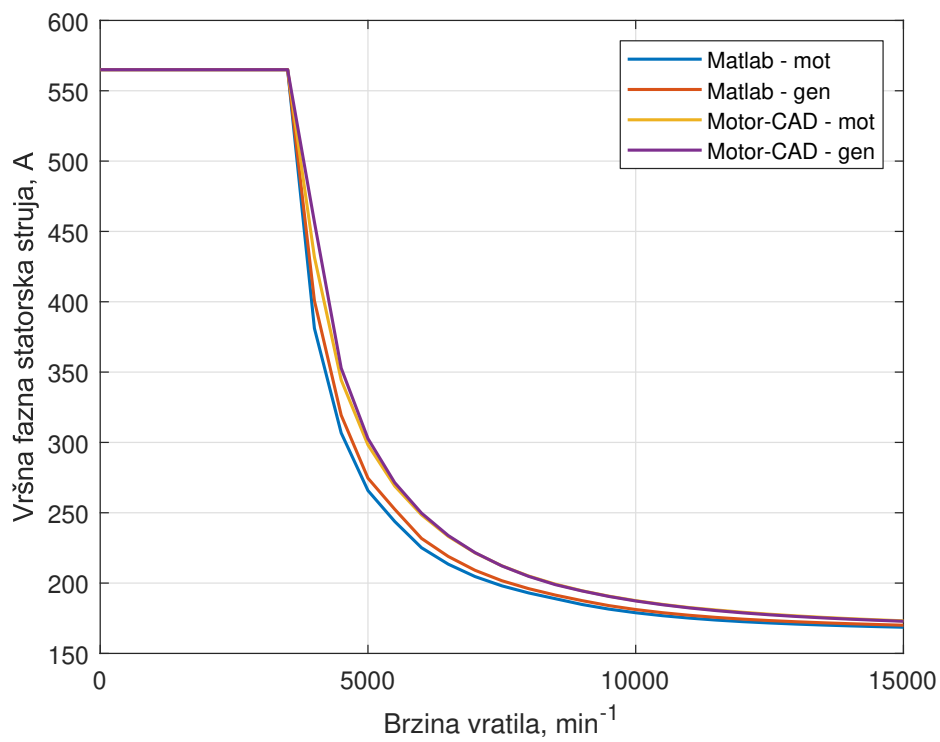
Slika 4.37. Snaga na vratilu, standardni model, objedinjeni motorski i generatorski režim



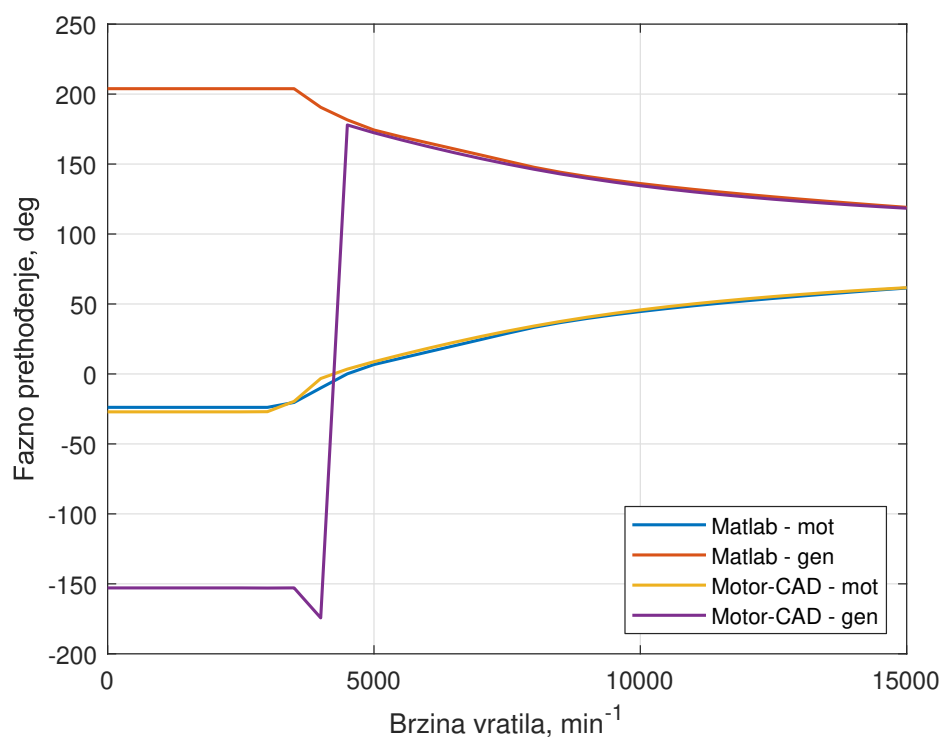
Slika 4.38. Snaga na vratilu, prošireni model, objedinjeni motorski i generatorski režim



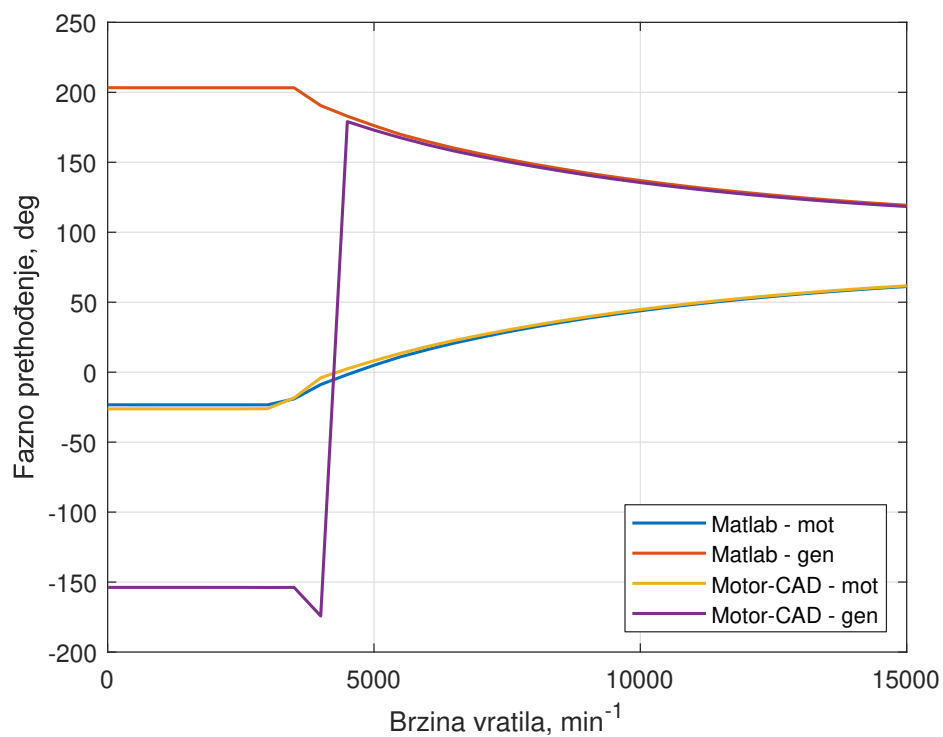
Slika 4.39. Vršna fazna statorska struja, standardni model, objedinjeni motorski i generatorski režim



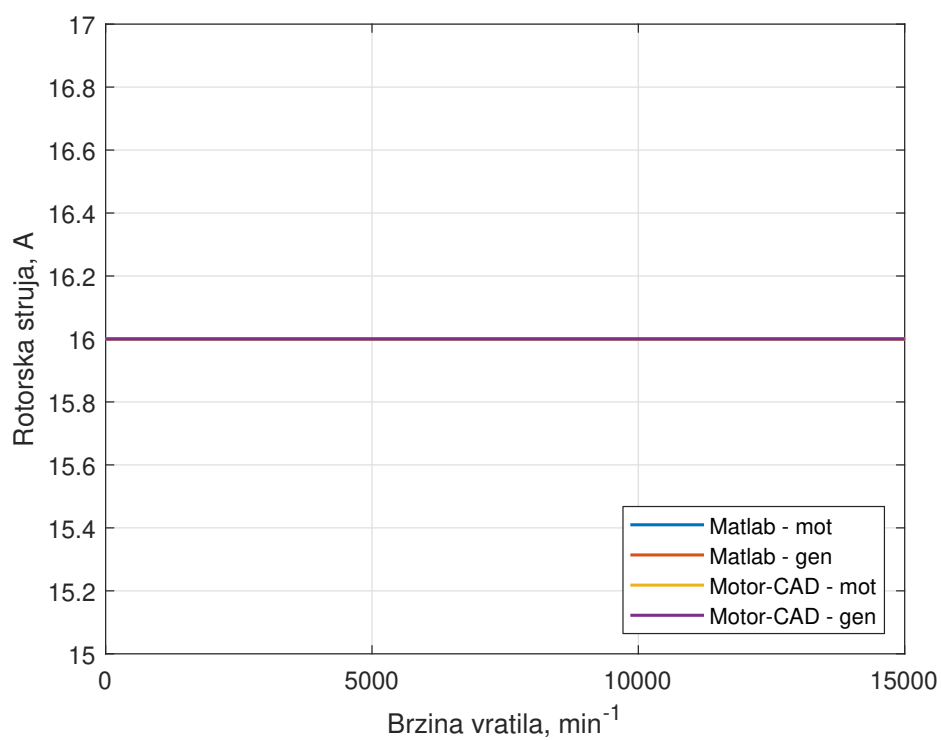
Slika 4.40. Vršna fazna statorska struja, prošireni model, objedinjeni motorski i generatorski režim



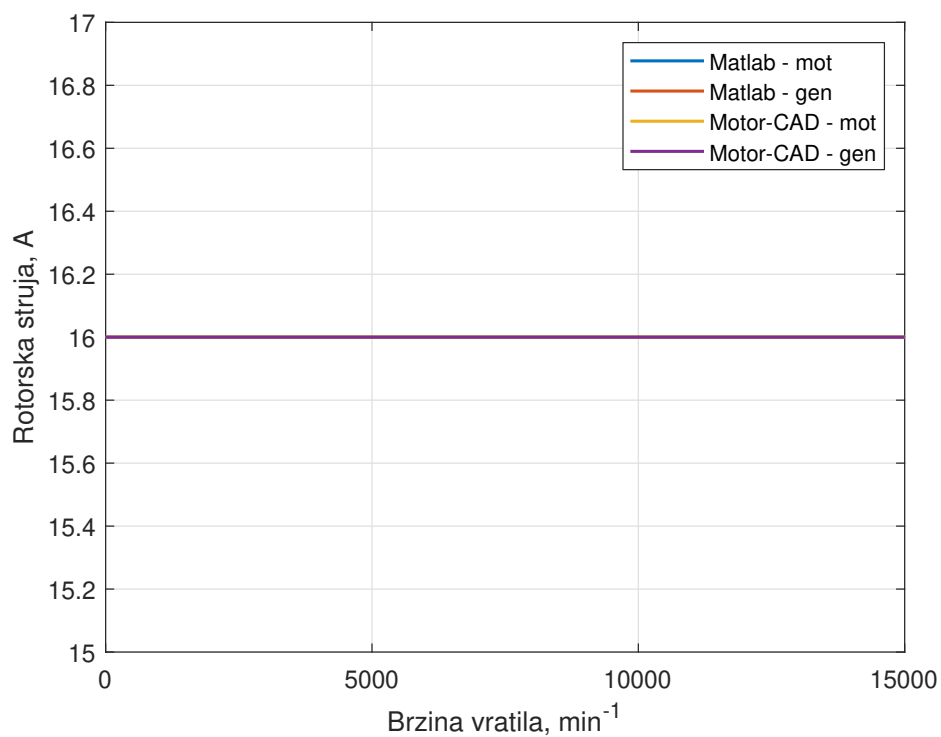
Slika 4.41. Kut vektora struje, standardni model, objedinjeni motorski i generatorski režim



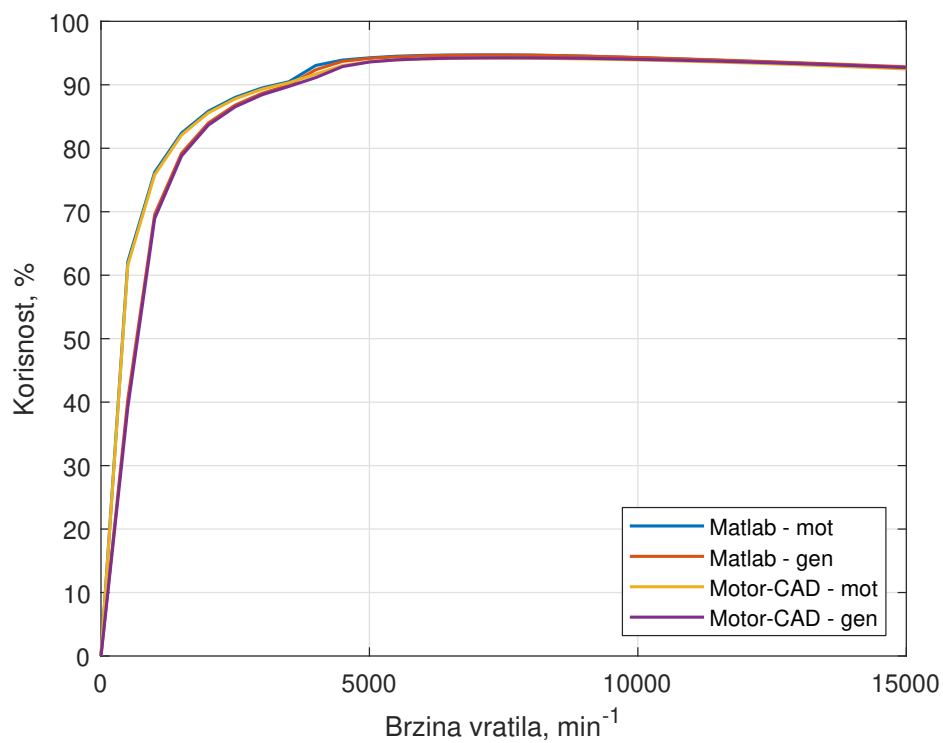
Slika 4.42. Kut vektora struje, prošireni model, objedinjeni motorski i generatorski režim



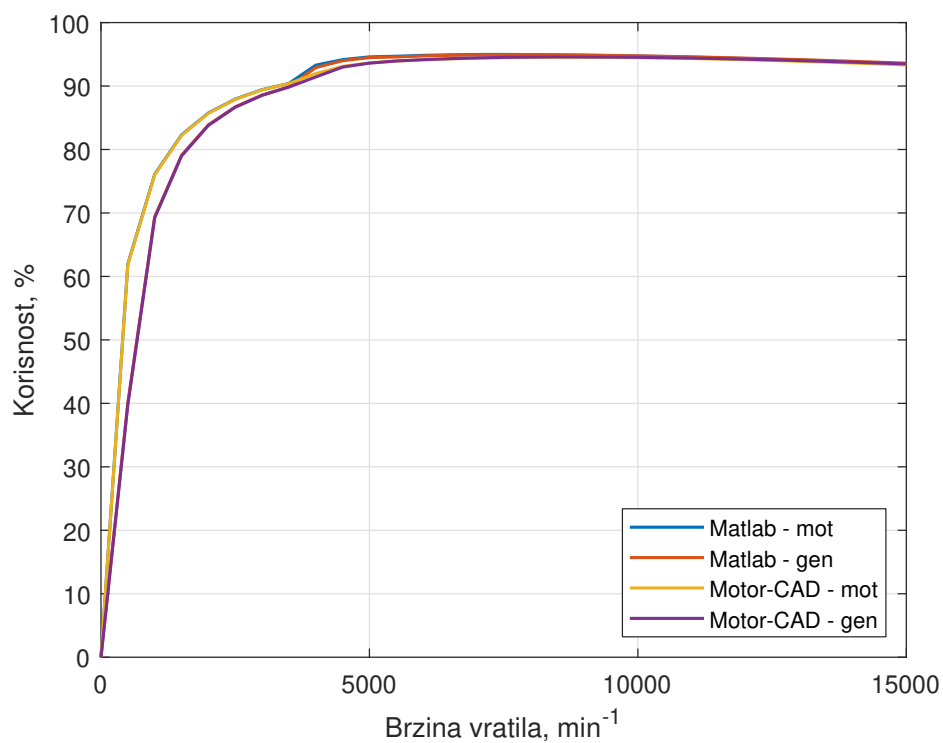
Slika 4.43. Rotorska struja, standardni model, objedinjeni motorski i generatorski režim



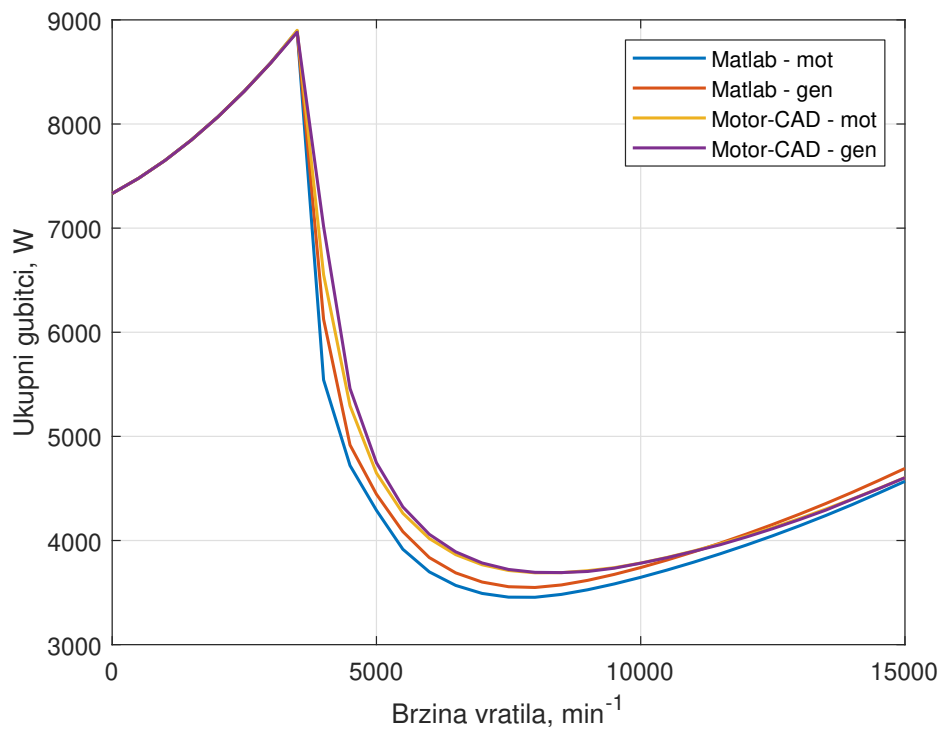
Slika 4.44. Rotorska struja, prošireni model, objedinjeni motorski i generatorski režim



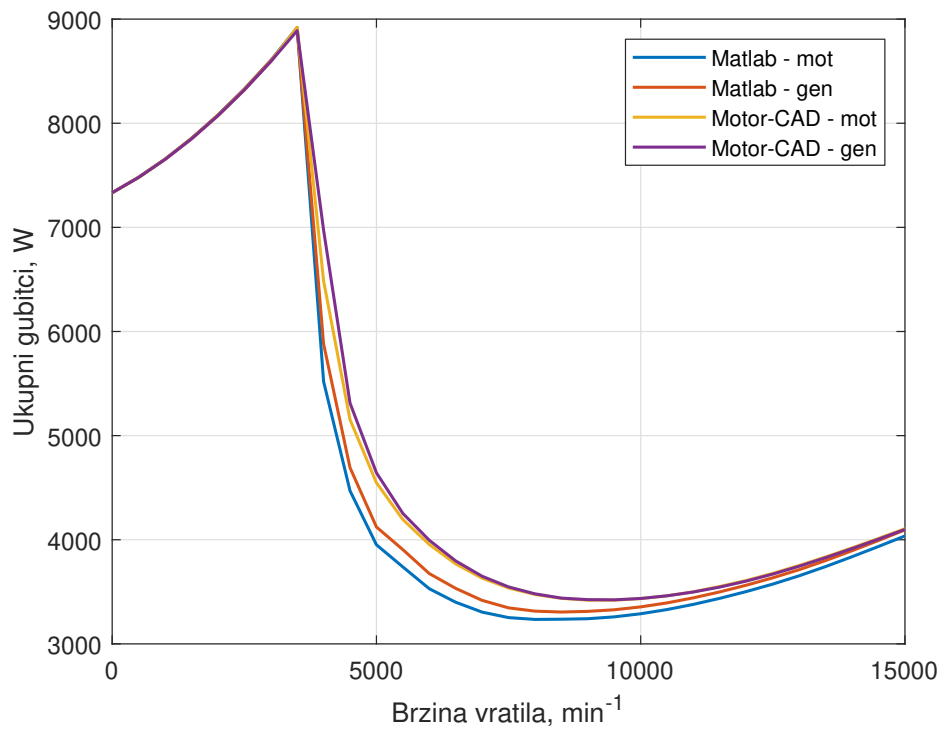
Slika 4.45. Korisnost, standardni model, objedinjeni motorski i generatorski režim



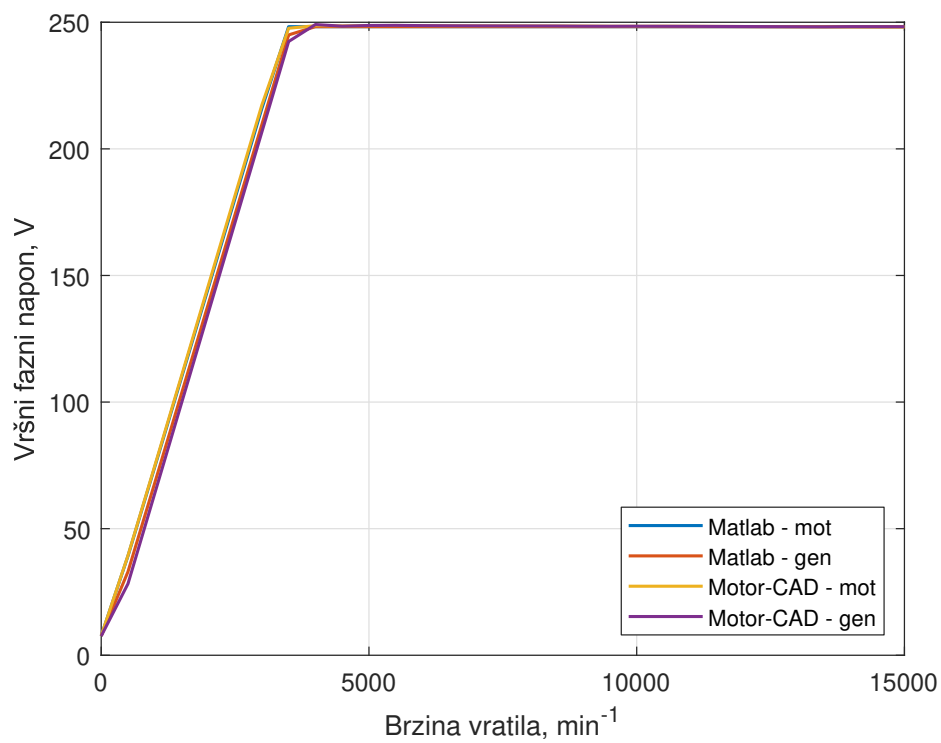
Slika 4.46. Korisnost, prošireni model, objedinjeni motorski i generatorski režim



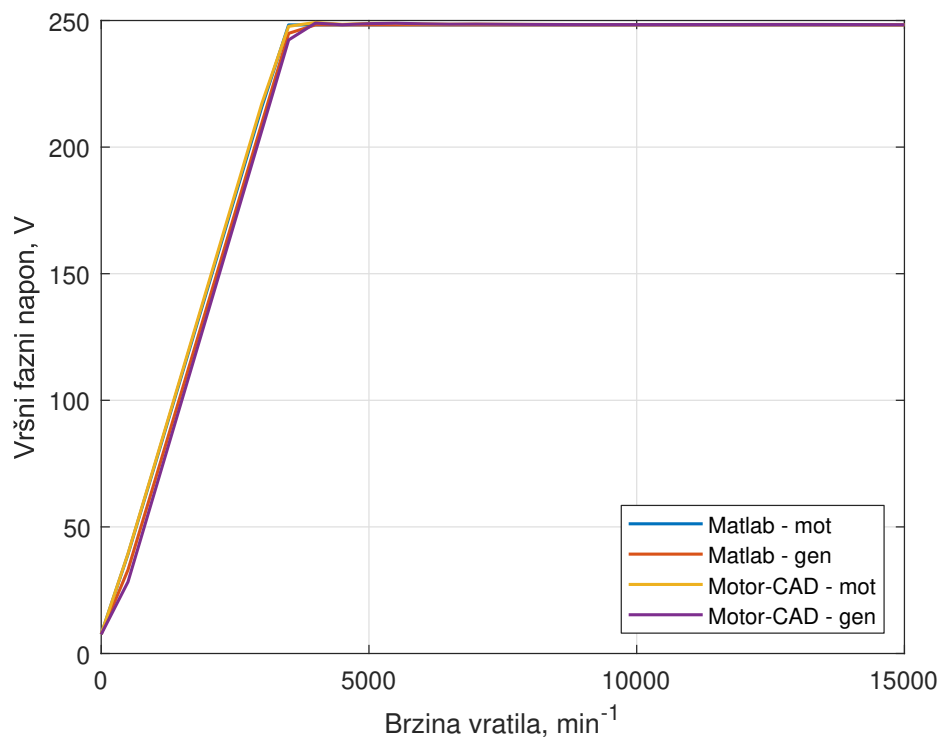
Slika 4.47. Ukupni gubitci, standardni model, objedinjeni motorski i generatorski režim



Slika 4.48. Ukupni gubitci, prošireni model, objedinjeni motorski i generatorski režim



Slika 4.49. Napon, standardni model, objedinjeni motorski i generatorski režim



Slika 4.50. Napon, prošireni model, objedinjeni motorski i generatorski režim

Tablica 4.12. Trajanje proračuna, *Maximum Torque/Speed Curve*

Režim	Standardni model		Prošireni model	
	Matlab	Motor-CAD	Matlab	Motor-CAD
Motor	0,7 s	16,5 s	1,5 s	1m 51s
Generator	0,6 s	17,3 s	1,7 s	1m 52s
MotGen	1,1 s	19,3 s	1,8 s	1m 50s
Omjer trajanja	23,6		74,0	
	28,8		65,9	
	17,5		61,1	

Općeniti zaključak je da postoje vidljive razlike između rezultata *Matlab* koda i *Motor-CAD* rezultata, razlike su manje kod proširenog modela, nego kod standardnog modela. *Matlab* kod radi značajno brže od programa *Motor-CAD*. Računanje s proširenim modelom vremenski traje duže (u slučaju *Motor-CAD*a je upitno isplati li se prijeći na prošireni model jer je usporenje vrlo izraženo).

