Statičko optimiranje parametara upravljačkih trajektorija uzlazne promjene stupnja prijenosa automatskog mjenjača

Hihlik, Mislav

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:300745

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mislav Hihlik

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Joško Deur, dipl. ing.

Student:

Mislav Hihlik

Zagreb, 2019.

IZJAVA

Pod punom moralnom odgovornošću izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Mislav Hihlik

ZAHVALA

Posebno se zahvaljujem voditelju rada prof. dr. sc. Jošku Deuru na ukazanom povjerenju te na izvrsnim znanstvenim i stručnim savjetima koje su pridonijele ideji i kvaliteti samog rada.

Iznimno se zahvaljujem doktorandu Ivanu Cvoku, mag. ing. mech. koji me nesebičnim odvajanjem svoga vremena, izvrsnim savjetima te diskusijama vodio kroz ovaj rad i time značajno pomogao u njegovoj izradi.

Najsrdačnije se zahvaljujem svojoj obitelji, ocu Marijanu, majci Moniki, braći Matiji i Mihovilu na neizmjernom povjerenju, strpljenju i podršci tokom studija i izrade ovog rada.

Također se zahvaljujem svojim prijateljima koji su bili uz mene tokom studija te su mi pružili mnoštvo lijepih uspomena.

Na koncu, zahvaljujem se svojoj djevojci Ines na pruženoj bezrezervnoj podršci i razumijevanju tokom izrade ovog rada.

M.H.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MISLAV HIHLIK** Mat. br.: 0035201140

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Statičko optimiranje parametara upravljačkih trajektorija uzlazne promjene stupnja prijenosa automatskog mjenjača**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Static optimization of control trajectory parameters for an automatic transmission upshift**

Opis zadatka:

Automatski mjenjač s pretvaračem momenta ključan je mehatronički element pogonskog sustava vozila. Upravljanje uzlaznom promjenom stupnja prijenosa uobičajeno se izvodi moduliranjem kapaciteta okretnog momenta uključne i isključne spojke, a dodatno poboljšanje kvalitete promjene stupnja prijenosa postiže se smanjivanjem okretnog momenta pogonskog motora. Pritom se upravljanje često provodi u otvorenom krugu, tj. zadavanjem prikladnih profila upravljačkih varijabli, čiji se parametri optimiraju van realnog vremena s ciljem postizanja brze i udobne promjene stupnja prijenosa uz niske gubitke energije. U radu je potrebno:

1. Opisati karakteristične faze uzlazne promjene stupnja prijenosa automatskog mjenjača, odgovarajući dinamički model pogona vozila, te rezultate optimiranja parametara upravljačkih trajektorija dobivene uz primjenu genetskog algoritma za različite scenarije upravljanja mjenjačem (uključujući onaj u kojem se u inercijskoj fazi promjene koriste obje spojke).
2. Provesti reduciranje dinamičkog modela pogona u statički model uz pretpostavke konstantne brzine vrtnje izlaznog vratila mjenjača i linearno padajuće brzine klizanja isključne spojke, te formulirati statički optimizacijski problem.
3. Realizirati numerički alat za statičko optimiranje parametara upravljačkih trajektorija u inercijskoj fazi promjene stupnja prijenosa, te provesti optimiranje za različite upravljačke scenarije i različite upravljačke profile (konstantne te po dijelovima linearne).
4. Provesti usporednu analizu kvalitete upravljanja promjenom stupnja prijenosa za različite upravljačke scenarije putem usporednih grafova kriterija (Pareto fronti) i vremenskih odziva, uključujući i usporedbu s rezultatima optimiranja dobivenim primjenom genetskog algoritma.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
02. svibnja 2019.

Rok predaje rada:
04. srpnja 2019.

Predviđeni datum obrane:
10. srpnja 2019.
11. srpnja 2019.
12. srpnja 2019.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Joško Deur

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ:

SADRŽAJ: I

POPIS SLIKA: IV

POPIS TABLICA: VII

POPIS OZNAKA VIII

POPIS KRATICA XII

SAŽETAK XIII

SUMMARY XIV

1. UVOD 1

1.1. Motivacija 1

1.2. Opis upravljanja i optimizacije promjene stupnja prijenosa 3

1.3. Pregled sadržaja rada 5

2. MODELIRANJE DINAMIKE POGONA VOZILA 7

2.1. Modeli komponenti pogonskog sustava vozila 8

2.1.1. Model Ottovog motora i pretvarača momenta 8

2.1.2. Model sustava prijenosa snage i uzdužne dinamike vozila 11

2.2. Model automatskog mjenjača punog reda 13

2.2.1. Struktura naprednog mjenjača s velikim brojem stupnjeva prijenosa 13

2.2.2. Struktura modela automatskog mjenjača reduciranog reda za uzlaznu promjenu s jednostrukim prijelazom 16

2.3. Model trenja spojke 17

2.3.1. Statička karakteristika trenja spojke 17

2.3.2. Karnoppov model trenja 18

3. VIŠE-KRITERIJSKO OPTIMIRANJE PARAMETARA UPRAVLJAČKIH PROFILA PROMJENE S JEDNOSTRUKIM PRIJELAZOM 19

3.1. Formulacija problema više-kriterijskog optimiranja na modelu reduciranog reda 19

3.2. Rezultati više-kriterijskog optimiranja parametara za uzlaznu promjenu 1-3 23

4. STATIČKO OPTIMIRANJE PARAMETARA KONSTANTNIH UPRAVLJAČKIH PROFILA PROMJENE S JEDNOSTRUKIM PRIJELAZOM 30

4.1. Statički model pogona 30

4.1.1. Pojednostavljeni model pogona 30

4.1.2. Prošireni model pogona 32

4.2. Formulacija problema optimiranja 37

4.2.1. Formulacija optimiranja pojednostavljenog modela 38

4.2.2. Formulacija optimiranja proširenog modela 39

4.3. Rezultati optimiranja parametara za uzlaznu promjenu 1-3 40

4.3.1. Rezultati optimiranja na pojednostavljenom modelu 40

4.3.2. Rezultati optimiranja na proširenom modelu 45

5. STATIČKO OPTIMIRANJE PARAMETARA LINEARNIH UPRAVLJAČKIH PROFILA PROMJENE S JEDNOSTRUKIM PRIJELAZOM NA MODELU REDUCIRNOG REDA 51

5.1. Pojednostavljeni model pogona s linearnim upravljačkim profilima 51

5.1.1. Model za prvi način (slučaj) implementacije 51

5.1.2. Model za drugi način (slučaj) implementacije 53

5.2. Formulacija problema optimiranja na pojednostavljenom modelu pogona s linearnim upravljačkim profilima 55

5.2.1. Formulacija problema za prvi način (slučaj) implementacije 55

5.2.2. Formulacija problema za drugi način (slučaj) implementacije 58

5.3. Rezultati optimiranja na pojednostavljenom modelu pogona s linearnim upravljačkim profilima 60

6. ZAKLJUČAK 64

7. LITERATURA 67

POPIS SLIKA:

Slika 1. Raspodjela tipova mjenjača na različitim tržištima u 2011. godini [3] 2

Slika 2. Osnovne komponente AT - presječni pregled automatskog mjenjača ZF- 8HP70..... 2

Slika 3. Karakteristične faze uzlazne promjene stupnja prijenosa s jednostrukim prijelazom .. 4

Slika 4. Shematski prikaz razmatrano pogona vozila s automatskim mjenjačem [8] 7

Slika 5. Ilustracija strukture pogona vozila: (a) shema i (b) vezni dijagram [8] 8

Slika 6. Mapa motora s unutarnjim izgaranjem: (a) trodimenzionalni i (b) dvodimenzionalni prikaz 9

Slika 7. Osnovne komponente pretvarača momenta [8] 9

Slika 8. Statičke karakteristike pretvarača momenta: (a) inverz faktora kapaciteta i (b) prijenosni omjer (pojačanje) momenta 10

Slika 9. Uzdužna statička karakteristika autogume 12

Slika 10. Ilustracija uzdužnog modela dinamike vozila 13

Slika 11. Shema 10-brzinskog AT mjenjača 13

Slika 12. 10-brzinski automatski mjenjač: (a) shema i (b) pripadajući vezni dijagram 15

Slika 13. Vezni dijagram dinamike promjene s jednostrukim prijelazom (dvije aktivne spojke) 17

Slika 14. Model trenja: (a) poopćena statička karakteristika i (b) Karnoppov model..... 18

Slika 15. Definicija po odsječcima linearnih profila kapaciteta momenata spojki i redukcije momenta motora za uzlaznu promjenu s jednostrukim prijelazom [11] 20

Slika 16. Ilustracija Pareto optimalnih rješenja [8] 23

Slika 17. Pareto fronte više-kriterijskog optimiranja za četiri optimizacijska scenarija u slučaju zatvorenog pretvarača momenta 25

Slika 18. Pareto fronte više-kriterijskog optimiranja za četiri optimizacijska scenarija u slučaju otvorenog pretvarača momenta 26

Slika 19. Vezni dijagram reduciranog modela s prikazom negativne recirkulacije 26

Slika 20. Simulacijski odziv rješenja iz trećeg i četvrtog scenarija za zatvoren pretvarač momenta 27

Slika 21. Simulacijski odziv rješenja iz prvog i drugog scenarija za otvoreni pretvarač momenta 29

Slika 22. Ilustrativni prikaz promjene stupnja prijenosa pojednostavljenog modela 31

Slika 23. Vezni dijagram reduciranog modela pogona bez inercijskog sprezanja, ekvivalentan DCT mjenjaču 32

Slika 24. Odziv vrijednosti omjera brzina pretvarača momenta za promjenu stupnja prijenosa 1-3 36

Slika 25. Primjer određivanja konstantnih omjera brzina ($\boldsymbol{R\omega}$) i ubrzanja ($\boldsymbol{R\omega}$) iz rezultata više-kriterijskog optimiranja za prvi scenarij 37

Slika 26. Pareto fronte statičkog optimiranja za četiri optimizacijska scenarija u slučaju zatvorenog pretvarača momenta 40

Slika 27. Pareto fronte svih scenarija: (a) statičkog optimiranja na pojednostavljenom modelu i (b) više-kriterijskog optimiranja 42

Slika 28. Pareto fronta drugog scenarija za slučaj statičkog i više-kriterijskog optimiranja ... 43

Slika 29. Simulacijski odziv rješenja drugog scenarija za slučaj statičkog i više-kriterijskog optimiranja 44

Slika 30. Rezultati statičkog optimiranja za sve scenarije sa i bez inercijskog sprezanja 45

Slika 31. Pareto fronte svih scenarija statičkog optimiranja dobiveni simulacijom: (a) sa zatvorenim pretvaračem momenta i (b) s otvorenim pretvaračem momenta 46

Slika 32. Pareto fronta drugog scenarija za slučaj statičkog i više-kriterijskog optimiranja: (a) zatvoreni pretvarač momenta i (b) otvoreni pretvarač momenta 47

Slika 33. Simulacijski odziv rješenja drugog scenarija za slučaj statičkog i više-kriterijskog optimiranja za zatvoreni pretvarač momenta 48

Slika 34. Simulacijski odziv rješenja drugog scenarija za slučaj statičkog i više-kriterijskog optimiranja za otvoreni pretvarač momenta 49

Slika 35. Ilustrativni prikaz promjene stupnja prijenosa pojednostavljenog modela s linearnim profilom isključne spojke – prvi slučaj 52

Slika 36. Ilustrativni prikaz promjene stupnja prijenosa pojednostavljenog modela s linearnim profilom isključne spojke – drugi slučaj 54

Slika 37. Simulacijski model korišten za provjeru izraza disipacije energije u spojkama..... 57

Slika 38. Pareto fronte više-kriterijskog optimiranja i statičkog optimiranja linearnim upravljačkim profilima za drugi scenarij..... 61

Slika 39. Rješenja višekriterijskog optimiranja i statičkog optimiranja za prvi slučaj linearnog momenta isključne spojke za drugi scenarij..... 62

Slika 40. Rješenja višekriterijskog optimiranja i statičkog optimiranja za drugi slučaj linearnog momenta isključne spojke za drugi scenarij..... 63

POPIS TABLICA:

Tablica 1. Tablica stanja spojki u pojedinim stupnjevima prijenosa 10-brzinskog AT mjenjača 14

Tablica 2. Numerički prikaz vrijednosti rješenja funkcija cilja za treći i četvrti scenarij te zatvoren pretvarač momenta 28

Tablica 3. Numerički prikaz vrijednosti rješenja funkcija cilja za prvi i drugi scenarij te otvoren pretvarač momenta 29

Tablica 4. Prikaz vrijednosti konstantnih omjera brzina ($\boldsymbol{R\omega}$) i ubrzanja ($\boldsymbol{R\omega}$) iz rezultata više-kriterijskog optimiranja za prvi scenarij 37

Tablica 5. Numerički prikaz vrijednosti rješenja funkcija cilja za drugi scenarij za slučaj statičkog i više-kriterijskog optimiranja 44

Tablica 6. Numerički prikaz vrijednosti rješenja drugog scenarija za slučaj statičkog i više-kriterijskog optimiranja za zatvoreni pretvarač momenta 49

Tablica 7. Numerički prikaz vrijednosti rješenja drugog scenarija za slučaj statičkog i više-kriterijskog optimiranja za otvoreni pretvarač momenta 50

Tablica 8. Numerički prikaz vrijednosti rješenja drugog scenarija za slučaj statičkog i više-kriterijskog optimiranja 63

Tablica 9. Prikaz brojčanih vrijednosti kriterija optimiranja za drugi scenarij upravljanja i različite slučajeve optimiranja za slučaj zatvorenog pretvarača momenta 66

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_d	m^2	Površina frontalnog dijela vozila
$\mathbf{A_{red}}$	-	Matrica inercija modela AT reduciranog reda
b_a	Ns/m	Koeficijent prigušenja ekvivalentnog elastičnog vratila
b_{hs}	Ns/m	Koeficijent prigušenja pojedinačnog poluvratila
$\mathbf{B_{red}}$	-	Ulazna matrica modela AT reduciranog reda
b_t	Ns/m	Koeficijent prigušenja automobilske gume
C_d	-	Koeficijent aerodinamičkog otpora
E_{loss}	J	Ukupna energija disipirana u spojkama tijekom promjene stupnja prijenosa
F_{drag}	N	Sila aerodinamičkog otpora
F_{grade}	N	Sila otpora uslijed nagiba ceste
F_t	N	Uzdužna sila na gumi (sila trakcije)
F_L	N	Ukupna sila otpora
F_{roll}	N	Sila otpora kotrljanja
g	m/s^2	Ubrzanje gravitacijske sile
h_i	-	Prijenosni omjer i-tog planetarnog prijenosnika
i_d	-	Prijenosni omjer diferencijala
I_{imp}	kgm^2	Inercija impelerskog kola i motora
I_{in}	kgm^2	Inercija ulaznog vratila mjenjača
I_{io}	kgm^2	Inercija sprezanja izlaznog na ulazno vratilo mjenjača
I_w	kgm^2	Inercija kotača
i_j, g_j, h_j	-	Ekvivalentni prijenosi omjeri *j*-te spojke modela reduciranog reda u formi veznog dijagrama
J_1	s	Ukupno trajanje promjene stupnja prijenosa – prvi kriterij više-kriterijskog optimiranja parametara upravljačkih profila promjene stupnja prijenosa
J_2	m/s^2	Korijen srednjeg kvadrata trzaja vozila – drugi kriterij više-kriterijskog optimiranja parametara upravljačkih profila promjene stupnja prijenosa

J_3	J	Ukupna energija disipirana u spojkama - treći kriterij više-kriterijskog optimiranja parametara upravljačkih profila promjene stupnja prijenosa
k_a	N/m	Koeficijent krutosti ekvivalentnog elastičnog vratila
k_{hs}	N/m	Koeficijent krutosti pojedinačnog poluvratila
K_i	rad/s(Nm)$^{1/2}$	Faktor kapaciteta pretvarača momenta
k_t	Ns/m	Nagib statičke karakteristike gume
m_v	kg	Ukupna masa vozila
$\mathbf{p_{cl}}$	-	Pod-vektor upravljačkog vektora $\mathbf{p_{ctrl}}$ koji sadrži parametre koji opisuju profile kapaciteta momenta spojki
$\mathbf{p_{ctrl}}$	-	Upravljački vektor koji sadrži parametre koji opisuju profile kapaciteta momenta spojki
$\mathbf{p_{eng}}$	-	Pod-vektor upravljačkog vektora $\mathbf{p_{ctrl}}$ koji sadrži parametre koji opisuju profil redukcije momenta motora
p_{th}	-	Položaj pedale akceleratora
r_{ri}	m	Polumjer i-tog kolutnog zupčanika
r_{si}	m	Polumjer i-tog sunčanog zupčanika
r_t	m	Efektivni polumjer automobilske gume
R_τ	-	Prijenosni omjer momenata pretvarača momenta
R_ω	-	Prijenosni omjer brzina vrtnji pretvarača momenta
$R_{\dot{\omega}}$	-	Prijenosni omjer ubrzanja pretvarača momenta
t_1	s	Vremenski trenutak u kojem vrijednost momenta isključne spojke pada na vrijednost nula
$\bar{T}_C$	-	Normirani Coulombov moment trenja
$t_{inertia}, t_{ip}$	s	Trajanje inercijske faze
$\bar{T}_S$	-	Normirani Stribeckov moment trenja
t_{shift}	s	Trajanje promjene stupnja prijenosa
t_{start}	s	Vrijeme početka momentne faze
t_{torque}	s	Vrijeme trajanja momentne faze
$\mathbf{U_{cl,red}}$	-	Matrica klizanja spojki AT reduciranog reda
v_v	m/s	Uzdužna brzina vozila
v_w	m/s	Brzina središta gume