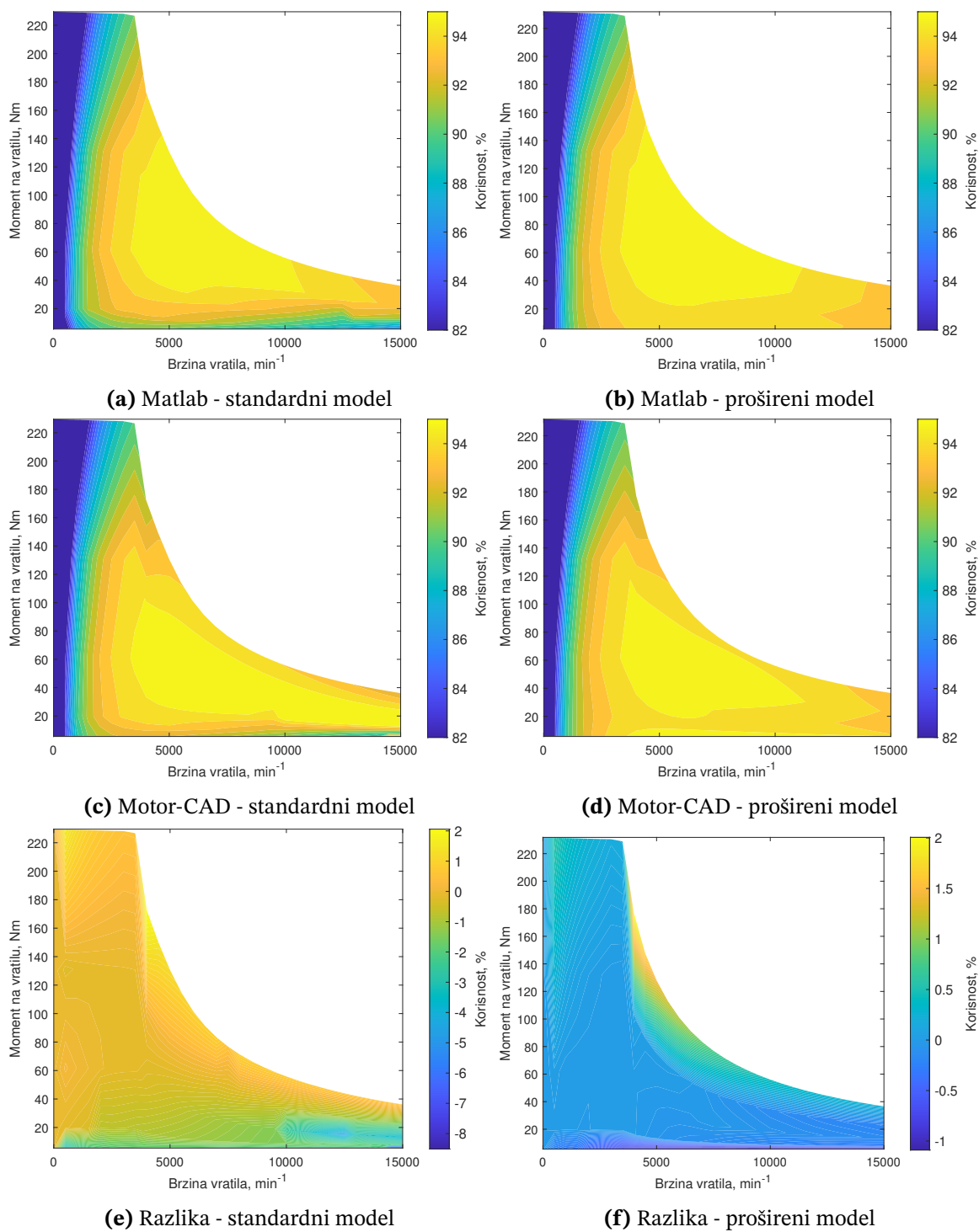
4.2.2. Način rada: Efficiency Map

Postavke s kojima je pokrenuta funkcija *Electromagnetic* dane su u tablici 4.13., *Motor-CAD* je podešen na ekvivalentne postavke. Ovdje je prikazano nekoliko grafova od interesa. Za motorski režim na slikama od 4.51. do 4.56., za generatorski režim na slikama od 4.57. do 4.62. i za objedinjeni motorski i generatorski režim na slikama od 4.63. do 4.68. Razlika je izračunata na način da se od vrijednosti dobivene *Matlab* kodom oduzme vrijednost dobivena *Motor-CADom* (osim za proračun razlike faznog pomaka, zbog promjenjivosti predznaka ove veličine oduzima se apsolutna vrijednost svake komponente uz kompenzaciju skoka kuta vektora struje u *Motor-CADu*).

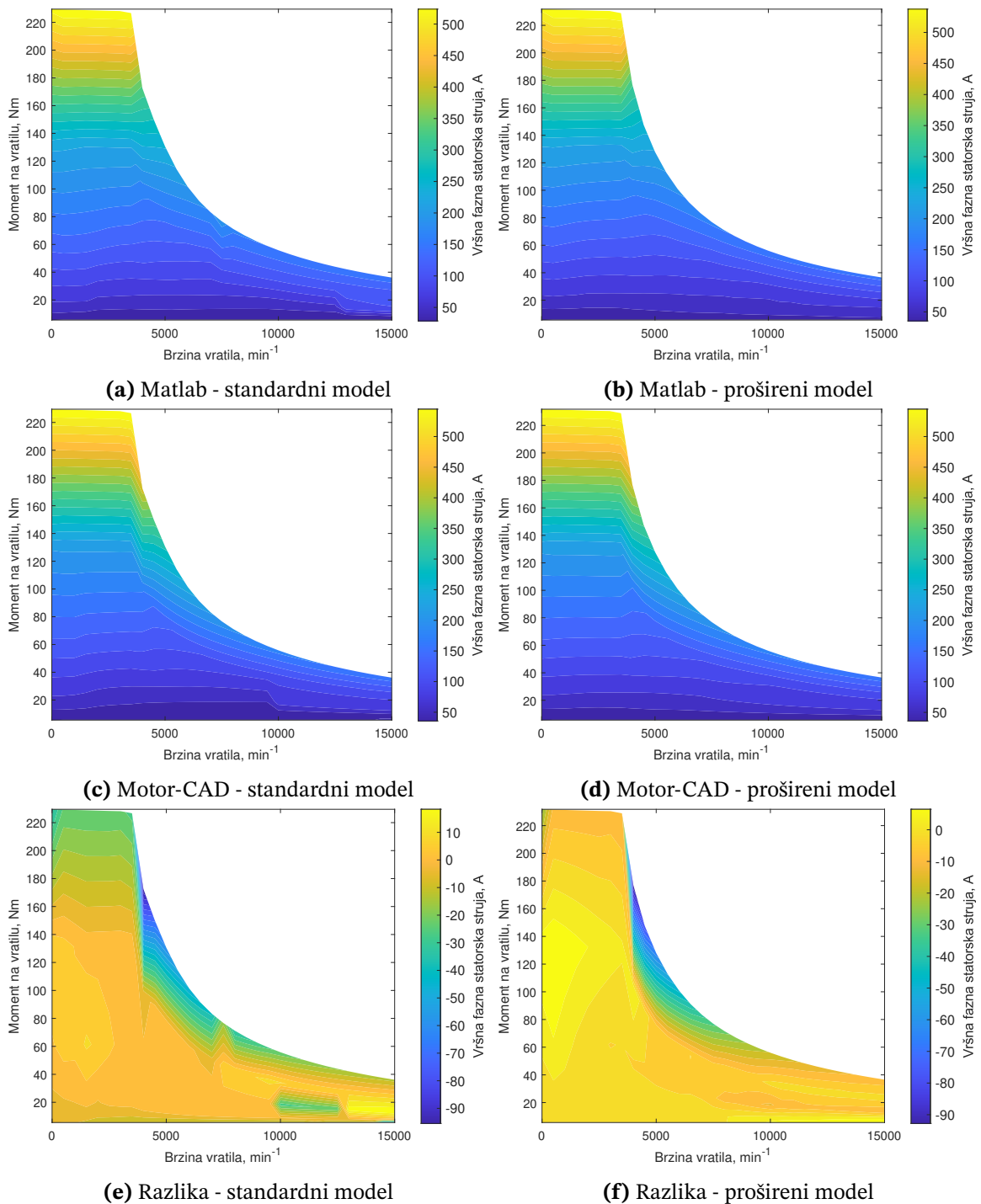
Tablica 4.13. Postavke proračuna - Efficiency Map

Varijabla	Vrijednost
functionMode	Efficiency Map
controlStrategy	MinTotalLoss
maxStatorCurrent	565 A
maxRotorCurrent	16 A
numIncrements	5
maxSpeed	15000 min ⁻¹
stepSpeed	500 min ⁻¹
minSpeed	0 min ⁻¹
effModeRefSelect	Motor-CAD

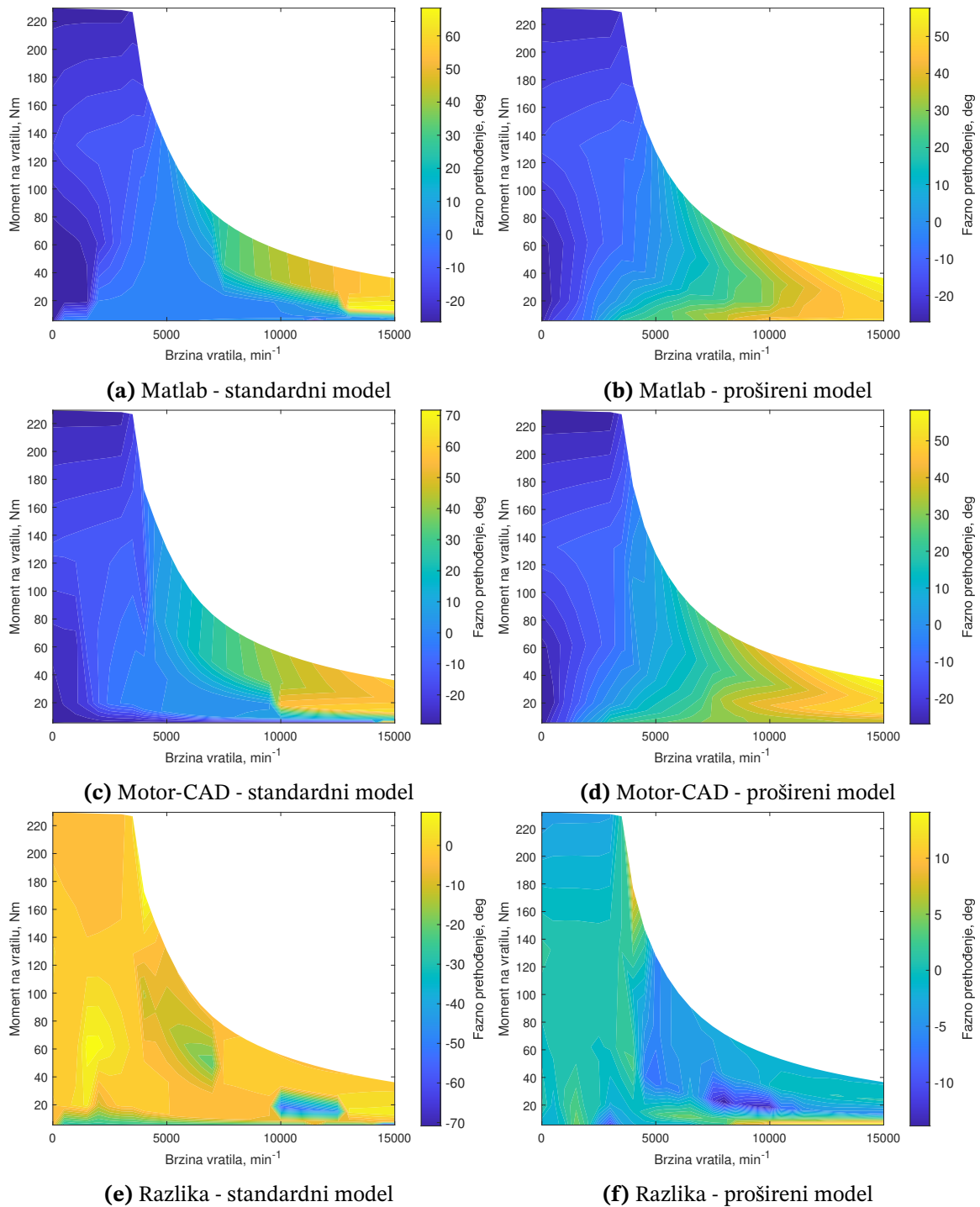
Sljedeće se slike odnose na motorski režim.



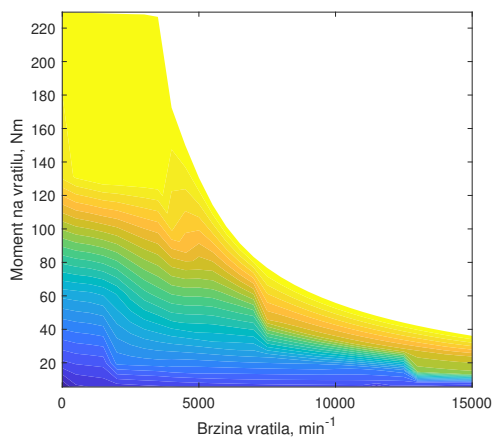
Slika 4.51. Korisnost, motorski režim



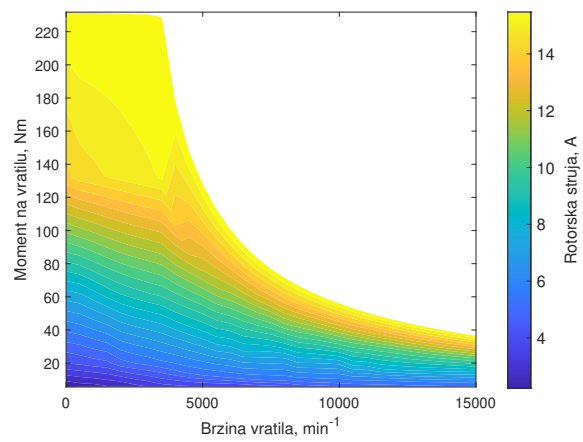
Slika 4.52. Vršna fazna statvorska struja, motorski režim



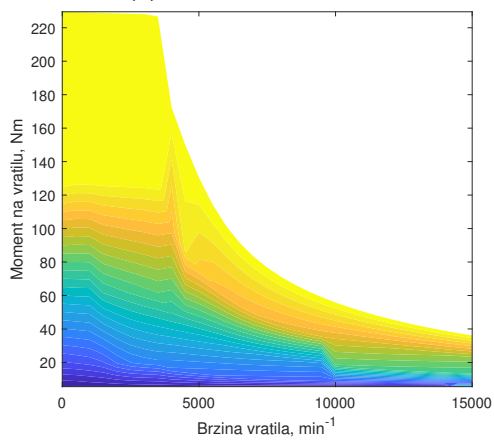
Slika 4.53. Kut vektora struje (γ), motorski režim



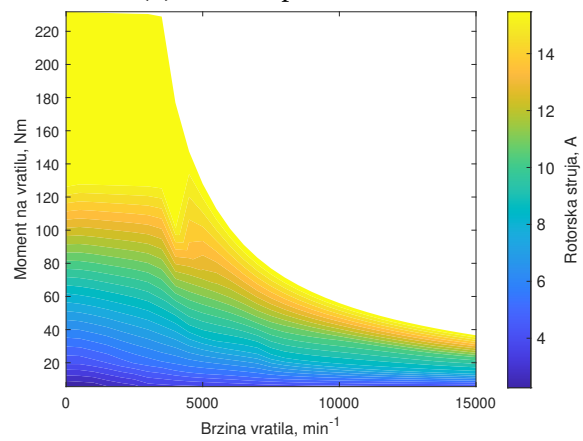
(a) Matlab - standardni model



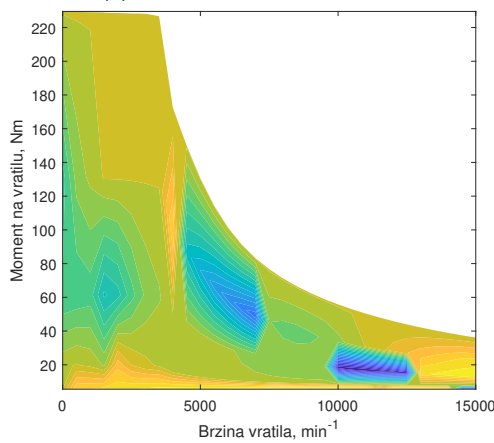
(b) Matlab - prošireni model



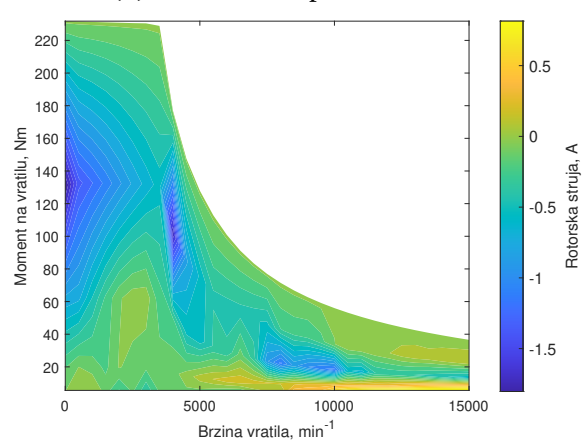
(c) Motor-CAD - standardni model



(d) Motor-CAD - prošireni model

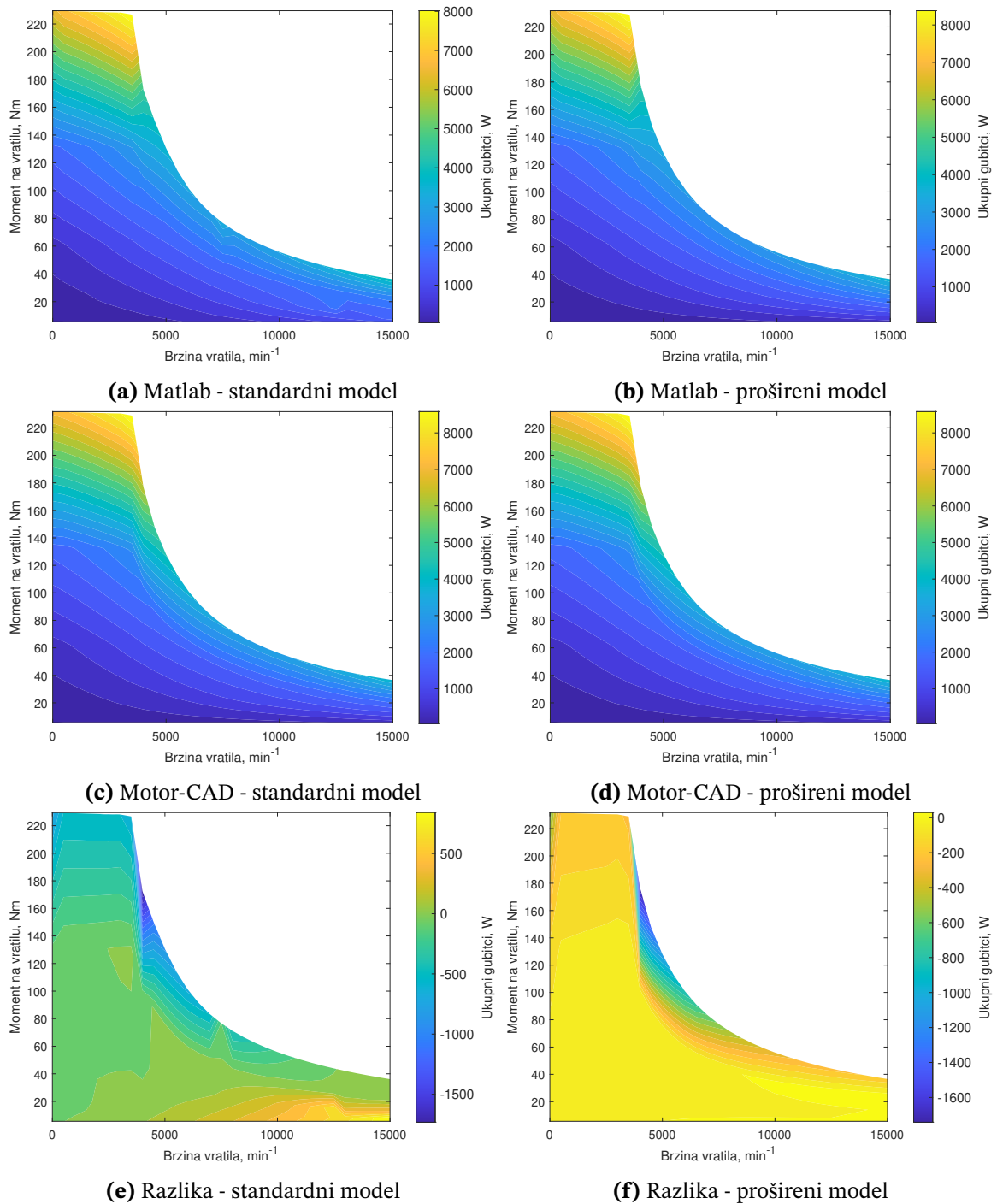


(e) Razlika - standardni model

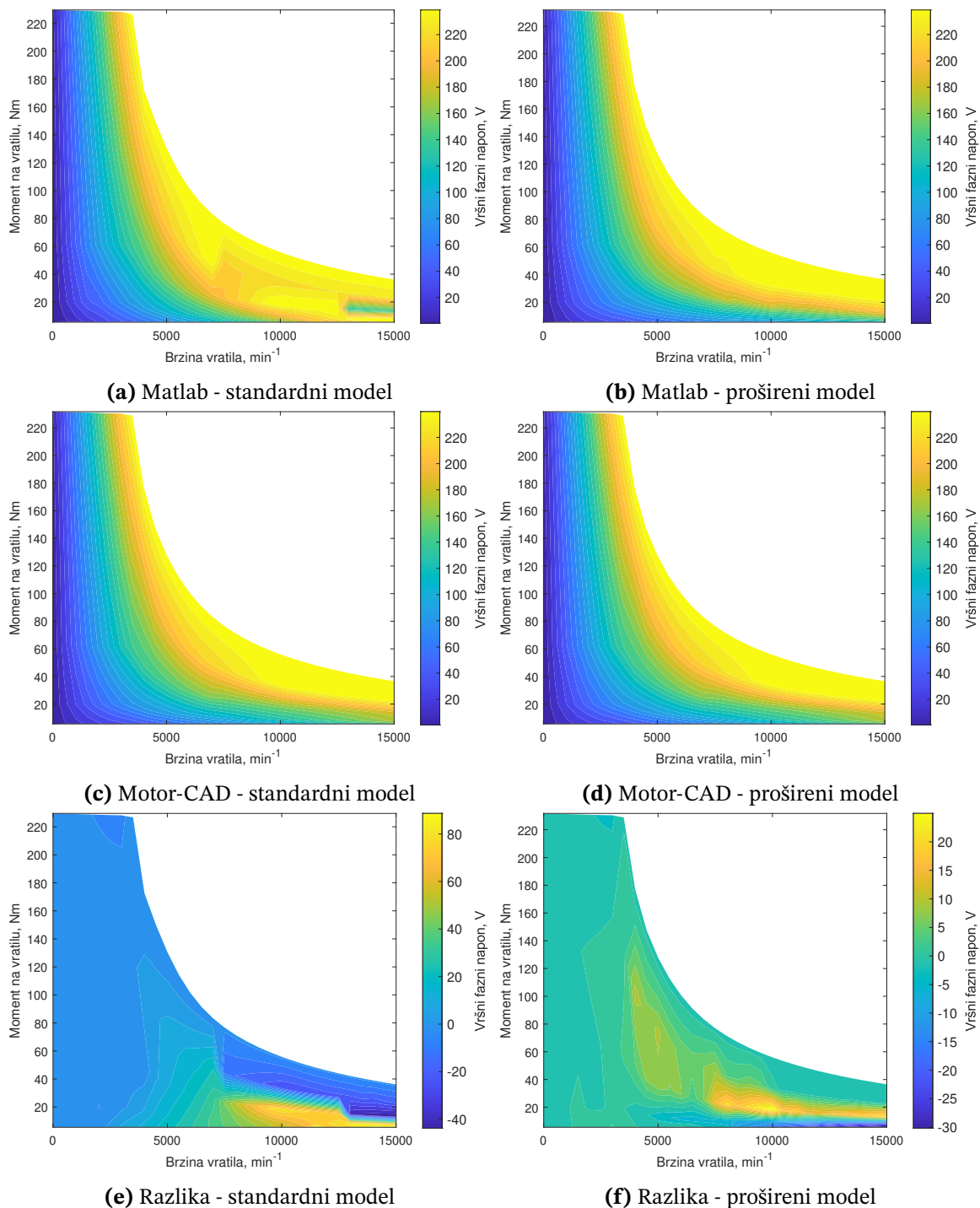


(f) Razlika - prošireni model

Slika 4.54. Rotorska struja, motorski režim

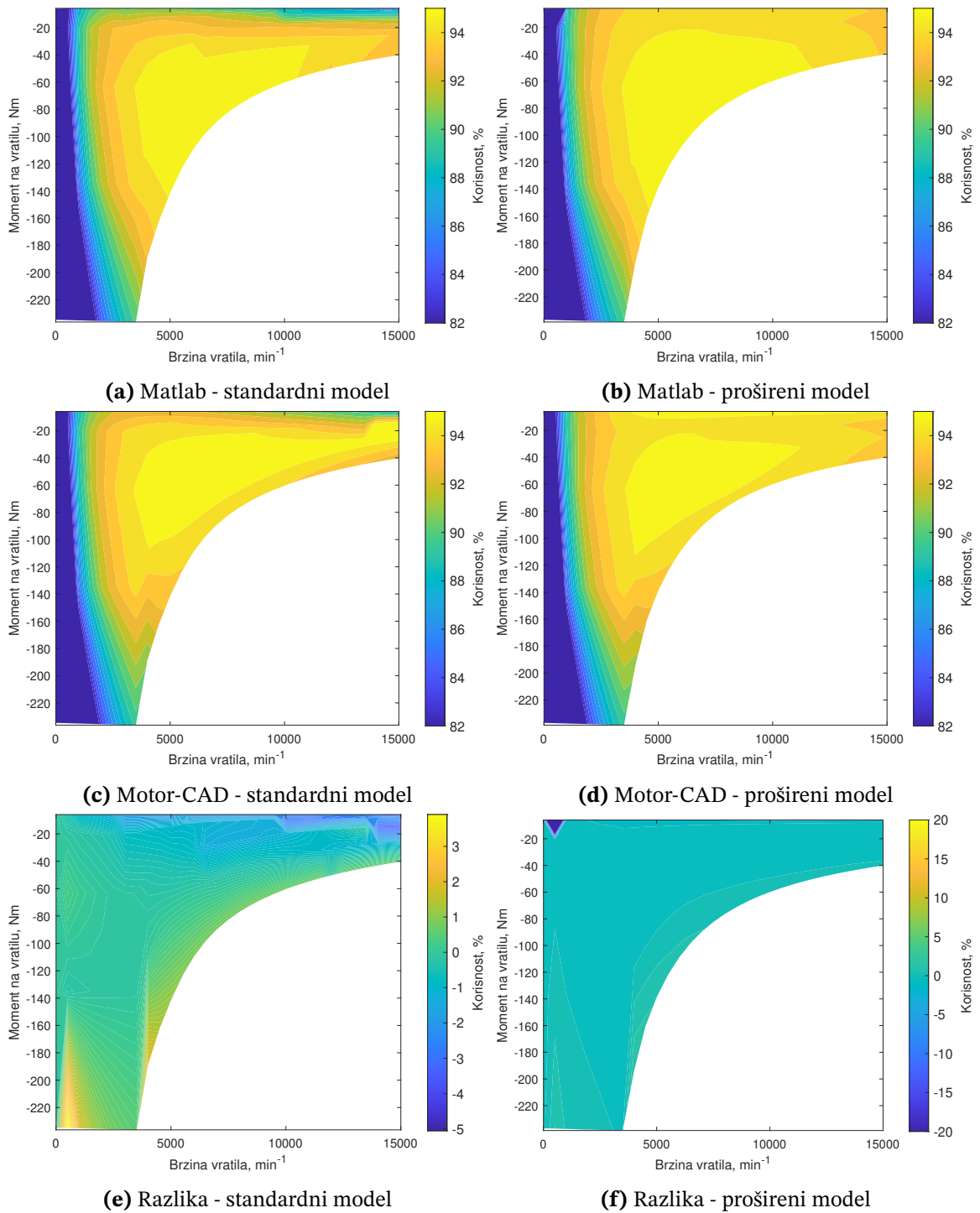


Slika 4.55. Ukupni gubitci, motorski režim

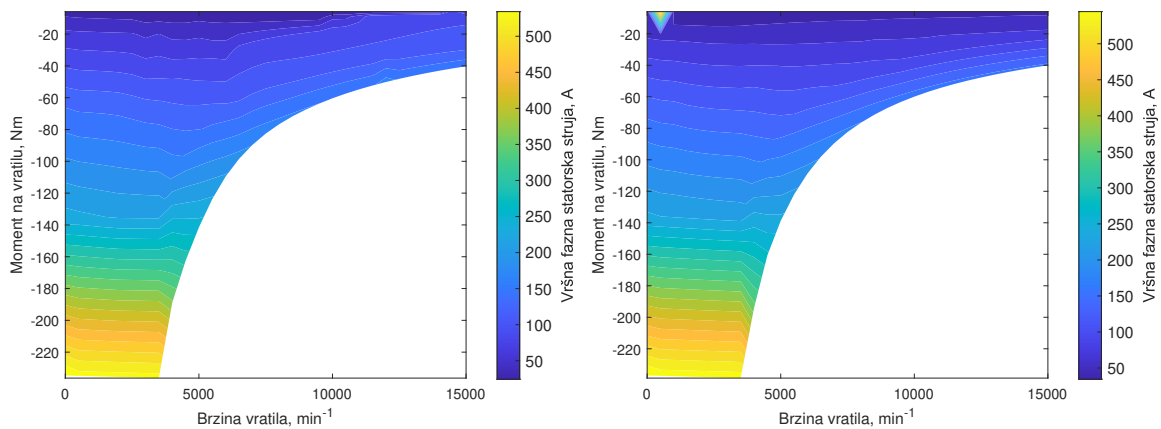


Slika 4.56. Vršni fazni napon, motorski režim

Sljedeće se slike odnose na generatorski režim.

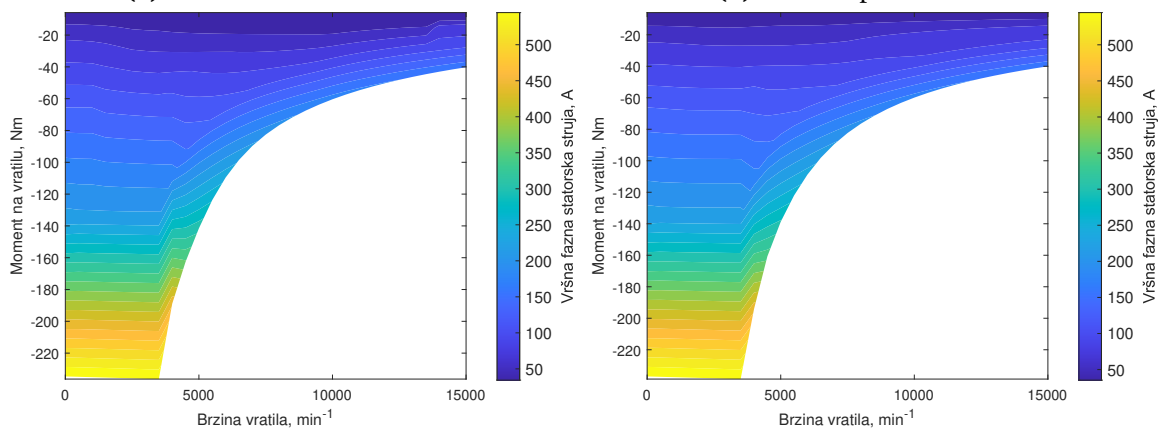


Slika 4.57. Korisnost, generatorski režim



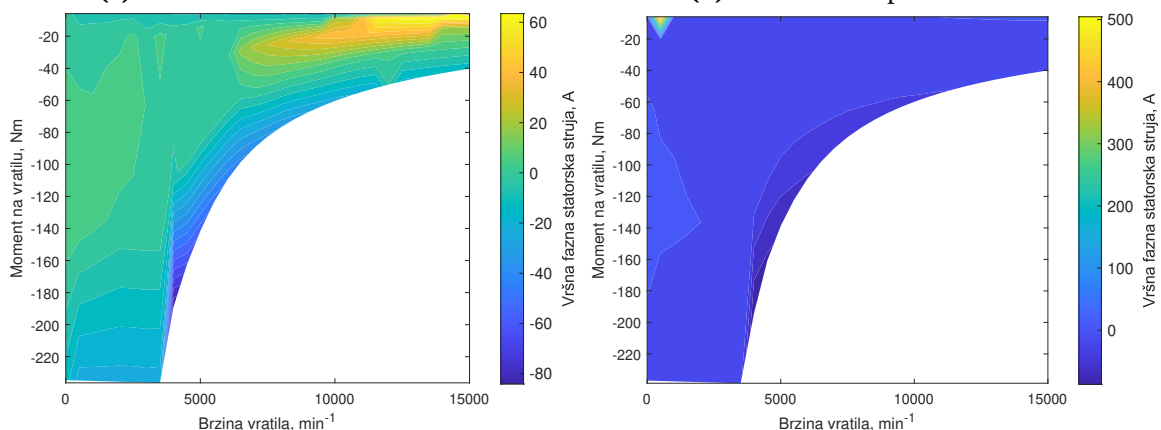
(a) Matlab - standardni model

(b) Matlab - prošireni model



(c) Motor-CAD - standardni model

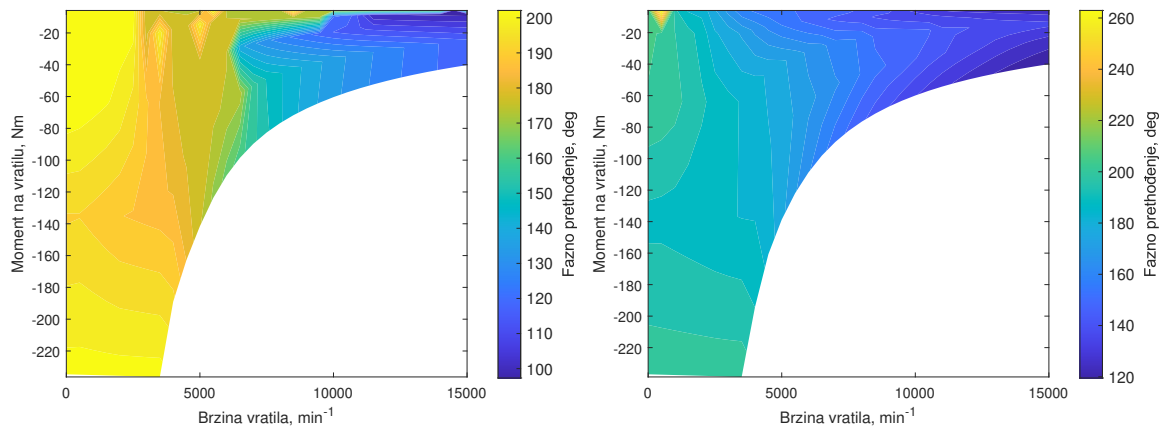
(d) Motor-CAD - prošireni model



(e) Razlika - standardni model

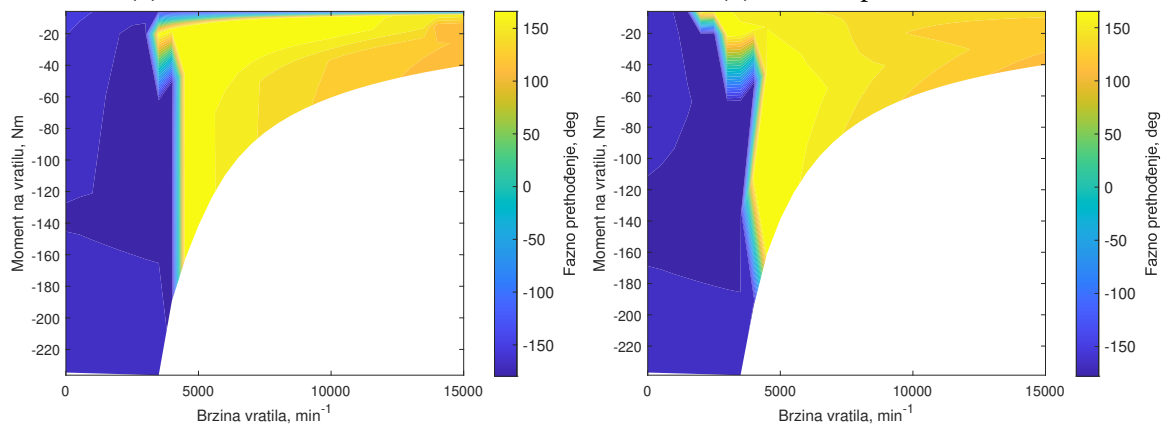
(f) Razlika - prošireni model

Slika 4.58. Vršna fazna statorska struja, generatorski režim



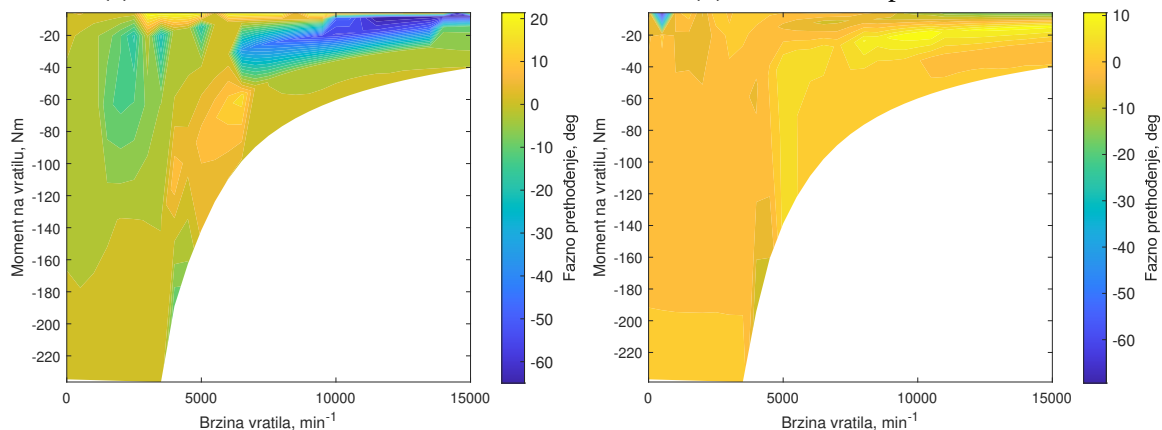
(a) Matlab - standardni model

(b) Matlab - prošireni model



(c) Motor-CAD - standardni model

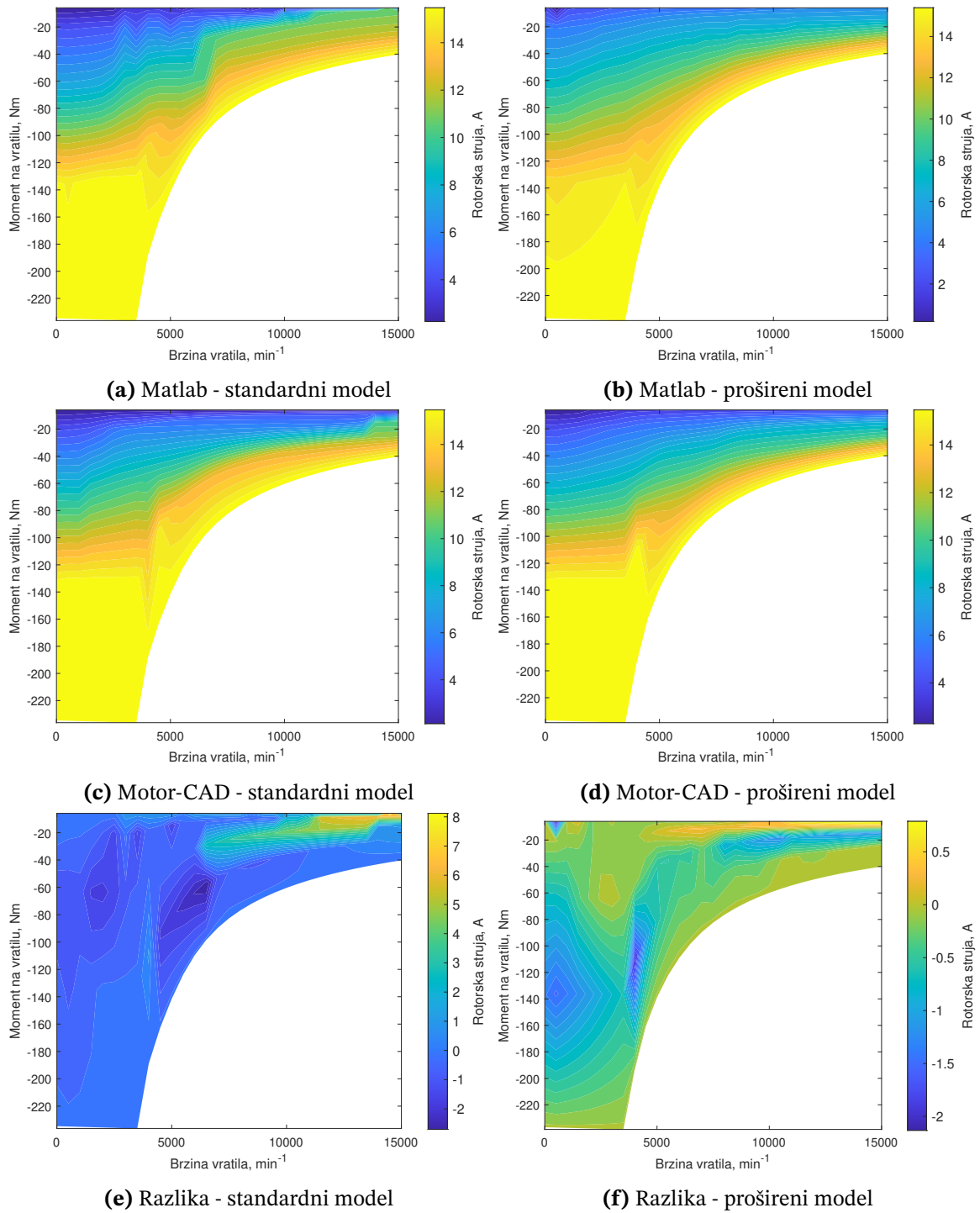
(d) Motor-CAD - prošireni model



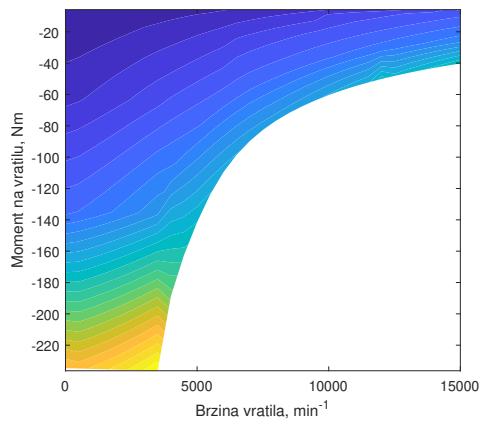
(e) Razlika - standardni model

(f) Razlika - prošireni model

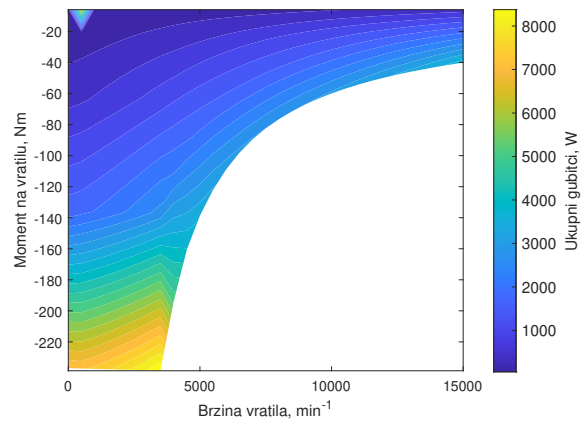
Slika 4.59. Kut vektora struje (γ), generatorski režim



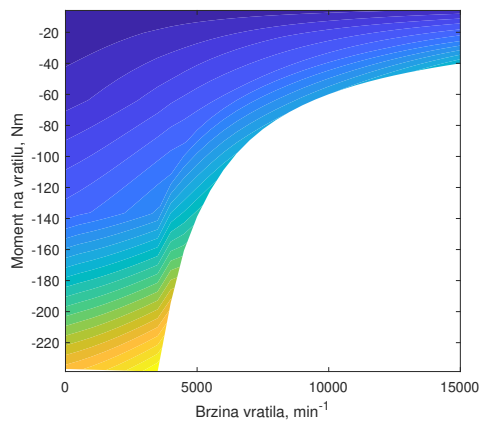
Slika 4.60. Rotorska struja, generatorski režim