γ_j	-	Prijenosni omjer *j*-tog stupnja prijenosa
δ	-	Stribeckov faktor oblika
$\Delta\tau_{ec}$	Nm	Iznos redukcije okretnog momenta motora s unutarnjim izgaranjem
Δ_ω	rad/s	Prag brzine klizanja spojke kojim se aproksimira zona držanja
η_t	m/s	Uzdužno klizanje
θ	rad	Kut nagiba ceste
ρ	kg/m^3	Gustoća zraka
σ_2	-	Normirani koeficijent viskoznog trenja
τ_e	Nm	Okretni moment motora s unutarnjim izgaranjem
τ_{fj}	Nm	(Stvarni) moment j-te spojke
τ_h	Nm	Kapacitet momenta spojke
τ_{hs}	Nm	Okretni moment ekvivalentnog elastičnog vratila
τ_i	Nm	Okretni moment pumpe pretvarača momenta
τ_{is}	Nm	Okretni moment ulaznog vratila mjenjača
τ_{ONC}	Nm	(Stvarni) moment uključne spojke
τ_{OFG}	Nm	(Stvarni) moment isključne spojke
τ_{os}	Nm	Okretni moment izlaznog vratila mjenjača
τ_{slip}	Nm	Moment spojke koja kliže
τ_{stick}	Nm	Moment primijenjen na zatvorenu spojku
τ_t	Nm	Okretni moment turbine pretvarača momenta
φ_{hs}	rad	Kut zakreta poluvratila
ω_e	rad/s	Brzina vrtnje motora s unutarnjim izgaranjem
ω_i	rad/s	Brzina vrtnje pumpe pretvarača momenta
ω_{is}	rad/s	Brzina vrtnje ulaznog vratila mjenjača
ω_j	rad/s	Brzina klizanja j-te spojke
$\overline{\omega}_{OFG}$	rad/s	Srednja brzina klizanja isključne spojke kroz inercijsku fazu
$\overline{\omega}_{ONC}$	rad/s	Srednja brzina klizanja uključne spojke kroz inercijsku fazu

ω_{os}	rad/s	Brzina vrtnje ulaznog vratila mjenjača
ω_{s1}, ω_{s2}	rad/s	Varijable stanja modela AT reduciranog reda
ω_{st}	rad/s	Stribeckova brzina
ω_t	rad/s	Brzina vrtnje turbine pretvarača momenta
ω_w	rad/s	Brzina vrtnje kotača

POPIS KRATICA

AM	Automatski mjenjač
AMT	Automatizirana manualna transmisija (*engl. Automated Manual Transmission)*
AT	Automatski mjenjač s planetarnim prijenosnicima
CVT	Kontinuirani varijabilni mjenjač
DCT	transmisije s dvostrukom spojkom (*engl. Dual-Clutch Transmission*)
DTS	Promjena s dvostrukim prijelazom (*engl. Double-Transition Shift*)
EM	Elektromotor
MOGA	Više-kriterijski genetski algoritam (*engl. Multi-Objective Genetic Algorithm*)
MOR	Reduciranje reda modela (*engl. Model Order Reducition*)
MPC	Modelsko prediktivno upravljanje (*engl. Model Predictive Control*)
MSUI	Motor s unutarnjim izgaranjem
OFG	Isključna spojka (*engl. OFf-Going clutch*)
ONC	Uključna spojka (*engl. ONComing clutch*)
RMS	Korijen srednjih kvadrata (*engl. Root-Mean-Square*)
STS	Promjena s jednostrukim prijelazom (*engl. Single-Transition Shift*)

SAŽETAK

Automatski mjenjač s planetarnim prijenosnicima je napredni mehatronički sustav koji omogućava prijenos i povećanje okretnog momenta motora s unutarnjim izgaranjem, rad motora uz zaustavljeno vozilo, pokretanje vozila unatrag te promjenu stupnja prijenosa bez prekida toka snage. Zbog visoke kompleksnosti automatskih mjenjača i njihova utjecaja na karakteristike voznosti i udobnosti vozila, vrlo je bitno pronaći optimalan način upravljanja promjenom stupnja prijenosa. Pod pojmom optimalnog načina upravljanja smatra se pronalazak parametara optimalnih profila upravljačkih varijabli (npr. primijenjeni moment na uključnoj i isključnoj spojci, redukcija momenta motora) kojima se minimiziraju kriteriji kvalitete promjene stupnja prijenosa (npr. uzdužni trzaj vozila, disipirana energija u spojkama, trajanje promjene stupnja prijenosa). U radu se prvo predstavlja model pogona na kojemu se provodi optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa. Zatim se daju rezultati optimiranja primjenom više-kriterijskog genetskog algoritma, koji se odnose na parametre praktičnih, po odsječcima linearnih profila upravljačkih varijabli. Rezultati više-kriterijskog optimiranja postavljaju referentno mjerilo (*engl. benchmark*) za razvoj numerički učinkovitog postupka optimiranja parametara upravljačkih varijabli, zasnovanog na primjeni pojednostavljenog, statičkog modela mjenjača. Pritom se prvo provodi redukcija dinamičkog modela pogona vozila u pojednostavljeni statički model za slučaj zanemarenja inercijskog sprezanja i zatvorenog pretvarača momenta, te formulira i implementira postupak optimiranja konstantnih profila upravljačkih varijabli u inercijskoj fazi promjene stupnja prijenosa. Potom se postupak optimiranja proširuje za slučaj uzimanja u obzir inercijskog sprezanja i otvorenog pretvarača momenta, te također za bogatije (po dijelovima linearne) profile upravljačkih varijabli. Konačno, provodi se usporedna analiza rezultata optimiranja za različite upravljačke scenarije i različite upravljačke profile pomoću usporednih grafova kriterija (Pareto fronti) i karakterističnih pripadnih vremenskih odziva, uključujući i usporedbu s referentnim mjerilom dobivenim više-kriterijskim optimiranjem.

Ključne riječi: automatski mjenjač, optimalno upravljanje, optimiranje, modeliranje, analiza

SUMMARY

A step-gear planetary automatic transmission is an advanced mechatronic system that transfers and multiplies the engine torque to provide desired torque at the wheels, engine idling when vehicle is stationary, driving in reverse and gear shifting without power flow interruption. Due to the high complexity of automatic transmissions and their influence on vehicle comfort and driveability, it is crucial to obtain the optimal shift control. Shift control profiles (e.g. oncoming and off-going clutch torques, engine torque reduction) are described by a set of parameters and the optimization aim is to find parameters which minimize the gear shift quality criteria (e.g. longitudinal vehicle jerk, clutch dissipation energy, gear shift duration). Thesis first presents the model of the vehicle powertrain system on which the gear shift control profile parameters optimization is carried out. Then, the results of the multi-objective genetic algorithm-based parameter optimization are presented, which relate to the parameters of the practical, piecewise-linear shift control profiles. The results of multi-objective parameter optimization are benchmark for the development of numerically efficient parameter optimization method, based on simplified, static transmission model. Firstly, reduction of the dynamic vehicle powertrain model to a simplified static vehicle powertrain model is performed for the case of closed torque converter with omitted inertia coupling effects, and the optimization of constant shift control profiles applied in the inertia phase is carried out. Furthermore, the optimization procedure is extended by taking into account open torque converter and inertia coupling effects. Additionally, piecewise-linear control profiles are also implemented in the optimization procedure. Finally, a comparative analysis of the optimization results for different control scenarios and shift control profiles is performed by using plots of gear shift quality criteria (Pareto frontiers) and corresponding characteristic time responses, including the comparison with benchmark performance obtained by multi-objective optimization results.

Key words: automatic transmission, optimal control, optimization, modelling, analysis

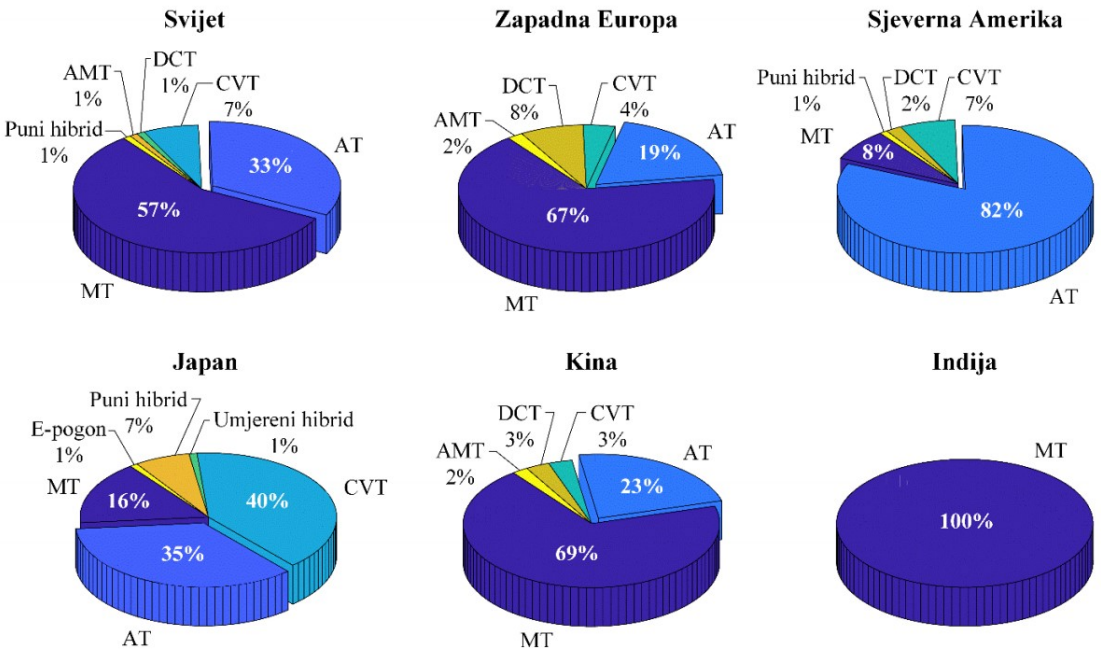
1. UVOD

1.1. Motivacija

Mjenjač predstavlja ključni dio sustava prijenosa snage vozila i omogućuje prijenos pogonskog momenta motora s unutarnjim izgaranjem (MSUI) i/ili elektromotora (EM) na kotače uz primjenu različitih prijenosnih omjera. Glavni zadaci mjenjača su [1]: povećanje i prijenos okretnog momenta pogonskog stroja, prilagodba brzine vrtnje pogonskog stroja brzini kotača, omogućavanje rada pogonskog stroja uz zaustavljeno vozilo (prazni hod) i omogućavanje vožnje unatrag [1].

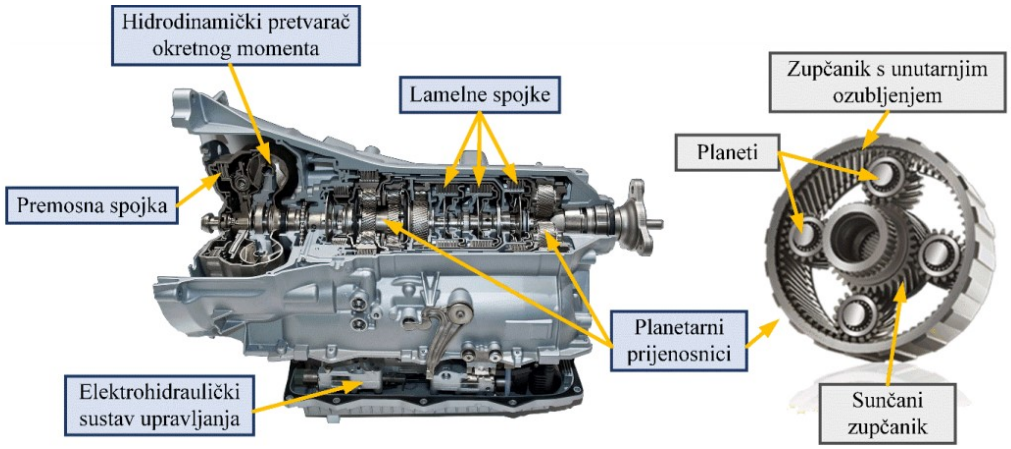
Prema stupnju automatiziranosti možemo razlikovati tri tipa mjenjača stupnja prijenosa: ručni mjenjač, poluautomatski mjenjač i automatski mjenjač. Kod ručnog mjenjača isključenje i uključenje prijenosa okretnog momenta (uključenje i isključenje spojke) te promjenu stupnja prijenosa izvodi vozač (ručno). U poluautomatskim mjenjačima (*engl. Automated Manual Transmission, AMT*) upravljanje spojkom je automatsko (pomoću servoaktuatora), a promjenu stupnja prijenosa izvodi vozač. Naposljetku, kod automatskih mjenjača (AM), promjena stupnja prijenosa je potpuno automatska bez prekida prijenosa okretnog momenta. AM mogu biti s konačnim (diskretnim) i beskonačnim brojem prijenosnih omjera (kontinuirani). Između temeljnih vrsti AM, koje obuhvaćaju kontinuirane varijabilne transmisije (*engl. Continiously Variable Transmission, CVT*), transmisije s dvostrukom spojkom (*engl. Dual-Clutch Transmission, DCT*), automatske transmisije s planetarnim prijenosnicima (*engl. Automatic Transmission, AT*) , globalnim tržištem i dalje dominiraju AT, što se može zaključiti sa Slika 1, te se na njih odnosi i ovaj rad.

Potaknuti sve strožim propisima o emisijama štetnih plinova, smanjenjem potrošnje goriva te općenito povećanjem efikasnosti pogonskog sustava, proizvođači automobila imaju tendenciju razvoja AT s velikim brojem stupnjeva prijenosa. Povećanje brojeva stupnjeva prijenosa stagniralo je u razdoblju od prvog automatskog mjenjača sve do 2002. godine, nakon čega broj stupnjeva naglo raste i završava trenutno na 10 stupnjeva [2]. Glavni nedostatak povećanja broja stupnjeva prijenosa, odnosi se na porast kompleksnosti njegove izvedbe, kako sa stanovišta konstrukcijske izvedbe, tako i sa stanovišta elektrohidraulike te upravljanja.



Slika 1. Raspodjela tipova mjenjača na različitim tržištima u 2011. godini [3]

Osnovne komponente AT su prikazane na Slika 2: hidrodinamički pretvarač okretnog momenta, premosna spojka, lamelaste spojke, planetarni prijenosnici te elektrohidraulički sustav upravljanja. Planetarni prijenosnik se sastoji od kolutnog zupčanika s unutarnjim ozubljenjem, planeta s jarmom (nosačem planeta) te sunčanih zupčanika [1].



Slika 2. Osnovne komponente AT - presječni pregled automatskog mjenjača ZF- 8HP70

Moderni AT evoluirao u kompleksan mehatronički sustav s visokim zahtjevima na udobnost, performanse i energetsku učinkovitost. Također je potrebno naglasiti da kod AT s veliki brojem stupnjeva prijenosa postoji zahtjev za preskakanjem većeg broja stupnjeva prijenosa, posebno kod silaznih promjena. U takvim preskočno-silaznim promjenama, može se javiti tzv. promjena s dvostrukim prijelazom koja je posebno zahtjevna sa stanovišta upravljanja jer koristi veći broj spojki (tipično četiri) (DTS, *engl. Double-Transition Shift*) u isto vrijeme [4]. Kako bi se izazovi upravljanja uspješno savladali, uobičajeno se koriste postupci optimalnog upravljanja i općenito optimiranja, na čemu će biti fokus ovog rada s primjenom na preskočne ulazne promjene s jednostrukim prijelazom (STS, *engl. Single-Transition Shift*). Temelj optimiranja čini matematički model pogona, ponajprije detaljan model mjenjača. Glavni cilj je razraditi numerički učinkovite postupke optimiranja paremetara profila upravljačkih varijabli mjenjača i motora koji se temelje na pojednostavljenom statičkom modelu pogona, koji je proizašao iz reduciranog dinamičkog modela pogona. Konačni cilj razvoja navedenog postupka optimiranja jest buduća primjena u naprednim strategijama upravljanja poput modelskog prediktivnog upravljanja (MPC).

1.2. Opis upravljanja i optimizacije promjene stupnja prijenosa

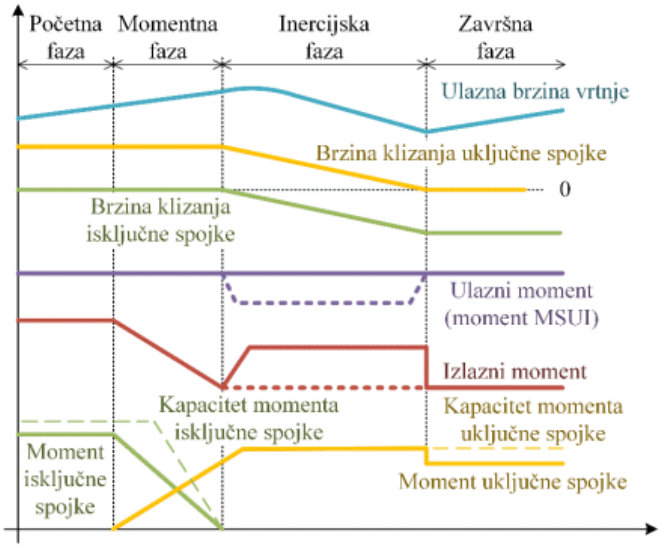
Upravljanje AT uključuje dva temeljna zadatka: vođenje mjenjača u smislu određivanja optimalnog stupnja prijenosa u svakom diskretnom vremenskom trenutku (strateška razina upravljanja, *engl. shift scheduling*), te upravljanje zadanom promjenom stupnja prijenosa (taktička razina, *engl. shift control*). Fokus ovog rada je na taktičkoj razini upravljanja.