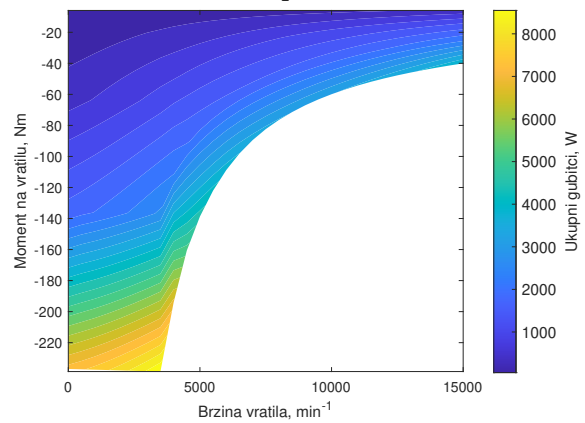
(a) Matlab - standardni model



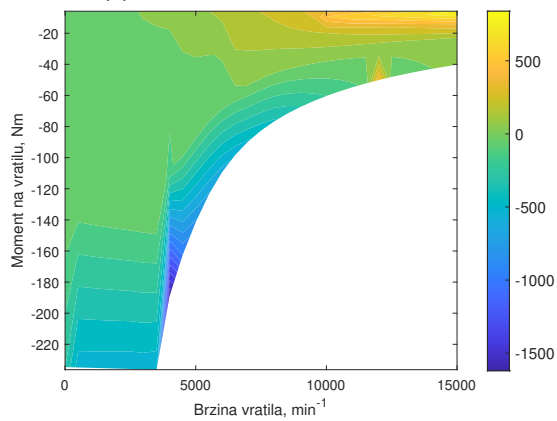
(b) Matlab - prošireni model



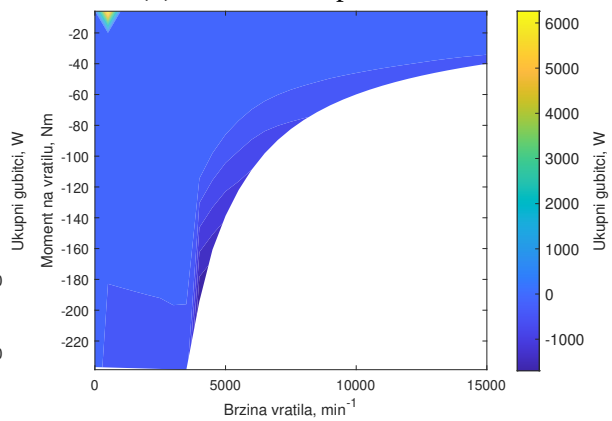
(c) Motor-CAD - standardni model



(d) Motor-CAD - prošireni model

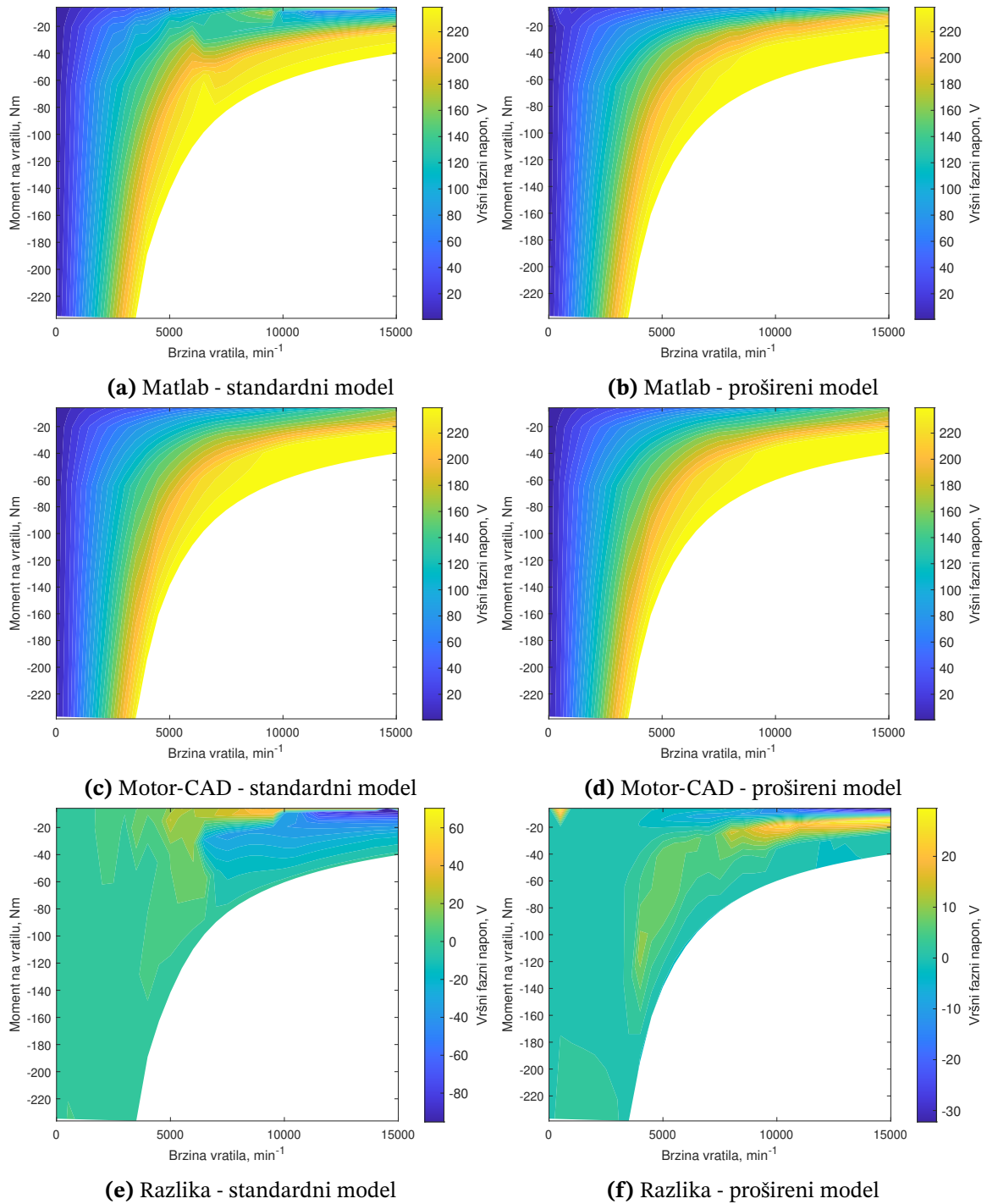


(e) Razlika - standardni model



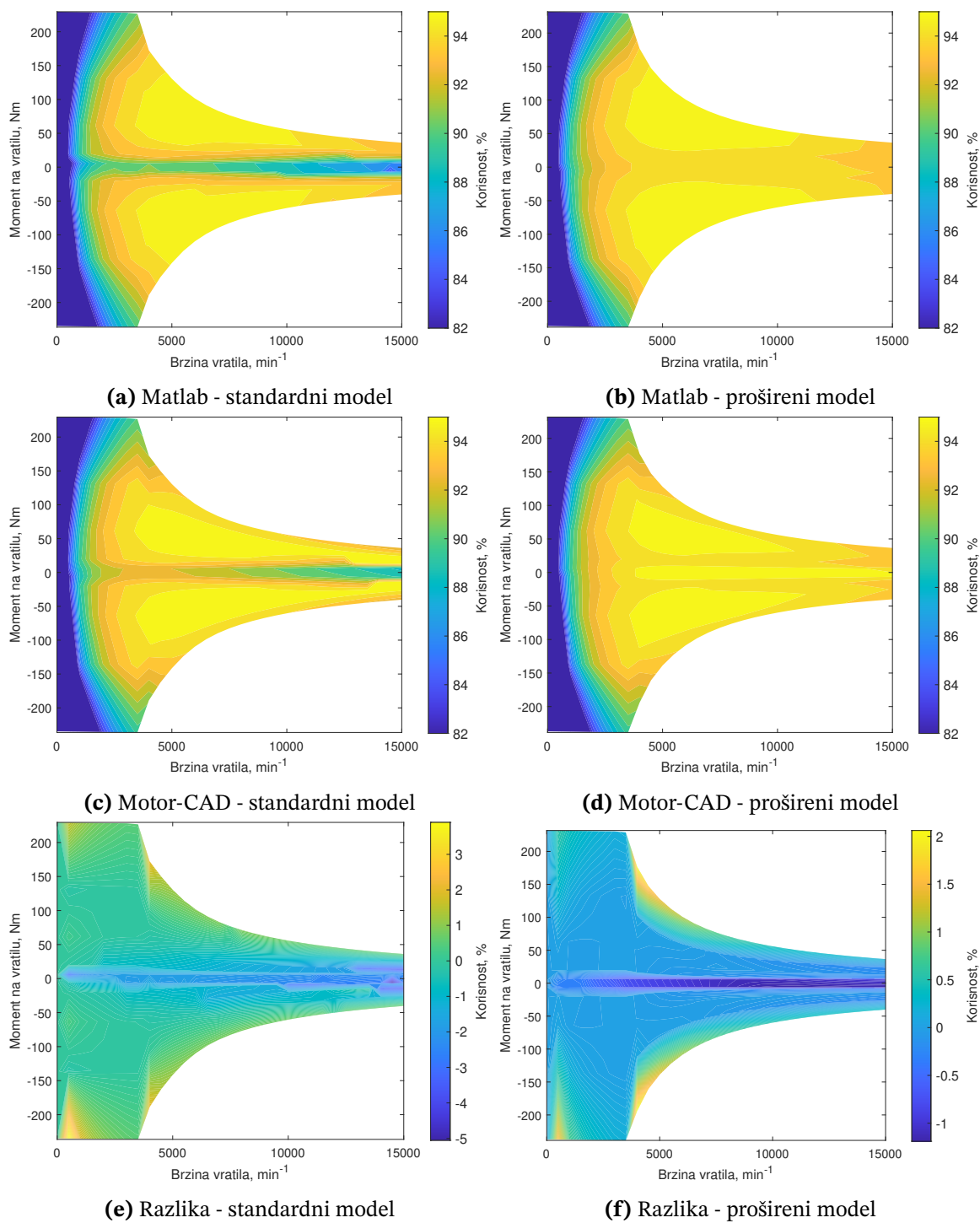
(f) Razlika - prošireni model

Slika 4.61. Ukupni gubitci, generatorski režim

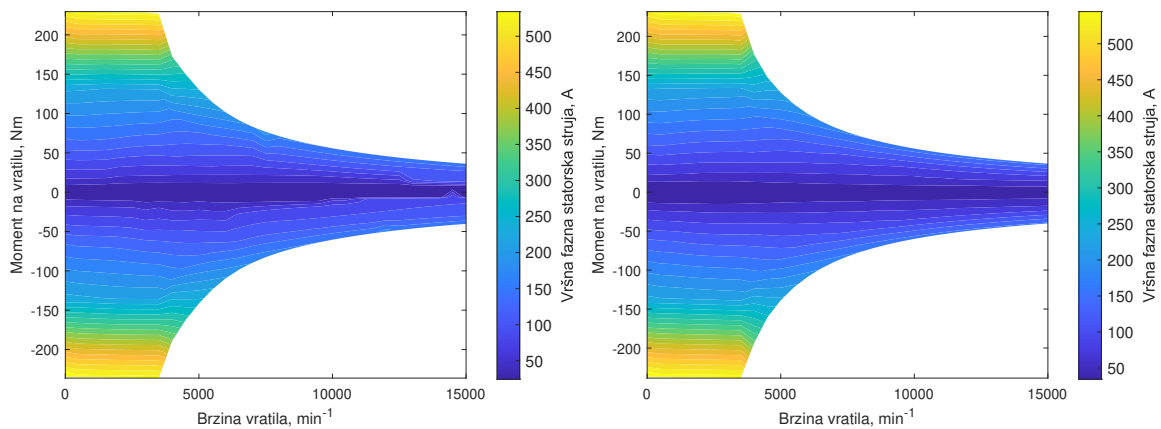


Slika 4.62. Vršni fazni napon, generatorski režim

Sljedeće se slike odnose na objedinjeni motorski i generatorski režim.

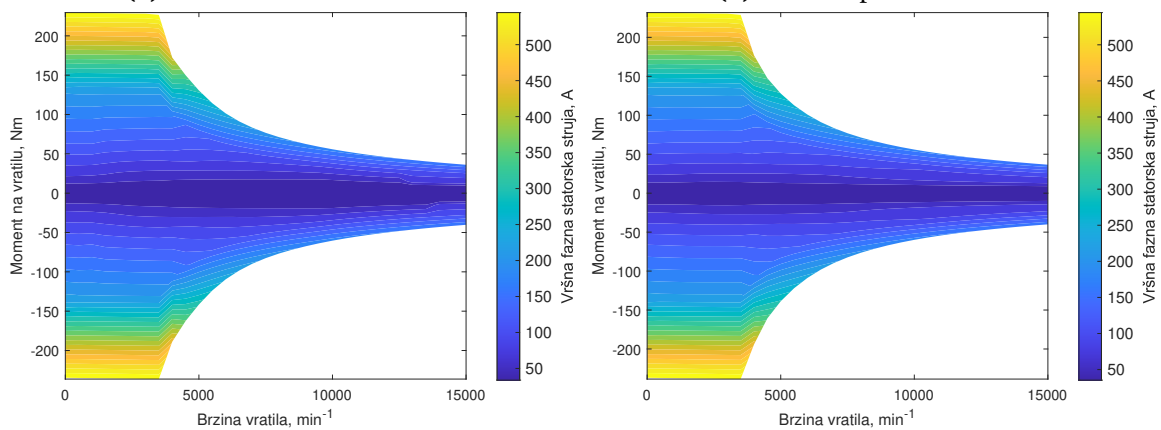


Slika 4.63. Korisnost, objedinjeni motorski i generatorski režim



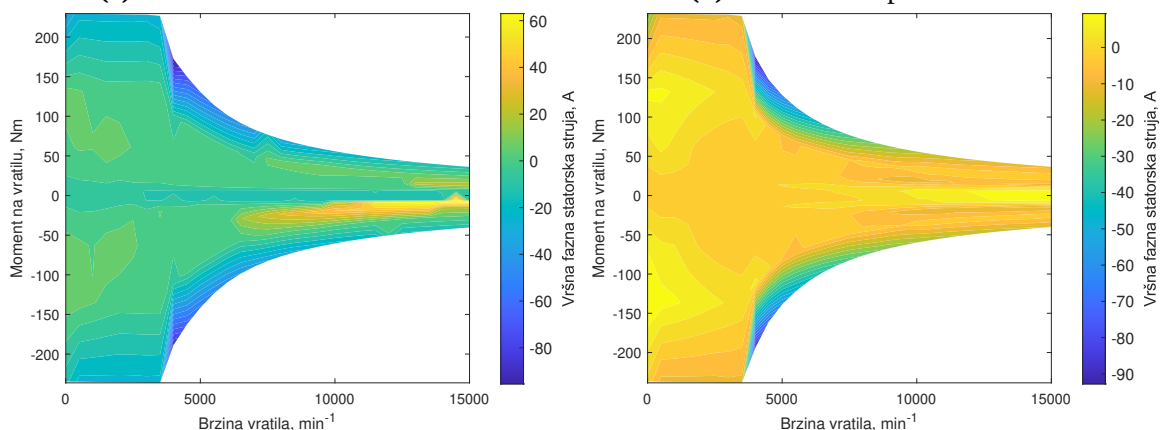
(a) Matlab - standardni model

(b) Matlab - prošireni model



(c) Motor-CAD - standardni model

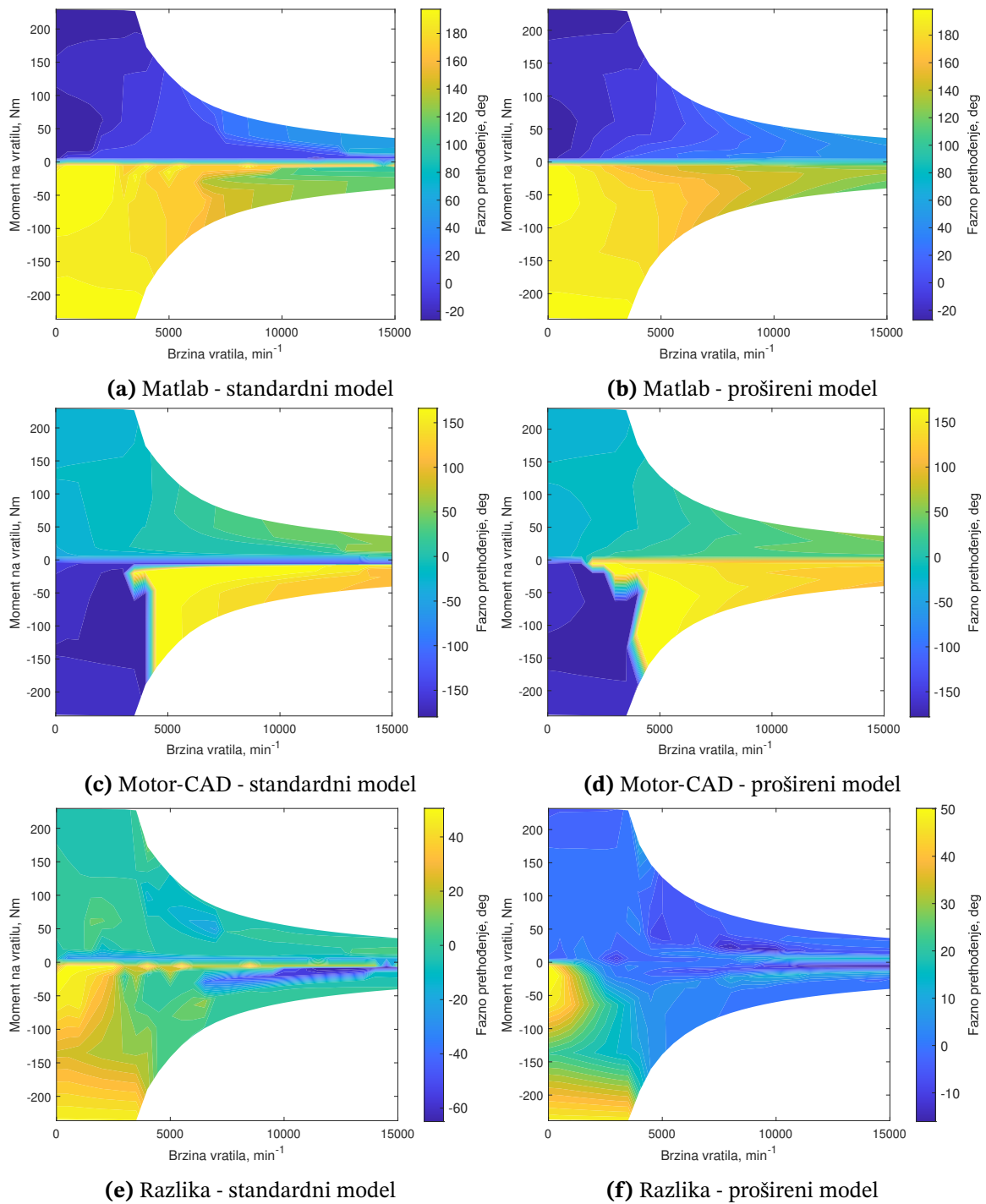
(d) Motor-CAD - prošireni model



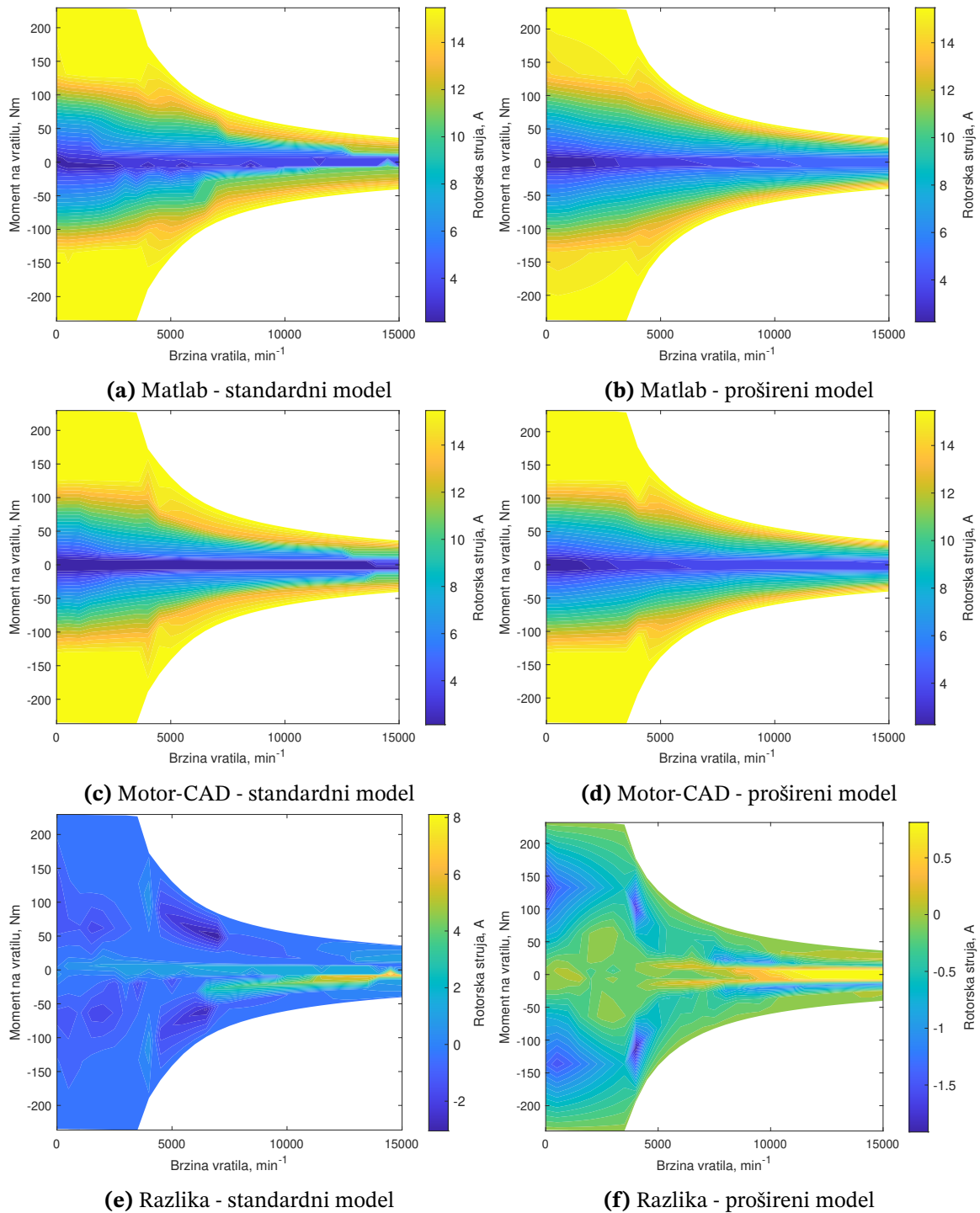
(e) Razlika - standardni model

(f) Razlika - prošireni model

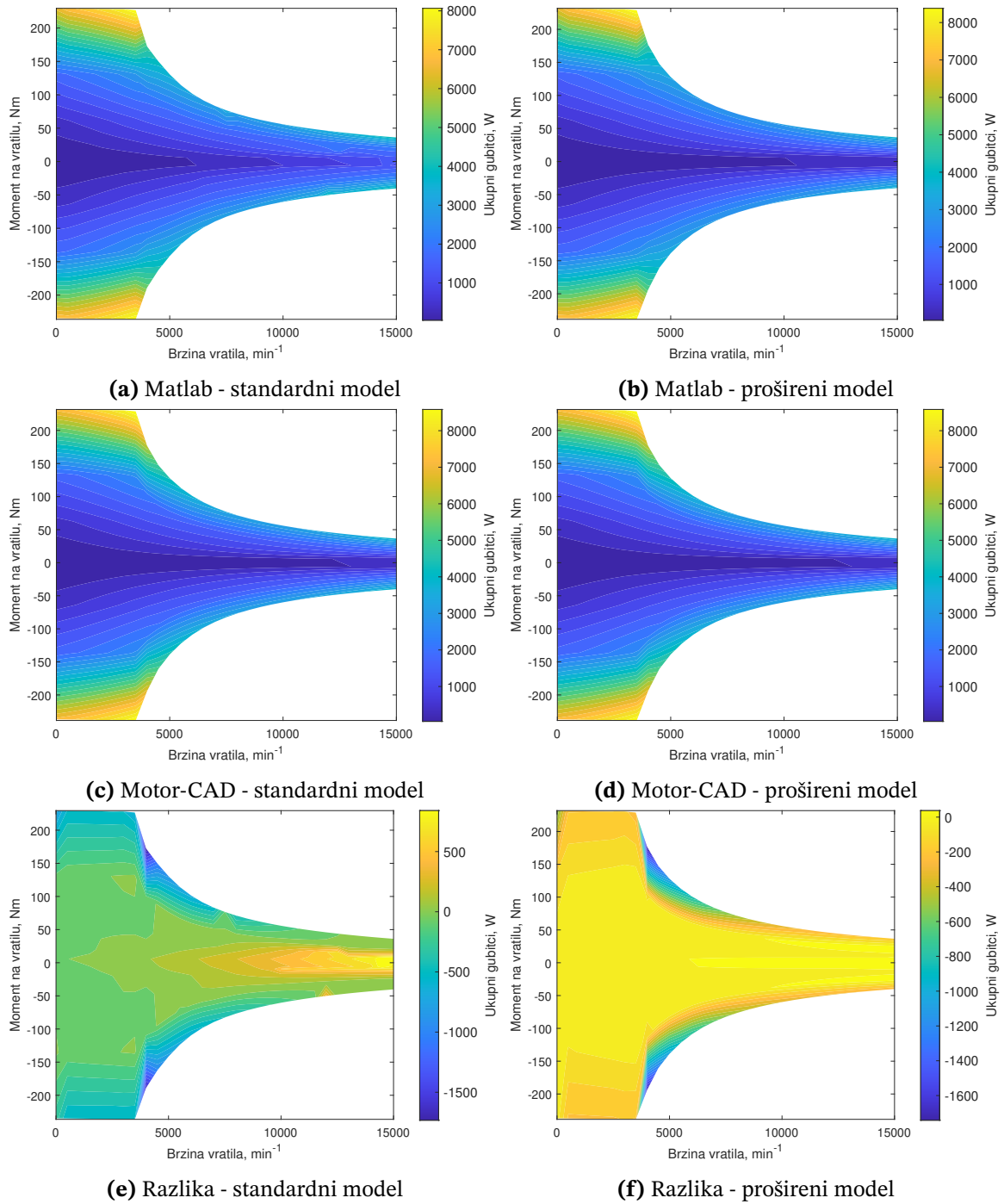
Slika 4.64. Vršna fazna statorska struja, objedinjeni motorski i generatorski režim