Budući da automatski mjenjači mogu ostvariti promjenu stupnja prijenosa bez prekida prijenosa pogonskog momenta od motora, promjene se mogu svrstati u četiri različite kategorije [4]: uzlazna promjena pod opterećenjem (iz nižeg stupnja prijenosa u viši; *engl. power-on upshift*), silazna promjena pod opterećenjem (iz višeg stupnja prijenosa u niži; *engl. power-on downshift*), uzlazna promjena bez opterećenja (*engl. power-on upshift*), te silazna promjena bez opterećenja (*power-off downshift*). U ovom radu je fokus postavljen na uzlaznu promjenu pod opterećenjem.

Upravljanje promjenom stupnja prijenosa se može provesti na dva načina: 1) upravljanje momentom spojki u otvorenom krugu pri čemu se minimiziraju suprotstavljeni kriteriji trzaja vozila i smanjenja gubitaka energije u spojkama (time i trošenja spojki) te 2) regulacija po povratnoj vezi odabrane varijable pogona (npr. po brzini klizanja spojki). Iako je upravljanje momentom spojki gotovo univerzalno zastupljeno, regulacija se može pridodati kako bi se povećala kvaliteta upravljanja u prisustvu poremećajnih djelovanja [5]. Također, uvodi se i upravljanje momentom motora čime se kvaliteta promjene značajno povećava [6].

Izvođenje tipične uzlazne promjene stupnja prijenosa može se podijeliti u četiri faze koje se mogu vidjeti na Slika 3 od koje su druga i treća stvarne (aktivne) faze, dok se prva i četvrta dodaju zbog kompletiranja slike cijelog procesa promjene stupnja prijenosa [4]:

1. početna faza (*engl. initial phase*)
2. momentna faza (*engl. torque phase*)
3. inercijska faza (*engl. inertia phase*)
4. završna faza (*engl. end phase*)



Slika 3. Karakteristične faze uzlazne promjene stupnja prijenosa s jednostrukim prijelazom

Tijekom početne faze, klip hidrauličkog cilindra uključne spojke pomiče se kako bi eliminirao prazni hod unutar mehanizma spojke. Time se spojka priprema za nadolazeću momentnu fazu promjene, u kojoj dolazi do prijenosa momenta s isključne na uključnu spojku, tj. s više razine prema nižoj razini izlaznog momenta [4]. U inercijskoj fazi dolazi do promjene ulazne brzine s više razine prema nižoj kojoj odgovara novom stupnju prijenosa. Promjena ulazne brzine se može ostvariti podizanjem momenta uključne spojke uz neizbježan udar (nadvišenje) izlaznog momenta (tzv. inercijski udar) ili slabljenjem momenta motora bez izraženog inercijskog udara. Inercijska faza predstavlja najkompleksniju fazu pri promjeni stupnja prijenosa sa stanovišta

upravljanja jer u njoj može doći do značajnih poboljšanja s obzirom na kvalitetu stupanj prijenosa (trajanje inercijske faze, uzdužni trzaj vozila, disipacija energije u spojkama) . Iz tog razloga će se razmatrati samo inercijska faza u sklopu statičkog optimiranja promjene stupnja prijenosa [7].

Kada je promjena ulazne brzine vrtnje završena, odnosno kada se zatvori uključna spojka, proces promjene stupnja prijenosa je završen.

U ovom radu bit će razmatrana dva pristupa optimiranju, pri čemu se oba izvode van realnog vremena (*engl. off-line*): u prvom je dan opis i rezultati optimiranja parametara pojednostavljenih, po odsječcima linearnih profila upravljačkih trajektorija primjenom više-kriterijskog genetskog algoritma optimiranja [8], [9], dok se kod drugog provodi numerički efikasnije optimiranje parametara konstantnih ili po dijelovima linearnih profila upravljačkih varijabli u inercijskoj fazi temeljem pojednostavljenog, statičkog modela pogona. Prvi pristup optimiranju (više-kriterijsko optimiranje) zasniva se na primjeni genetskog algoritma MOGA-II (*Multi-Objective Genetic Algorithm*) [10], te uključuje sustavnu metodu vrednovanja različitih strategija upravljanja temeljem usporedbi pripadnih Pareto fronti. Drugi pristup optimiranju temelji se na nelinearnoj statičkoj optimizaciji (primjenom algoritma traženja optimuma) implementiranoj unutar MATLAB okruženja koja je numerički učinkovita a pritom se po točnosti treba približiti rezultatima višekriterijskog optimiranja. Glavna prednost drugog pristupa drugog pristupa leži u činjenici da rezultati mogu biti dobiveni značajno brže u odnosu na prvi pristup, te se zbog te brzine ovaj pristup može iskoristiti u budućoj MPC strategiji upravljanja.

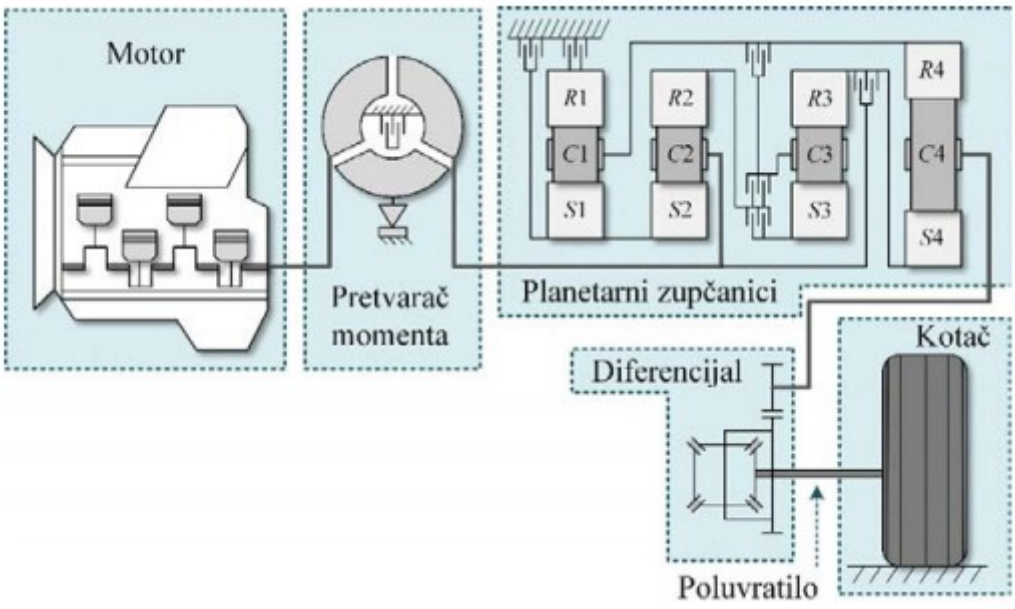
1.3. Pregled sadržaja rada

U drugom poglavlju rada predstavljaju se puni i reducirani matematički modeli pogona vozila, koji će se koristiti u simulacijskim i optimizacijskim studijama u narednim poglavljima. Model pogona se sastoji od nekoliko ključnih komponenti: Ottov motor, pretvarač momenta, diferencijal s poluvratilima, uzdužna dinamika vozila, te 10-brzinski automatski mjenjač. U trećem poglavlju opisuje se formulacija više-kriterijskog optimizacijskog problema te se daju simulacijski rezultati višekriterijskog optimiranja [11]. U četvrtom poglavlju bit će dan

pojednostavljeni, statički model pogona vozila za uzlaznu promjenu stupnja prijenosa, koji se daje u bazičnoj formulaciji sa zanemarenim sprezanjem inercija i zatvorenim pretvaračem momenta, te također u punijoj formulaciji (bez tih pretpostavki). Nakon toga se za oba modela daje formulacija statičkog optimiranja konstantnih upravljačkih profila koja će naposljetku biti uspoređena s rezultatima višekriterijskog optimiranja kroz različite scenarije. Razmatranja iz četvrtog poglavlja proširuju se u petom poglavlju za slučaj općenitijih, po odsječcima linearnih upravljačkih varijabli, uključujući analizu prednosti u odnosu na primjenu konstantnih profila. Zaključak s osvrtom na optimizacijske alate te postignute upravljačke performanse promjene stupnja prijenosa daje se u završnom poglavlju, pri čemu se navode i moguća daljnja proširenja rada.

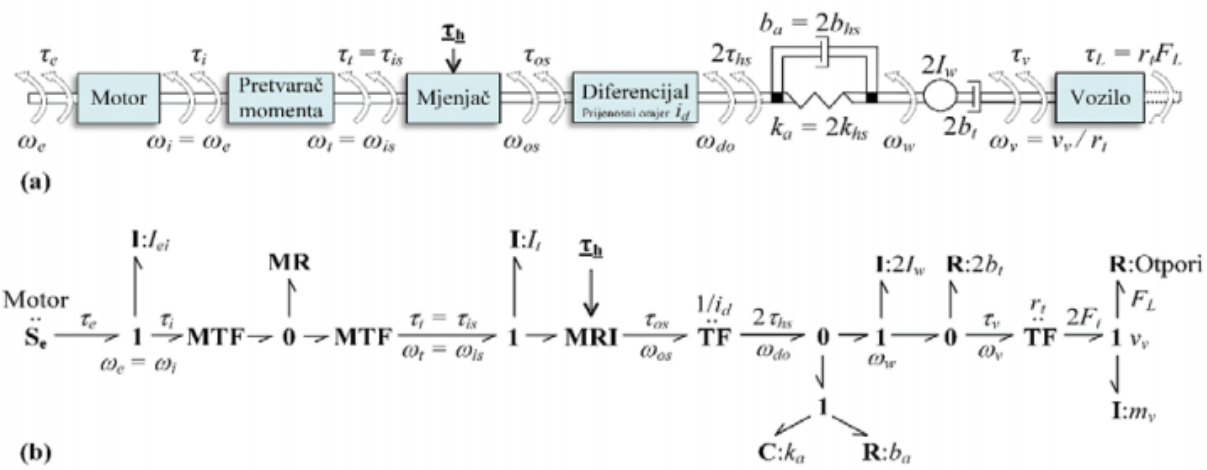
2. MODELIRANJE DINAMIKE POGONA VOZILA

Model pogona vozila sastoji se od sljedećih komponenti prikazanih na Slika 4: Ottovog motora, pretvarača momenta, mjenjača, diferencijala s poluvratilima i kotačima, te uzdužne dinamike vozila. Inercije i mase oba kotača, te krutosti oba poluvratila su svedeni na jedan kotač temeljem pretpostavke jednake brzine lijevog i desnog kotača (uzdužnog gibanja bez proklizavanja kotača) [12], [13].



Slika 4. Shematski prikaz razmatrano pogona vozila s automatskim mjenjačem [8]

Model vozila je moguće prikazati u shematskoj formi, koja je dana na Slika 5 (a) gdje se može zorno prikazati struktura i ključne varijable koje ju opisuju. Također, model je moguće prikazati u formi veznog dijagrama, koji je prikazan na Slika 5 (b), iz kojeg se jasno mogu vidjeti tokovi snaga te se iz njega jednostavno može izvesti matematički oblik modela [14].



Slika 5. Ilustracija strukture pogona vozila: (a) shema i (b) vezni dijagram [8]

2.1. Modeli komponenti pogonskog sustava vozila

2.1.1. Model Ottovog motora i pretvarača momenta

Ottov motor je uređaj u kojemu benzinsko gorivo izgara u radnom prostoru koji služi za pretvaranje kemijske energije goriva u toplinsku energiju, a potom iz toplinske energije u mehanički rad. Motor se ovdje i uobičajeno prikazuje kao izvor momenta, pri čemu je okretni moment funkcija položaja pedale akceleratora p_{th} i brzine vrtnje motora ω_e:

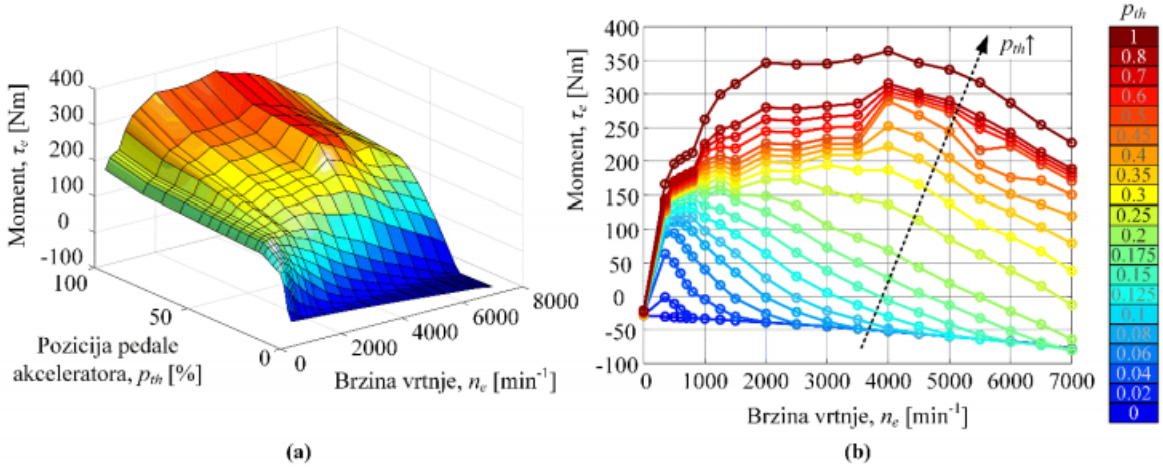
$$\tau_e = f_e(p_{th}, \omega_e). \tag{1}$$

Funkcija f_e definirana je eksperimentalno nelinearnom mapom koja može biti dana u trodimenzionalnom prikazu danom na Slika 6 (a) ili dvodimenzionalnom prikazu danom na Slika 6 (b). Rotacijska dinamika motora može se prikazati izrazom:

$$I_{imp}\dot{\omega}_e = \tau_{is} - \tau_i = (\tau_e - \Delta\tau_{ec}) - \tau_i, \tag{2}$$

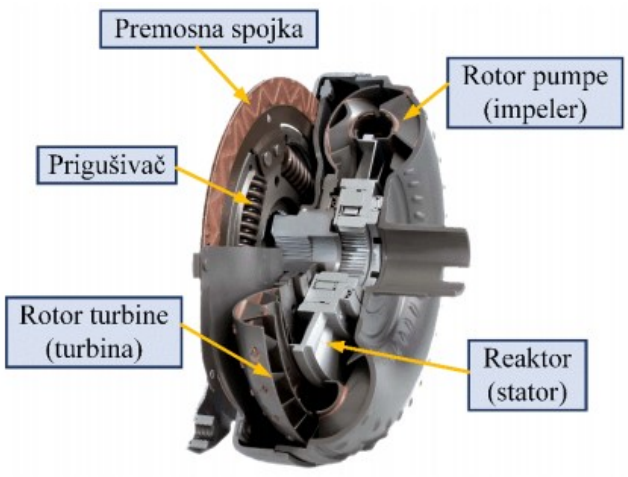
gdje je τ_i okretni moment pumpnog kola (impelera) pretvarača momenta (tj. moment tereta motora), dok je I_{imp} ukupan moment inercije pumpnog kola pretvarača momenta i inercije motora sa zamašnjakom, a τ_{is} je razvijeni okretni moment motora. Član $\Delta\tau_{ec}$ označava iznos redukcije momenta motora ($\Delta\tau_{ec} > 0$), koja se općenito može ostvariti putem upravljanja

kutom pretpaljenja svjećica te prekidom dotoka goriva kroz podesivi interval (oba brza kanala), ili upravljanjem radom zaklopke motora (spori kanal) [8].



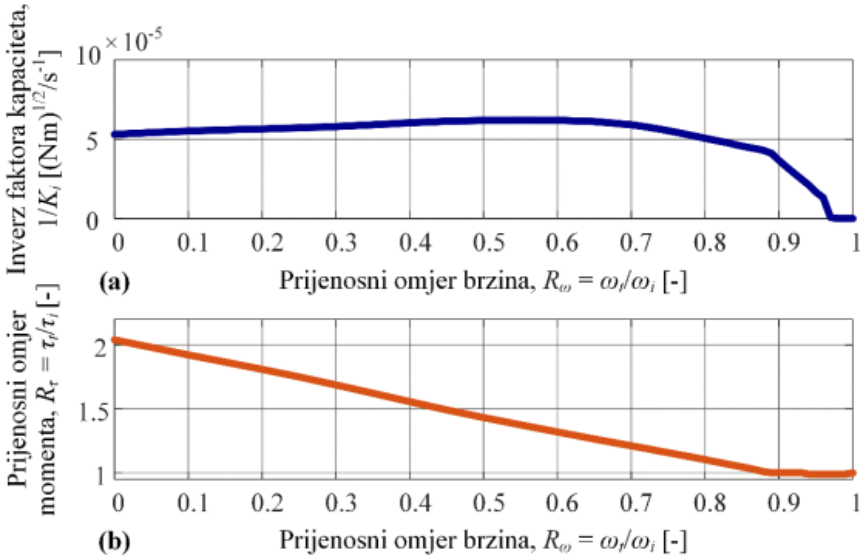
Slika 6. Mapa motora s unutarnjim izgaranjem: (a) trodimenzionalni i (b) dvodimenzionalni prikaz

Između motora i mjenjača nalazi se hidrodinamički pretvarač okretnog momenta, čiji su zadaci [1]: prijenos i pojačanje okretnog momenta te prigušivanje torzijskih vibracija i općenito udara koji se prenose sa strane motora prema kotačima i obratno. Osnovni dijelovi pretvarača momenta su prikazani na Slika 7: pumpno kolo, turbinsko kolo, reaktor sa spojkom slobodnog hoda, prigušivač i premosna spojka.