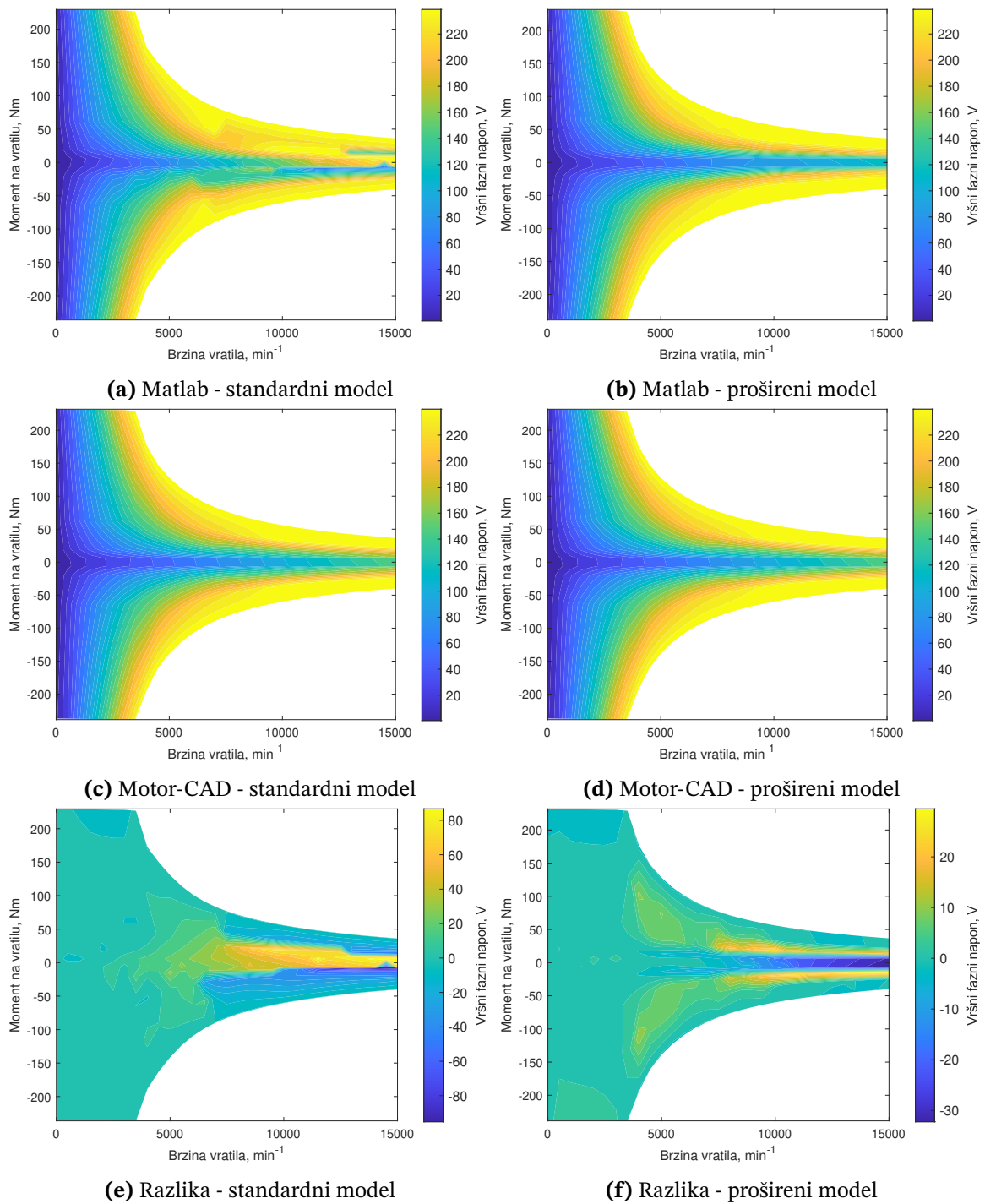
Slika 4.65. Kut vektora struje (γ), objedinjeni motorski i generatorski režim



Slika 4.66. Rotorska struja, objedinjeni motorski i generatorski režim



Slika 4.67. Ukupni gubitci, objedinjeni motorski i generatorski režim



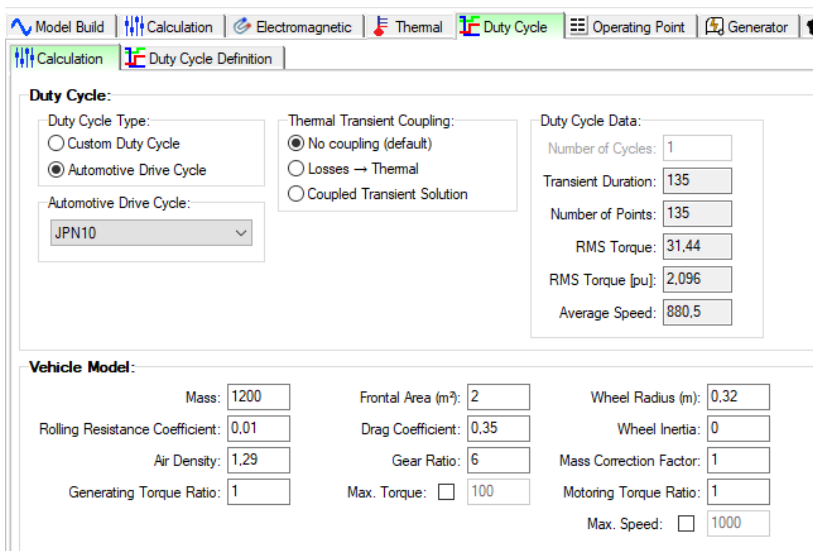
Slika 4.68. Vršni fazni napon, objedinjeni motorski i generatorski režim

Tablica 4.14. Trajanje proračuna, *Efficiency Map*

Režim	Standardni model		Prošireni model	
	Matlab	Motor-CAD	Matlab	Motor-CAD
Motor	5,1 s	45,3 s	19,7 s	2m 14s
Generator	7,4 s	44,7 s	35,1 s	2m 42s
MotGen	8,2 s	1m 1s	34,6 s	3m 10s
Omjer trajanja	8,9		6,8	
	6,0		4,6	
	7,4		5,5	

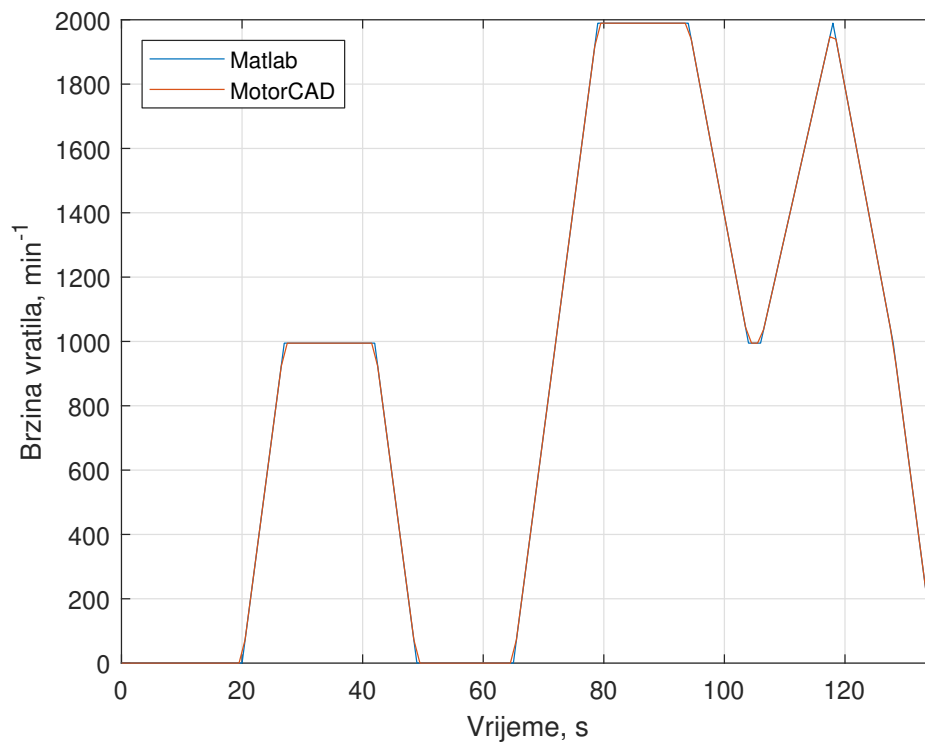
4.3. Duty Cycle

U ovom se potpoglavlju uspoređuju rezultati kartice *Duty Cycle* i *Matlab* funkcije *DutyCycle*. Na slikama od 4.70. do 4.87. dani su rezultati analize ciklusa vožnje *JNP10*, a u tablici 4.15. dan je sumarni prikaz analize tog ciklusa. Na slikama 4.72. i 4.73. su vidljive šiljaste oscilacije (na primjer između 60. i 80. sekunde) u rezultatima *Motor-CADa*, spomenute oscilacije nemaju fizikalnog smisla te predstavljaju grešku u *Motor-CADu*. Na slici 4.76. je vidljiv povremeni mali pad korisnosti u rezultatima *Matlab-a* (na primjer između 25. i 42. sekunde), nema fizikalnog objašnjenja za taj pad nego on predstavlja manjkavost koda kad se koristi standardni model. Na slici 4.77. je vidljivo da korištenjem proširenog modela tih padova nema. U rezultatima *Motor-CADa* ta razlika ne postoji između modela.

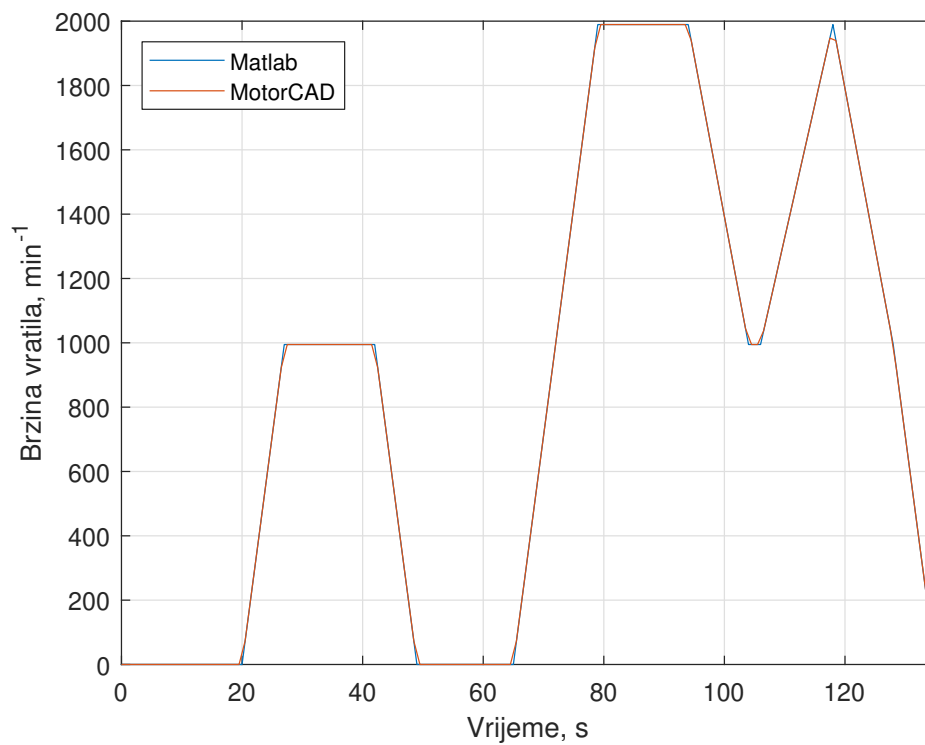


Slika 4.69. Motor-CAD Lab, Duty Cycle

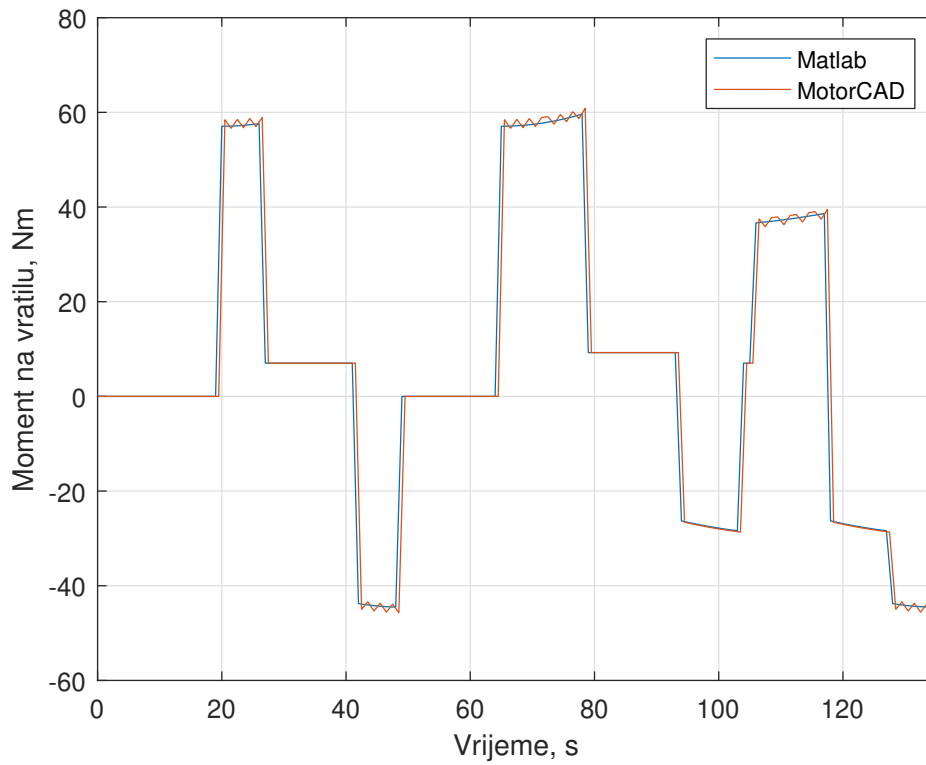
Sljedeće se slike odnose na ciklus *JPN10*



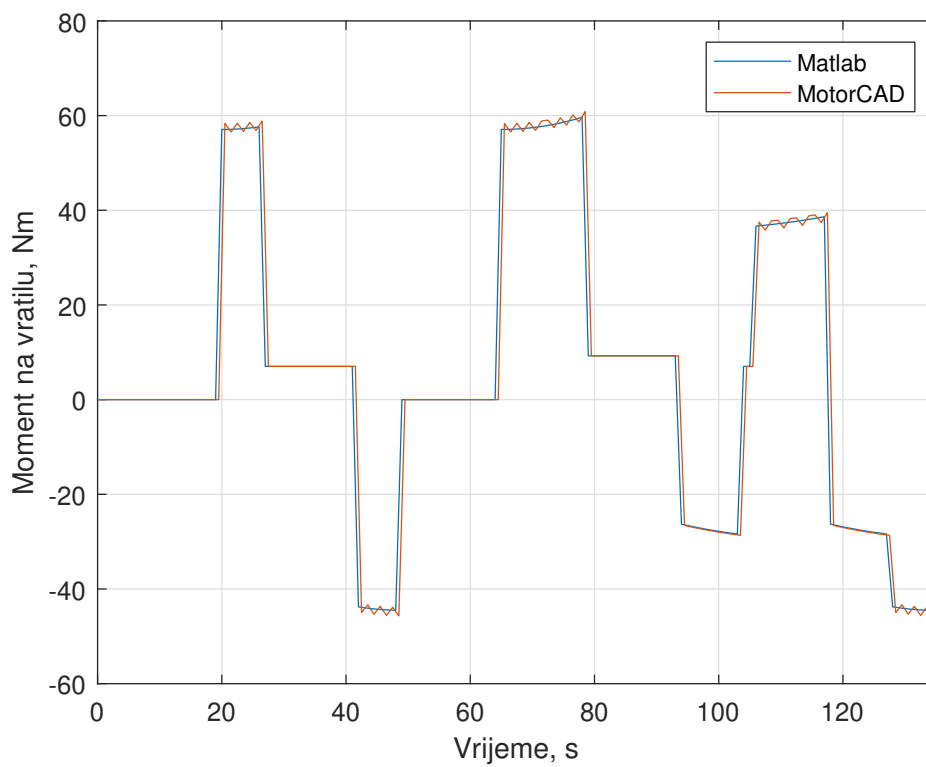
Slika 4.70. Brzina vratila, standardni model



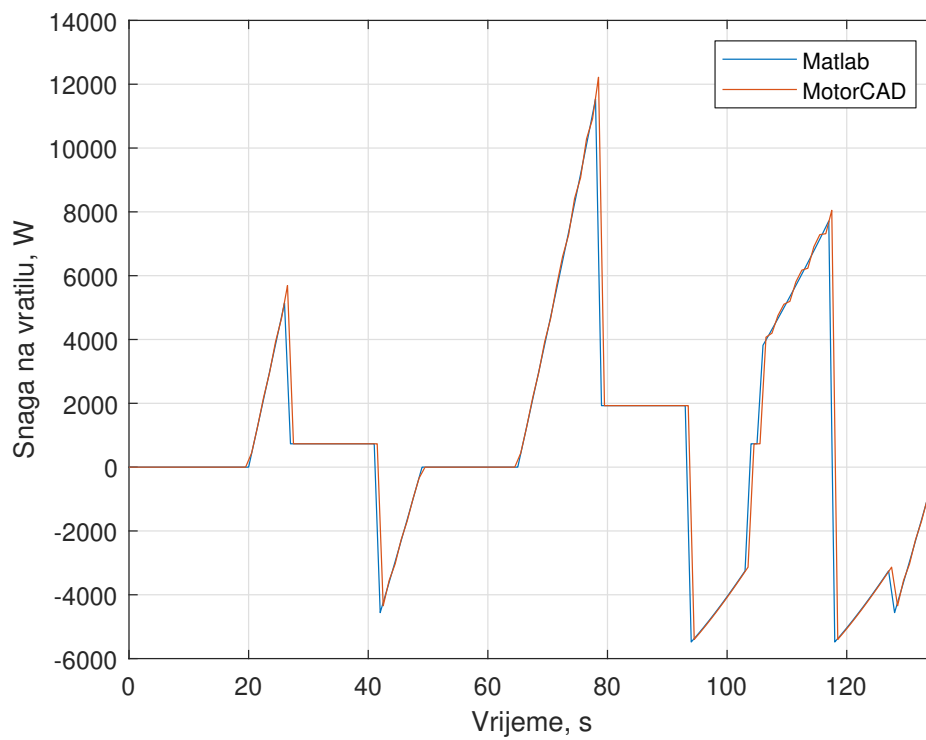
Slika 4.71. Brzina vratila, prošireni model



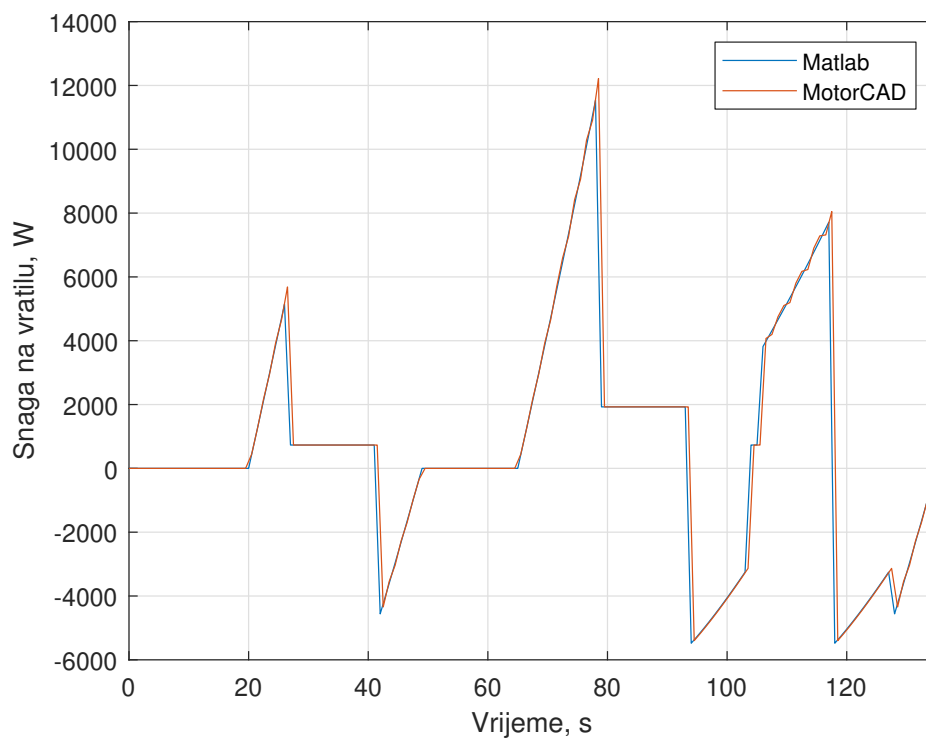
Slika 4.72. Moment na vratilu, standardni model



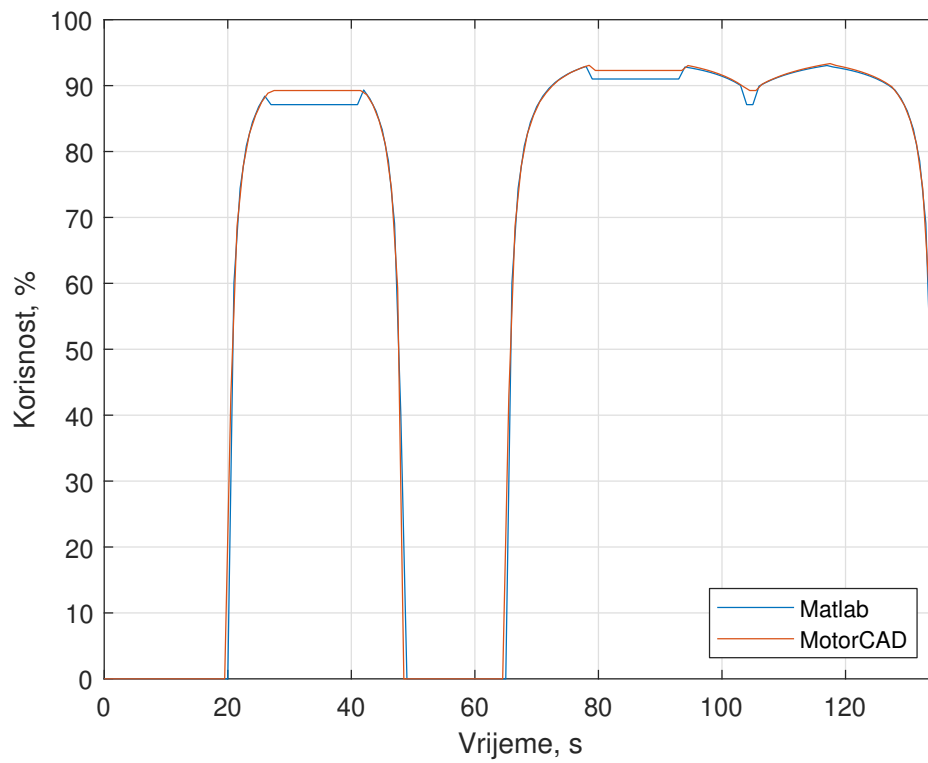
Slika 4.73. Moment na vratilu, prošireni model



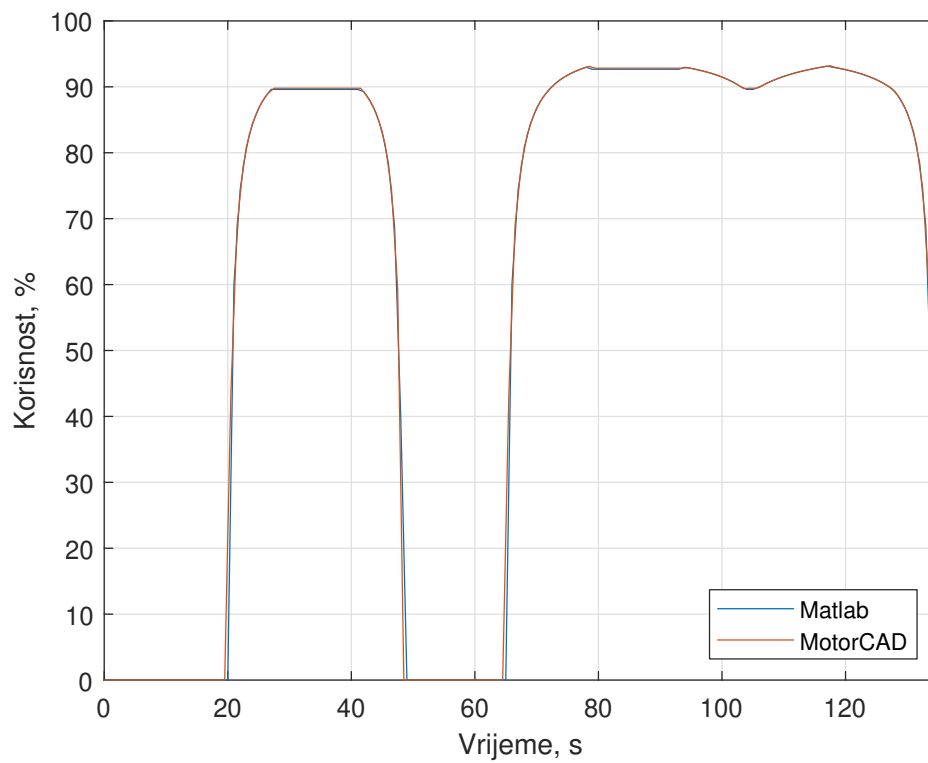
Slika 4.74. Snaga na vratilu, standardni model



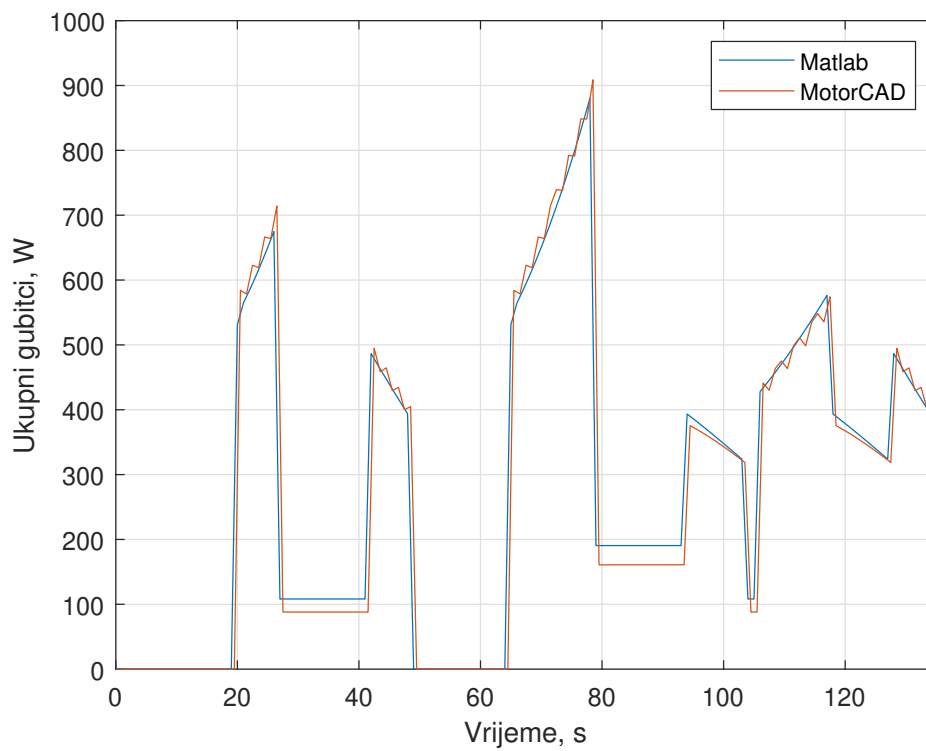
Slika 4.75. Snaga na vratilu, prošireni model



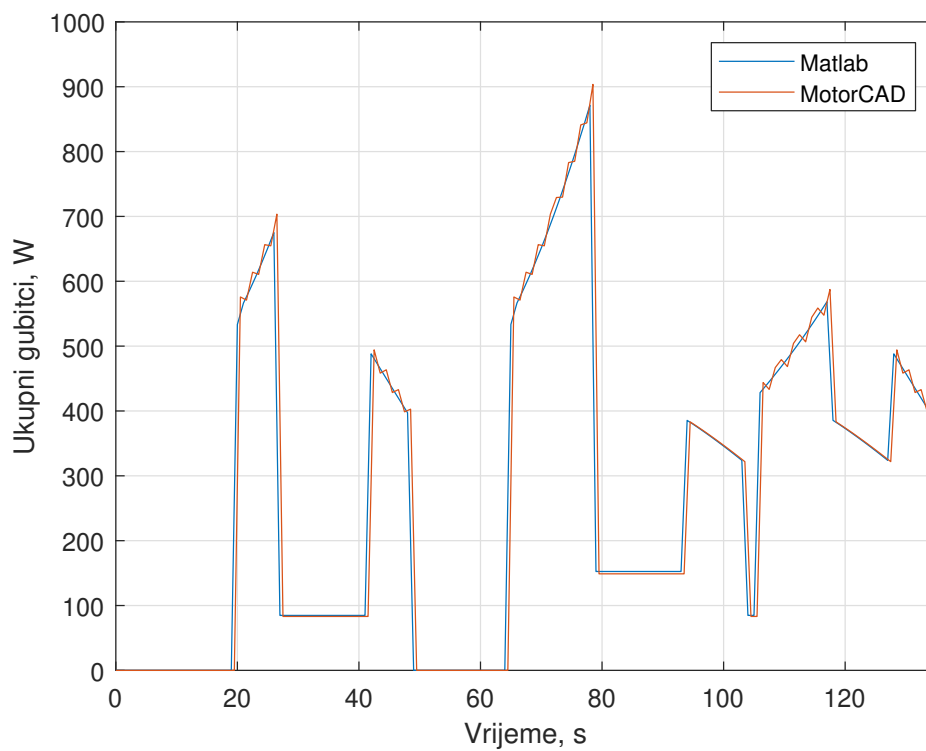
Slika 4.76. Korisnost, standardni model



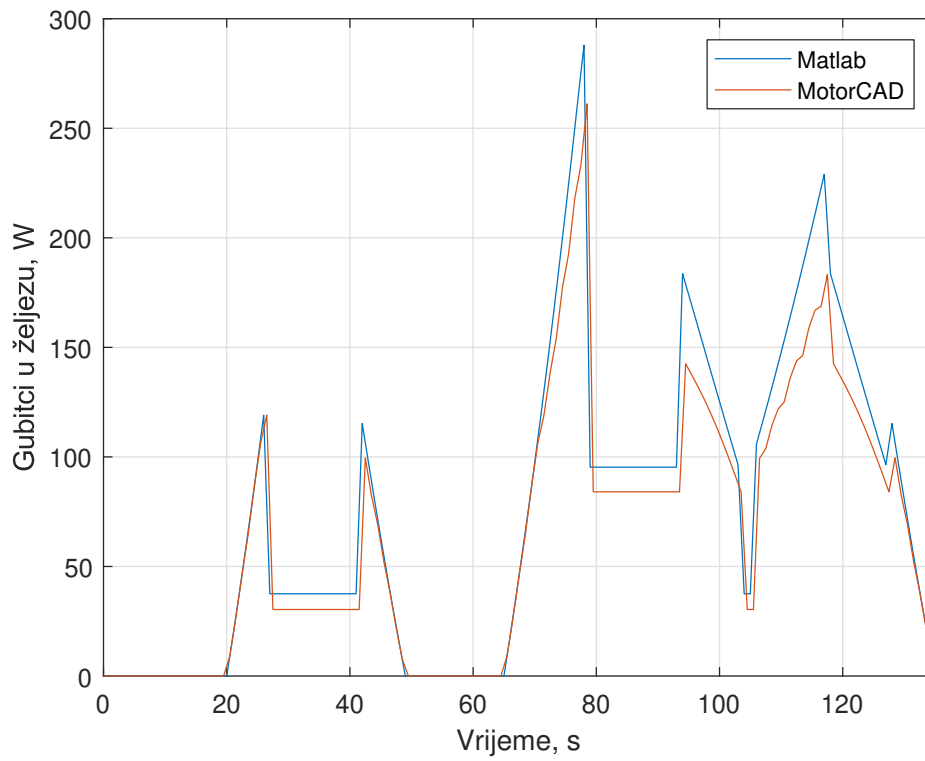
Slika 4.77. Korisnost, prošireni model



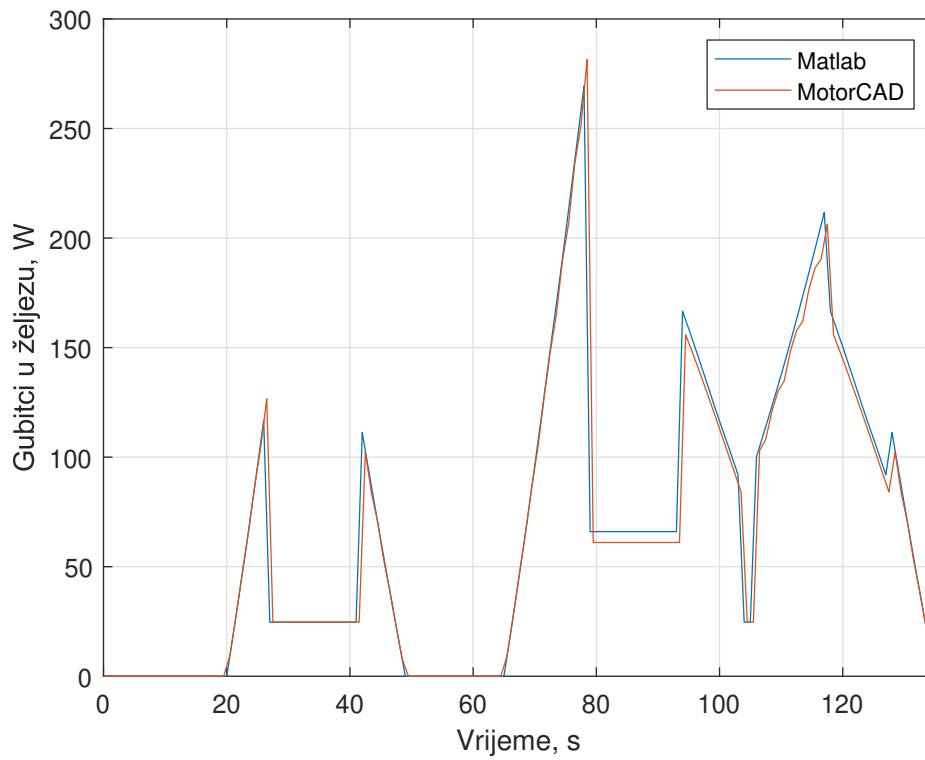
Slika 4.78. Ukupni gubitci, standardni model



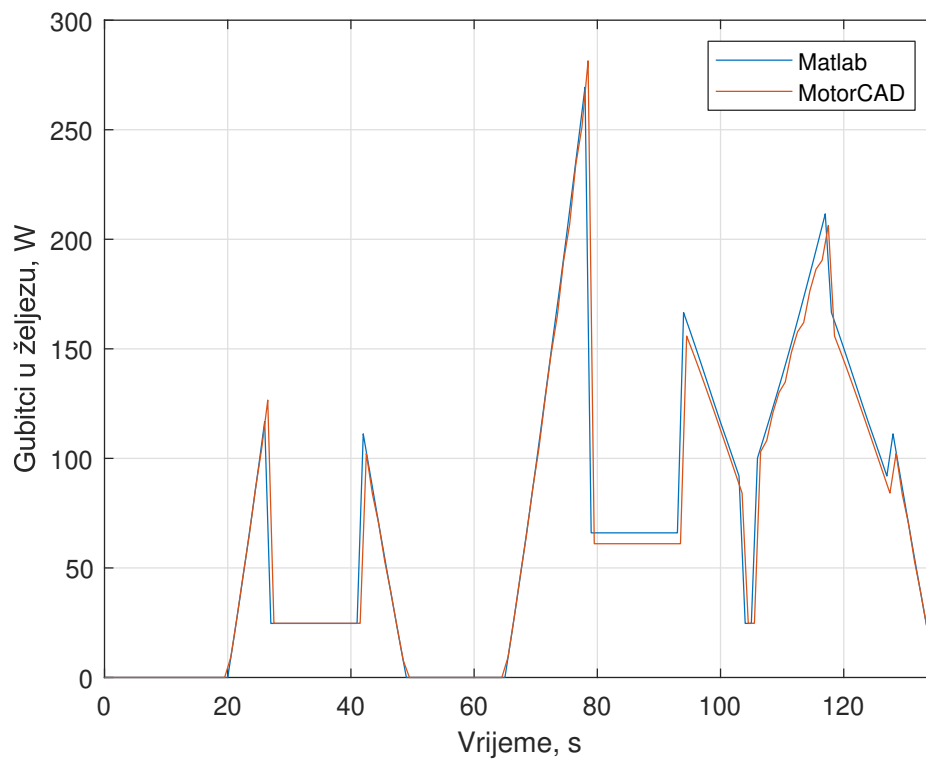
Slika 4.79. Ukupni gubitci, prošireni model



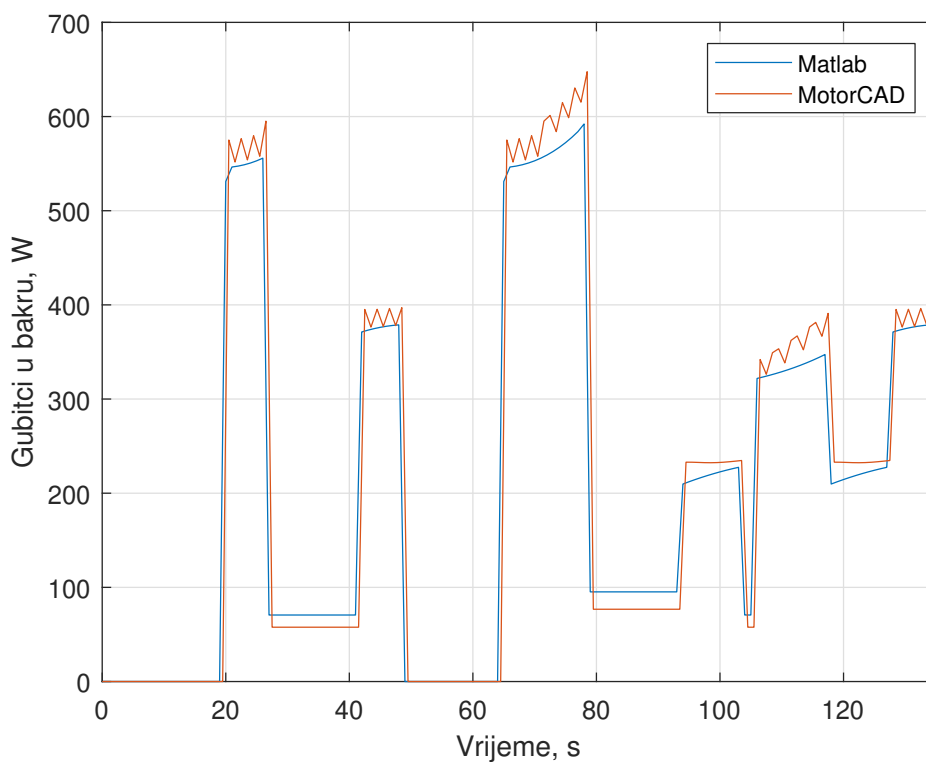
Slika 4.80. Gubitci u željezu, standardni model



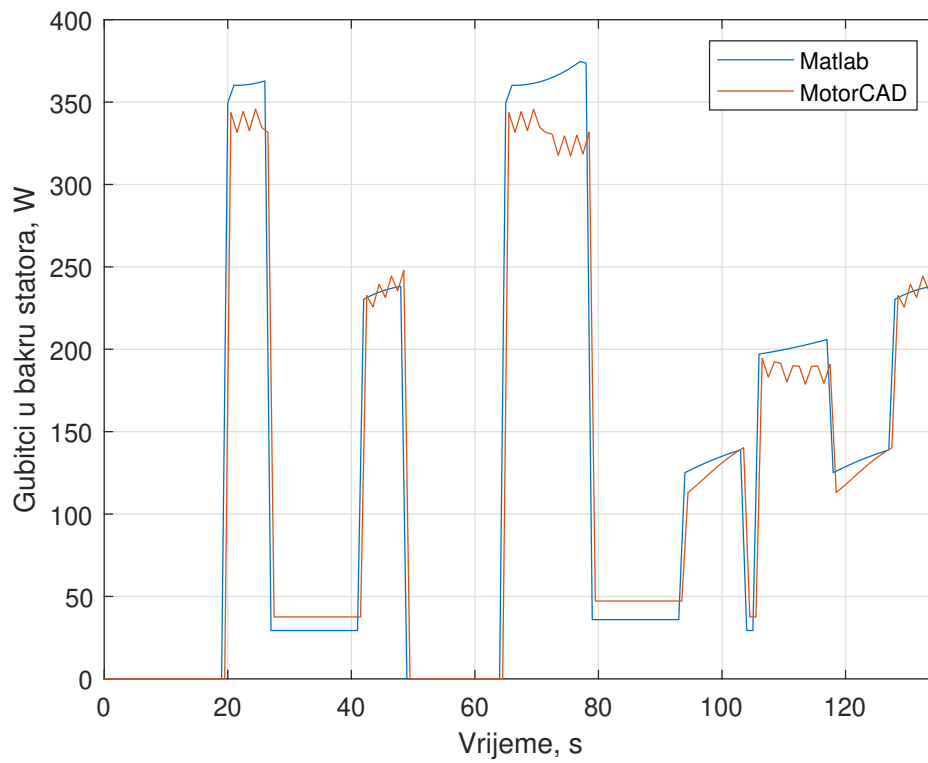
Slika 4.81. Gubitci u željezu, prošireni model



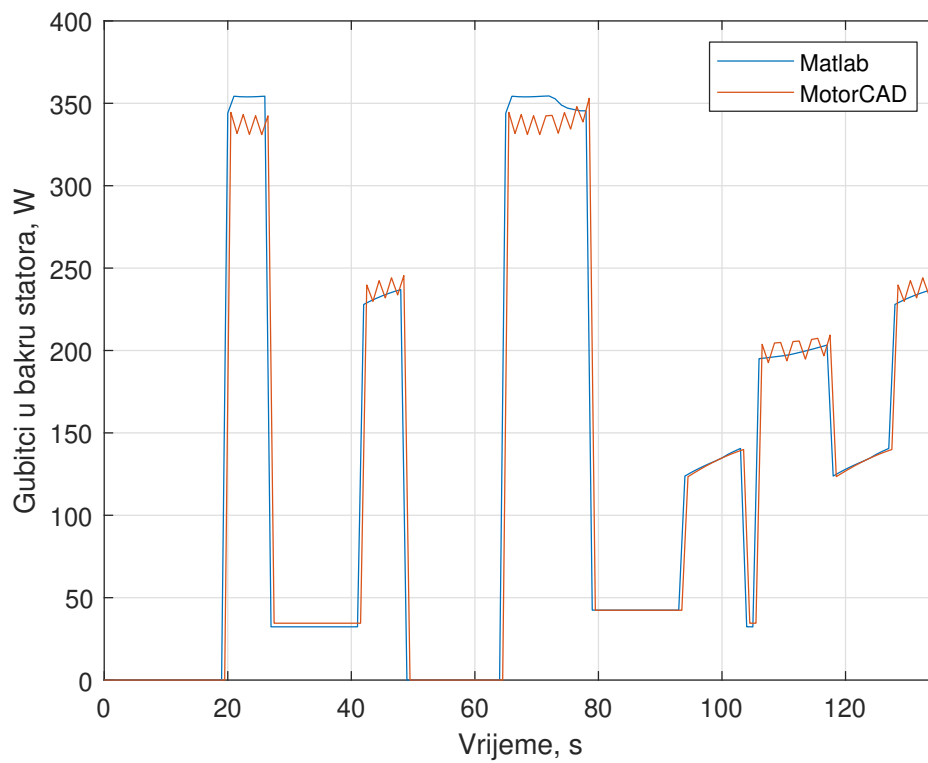
Slika 4.82. Gubitci u bakru, standardni model



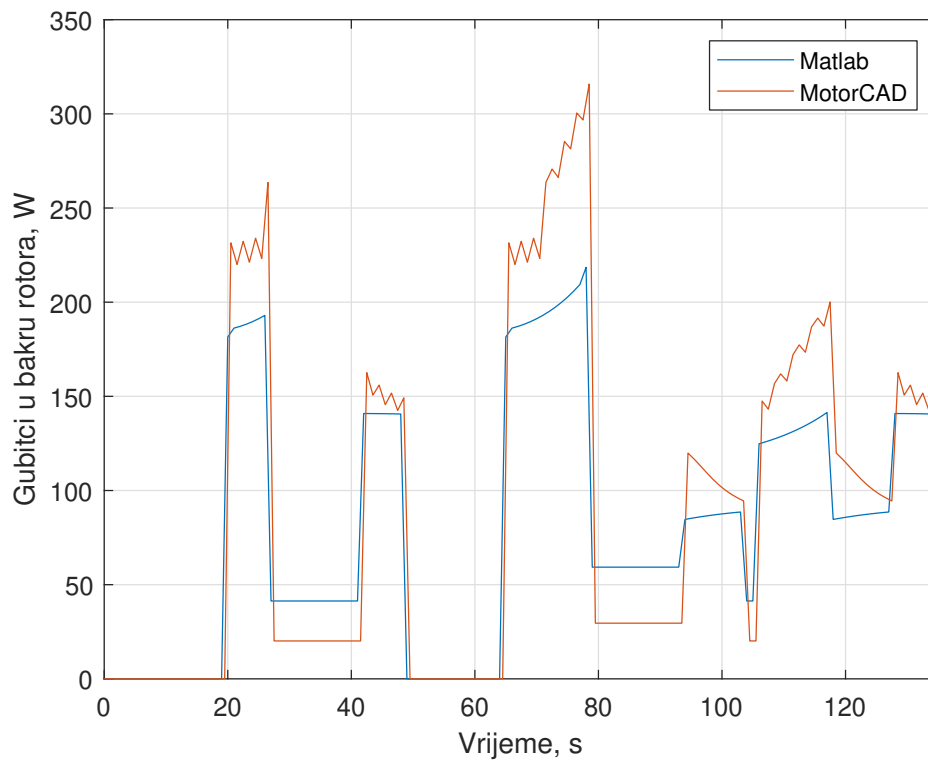
Slika 4.83. Gubitci u bakru, prošireni model