Slika 7. Osnovne komponente pretvarača momenta [8]

Pumpno kolo pretvarača momenta (označeno u modelu indeksom i) čvrsto je spojeno na izlazno vratilo motora, dok je turbinsko kolo (indeks t) čvrsto spojeno na ulazno vratilo mjenjača. Hidrodinamički pretvarač ima dva radna područja. Kod pokretanja vozila, kada se turbinsko kolo okreće sporije od pumpnog kola, pretvarač momenta radi u području pojačanja okretnog momenta koje se nalazi u rasponu $R_\omega = 0 \dots 0.87$ kao što se vidi sa Slika 8 (b). Povećanjem brzine vrtnje turbinskog kola smanjuje se razlika brzine vrtnje pumpe i turbine, tj. klizanje pretvarača momenta, te se posljedično smanjuje pojačanje okretnog momenta. Kod visokih klizanja (u tzv. točki sprezanja) pretvarač momenta ulazni u radno područje hidrodinamičke spojke te prestaje djelovati kao pojačivač okretnog momenta [1].



Slika 8. Statičke karakteristike pretvarača momenta: (a) inverz faktora kapaciteta i (b) prijenosni omjer (pojačanje) momenta

Pretvarač momenta opisan je nelinearnim statičkim karakteristikama $R_\tau(R_\omega)$ i $K_i(R_\omega)$, gdje je $R_\tau = \tau_t/\tau_i$ prijenosni omjer momenata, $K_i = \omega_i/\tau_i^{1/2}$ je faktor kapaciteta, dok je $R_\omega = \omega_t/\omega_i = \omega_t/\omega_e$ prijenosni omjer brzina vrtnji [15]:

$$\tau_i = \frac{\omega_e^2}{K_i^2(R_\omega)}\,, \tag{3}$$

$$\tau_t = \tau_i R_\tau(R_\omega) \tag{4}$$

Pretvaračem momenta može se upravljati korištenjem premosne spojke kojom se ostvaruje izravna (mehanička) veza između motora i ulaznog vratila mjenjača. Moduliranjem premosne spojke smanjuju se gubici strujanja fluida te potrošnja goriva u području rada pretvarača okretnog momenta kao spojke [1]. Potpunim zatvaranjem spojke ostvaruje se potpuna mehanička veza sa motora prema mjenjaču (slučaj zatvorenog pretvarača momenta).

2.1.2. Model sustava prijenosa snage i uzdužne dinamike vozila

Izlazno vratilo mjenjača spojeno je na diferencijal čiji je zadatak dopustiti različite brzine vrtnje kotača (npr. u zavojima) te ravnomjerno razdijeliti okretne momente na lijevi i desni kotač. Pritom, diferencijal uključuje i redukciju brzine vrtnje s prijenosnim omjerom i_d. Poluvratila su modelirana ekvivalentnim elastičnim vratilom (Slika 5), čiji je moment $2\tau_{hs}$, te koeficijenti krutosti i prigušenja k_a i b_a, dvostruko veći od onih za svako pojedinačno poluvratilo (τ_{hs} te k_{hs} i b_{hs}) [12], [13]:

$$\dot{\varphi}_{hs} = i_d^{-1}\omega_{os} - \omega_w, \tag{5}$$

$$\tau_{os} = i_d^{-1}(2\tau_{hs}) = 2i_d^{-1}(k_{hs}\varphi_{hs} + b_{hs}\dot{\varphi}_{hs}), \tag{6}$$

gdje je φ_{hs} kut zakreta poluvratila, a $\omega_w$brzina vrtnje kotača. Jednadžba gibanja kotača može se zapisati kao

$$I_w\dot{\omega}_w = \tau_{hs} - r_t^{-1}F_t, \tag{7}$$

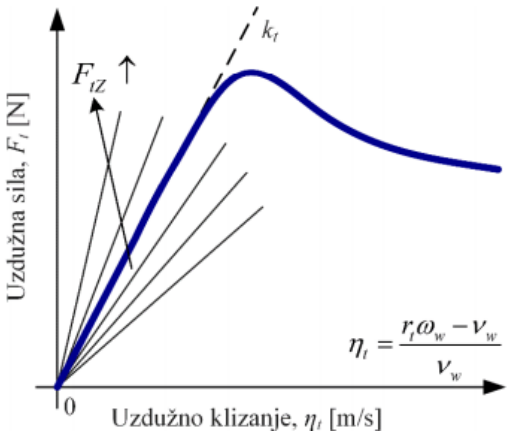
gdje r_t predstavlja efektivni polumjer automobilske gume (pneumatika), F_t uzdužnu silu između gume i podloge (vučna sila), a I_w predstavlja inerciju kotača. Pod pretpostavkom da guma djeluje u linearnom području svoje statičke karakteristike prikazanoj na Slika 9., njeno ponašanje se može opisati sljedećim lineariziranim modelom [13]:

$$F_t = r_t^{-1}b_t(\omega_w - r_t^{-1}v_w), \tag{8}$$

pri čemu je koeficijent prigušenja dan izrazom

$$b_t = k_t \frac{r_t^2}{v_w} \,, \tag{9}$$

gdje $k_t = dF_t/d\eta_t$ označava nagib statičke karakteristike gume (koja je funkcija vertikalnog opterećenja gume F_{tZ}, v_w uzdužnu brzinu središta gume, a η_t uzdužno klizanje.



Slika 9. Uzdužna statička karakteristika auto gume

Model uzdužne dinamike opisan je sljedećom jednadžbom i ilustrativno prikazan na Slika 10:

$$m_v \dot{v}_v = 2F_t - F_L \,, \tag{10}$$

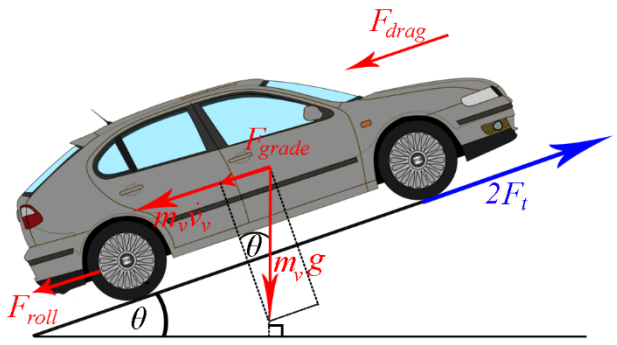
pri čemu m_v predstavlja masu vozila, a v_v brzinu vozila. Ukupna sila otpora F_L uključuje aerodinamički otpor F_{drag}, otpor kotrljanja F_{roll} (pretpostavlja se da je konstantnog iznosa za dani interval promjene stupnja prijenosa) i otpor uslijed nagiba ceste F_{grade}:

$$F_L = F_{drag} + F_{roll} + F_{grade} \,, \tag{11}$$

$$F_{grade} = m_v g \sin\theta \,, \tag{12}$$

$$F_{drag} = \frac{1}{2}\rho A_d C_d v_v^2 \,, \tag{13}$$

pri čemu je ρ gustoća zraka, C_d je koeficijent aerodinamičkog otpora, A_d površina frontalnog dijela vozila, a θ kut nagiba ceste. U radu se pretpostavlja se da je kut nagiba ceste jednak nuli.

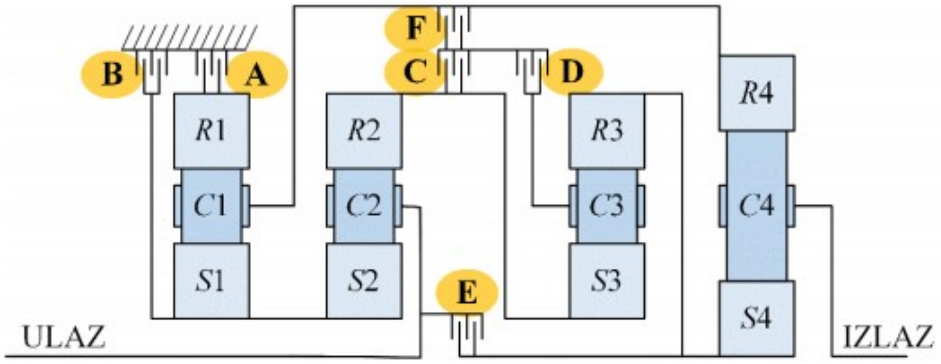


Slika 10. Ilustracija uzdužnog modela dinamike vozila

2.2. Model automatskog mjenjača punog reda

2.2.1. Struktura naprednog mjenjača s velikim brojem stupnjeva prijenosa

10-brzinski automatski mjenjač iz [16], [8] se koristi kao generički primjer napredne transmisije. Sa shematskog prikaza mjenjača na Slika 11 može se vidjeti da se on se sastoji od četiriju planetarnih prijenosnika i šest uljnih lamelnih spojki.



Slika 11. Shema 10-brzinskog AT mjenjača

Planetarni prijenosnik, prikazan na Slika 2, sastoji se od sunčanog zupčanika (S, *engl. sun gear*), zupčanika s unutarnjim ozubljenjem (kolutni zupčanik, R, *engl. ring gear*), te planetarnih zupčanika (planeti, sateliti) s nosačem planeta (C, *engl. planet carrier*).

Kombinacijom stanja različitih spojki mogu se ostvariti različiti stupnjevi prijenosa. Korak prijenosnog omjera definiran je u Tablica 1 kao recipročna vrijednost kvocijenta prijenosnih omjera danog stupnja i stupnja koji mu prethodi, dok X označava zatvorenu spojku. Tako su npr. u stabilnom 1. stupnju prijenosa zatvorene spojke A, B, D i E, dok su u stabilnom 2. stupnju prijenosa zatvorene spojke A, B, C i D. Dakle, kako bi se ostvarila 1-3 promjena stupnja prijenosa, potrebno je otvoriti spojku B (isključna spojka) i ukopčati i zatvoriti spojku C (uključna spojka).

Tablica 1. Tablica stanja spojki u pojedinim stupnjevima prijenosa 10-brzinskog AT mjenjača

Stupanj prijenosa	**Prijenosni omjer**	**Korak prijenosnog omjera**	**Spojke koje prenose moment**					
			A	B	C	D	E	F
Unatrag	-4.79	1.02	X	X		X		X
Prazan hod								
1.	4.70		X	X		X	X	
2.	2.99	1.57	X	X	X	X		
3.	2.18	1.27	X		X	X	X	
4.	1.80	1.21	X		X	X		X
5.	1.54	1.17	X		X		X	X
6.	1.29	1.19	X			X	X	X
7.	1.00	1.29			X	X	X	X
8.	0.85	1.17		X		X	X	X
9.	0.69	1.24		X	X		X	X
10.	0.64	1.08		X	X	X		X

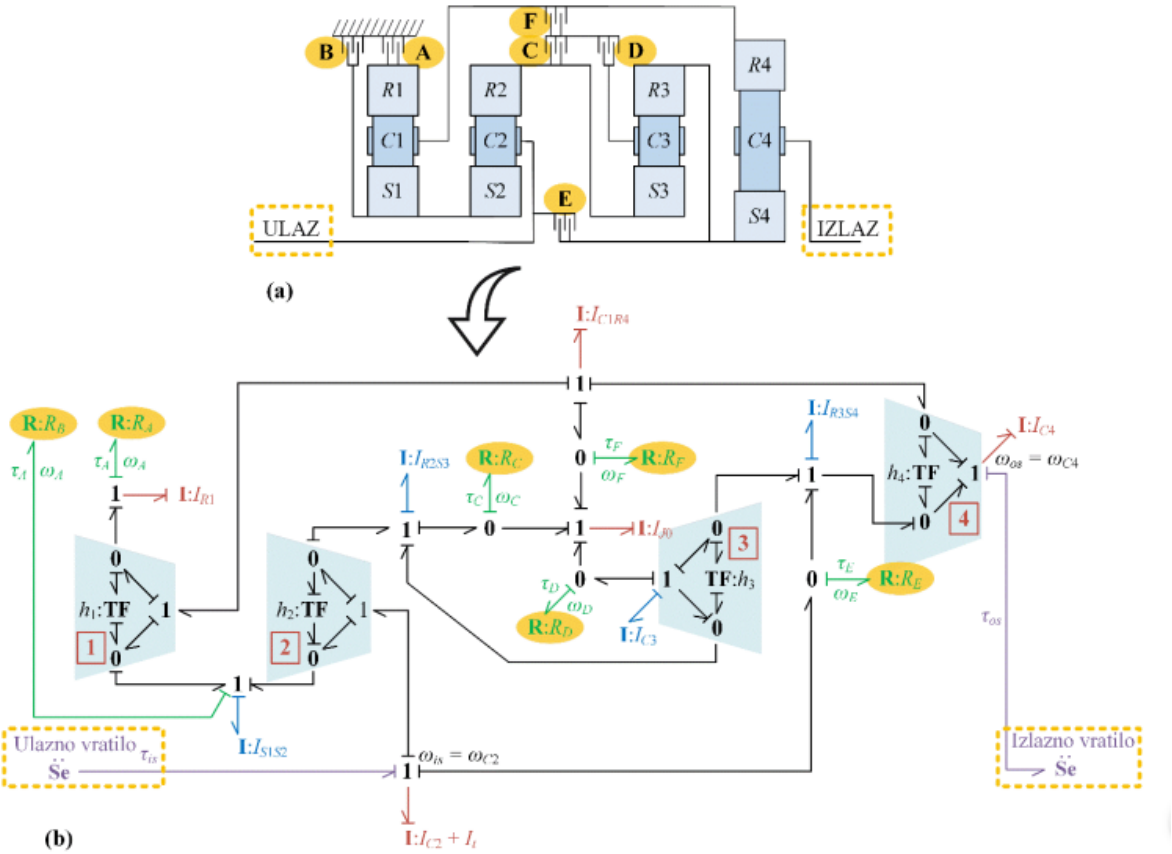
Pristup modeliranja metodom veznih dijagrama predstavljen je u [12]. Dinamika automatskog mjenjača može se opisati korištenjem modela veznog dijagrama prikazanog na Slika 1 (b). Model veznog dijagrama izrađen je oko trokutastih struktura veza koje opisuju kinematiku planetarnog prijenosnika. Prijenosni omjer definiran je kao [13]:

$$h_i = \frac{r_{ri}}{r_{si}}, \qquad i = 1, \dots, 4\,, \tag{14}$$

pri čemu su r_{ri} i r_{si} polumjeri kolutnog i sunčanog zupčanika. Ostatak veznog dijagrama izravno reflektira mehaničku strukturu mjenjača prikazanu na Slika 12. (a), gdje elementi **R** i

I opisuju trenje spojke i inerciju zupčanika, dok čvorišne točke **0** i **1** reprezentiraju točke zbrajanja brzina vrtnji i momenata [12].

Analiza kauzalnosti [14] pokazuje da pet od devet inercijskih elemenata mjenjača ima integralu kauzalnost, tj. da je puni model mjenjača petog reda.



Slika 12. 10-brzinski automatski mjenjač: (a) shema i (b) pripadajući vezni dijagram

2.2.2. Struktura modela automatskog mjenjača reduciranog reda za uzlaznu promjenu s jednostrukim prijelazom

Redukcija modela automatskog mjenjača MOR metodom prezentiranom u [8] rezultira općom formom modela mjenjača drugog reda za promjene s jednostrukim prijelazom:

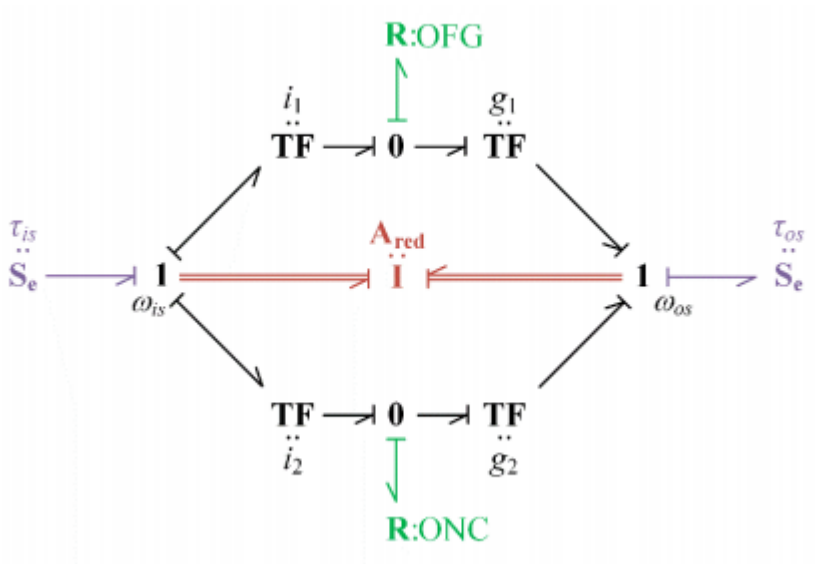
$$\begin{gathered}\mathbf{A_{red}}[\dot{\omega}_{is} \quad \dot{\omega}_{os}]^{\mathrm{T}} = \mathbf{B_{red}}[\tau_{fa} \quad \tau_{fb} \quad \tau_{os} \quad \tau_{is}]^{\mathrm{T}} \\ \mathbf{A_{red}} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B_{red}} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 1 \\ a_{21} & a_{22} & -1 & 0 \end{bmatrix},\end{gathered} \tag{15}$$

gdje su varijable stanja ω_{is} i ω_{os}, dok indeksi a i b odgovaraju aktivnim spojkama za danu promjenu stupnja prijenosa (npr. za 1-3 uzlaznu promjenu vrijedi sljedeća notacija: a = C – uključna spojka (*engl. ONComing clutch, ONC*), b = B – isključna spojka (*engl. Off-going clutch, OFG*) [7]; Tablica 1). MOR postupak daje i konkretne vrijednosti parametara modela (tj. matrica $\mathbf{A_{red}}$ i $\mathbf{B_{red}}$) za danu promjenu stupnja prijenosa. Van-dijagonalni elementi $a_{ij} = a_{ji}$, i ≠ j, matrice inercija $\mathbf{A_{red}}$ reprezentiraju članove koji se javljaju uslijed sprege inercije, te koji mogu značajnije utjecati na dinamiku promjene stupnja prijenosa [17].

Dinamika mjenjača za promjenu s jednostrukim prijelazom može se predstaviti veznim dijagramom prikazanima na Slika 13. Ekvivalentni prijenosni omjeri modela u formi veznog dijagrama dobivaju se iz elemenata b_{1j} i b_{2j} ulazne matrice $\mathbf{B_{red}}$ na sljedeći način:

$$\begin{aligned} i_j &= -b_{1j} \\ g_j &= \frac{1}{b_{2j}}, \quad j = 1{,}2 \end{aligned} \tag{16}$$

Vezni dijagram modela uključuje članove sprege inercije koji su reprezentirani matričnim elementom $\mathbf{I}$: $\mathbf{A_{red}}$. Vezni dijagram modela zorno ilustrira kako se sprega inercije manifestira u uspostavi višestrukih putanja prijenosa momenta, uključujući one koje prenose moment s ulaznog vratila mjenjača izravno na izlazno (bez obzira na stanje aktivnih spojki) [17].



Slika 13. Vezni dijagram dinamike promjene s jednostrukim prijelazom (dvije aktivne spojke)

2.3. Model trenja spojke

2.3.1. Statička karakteristika trenja spojke

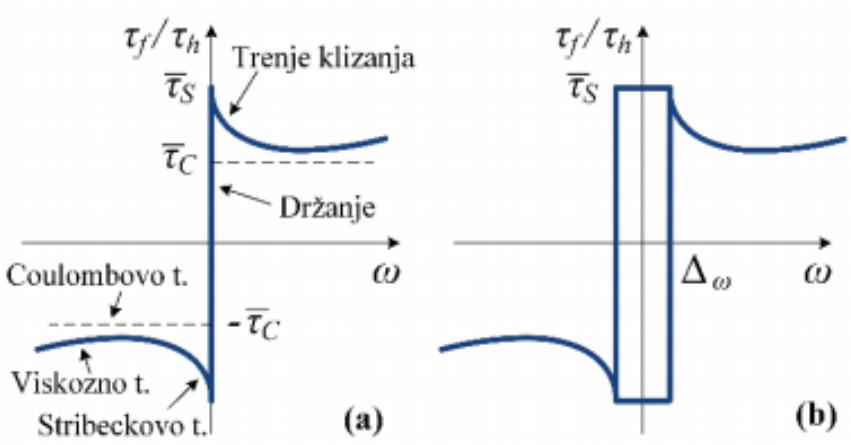
Statička karakteristika trenja (Slika 14. (a)) [12] može se opisati kao funkcija brzine klizanja ω i kapaciteta momenta spojke τ_h koji predstavlja upravljačku varijablu spojke (vezanu uz tlak hidrauličkog aktuatora spojke):

$$\tau_f(\tau_h, \omega) = \tau_h \left[\bar{T}_C + (\bar{T}_S - \bar{T}_C) e^{-\left|\frac{\omega}{\omega_{st}}\right|^{\delta}} + \sigma_2 \omega \right] \operatorname{sgn} \omega \tag{17}$$

gdje $\bar{T}_C = 1$ označava normirani Coulombov moment trenja, $\bar{T}_S$ je normirani maksimalni statički moment trenja, σ_2 je normirani koeficijent viskoznog trenja, ω_{st} je Stribeckova brzina i δ je faktor oblika koji se obično kreće u rasponu $\delta = \epsilon\,[0{,}5 \ldots 2]$. U specijalnom slučajnu za koji vrijedi $\bar{T}_C = \bar{T}_S = 1$ i ne uzimajući u obzir viskozno trenje, dobiva se jednostavni Coulombov model trenja koji se razmatra u ovom radu i koji je prikazan na Slika 14 (a) isprekidanom linijom:

$$\tau_f(\tau_h, \omega) = \tau_h \bar{T}_C \operatorname{sgn} \omega \tag{18}$$

Statička karakteristika trenja prikazana na Slika 14 (a) nije jednoznačno definirana za brzinu klizanja nula, odnosno u području držanja (*engl. stiction*) te se kao takva ne može računalno implementirati. Postoje različiti načini implementacije modela trenja, te će se model koji je korišten u ovom radu (Karnoppov model [12], [18]) detaljno objasniti u idućem odjeljku.



Slika 14. Model trenja: (a) poopćena statička karakteristika i (b) Karnoppov model

2.3.2. Karnoppov model trenja

Ovaj model uvodi usko područje $|\omega| < \Delta_\omega$ unutar kojeg moment trenja ne ovisi o klizanju spojke već o primijenjenom momentu na spojku. Za slučaj Coulombove krivulje trenja, Karnoppov model se može opisati kao:

$$\tau_f = \begin{cases} \tau_{f,slip} = \tau_h \bar{T}_C \operatorname{sgn} \omega, & za\ |\omega| \geq \Delta_\omega \\ \tau_{f,stick} = \operatorname{sat}(\tau_{stick}, \tau_h \bar{T}_C), & \text{inače} \end{cases}, \tag{19}$$

pri čemu funkcija sat(x, Y) zasićuje ulaz x na razinu $\pm Y$, dok τ_{stick} označava primijenjeni moment na zatvorenu spojku. Taj se moment kod automatskog mjenjača, kao sustava s više frikcijskih elementa, određuje na relativno složen način [8], [12], [18], no sveukupan model krasi računalna učinkovitost i realističnost.

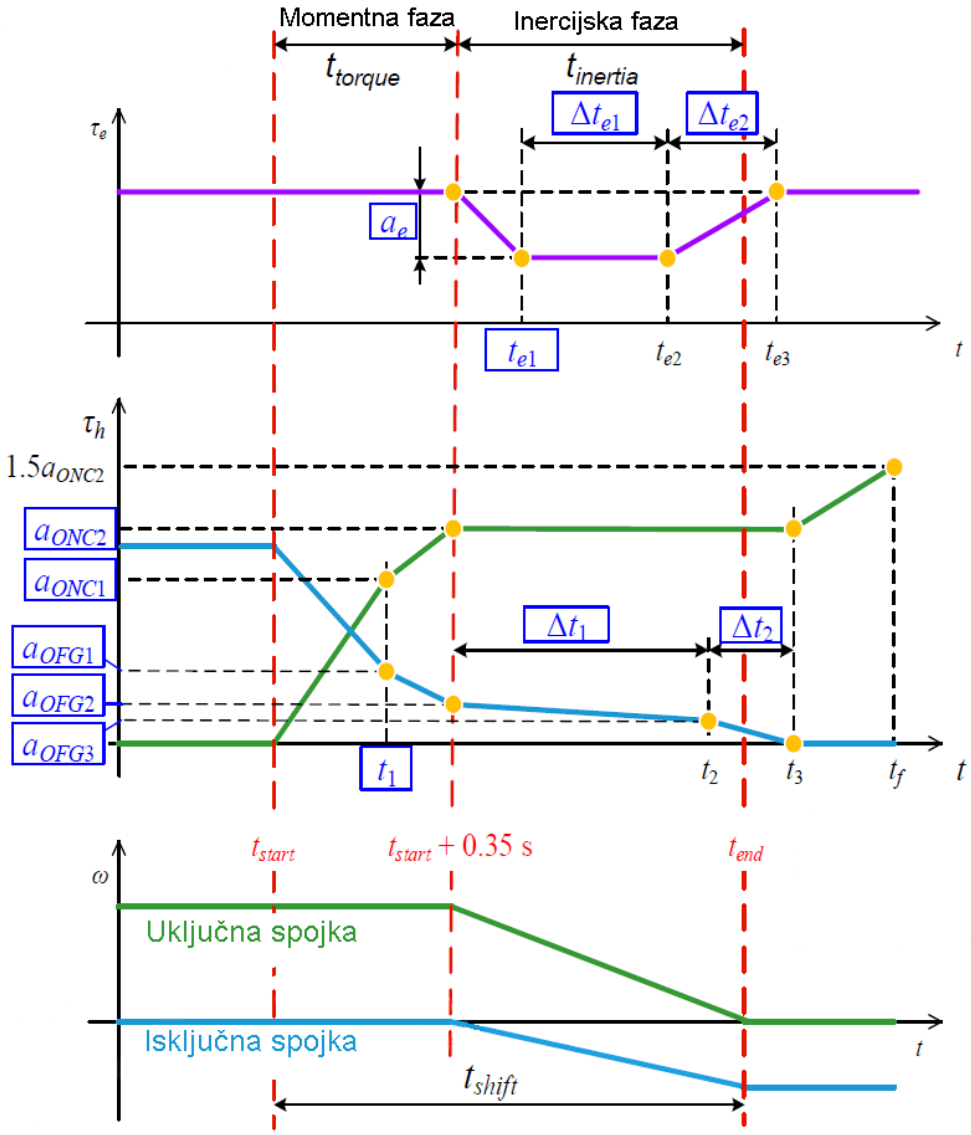
3. VIŠE-KRITERIJSKO OPTIMIRANJE PARAMETARA UPRAVLJAČKIH PROFILA PROMJENE S JEDNOSTRUKIM PRIJELAZOM

U ovom poglavlju predstavit će se prvi pristup optimiranju upravljanja promjenom stupnja prijenosa koji se zasniva na primjeni više-kriterijskog optimiranja korištenjem genetskih algoritama, u svrhu dobivanja optimalnih parametara po odsječcima linearnih upravljačkih varijabli, te koji je detaljnije dan u [11]. Nakon što se provede formulacija problema, bit će opisani rezultati za različite scenarije za uzlaznu promjenu 1-3.

3.1. Formulacija problema više-kriterijskog optimiranja na modelu reduciranog reda

Upravljački profili promjene stupnja prijenosa s jednostrukim prijelazom prikazani su na Slika 15. Promjena stupnja prijenosa inicira se u trenutku t_{start} podizanjem kapacitete momenta uključne (ONC) spojke (puna zelena linija) i istovremenim smanjenjem momenta isključne (OFG) spojke (puna plava linija). Završetak momentne i početak inercijske faze određen je trenutkom proklizavanja isključne spojke ($|\omega_{OFG}| > 0$). U trenutku $t_{start} + 0.35$ moment uključne spojke se drži na konstantnoj vrijednosti dok moment isključne spojke linearno pada. Važno je napomenuti da momentna faza može završiti prije preddefiniranog vremena $t_{start} + 0.35$.

Inercijska faza, a time i promjena stupnja prijenosa završava kada brzina klizanja uključne spojke padne na nulu, odnosno u vremenskom trenutku t_{end}. Inercijska faza može se ubrzati redukcijom momenta motora tijekom inercijske faze. Trajanje inercijske faze, $t_{inertia}$, ovisna je osim o iznosu redukcije momenta motora (a_e), i o amplitudi kapaciteta momenta uključne spojke u inercijskoj fazi (a_2) te dvije amplitude kapaciteta momenta isključne spojke u inercijskoj fazi (a_{OFG2}, a_{OFG3}), ukoliko se isključna spojka koristi tijekom inercijske faze.



Slika 15. Definicija po odsječcima linearnih profila kapaciteta momenata spojki i redukcije momenta motora za uzlaznu promjenu s jednostrukim prijelazom [11]

Zadatak optimiranja je pronaći parametre (sadržani u upravljačkom vektoru $\mathbf{p}_{\mathbf{ctrl}}$) koji opisuju upravljačke profile promjene stupnja prijenosa prikazane na Slika 15, koji istovremeno minimiziraju tri konfliktna kriterija kvalitete promjene stupnja prijenosa [11].

Upravljački vektor $\mathbf{p_{ctrl}}$ sastoji se od dva pod-vektora: $\mathbf{p_{cl}}$ koji opisuje profile kapaciteta spojki i $\mathbf{p_{eng}}$ koji opisuje profil redukcije momenta motora:

$$\mathbf{p_{ctrl}} = \begin{bmatrix} \mathbf{p_{cl}} \\ \mathbf{p_{eng}} \end{bmatrix} \quad . \tag{20}$$

Pod-vektori $\mathbf{p_{cl}}$ i $\mathbf{p_{eng}}$ sadrže sljedeće parametre za slučaj uzlazne promjene pod opterećenjem:

$$\begin{gathered} \mathbf{p_{cl}} = [a_{ONC1} \;\; a_{ONC2} \;\; t_1 \;\; a_{OFG1} \;\; a_{OFG2} \;\; a_{OFG3} \;\; \Delta t_1 \;\; \Delta t_2]^{\mathrm{T}} \quad , \\ \mathbf{p_{eng}} = [a_e \;\; t_{e1} \;\; \Delta t_{e1} \;\; \Delta t_{e2}]^{\mathrm{T}} \quad . \end{gathered} \tag{21}$$

gdje su a_{ONC} iznosi kapaciteta uključne spojke, a_{OFG} iznosi kapaciteta isključne spojke, a_e iznos redukcije momenta motora, a t i Δt vremenski trenuci, odnosno razmaci između točaka loma koje definiraju upravljačke profile.

Optimiranjem parametara istovremeno se minimiziraju tri konfliktna kriterija kvalitete promjene stupnja prijenosa [11]. Prvi kriterij kvalitete promjene stupnja prijenosa koji se minimizira, J_1, odnosi se na ukupno trajanje promjene stupnja prijenosa koje je zbroj trajanja momentne (t_{torque}) i inercijske faze ($t_{inertia}$) [8]:

$$\min_{\mathbf{p_{ctrl}}} J_1 = t_{shift} = t_{torque} + t_{inertia} \quad . \tag{22}$$

Drugi kriterij kvalitete promjene stupnja prijenosa, J_2, mjera je neudobnosti promjene stupnja prijenosa koja je izražena kao korijen srednjeg kvadrata (*engl. Root-Mean-Square, RMS*) trzaja vozila [8]:

$$\min_{\mathbf{p_{ctrl}}} J_2 = \sqrt{\frac{1}{t_f}\int_0^{t_f} \ddot{v}_v^2 \, dt} \quad , \tag{23}$$

gdje t_f označava vrijeme trajanja simulacije, a $\ddot{v}_v$ uzdužni trzaj vozila.

Treći kriterij kvalitete promjene stupnja prijenosa, J_3, odnosi se na gubitak energije u spojkama kao mjeru neučinkovitosti promjene stupnja prijenosa odnosno na integral umnoška brzine klizanja (ω_j) i stvarnog momenta spojke (τ_{fj}) tijekom promjene stupnja prijenosa [8]:

$$\min_{\mathbf{p_{ctrl}}} J_3 = \int_0^{t_f} \sum_j \omega_j \tau_f \quad , \quad j \epsilon \{ONC, OFG\} \tag{24}$$

Parametri upravljačkih profila podložni su tvrdim ograničenjima. Tvrda ograničenja parametara koji definiraju kapacitet spojki su:

$$\begin{gathered} a_{ONC1,2-\min} \leq a_{ONC1,2} \leq a_{ONC1,2-\max}\,, \\ a_{OFG1,2,3-\min} \leq a_{OFG1,2,3} \leq a_{OFG1,2,3-\max}\,, \\ t_{1-\min} \leq t_1 - t_{start} \leq t_{1-\max}\,, \\ \Delta t_{1-\min} \leq \Delta t_1 \leq \Delta t_{1-\max}\,, \\ \Delta t_{2-\min} \leq \Delta t_2 \leq \Delta t_{2-\max}\,, \end{gathered} \tag{25}$$

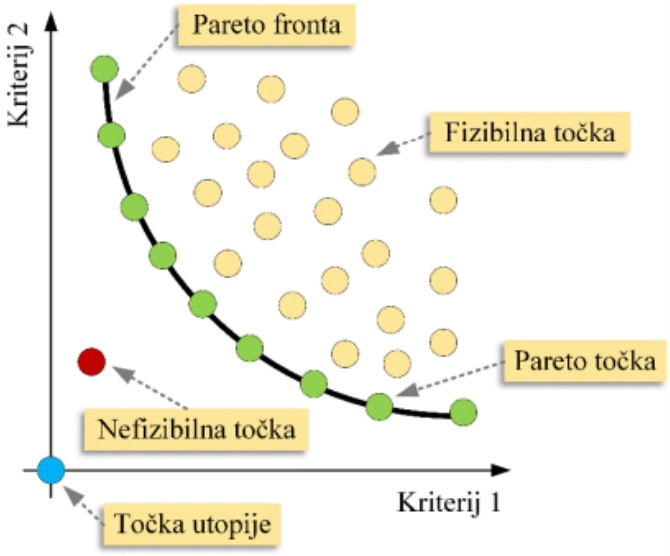
dok su tvrda ograničenja parametara redukcije momenta motora:

$$\begin{gathered} a_{e-\min} \leq a_e \leq a_{e-\max}\,, \\ t_{e1-\min} \leq t_{e1} - t_{start} \leq t_{e1-\max}\,, \\ \Delta t_{e1-\min} \leq \Delta t_{e1} \leq \Delta t_{e1-\max}\,, \\ \Delta t_{e2-\min} \leq \Delta t_{e2} \leq \Delta t_{e2-\max}\,. \end{gathered} \tag{26}$$

Osim navedenih tvrdih ograničenja, dodano je nekoliko ograničenja kako bi se spriječilo ekstremno kratko trajanje promjene stupanja prijenosa i izbjeglo razmatranje neprihvatljivih rješenja (onih u kojima promjena stupnja nikad ne završi). Prvo se osigurava postavljenjem ograničenja na minimalno trajanje promjene stupnja prijenosa koje ne smije biti manje od $t_{shift-\min}$, a drugo je osigurano postavljanjem je ograničenja na maksimalni iznos integrala brzine klizanja uključne spojke u intervalu $[t_{end}\ t_{f,end}]$ odnosno nakon završetka inercijske faze:

$$\begin{gathered} t_{shift} > t_{shift-\min}\,, \\ \int_{t_{end}}^{t_f} \omega_{ONC}^2 < \omega_{ONC-\min}\,. \end{gathered} \tag{27}$$

Problem optimiranja je riješen [11] pomoću MOGA-II genetskog algoritma. On je dostupan unutar modeFRONTIER optimizacijskog okruženja koji koristi elitizam. Elitizam je vrsta selekcijskog postupka koja se uvodi kako bi se najbolja jedinka očuvala te sudjelovala u sljedećoj iteraciji GA neizmijenjena. On omogućava očuvanje izvrsnih rješenja bez preuranjene konvergencije k lokalnom optimumu [19], [8]. Rješenje više-kriterijskog optimiranja rezultira širokim skupom mogućih rješenja iz kojih se izdvaja skup Pareto optimalnih rješenja, tzv. Pareto fronta koja je ilustrativno prikazana na Slika 16. gdje jedno Pareto rješenje predstavlja optimalan kompromis između dva ili više suprotstavljenih kriterija optimiranja. Pareto optimalna rješenja definiraju se kao rješenja koja su bolja u najmanje jednom kriteriju od bilo kojeg drugog rješenja. Rješenja u kojima je prekršeno barem jedno ograničenje smatraju se nemogućim rješenjima (eng. *unfeasible*) te ne ulaze u skup Pareto optimalnih rješenja čak i ako su po jednom kriteriju bolja od bilo kojeg drugog rješenja.