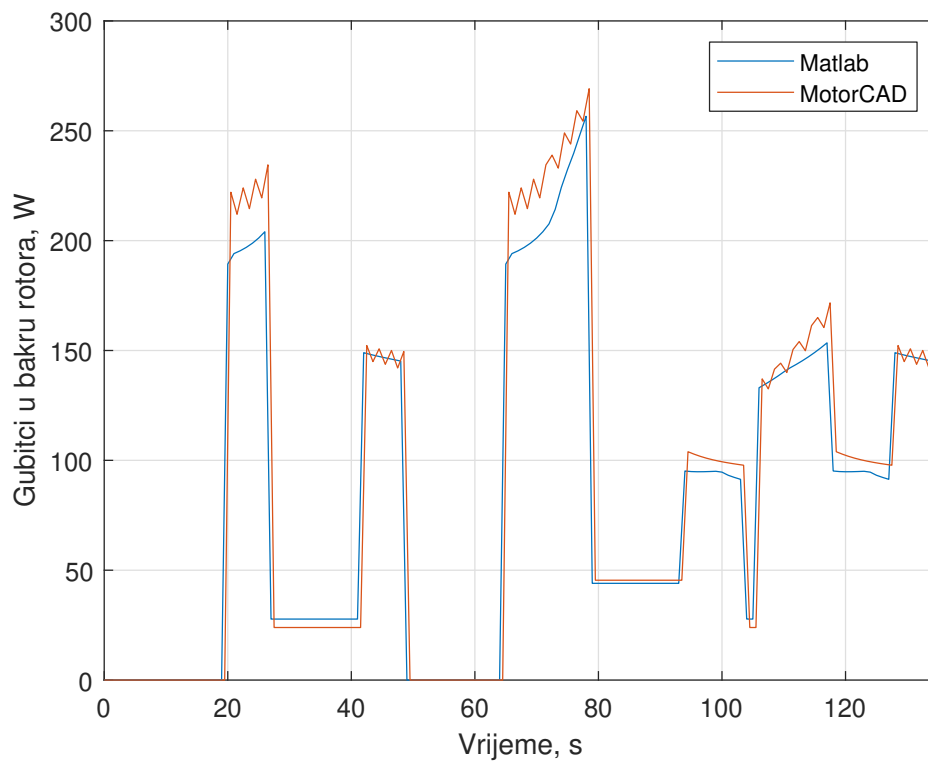
Slika 4.84. Gubitci u bakru statora, standardni model



Slika 4.85. Gubitci u bakru statora, prošireni model



Slika 4.86. Gubitci u bakru rotora, standardni model



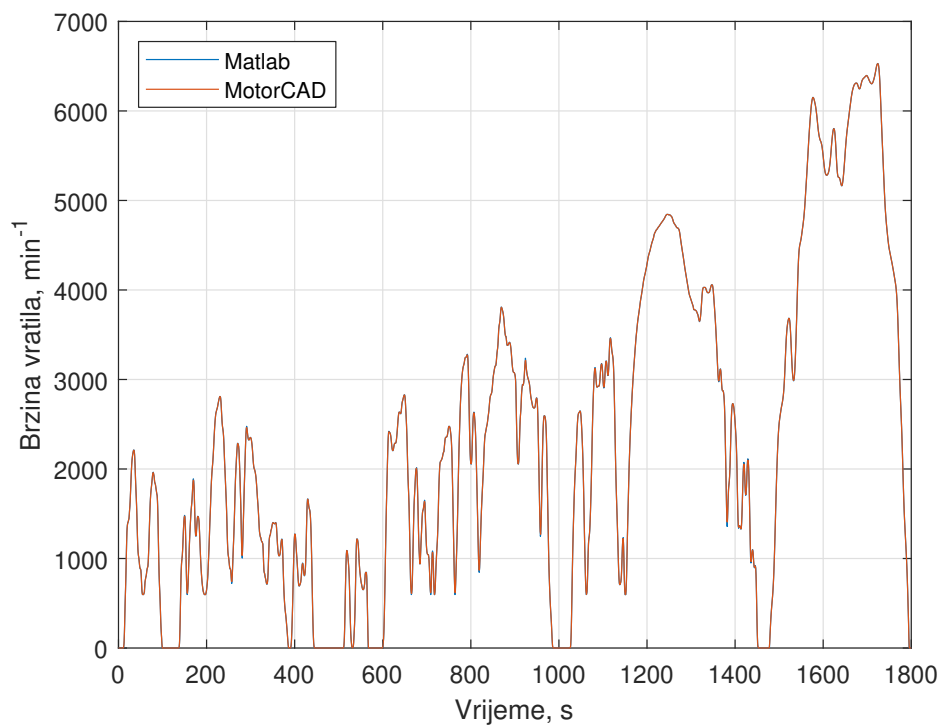
Slika 4.87. Gubitci u bakru rotora, prošireni model

Tablica 4.15. Sumarni prikaz analize ciklusa JPN10

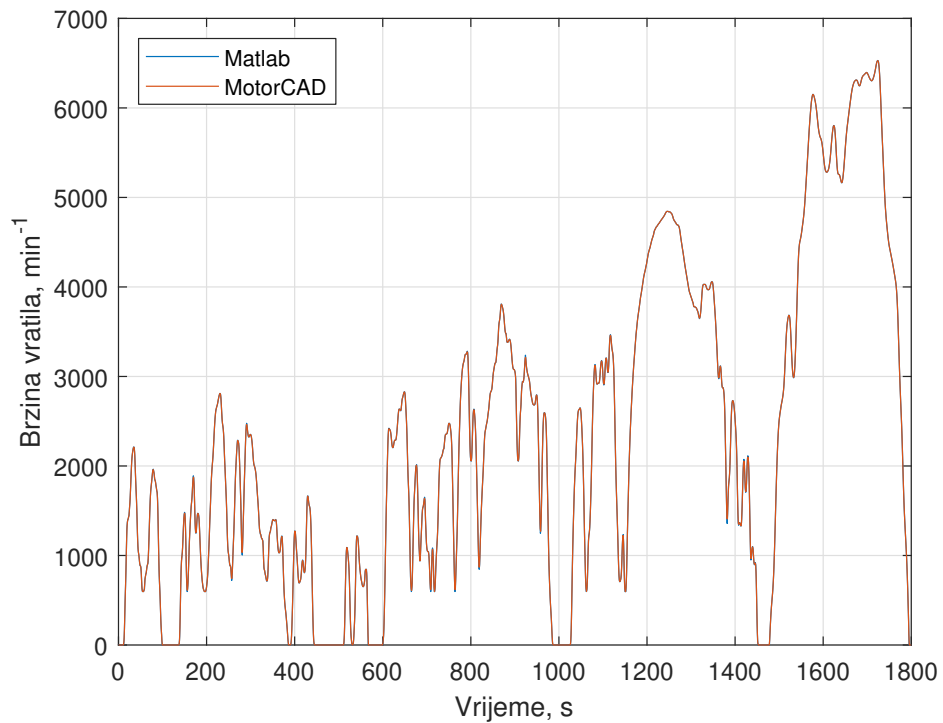
Parametar	Standardni model		Prošireni model	
	Matlab	Motor-CAD	Matlab	Motor-CAD
Prosječna korisnost (po potrošnji energije), %	89,34	89,63	89,61	89,69
Prosječna korisnost (točka po točka), %	87,03	87,65	87,72	87,83
Ulazna električna energija, Wh	64,38	67,75	64,09	67,62
Motorska energija na vratilu, Wh	57,53	60,96	57,53	60,93
Vraćena električna energija, Wh	31,00	29,31	31,01	29,28
Generatorska energija na vratilu, Wh	34,70	32,96	34,70	32,95
Ukupni gubitci, Wh	10,56	10,44	10,27	10,37
Gubitci u bakru statora, Wh	4,72	4,57	4,68	4,65
Gubitci u željezu, Wh	2,79	2,44	2,48	2,43
Gubitci u bakru rotora, Wh	3,04	3,43	3,10	3,28
Udio motorskog rada, %	65,66	65,66	65,66	65,66
Udio generatorskog rada, %	34,34	34,34	34,34	34,34

Na slikama od 4.88. do 4.105. dani su rezultati analize ciklusa vožnje *WLTP Class 3*, a u tablici 4.16. dan je sumarni prikaz analize tog ciklusa.

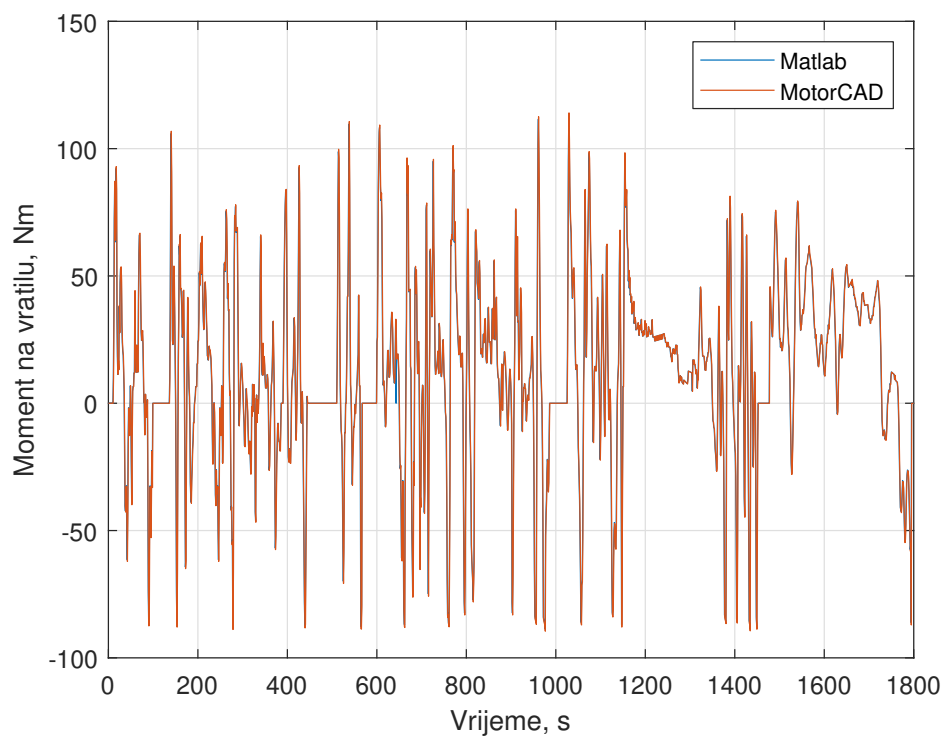
Sljedeće se slike odnose na ciklus *WLTP Class 3*



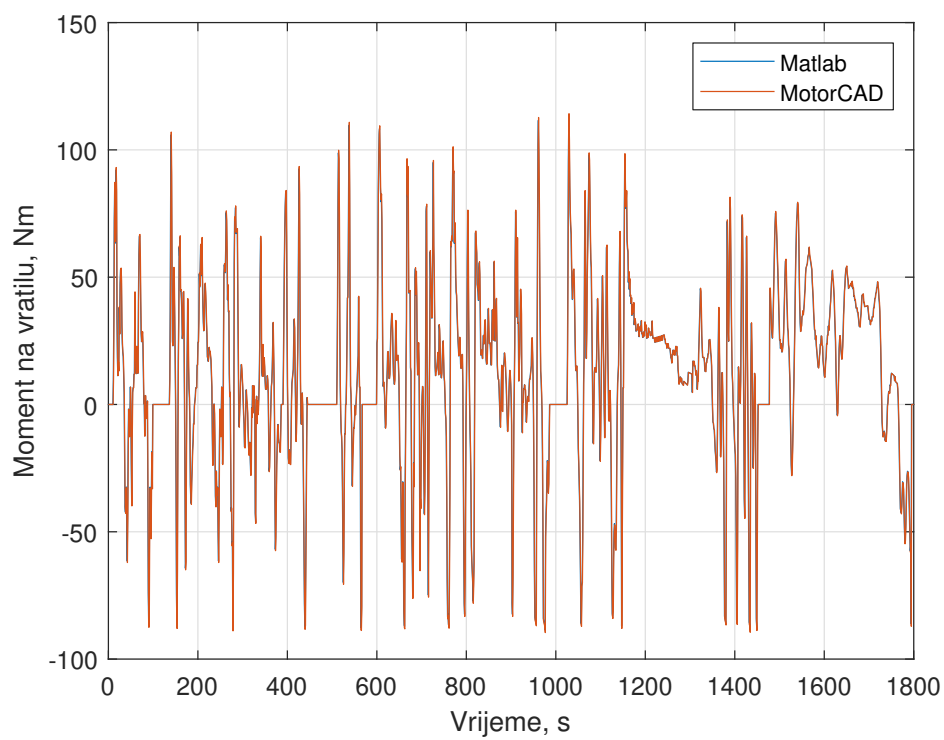
Slika 4.88. Brzina vratila, standardni model



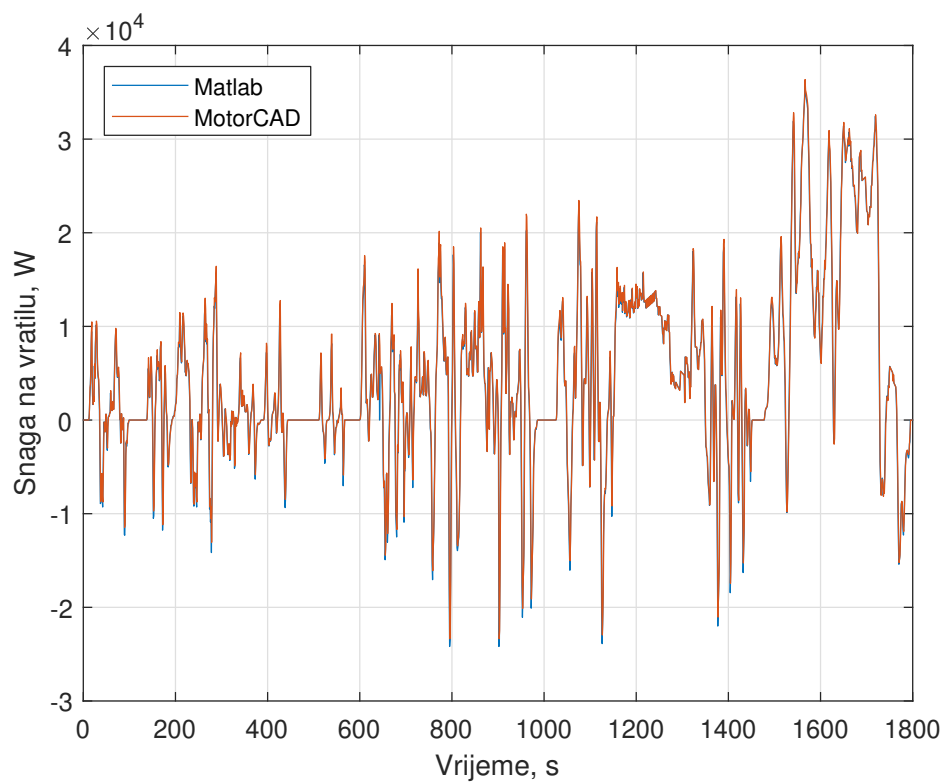
Slika 4.89. Brzina vratila, prošireni model



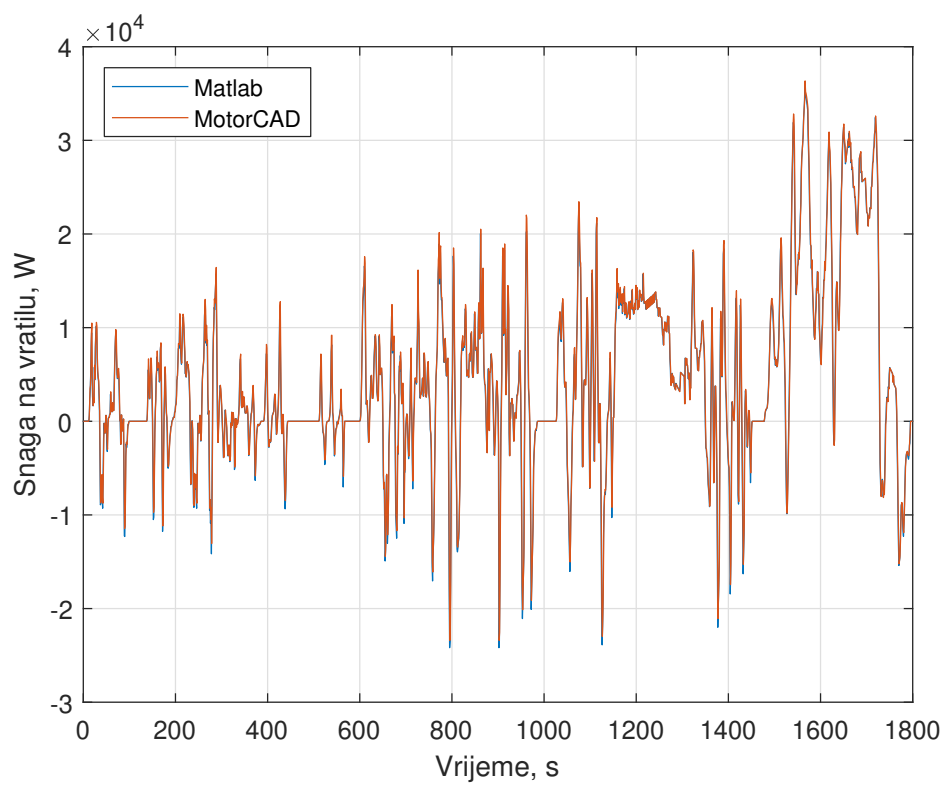
Slika 4.90. Moment na vratilu, standardni model



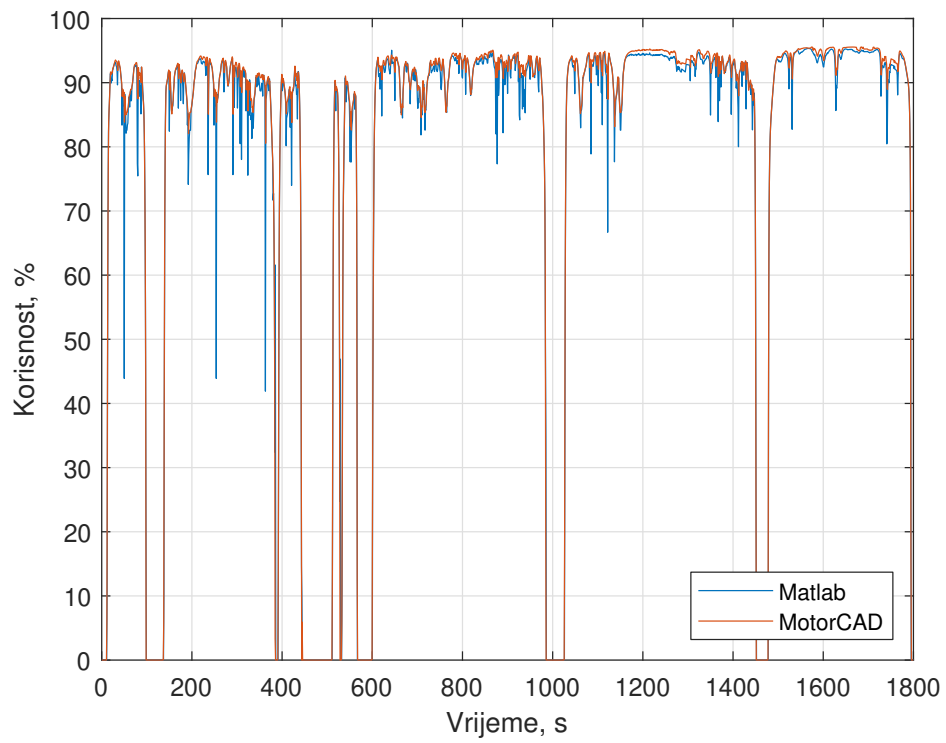
Slika 4.91. Moment na vratilu, prošireni model



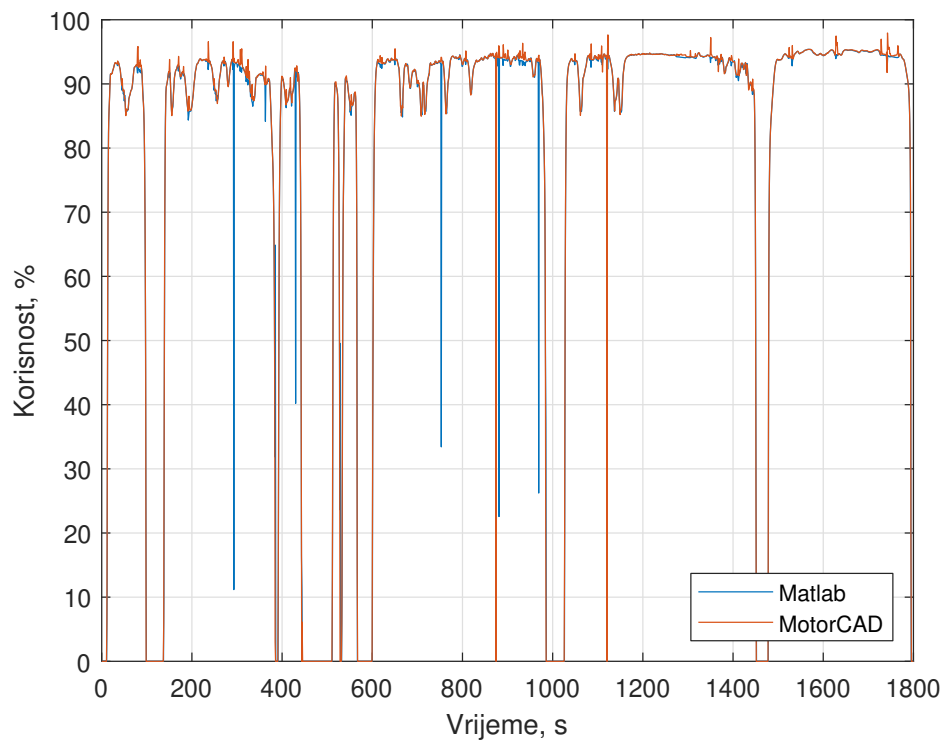
Slika 4.92. Snaga na vratilu, standardni model



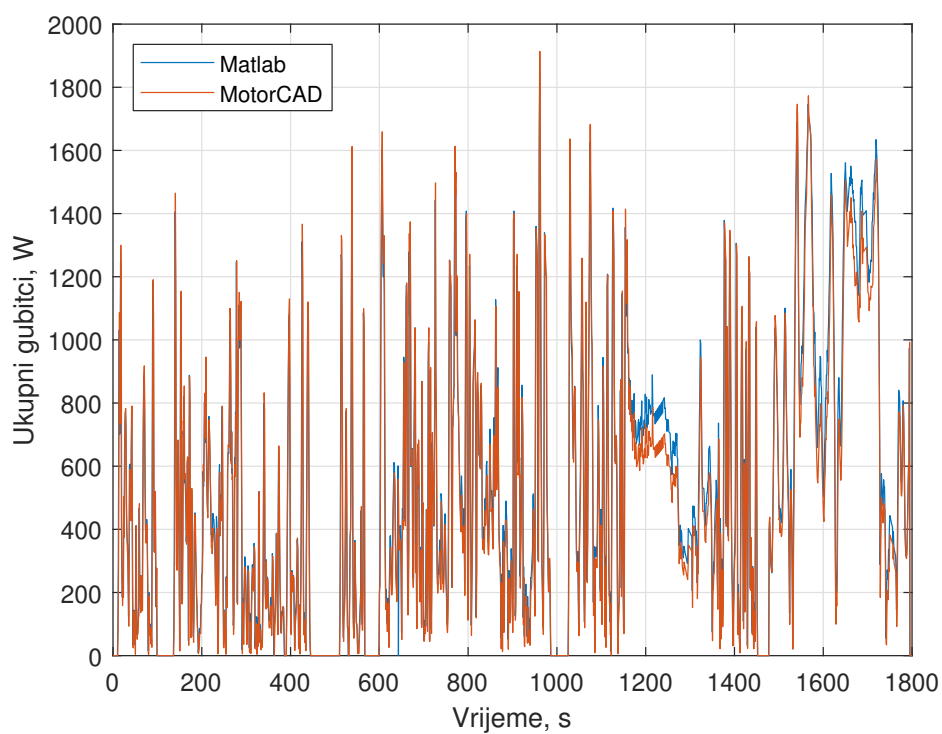
Slika 4.93. Snaga na vratilu, prošireni model