Slika 16. Ilustracija Pareto optimalnih rješenja [8]

3.2. Rezultati više-kriterijskog optimiranja parametara za uzlaznu promjenu 1-3

U ovom potpoglavlju prezentirat će se rezultati optimiranja parametara za uzlaznu promjenu 1-3. Kako bi se stekao bolji uvid u postizive performanse promjene stupnja prijenosa, optimizacija parametara je provedena za 4 različita scenarija upravljanja promjenom stupnja

prijenosa. U svim rezultatima ovog i narednih poglavlja bit će korišten položaj pedale akceleratora (p_{th}) od 30% i brzina vrtnje motora (ω_e) od 2500 min^{-1}.

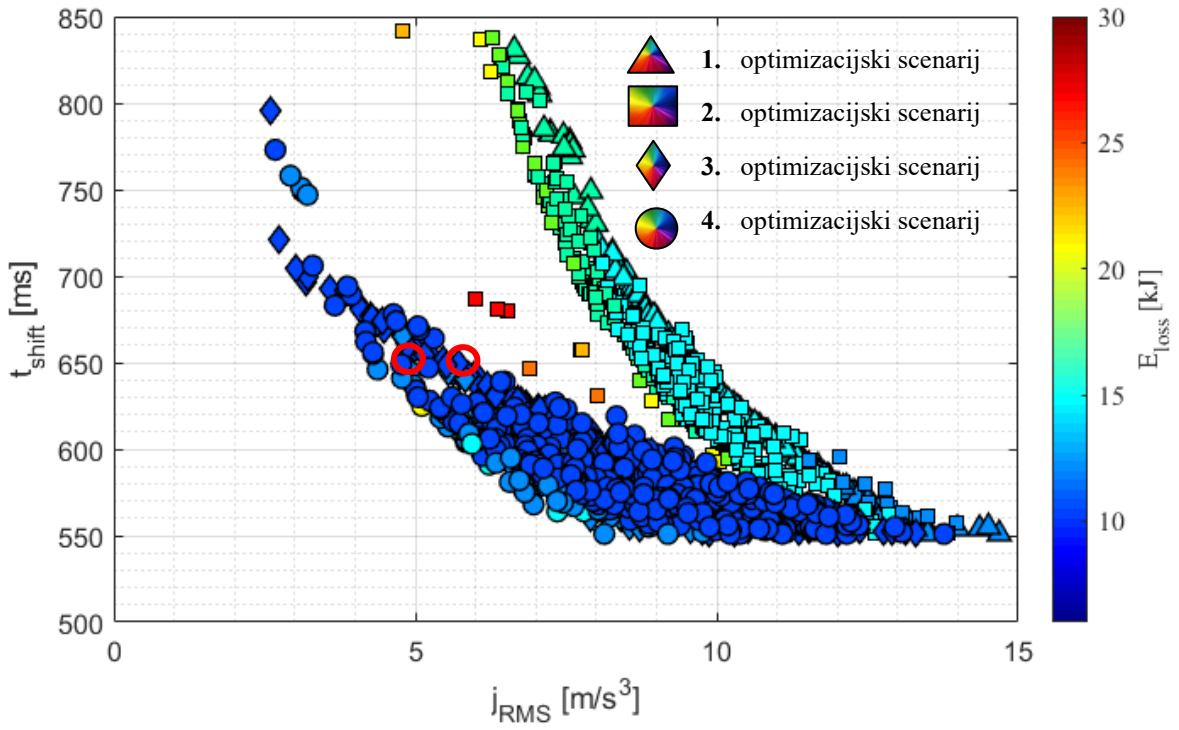
Prvi optimizacijski scenarij se odnosi na korištenje samo jednog upravljačkog kanala, uključne spojke. U tom slučaju se optimiraju samo tri parametra ($a_{ONC1}, a_{ONC2}, \Delta t_2$), parametri a_{OFG2}, a_{OFG3} i a_e se postavljaju na nulu dok se ostali parametri ne optimiraju, tj. postavljeni su kao preddefinirane konstantne vrijednosti.

Drugi optimizacijski scenarij se odnosi na korištenje dva upravljačka kanala, uključnu spojku i isključnu spojku. U tom slučaju se optimiraju parametri sadržani u $\mathbf{p_{cl}}$ vektoru, parametar a_e se postavlja na nulu dok se ostali parametri ne optimiraju. Za razliku od prvog optimizacijskog scenarija, u ovom scenariju uvedena je modulacija isključne spojke tijekom trajanja inercijske faze.

Treći optimizacijski scenarij se također odnosi na korištenje dva upravljačka kanala, uključnu spojku i redukciju momenta motora. U tom slučaju se optimiraju sljedeći parametri: $a_{ONC1}, a_{ONC2}, \Delta t_2, a_e, t_{e1}, \Delta t_{e1}, \Delta t_{e2}$, parametri a_{OFG2} i a_{OFG3} se postavljaju na nulu dok se ostali parametri ne optimiraju.

Četvrti optimizacijski scenarij se odnosi na korištenje svih upravljačkih kanala te se zato svi parametri sadržani u vektoru $\mathbf{p_{ctrl}}$ optimiraju.

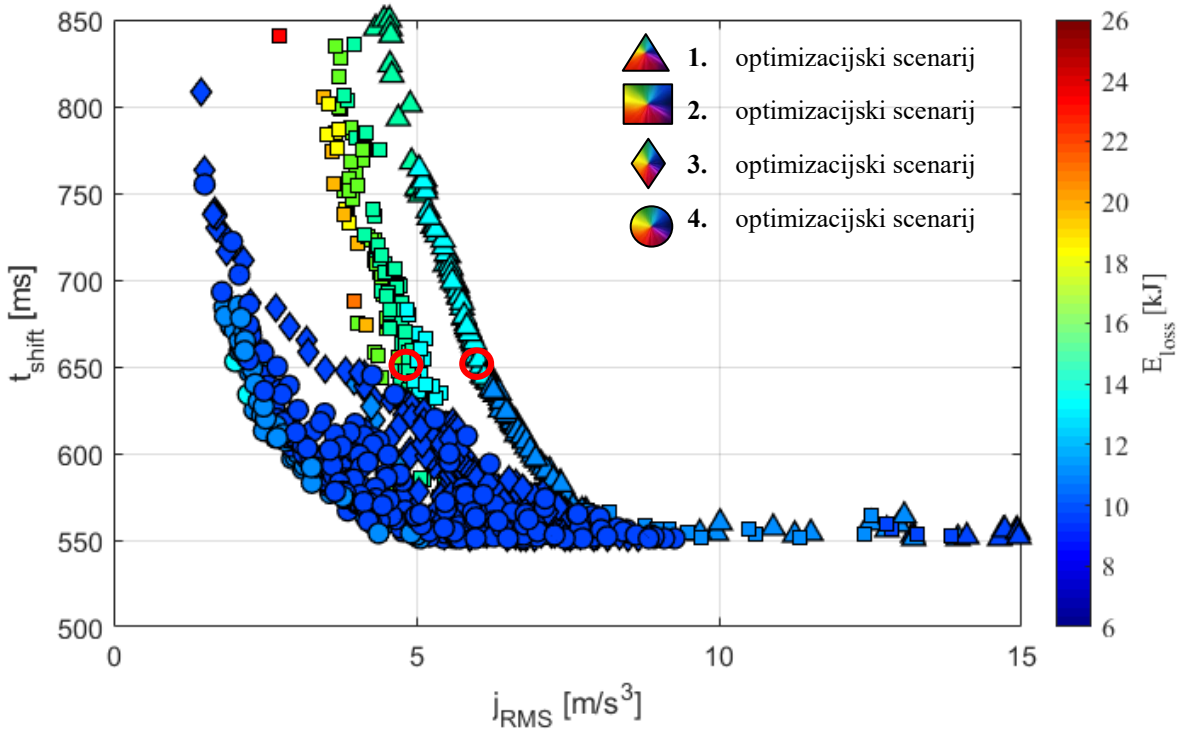
Slika 17 prikazuje rezultate optimiranja sva četiri navedena optimizacijska scenarija za slučaj zatvorenog pretvarača momenta. Rezultati pokazuju da se dodavanjem dodatnih stupnjeva slobode Pareto fronta približava točki utopije (0, 0, 0), odnosno sve funkcije cilja poprimaju manje vrijednosti. Također može se zaključiti da najveći utjecaj u ovom slučaju donosi redukcija momenta motora, odnosno veća poboljšanja su u slučajevima trećeg i četvrtog u odnosu na prvi i drugi scenarij. To se donekle može pripisati činjenici odabranih ograničenja (dizajnerskih parametara). Primjerice, da se odabrala manja amplituda maksimalne redukcije momenta (parametar a_e), Pareto fronta bi se povukla više prema prvom i drugom scenariju, zbog povećanog inercijskog udara sa strane motora i posredno povećanog korištenja spojki.



Slika 17. Pareto fronte više-kriterijskog optimiranja za četiri optimizacijska scenarija u slučaju zatvorenog pretvarača momenta

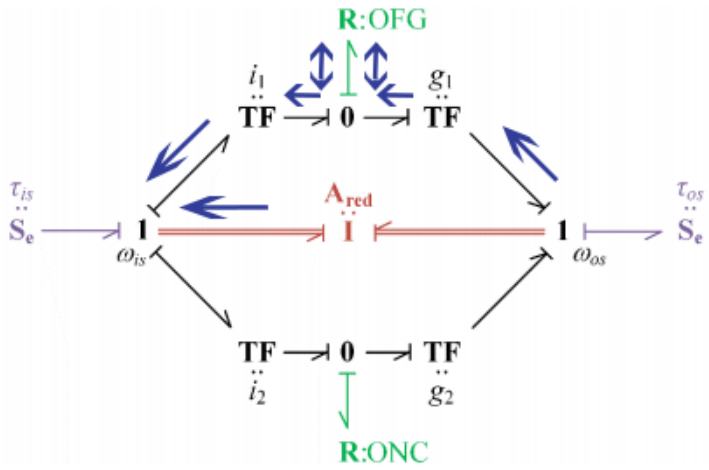
Slika 18 prikazuje rezultate optimiranja sva četiri navedena optimizacijska scenarija za slučaj otvorenog pretvarača momenta. U odnosu na rezultate slučaja sa zatvorenim pretvaračem momenta, može se uočiti sveukupni trend poboljšanja funkcija cilja (niža disipirana energija u spojkama, manji trzaj, kraće vrijeme trajanja prijenosa stupnja) kod svih optimizacijskih scenarija. Glavni utjecaj poboljšanja je u tome što dinamika momentnog pretvarača eliminira torzijske vibracije između motora i ulaznog vratila transmisije jer unosi određeno prigušenje hidrodinamičkim prijenosom. Nadalje, može se primijetiti kako je izraženija razlika između prvog i drugog scenarija te trećeg i četvrtog scenarija u usporedbi s razlikama između istih scenarija za slučaj zatvorenog pretvarača momenta.

Poboljšanje dobiveno uvođenjem moduliranja isključne spojke tijekom inercijske faze može se objasniti analizom veznog dijagrama reduciranog modela automatske transmisije, prikazanog na Slika 19 [7].



Slika 18. Pareto fronte više-kriterijskog optimiranja za četiri optimizacijska scenarija u slučaju otvorenog pretvarača momenta

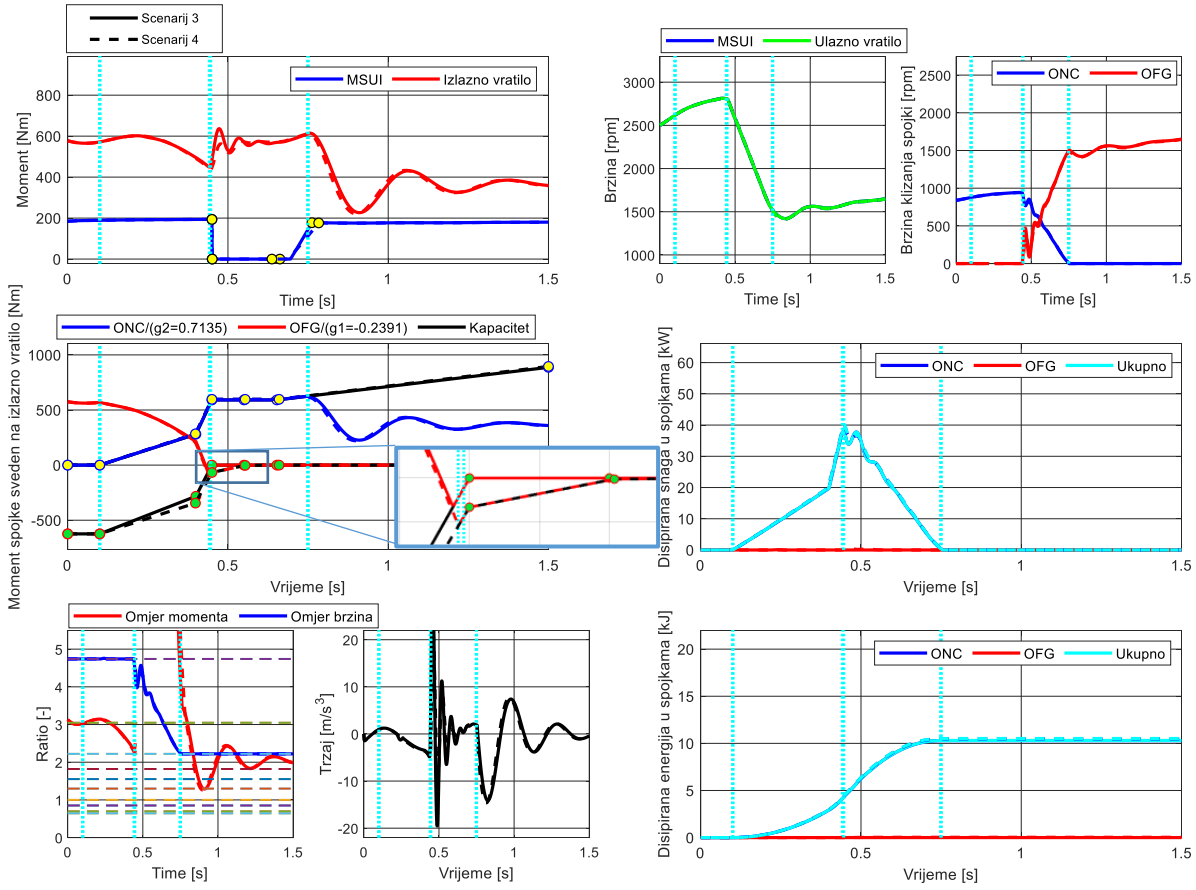
Analiza pokazuje da moduliranje isključne spojke u inercijskoj fazi može smanjiti inercijski udar, tj. iznos momenta na izlaznom vratilu. Međutim kako bi se spriječilo usporenje pada brzine ulaznog vratila mjenjača, potrebno je povećavati moment uključne spojke.



Slika 19. Vezni dijagram reduciranog modela s prikazom negativne recirkulacije

Stoga dolazi do negativne recirkulacije snage preko spojke (plave strelice označavaju smjer recirkulacije). U slučaju da je otvoren pretvarač momenta, moment ulaznog vratila više nije konstantan kroz inercijsku fazu već se on može smanjiti zbog karakteristike ublažavanja torzijskih vibracija koju pruža pretvarač momenta.

Kako bi se zornije prikazala razlika među scenarijima, na Slika 20 dan je simulacijski odziv dva rješenja s Pareto fronti za treći i četvrti scenarij za isto vrijeme trajanja promjene stupnja prijenosa (označeno crvenim kružnicama na Slika 17) za zatvoren pretvarač momenta.



Slika 20. Simulacijski odziv rješenja iz trećeg i četvrtog scenarija za zatvoren pretvarač momenta

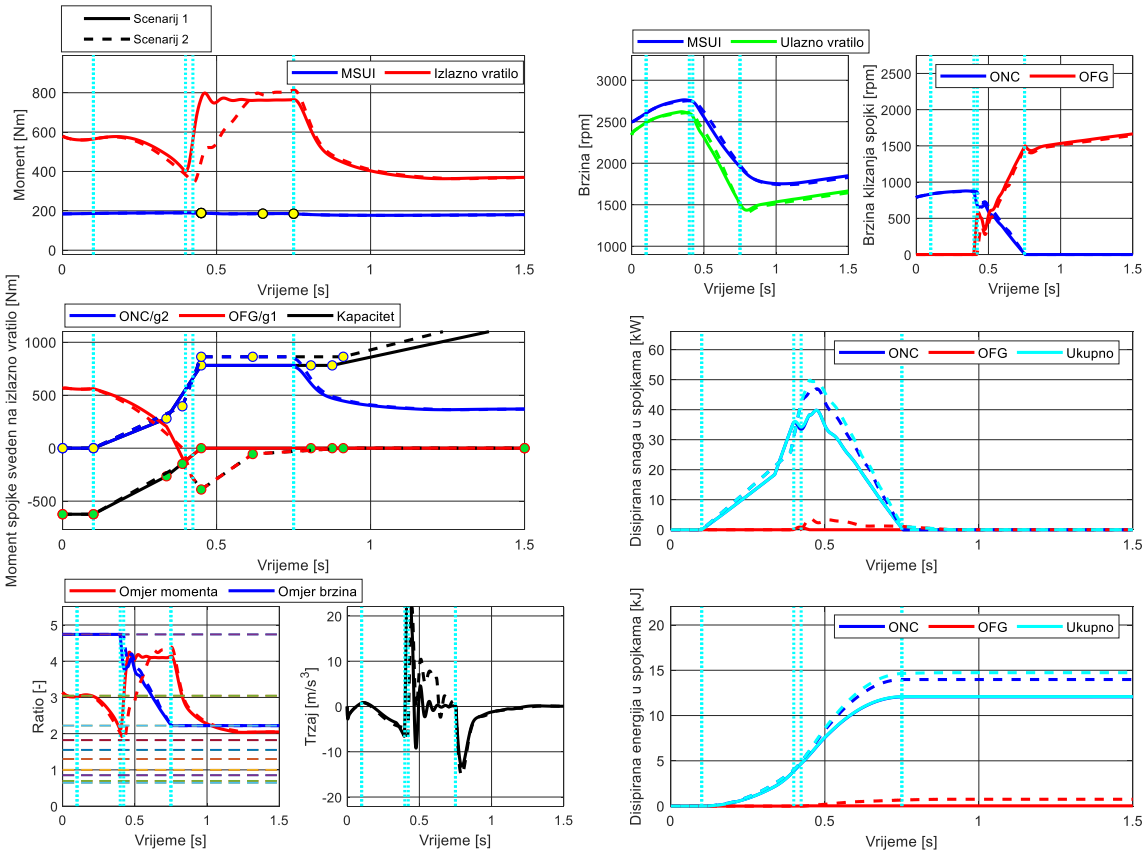
Sa slike se može vidjeti da je razlika među scenarijima mala zbog slabog korištenja isključne spojke u inercijskoj fazi (pogledati uvećanje na slici). No, može se primijetiti da je inercijski udar ipak nešto manji u slučaju četvrtog scenarija jer moduliranje isključne spojke na početku inercijske faze smanjuje vrh inercijskog udara. Kada se usporede numeričke vrijednosti rješenja funkcija cilja dane u Tablica 2, potvrđuju prethodno spomenute zaključke. Scenarij četiri ima blago veću disipaciju energije u spojkama zbog korištenja obje spojke u inercijskoj fazi, dok ostvaruje znatno niži trzaj zbog ublaženja inercijskog udara.

Tablica 2. Numerički prikaz vrijednosti rješenja funkcija cilja za treći i četvrti scenarij te zatvoren pretvarač momenta

Rješenje	t_{shift} [ms]	E_{loss} [kJ]	j_{RMS} [m/s³]
Scenarij 3	650	10.3008	5.7055
Scenarij 4	650 (+0%)	10.5148 (+2.08%)	4.7676 (-16.44%)

Naposljetku, na Slika 21 dan je simulacijski odziv dva rješenja s Pareto fronti za prvi i drugi scenarij za isto vrijeme trajanja promjene stupnja prijenosa za slučaj otvorenog pretvarača momenta (označeno crvenim kružnicama na Slika 18). Simulacijski odzivi pokazuju znatno ublažen inercijski udar u momentu izlaznog vratila u drugom optimizacijskom scenariju koji je izravna posljedica značajnijeg moduliranja isključne spojke (označeno OFG na slici) tijekom inercijske faze.

Usporedbom simulacijskih odziva za zatvoreni (Slika 20) i za otvoreni (Slika 21) pretvarač momenta mogu se primijetiti značajnije torzijske vibracije na izlaznom vratilu u završnoj fazi promjene kod zatvorenog pretvarača momenta (*engl. Shuffle Mode*), dok su kod otvorenog te vibracije prigušene u pretvaraču momenta. Prigušenje torzijskih vibracija bitno poboljšava udobnost promjene stupnja prijenosa (smanjenje RMS trzaja) kod otvorenog pretvarača momenta.



Slika 21. Simulacijski odziv rješenja iz prvog i drugog scenarija za otvoreni pretvarač momenta

Slično kao kod trećeg i četvrtog scenarija u slučaju zatvorenog pretvarača momenta, numeričke vrijednosti funkcija cilja dane u Tablica 3 pokazuju da drugi scenarij u slučaju otvorenog pretvarača momenta ima dosta veću disipaciju energije u spojkama zbog jačeg korištenja isključne spojke u inercijskoj fazi, dok ostvaruje znatno niži trzaj zbog ublaženja inercijskog udara. Ako se ove vrijednosti usporede s prethodnim numeričkim rezultatima, može se vidjeti kako je dobiven skoro jednak iznos trzaja bez korištenja redukcije momenta motora.

Tablica 3. Numerički prikaz vrijednosti rješenja funkcija cilja za prvi i drugi scenarij te otvoren pretvarač momenta

Rješenje	t_{shift} [ms]	E_{loss} [kJ]	j_{RMS} [m/s^3]
Scenarij 1	650	12.0909	6.0619
Scenarij 2	650 (+0%)	14.7328 (+21.85%)	4.8180 (-20.52%)

4. STATIČKO OPTIMIRANJE PARAMETARA KONSTANTNIH UPRAVLJAČKIH PROFILA PROMJENE S JEDNOSTRUKIM PRIJELAZOM

U ovom poglavlju bit će predstavljen drugi pristup optimiranju upravljanja promjenom stupnja prijenosa koji primjenjuje statičko optimiranje u svrhu parametriranja konstantnih upravljačkih varijabli tijekom inercijske faze. Kako bi se mogla provesti statička optimizacija, potrebno je provesti redukciju modela pogona iz reduciranog dinamičkog u reducirani pojednostavljeni statički model pogona uz uvođenje određenih pretpostavki. Nakon postavljanja statičkog modela pogona, prikazat će se formulacija problema statičkog optimiranja te će se analizirati rezultati u usporedbi sa višekriterijskim optimiranjem genetskim algoritmima za različite scenarije za uzlaznu promjenu 1-3.

4.1. Statički model pogona

4.1.1. Pojednostavljeni model pogona

Redukcija dinamičkog modela u pojednostavljeni statički model provodi se korištenjem veznog dijagrama danog na Slika 13 ili iz izraza (15) uz uvođenje određenih pretpostavki koje su navedene u nastavku, te grafički prikazane na Slika 22.

Prva pretpostavka je da je brzina izlaznog vratila konstantna:

$$\omega_{os} \approx const. \;\rightarrow\; \dot{\omega}_{os} = 0 \tag{28}$$

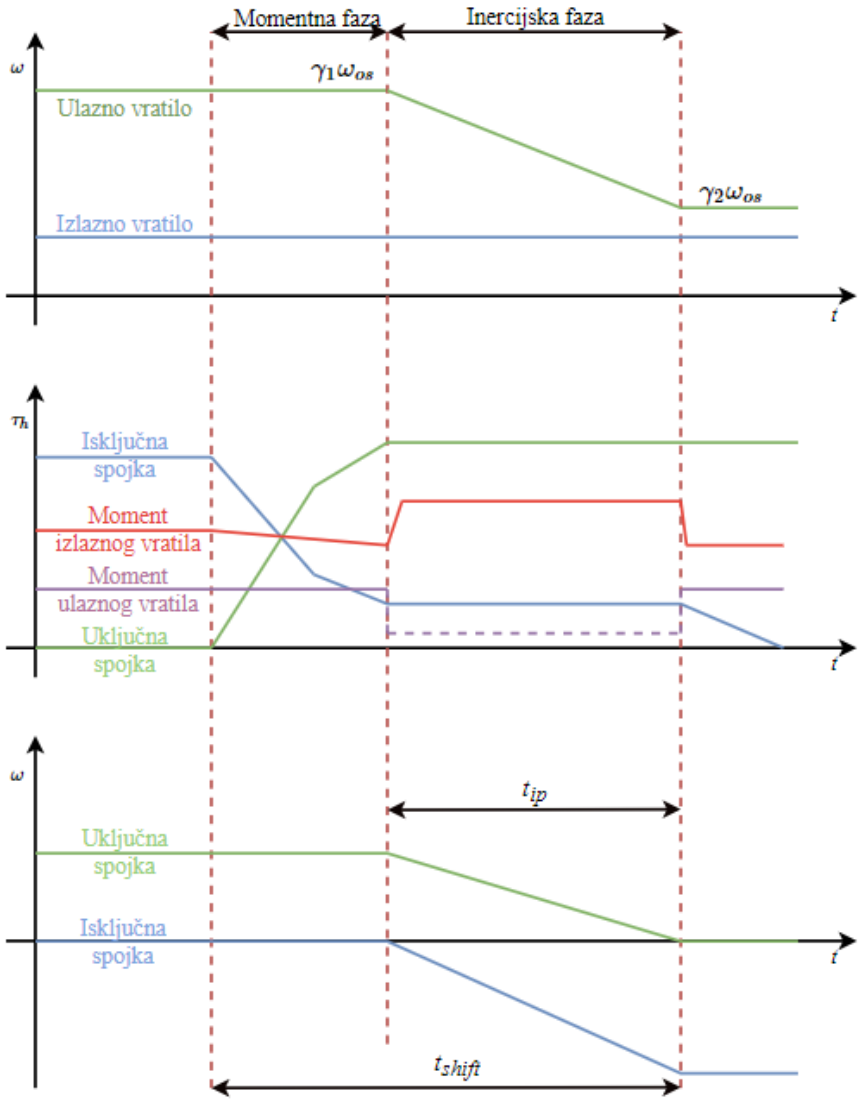
Druga pretpostavka jest da su svi momenti konstantni:

$$\tau_{ONC} = const., \qquad \tau_{OFG} = const., \qquad \tau_{os} = const., \qquad \tau_{is} = const. \tag{29}$$

Treća pretpostavka je da se brzina ulaznog vratila linearno smanjuje, odnosno podrazumijeva konstantnu deceleraciju brzine vrtnje ulaznog vratila:

$$\dot{\omega}_{is} = \frac{\omega_{is,f} - \omega_{is,0}}{t_{ip}} = \frac{\omega_{os}}{t_{ip}}(\gamma_2 - \gamma_1) = const, \tag{30}$$

gdje je γ_1 početni prijenosni omjer, γ_2 konačni prijenosni omjer.



Slika 22. Ilustrativni prikaz promjene stupnja prijenosa pojednostavljenog modela

Nadalje, radi olakšavanja prvotne analize, pretpostavljeno je zanemarivo inercijsko sprezanje. Raspisivanjem matričnog oblika izraza (15) i uvrštavanjem izraza (16) dobivaju se sljedeće jednadžbe:

$$a_{11}\dot{\omega}_{is} = \tau_{is} - i_1\tau_{OFG} - i_2\tau_{ONC} \ , \tag{31}$$

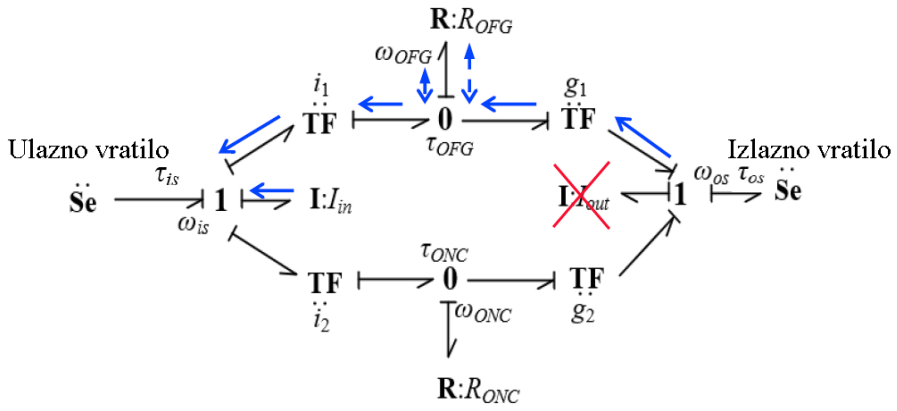
$$a_{12}\dot{\omega}_{os} = \frac{1}{g_1}\tau_{OFG} + \frac{1}{g_2}\tau_{ONC} - \tau_{os} \ . \tag{32}$$

Nakon uvrštavanja pretpostavki (28) i (30) u jednadžbe (31) i (32), te zamjene koeficijenta a_{11} koeficijentom I_{in} (inercija ulaznog vratila, motora i pretvarača momenta, u slučaju zatvorenog pretvarača momenta) dobivaju se statička jednadžbe ulaznog i izlaznog vratila:

$$I_{in}\frac{\omega_{os}}{t_{ip}}(\gamma_2 - \gamma_1) = \tau_{is} - i_1\tau_{OFG} - i_2\tau_{ONC} = \ \tau_e - \Delta\tau_{ec} - i_1\tau_{OFG} - i_2\tau_{ONC}\ , \tag{33}$$

$$\tau_{os} = \frac{1}{g_1}\tau_{OFG} + \frac{1}{g_2}\tau_{ONC} \tag{34}$$

Kao i u odjeljku 2.2.2., struktura modela se može predstaviti i veznim dijagramom (Slika 23), to jest, diferencijalne jednadžbe su se mogle ispisati i sa veznog dijagrama reduciranog dinamičkog modela sa Slika 13 te od tu doći do krajnjih jednadžbi i veznog dijagrama.



Slika 23. Vezni dijagram reduciranog modela pogona bez inercijskog sprezanja, ekvivalentan DCT mjenjaču

4.1.2. Prošireni model pogona

Prošireni model izveden je u dvije verzije. U prvoj verziji uvedeno je prethodno zanemareno inercijsko sprezanje. Druga verzija je nadogradnja prve verzije, te se uvodi otvoreni pretvarač momenta. Redukcija dinamičkog reduciranog modela u statički model započinje na sličan

način kao što je predstavljeno u prethodnom odjeljku, tako da se iz izraza (15) u koje se uvrštavaju izrazi (16) ispisuju diferencijalne jednadžbe:

$$a_{11}\dot{\omega}_{is} + a_{12}\dot{\omega}_{os} = \tau_{is} - i_1\tau_{OFG} - i_2\tau_{ONC} \ , \tag{35}$$

$$a_{21}\dot{\omega}_{is} + a_{22}\dot{\omega}_{os} = \frac{1}{\mathrm{g}_1}\tau_{OFG} + \frac{1}{g_2}\tau_{ONC} - \tau_{os} \ . \tag{36}$$

Razlika u odnosu na pojednostavljeni model jest u tome što su u izrazima prisutni koeficijenti a_{12} i a_{21} koji prikazuju preslikavanje momenta s ulaza na izlaz i izlaza na ulaz, odnosno inercijsko sprezanje. Uvođenjem pretpostavki (28) i (29) koje su identične kao i u prethodnom odjeljku, njihovim uvrštavanjem u (35) i (36), te zamjenom koeficijenta a_{11} koeficijentom I_{in} (inercija ulaznog vratila) i koeficijenta a_{21} koeficijentom I_{io} (inercija sprezanja izlaznog na ulazno vratilo), dobivaju se sljedeći izrazi:

$$I_{in}\dot{\omega}_{is} = \tau_{is} - i_1\tau_{OFG} - i_2\tau_{ONC} \ , \tag{37}$$

$$I_{io}\dot{\omega}_{is} = \frac{1}{\mathrm{g}_1}\tau_{OFG} + \frac{1}{g_2}\tau_{ONC} - \tau_{os} \ . \tag{38}$$

Uvrštavanje jednakosti (37) u (38) rezultira sljedećom jednadžbom:

$$\tau_{os} = -\tau_{is}\frac{I_{io}}{I_{in}} + \ \tau_{OFG}\left(\frac{i_1 I_{io}}{I_{in}} + \frac{1}{\mathrm{g}_1}\right) + \tau_{ONC}\left(\frac{i_2 I_{io}}{I_{in}} + \frac{1}{\mathrm{g}_2}\right). \tag{39}$$

Usporedbom jednadžbi (34) i (39), može se zaključiti da se inercijsko sprezanje manifestira kroz modificirana pojačanja momenta spojki te direktnu vezu ulaza s izlazom (pojavljuje se moment ulaznog vratila τ_{is}). Ako se vrijednost inercije I_{io} postavi na vrijednost nula, izraz (39) se svodi na izraz (34), što je ujedno i dobra provjera modela. Krajnji model za slučaj inercijskog sprezanja, konstantne redukcije momenta motora ($\Delta\tau_{ec}$) i zatvorenog pretvarača momenta je dan u sljedećem obliku nakon uvrštavanja pretpostavke (30):

$$I_{in}\frac{\omega_{os}}{t_{ip}}(\gamma_2 - \gamma_1) = \tau_e - \Delta\tau_{ec} - i_1\tau_{OFG} - i_2\tau_{ONC} \ , \tag{40}$$

$$\tau_{os} = -(\tau_e - \Delta\tau_{ec})\frac{I_{io}}{I_{in}} + \tau_{OFG}\left(\frac{i_1 I_{io}}{I_{in}} + \frac{1}{\mathrm{g}_1}\right) + \tau_{ONC}\left(\frac{i_2 I_{io}}{I_{in}} + \frac{1}{\mathrm{g}_2}\right) \ . \tag{41}$$

Po opisu iz poglavlja 2.1.1. dinamika motora (2) i ulazno vratilo mjenjača (35) povezane su nelinearnim mapama pretvarača momenta (3) i (4) u slučaju otvorenog pretvarača momenta.