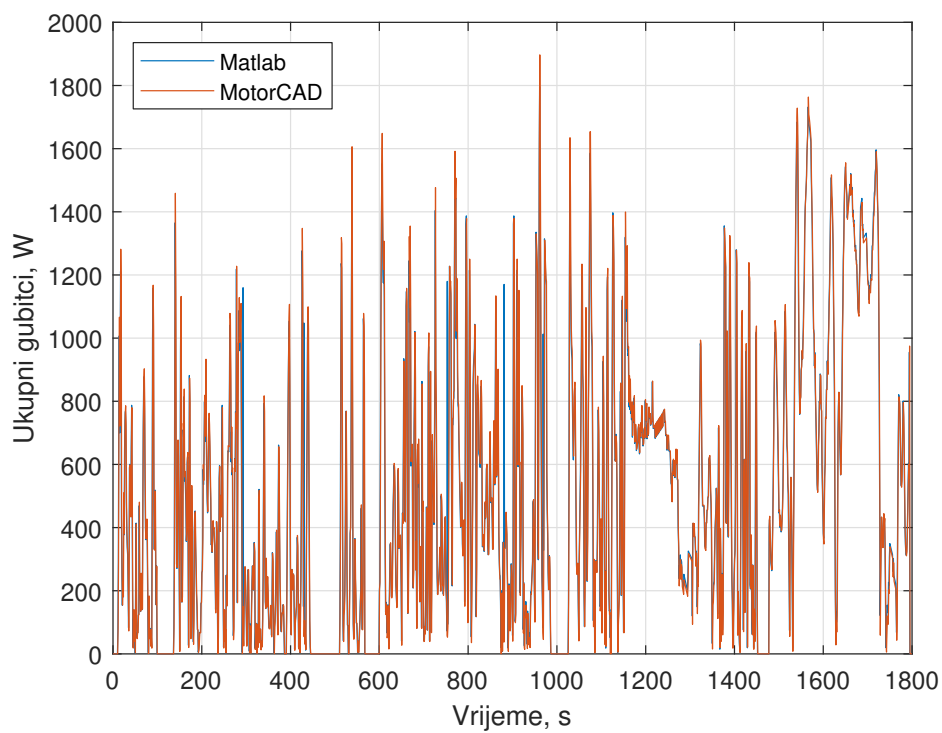
Slika 4.94. Korisnost, standardni model



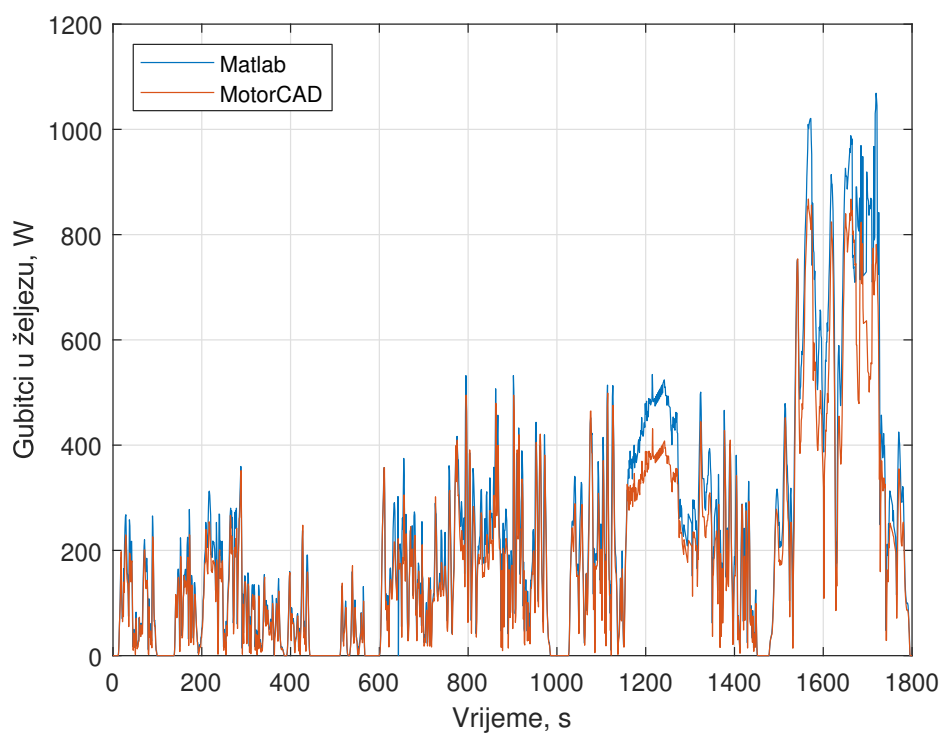
Slika 4.95. Korisnost, prošireni model



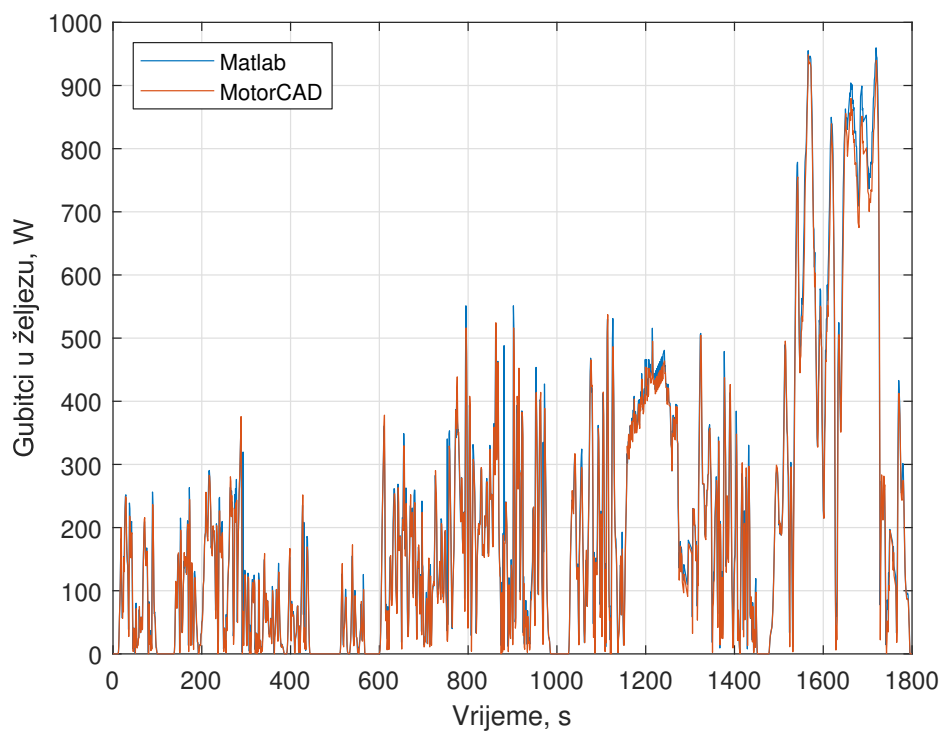
Slika 4.96. Ukupni gubitci, standardni model



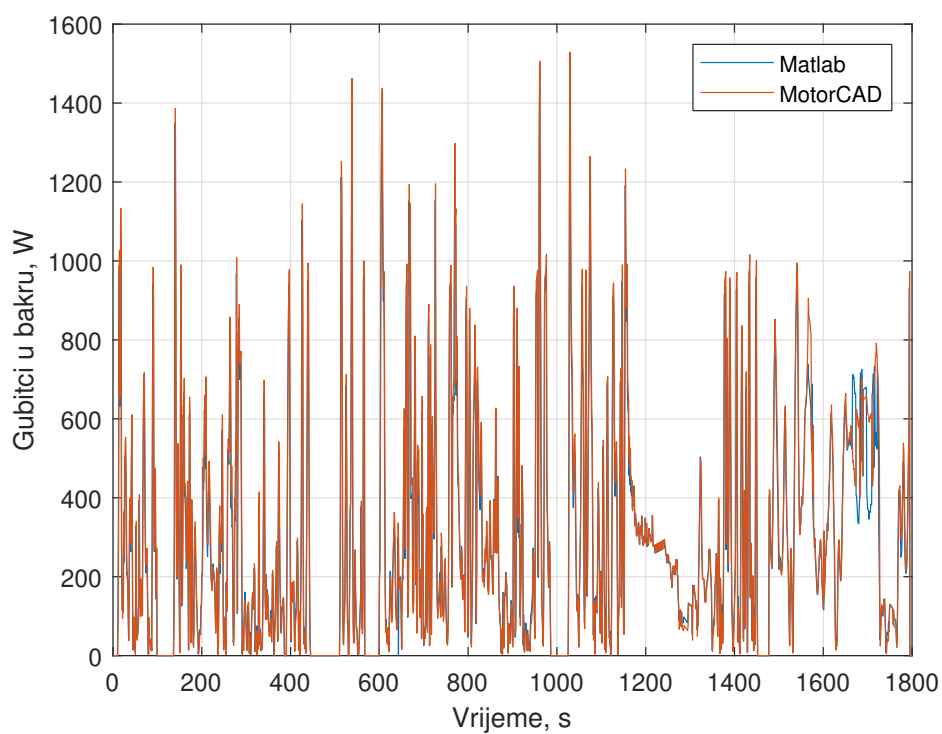
Slika 4.97. Ukupni gubitci, prošireni model



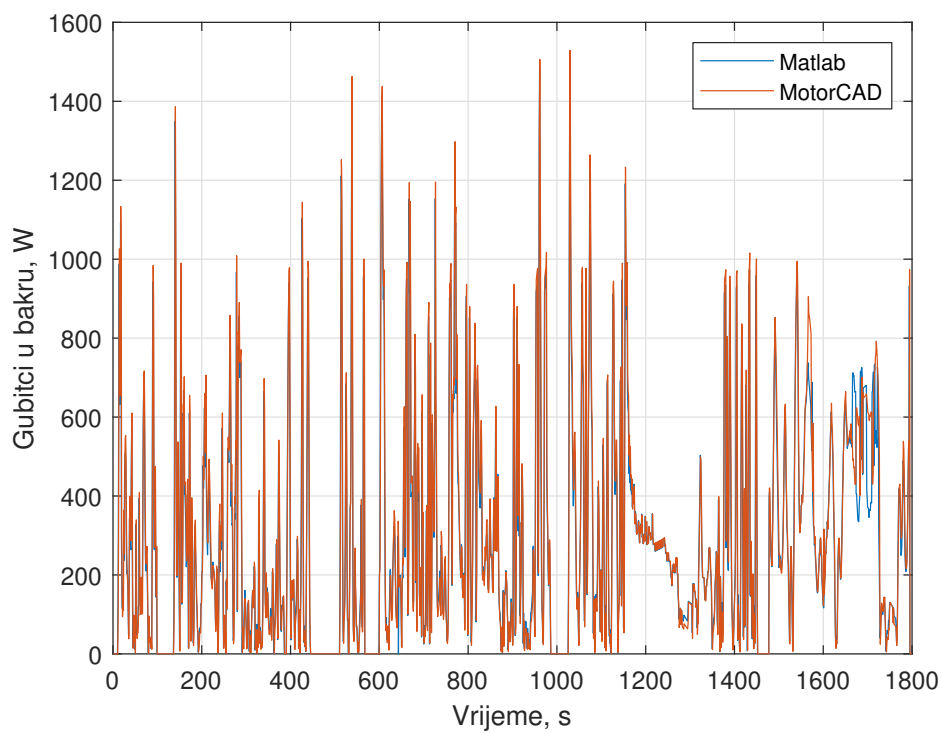
Slika 4.98. Gubitci u željezu, standardni model



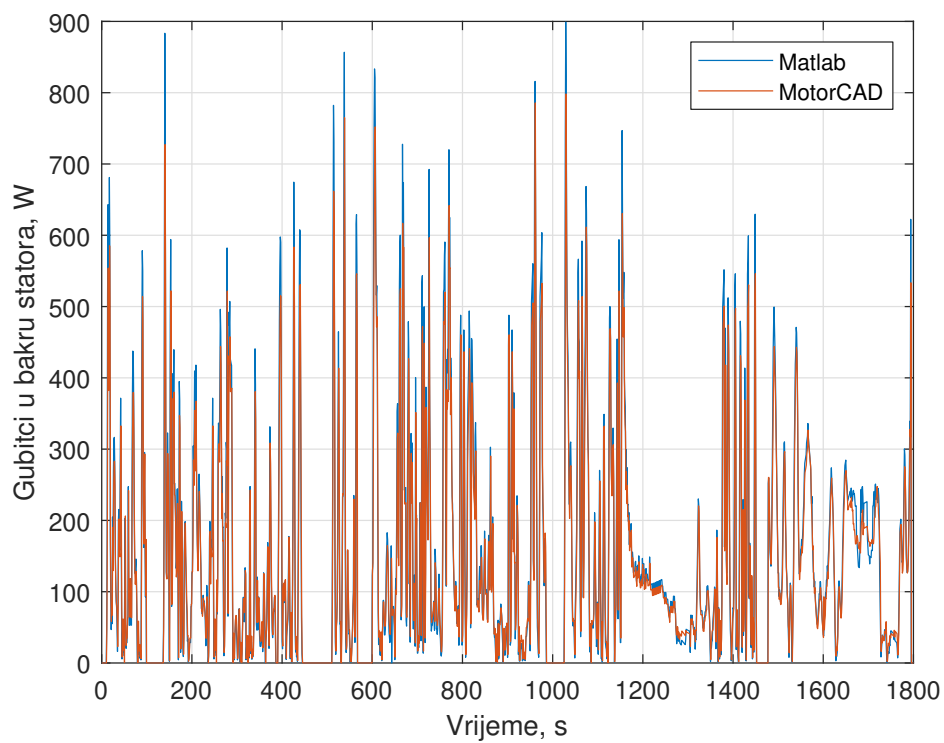
Slika 4.99. Gubitci u željezu, prošireni model



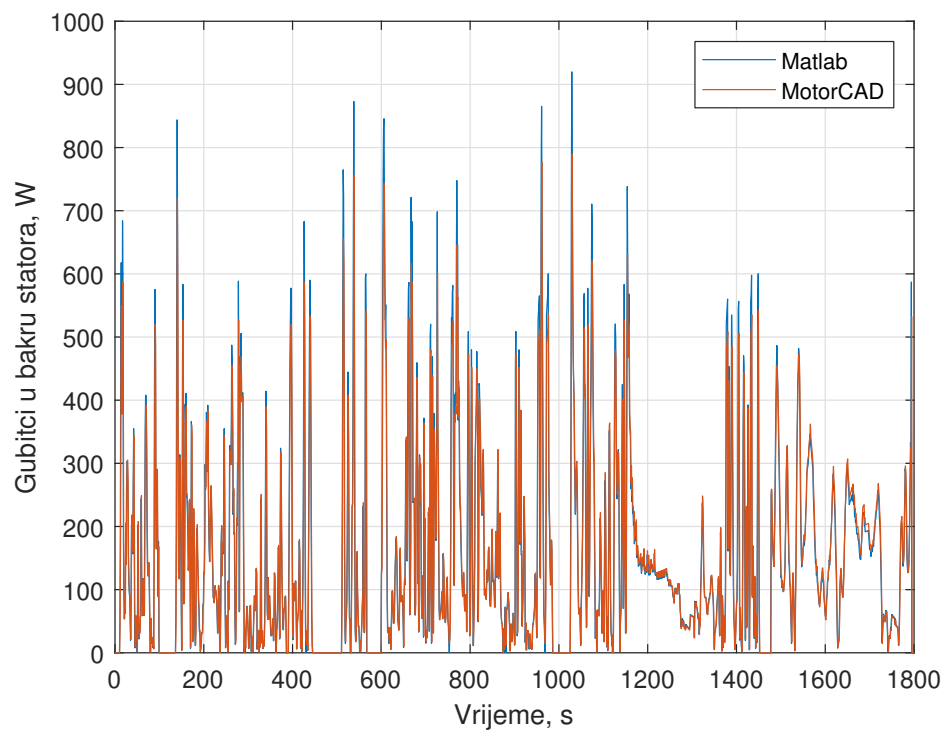
Slika 4.100. Gubitci u bakru, standardni model



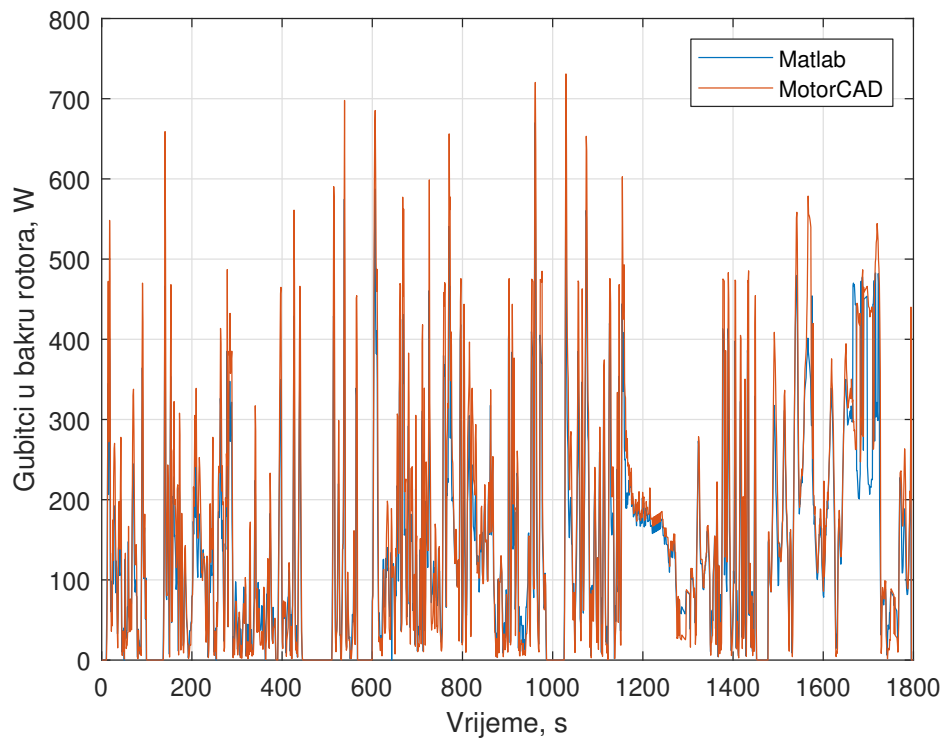
Slika 4.101. Gubitci u bakru, prošireni model



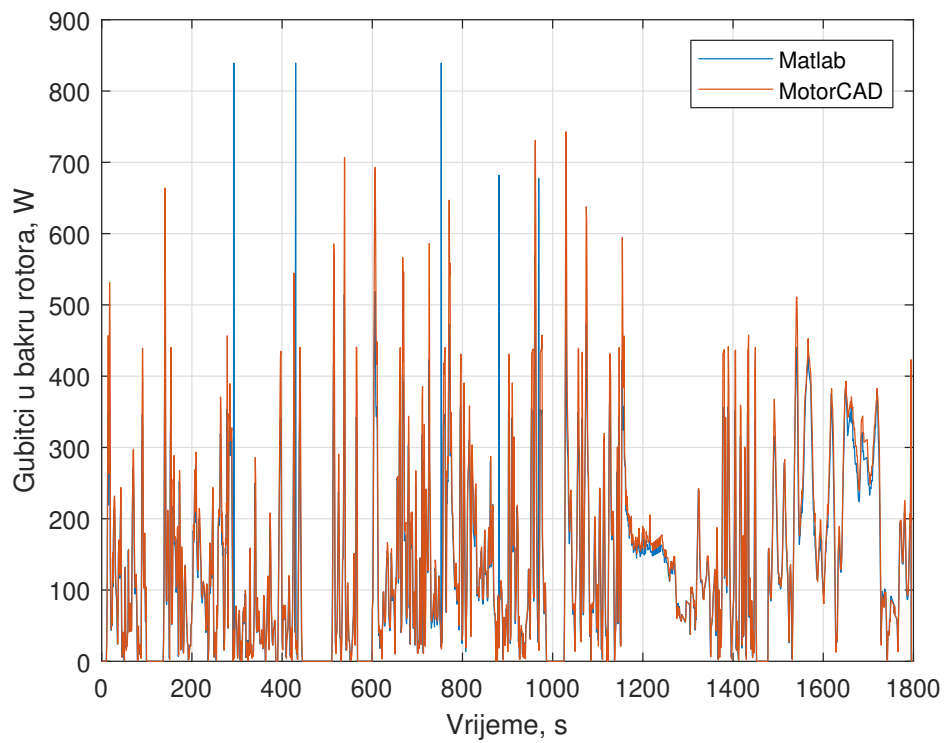
Slika 4.102. Gubitci u bakru statora, standardni model



Slika 4.103. Gubitci u bakru statora, prošireni model



Slika 4.104. Gubitci u bakru rotora, standardni model



Slika 4.105. Gubitci u bakru rotora, prošireni model

Tablica 4.16. Sumarni prikaz analize ciklusa WLTP Class 3

Parametar	Standardni model		Prošireni model	
	Matlab	Motor-CAD	Matlab	Motor-CAD
Prosječna korisnost (po potrošnji energije), %	93,13	93,53	93,43	93,48
Prosječna korisnost (točka po točka), %	89,97	90,75	90,85	91,09
Ulazna električna energija, Wh	3061,90	3108,44	3053,40	3110,98
Motorska energija na vratilu, Wh	2860,90	2919,68	2863,10	2919,31
Vraćena električna energija, Wh	627,15	600,94	628,41	601,91
Generatorska energija na vratilu, Wh	683,67	655,77	683,72	655,82
Ukupni gubitci, Wh	257,50	243,59	245,67	245,58
Gubitci u bakru statora, Wh	75,41	70,63	76,48	75,13
Gubitci u željezu, Wh	115,15	96,35	103,67	99,76
Gubitci u bakru rotora, Wh	66,94	76,62	65,52	70,70
Udio motorskog rada, %	71,92	71,86	71,92	71,82
Udio generatorskog rada, %	28,08	28,14	28,08	28,18

Tablica 4.17. Trajanje proračuna, *Duty Cycle*

Ciklus	Standardni model		Prošireni model	
	Matlab	Motor-CAD	Matlab	Motor-CAD
JPN10	1,4 s	59,0 s	6,3 s	2m 50s
WLTP Class 3	14,4 s	10m 43s	1m 12s	13m 4s
Omjer trajanja	42,1		27,0	
	44,7		10,9	

Općeniti je zaključak ponovno da postoje vidljive razlike između rezultata *Matlab* koda i *Motor-CAD* rezultata, razlike su manje kod proširenog modela, nego kod standardnog modela. *Matlab* kod radi značajno brže od *Motor-CAD*a. Računanje s proširenim modelom traje vremenski duže (u slučaju *Motor-CAD*a je upitno je li smisleno prijeći na prošireni model).

5. Zaključak

Za potrebe analize ciklusa vožnje pogonskog sklopa temeljenog na sinkronom stroju s uzbudnim namotom izrađen je *Matlab* kod. Kod je idejno i funkcionalno sličan modulu *Lab* programskog paketa *Motor-CAD*. Radi na način da prvo preuzima mape izgrađenog modela stroja koje je potrebno stvoriti modulom *Lab*, a potom je na temelju tih mapa moguće provoditi određene proračune od interesa kao što su na primjer analiza mape korisnosti ili ciklusa vožnje. Kod može raditi s finijim i s grubljim mapama ovisno o želji i potrebi. Standardni model stroja koji je izgrađen od 175 točaka uz primjenu *Matlab* algoritma omogućuje vrlo brz proračun ciklusa vožnje. Prošireni model povećava vrijeme izvođenja proračuna (i gradnje samog modela), ali omogućuje točniji proračun gubitaka u željezu. Gubici u bakru su praktično jednaki u oba modela jer oba modela daju slične struje, a otpor namota ne ovisi o broju točaka od kojih je izgrađen model. *Matlab* kod je kroz rad uspoređen s programom *Motor-CAD*. Od njega radi značajno brže, ali postoje vidljive razlike u rezultatima. Razlike su manje kad se koristi finija mapa (u ovom radu takozvani prošireni model).

Sinkroni stroj s uzbudnim namotom kao i svaki drugi stroj ima svoje prednosti i mane. Izostanak magneta pri konstrukciji, a pritom visoka korisnost na brzinama većim od rubne brzine čine ovaj stroj vrlo primamljivim odabirom za primjene gdje vozilo većinu svog radnog vijeka provodi na relativno visokim brzinama i srednjim momentima kao što je na primjer vožnja na autoputu. Cijena koja se za to plaća je nešto složeniji električki pretvarač jer je osim statorskog potrebno napajati i rotorski namot (pojavljuje se i potreba za zamjenom potrošnih dijelova ako se rotor napaja preko četkica i kliznih kolutova) i nešto niža korisnost pri malim brzinama uz veliki traženi moment. Uzevši u obzir prethodno navedene prednosti i mane shodno je za očekivati je da će ovaj tip stroja u budućnosti obuhvaćati sve veći tržišni udio pogonskih sklopova modernih vozila.