Uvrštavanjem jednadžbe (4) u jednadžbu (2), te zatim uvrštavanjem dobivenog rezultata u jednadžbu (37) dobiva se sljedeći izraz koji opisuje dinamiku brzine vrtnje ulaznog vratila:

$$I_{in}\dot{\omega}_{is} = (\tau_e - \Delta\tau_{ec})R_t - I_{imp}\dot{\omega}_e R_t - i_1\tau_{OFG} - i_2\tau_{ONC} \ . \tag{42}$$

gdje je I_{imp} inercija impelerskog kola i motora.

Iz jednadžbe (42) očigledno je da nakon uvrštavanja modela pretvarača momenta u model u model dinamike mjenjača, model postaje ovisan o vremenu ($R_t = f(\omega_e, \omega_{is})$) te iz tog razloga statička optimizacija nije moguća bez daljnjih pojednostavljenja.

Prvo dodatno pojednostavljenje odnosi se na postavljanje konstantnog omjera brzina turbinskog i impelerskog kola:

$$R_\omega = \frac{\omega_t}{\omega_i} = const.\,(0.8 \ \ldots 0.95)\,. \tag{43}$$

Postavljanjem R_ω na konstantnu vrijednost posredno se postavlja i R_t na konstantnu vrijednost. Budući da brzine motora i ulaznog vratila transmisije više nisu jednake, niti njihova ubrzanja više nisu jednaka. To znači da se treba uvesti još jedan koeficijent, $R_{\dot\omega}$, koji postavlja konstantan omjer između ubrzanja ulaznog vratila i motora:

$$\dot\omega_e = \frac{\dot\omega_{is}}{R_{\dot\omega}} \ . \tag{44}$$

Nakon uvrštavanja (44) u (42) dobiva se sljedeći izraz:

$$\left(I_{in} + I_{imp}\frac{R_t}{R_{\dot\omega}}\right)\dot\omega_{is} = (\tau_e - \Delta\tau_{ec})R_t - i_1\tau_{OFG} - i_2\tau_{ONC}\,, \tag{45}$$

gdje je bitno naglasiti da je omjer ubrzanja pretvarača momenta drukčiji od omjera brzina. Jednadžba ulaznog vratila mjenjača s otvorenim pretvaračem momenta se razlikuje u dvije stvari u odnosu na jednadžbu ulaznog vratila pojednostavljenog modela (31). Prva stvar koja se može primijetiti je da se inercija svedena na impelersko kolo korigira određenim faktorom prije nego što se nadodaje na inerciju ulaznog vratila mjenjača, te druga stvar jest da je moment ulaznog vratila korigiran faktorom R_t.

Nakon uvrštavanja pretpostavke (30) u jednadžbu (45), i rješavanjem iste kako bi se dobilo vrijeme inercijske faze (t_{ip}), izraz glasi:

$$t_{ip} = \frac{\omega_{os}(\gamma_2 - \gamma_1)\left(I_{in} + I_{imp}\frac{R_\tau}{R_{\dot{\omega}}}\right)}{(\tau_e - \Delta\tau_{ec})R_\tau - i_1\tau_{OFG} - i_2\tau_{ONC}}\ . \tag{46}$$

Dodavanjem jednadžbi (2), (4) i (44) u jednadžbu (39) i njihovo sređivanje rezultira jednadžbom izlaznog momenta za slučaj otvorenog pretvarača momenta i inercijskog sprezanja

$$\tau_{os} = \tau_{ONC}\left(\frac{i_2 I_{io}}{I_{in}} + \frac{1}{\mathrm{g}_2}\right) + \tau_{OFG}\left(\frac{i_1 I_{io}}{I_{in}} + \frac{1}{\mathrm{g}_1}\right) - \frac{I_{io}}{I_{in}}R_\tau\left(\tau_e - \Delta\tau_{ec} - I_{imp}\frac{\omega_{os}}{t_{ip}R_{\dot{\omega}}}(\gamma_2 - \gamma_1)\right). \tag{47}$$

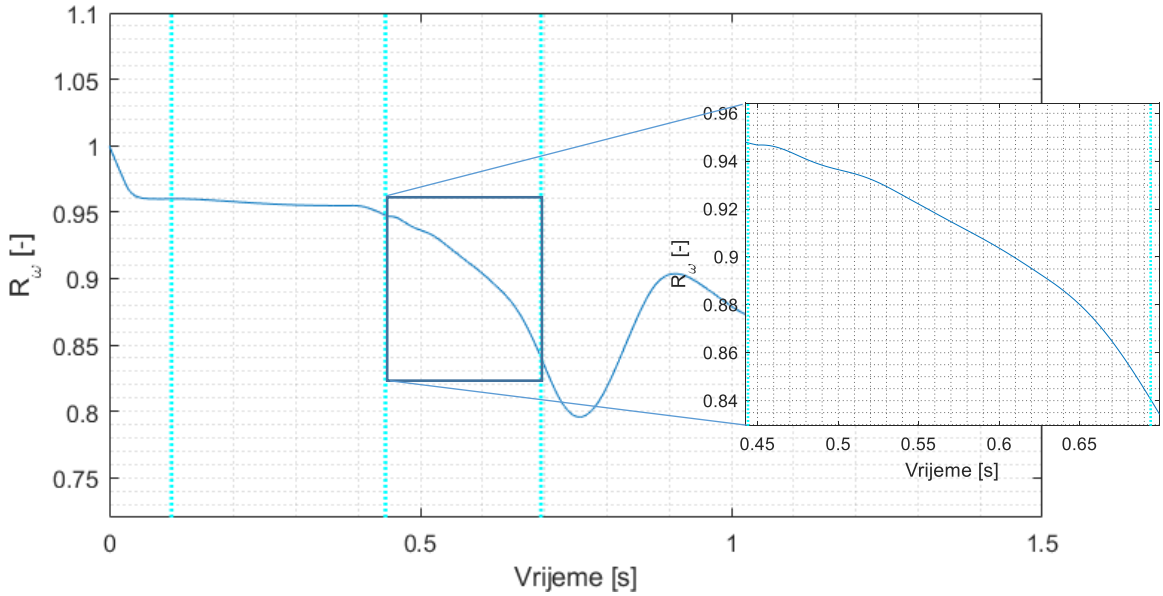
Naposljetku, uvrštavanjem jednadžbe (46) u (47), i sređivanjem dolazi se konačnog izraza za moment izlaznog vratila izraženog pomoću momenata spojki i momenta motora:

$$\begin{aligned}\tau_{os} = {} & \tau_{ONC}\left(\frac{i_2 I_{io}}{I_{in}} + \frac{1}{\mathrm{g}_2} - \frac{I_{io}R_\tau I_{imp} i_2}{I_{in}(I_{in}R_{\dot{\omega}} + I_{imp}R_\tau)}\right) + \tau_{OFG}\left(\frac{i_1 I_{io}}{I_{in}} + \frac{1}{\mathrm{g}_1} - \frac{I_{io}R_\tau I_{imp} i_1}{I_{in}(I_{in}R_{\dot{\omega}} + I_{imp}R_\tau)}\right) \\ & -\tau_e\left[\frac{I_{io}}{I_{in}}R_\tau - \frac{I_{io}I_{imp}R_\tau^2}{I_{in}(I_{in}R_{\dot{\omega}} + I_{imp}R_\tau)}\right] + \Delta\tau_{ec}\left[\frac{I_{io}}{I_{in}}R_\tau - \frac{I_{io}I_{imp}R_\tau^2}{I_{in}(I_{in}R_{\dot{\omega}} + I_{imp}R_\tau)}\right]\ .\end{aligned} \tag{48}$$

Struktura jednadžbe/modela (48) je ista kao u slučaju zatvorenog pretvarača momenta (vidi izraz (41)), samo su pojačanja vezana uz upravljačke varijable promijenjena.

Konstantni omjer brzina motora i ulaznog vratila R_ω, te ubrzanja $R_{\dot{\omega}}$ određeni su analiziranjem simulacijskih odziva. Ako se promotri tipičan odziv vrijednosti omjera brzina pretvarača

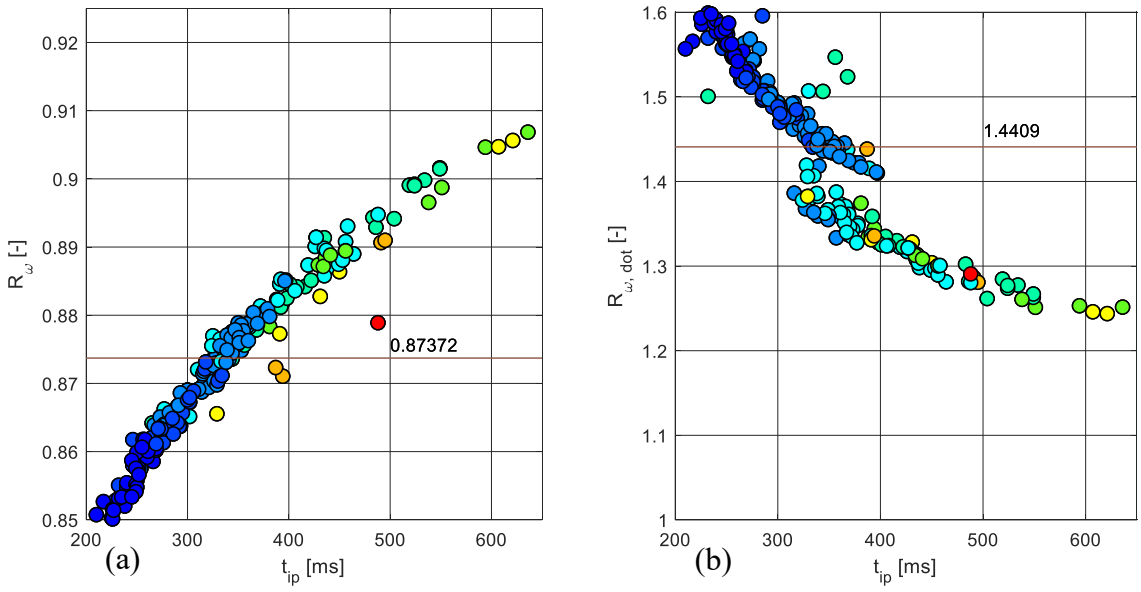
momenta dinamičkog modela za promjenu 1-3 prikazan na Slika 24, može se primijetiti da on kroz inercijsku fazu pada od vrijednosti 0.95 na 0.85.



Slika 24. Odziv vrijednosti omjera brzina pretvarača momenta za promjenu stupnja prijenosa 1-3

Uvrštavanjem tih vrijednosti omjera brzina u mapu omjera momenata momentnog pretvarača (Slika 8 (b)) dobiva se razlika pojačanja momenta R_τ od otprilike 5% kroz inercijsku fazu. Kako bi se odredila konstantna vrijednost koja treba biti korištena za R_ω i $R_{\dot{\omega}}$, iz svih dobivenih rješenja primjenom više-kriterijskog optimiranja za sve scenarije su izračunate srednje vrijednosti navedenih omjera prikazane na Slika 25 [20], dok se omjer R_τ izračuna korištenjem vrijednosti R_ω.

Iz srednjih vrijednosti za pojedini scenarij i njihove srednje vrijednosti koje su dane u Tablica 4. može se zaključiti da su devijacije svih omjera poprilično male te da se ne bi unosila velika greška ako bi se u optimizaciju ulazilo sa istom vrijednosti (srednjom) za svaki scenarij [20]. U nastavku rada će se koristiti točno definirane vrijednosti za svaki scenarij.



Slika 25. Primjer određivanja konstantnih omjera brzina (R_ω) i ubrzanja ($R_{\dot{\omega}}$) iz rezultata više-kriterijskog optimiranja za prvi scenarij

Tablica 4. Prikaz vrijednosti konstantnih omjera brzina (R_ω) i ubrzanja ($R_{\dot{\omega}}$) iz rezultata više-kriterijskog optimiranja za prvi scenarij

	R_ω	$R_{\dot{\omega}}$	R_τ
Scenarij 1	0.8737 (-1.7%)	1.4589 (+6.9%)	1.0304 (+1.0%)
Scenarij 2	0.8737 (-1.7%)	1.4409 (+5.6%)	1.0320 (+1.1%)
Scenarij 3	0.9051 (+1.9%)	1.3167 (-3.5%)	1.0082 (-1.2%)
Scenarij 4	0.9018 (+1.5%)	1.2401 (-9.1%)	1.0107 (-0.9%)
Srednja vrijednost	0.8886 (+0.0%)	1.3642 (+0.0%)	1.0203 (+0.0%)

4.2. Formulacija problema optimiranja

Zadatak statičkog optimiranja je minimizirati dva konfliktna kriterija kvalitete promjene stupnja prijenosa, trajanje inercijske faze (t_{ip}) i gubitak energije kroz disipaciju u spojkama (E_{loss}), optimiranjem upravljačkih varijabli (τ_{OFG}, $\Delta\tau_{ec}$ i τ_{ONC}) promjene stupnja prijenosa. Problem optimiranja riješen je pomoću funkcije *fmincon* dostupne unutar *Optimization Toolbox* alata u sklopu MATLAB računalnog okruženja. Funkcija *fmincon* traži minimum

nelinearne multivarijabline funkcije koja može imati ograničenja tipa jednakosti, nejednakosti i nelinearnih funkcija.

4.2.1. Formulacija optimiranja pojednostavljenog modela

Prvi kriterij kvalitete promjene stupnja prijenosa koji se minimizira odnosi se na trajanje inercijske faze, te se on dobiva rješavanjem izraza (33) za t_{ip} koji je izražen pomoću upravljačkih varijabli:

$$\min t_{ip} = \frac{I_{in}\omega_{os}(\gamma_2 - \gamma_1)}{\tau_e - \Delta\tau_{ec} - i_1\tau_{OFG} - i_2\tau_{ONC}} \ . \tag{49}$$

Drugi kriterij kvalitete promjene stupnja koji se minimizira odnosi se na gubitak energije kroz disipaciju u spojkama tokom inercijske faze, E_{loss}, te je on dan sljedećim izrazom:

$$\min E_{loss} = \left|\tau_{ONC}\ \bar{\omega}_{ONC}\ t_{ip}\right| + \left|\tau_{OFG}\ \bar{\omega}_{OFG}\ t_{ip}\right| \ , \tag{50}$$

gdje su $\bar{\omega}_{ONC}$ i $\bar{\omega}_{OFG}$ srednje brzine klizanja spojki dobivene izrazima:

$$\bar{\omega}_{ONC} = i_2\frac{\omega_{os}}{2}(\gamma_2 - \gamma_1), \qquad \bar{\omega}_{ONC} = i_2\frac{\omega_{os}}{2}(\gamma_2 - \gamma_1) \ . \tag{51}$$

Problem optimiranja podložan je ograničenjima upravljačkih varijabli momentata spojki, redukcije momenta motora i funkciji cilja, odnosno vremenu trajanja inercijske faze:

$$\begin{gathered} \tau_{os} = \frac{1}{g_1}\tau_{OFG} + \frac{1}{g_2}\tau_{ONC} \ \text{ vidi jed. (34)} \ , \\ 0 \le \Delta\tau_{ec} \le \tau_e \ , \\ \tau_{OFG,min} \le \tau_{OFG} \le \tau_{OFG,max} \ , \\ \tau_{ONC,min} \le \tau_{ONC} \le \tau_{ONC,max} \ , \\ 200\ \text{ms} \le t_{ip} \le 700\ \text{ms} \ . \end{gathered} \tag{52}$$

Osim navedenih ograničenja, uvedena su dodatna ograničenja na momente spojki koja definiraju recirkulaciju momenta [11]:

$$\begin{aligned} \operatorname{sgn}(i_2\tau_{ONC}) &= \operatorname{sgn}(g_2^{-1}\tau_{ONC}) = 1 \ , \\ \operatorname{sgn}(i_1\tau_{OFG}) &= \operatorname{sgn}(g_1^{-1}\tau_{ONC}) = -1 \ . \end{aligned} \tag{53}$$

Scenariji za koje će provoditi optimizacija i simulacijske provjere su jednaki kao potpoglavlju 3.2., odnosno imaju jednake upravljačke kanale. Tako se u prvom optimizacijskom scenariju optimira samo moment uključne spojke (τ_{ONC}), u drugom scenariju se optimira moment uključne i isključne spojke (τ_{ONC} i τ_{OFG}), u trećem scenariju se optimira moment uključne spojke i redukcija momenta (τ_{ONC} i $\Delta\tau_{ec}$), dok se u četvrtom scenariju optimiraju svi upravljački kanali (τ_{ONC}, τ_{OFG} i $\Delta\tau_{ec}$). Za sve upravljačke scenarije se koriste iste prethodno definirane funkcije cilja definirane izrazima (49) i (50), uz činjenicu da se vrijednost upravljačke varijable koja nedostaje u pojedinom scenariju postavlja na vrijednost 0.

4.2.2. Formulacija optimiranja proširenog modela

U formulaciji optimiranja proširenog modela također se koriste dvije iste funkcije cilja koje su bile navedene u prethodnom odjeljku, uz donekle drukčiju formu.

Prvi kriterij kvalitete promjene stupnja prijenosa, t_{ip}, je za slučaj otvorenog pretvarača momenta već izveden za potrebe dobivanja izraza momenta izlaznog vratila :

$$\min t_{ip} = \frac{\omega_{os}(\gamma_2 - \gamma_1)\left(I_{in} + I_{imp}\frac{R_\tau}{R_{\dot{\omega}}}\right)}{(\tau_e - \Delta\tau_{ec})R_\tau - i_1\tau_{OFG} - i_2\tau_{ONC}} \ \text{vidi jed (46).}$$

Drugi kriterij kvalitete promjene stupnja, E_{loss}, ima identičnu formu jednadžbe (50), no jedino se razlikuje u članu t_{ip} koji se na drukčiji način izračunava u proširenom modelu, odnosno pomoću jednadžbe (46).

Problem optimiranja podložan je istim ograničenjima na upravljačke varijable i recirkulaciju snage kao i u prethodnom odjeljku. Razlika je jedino u ograničenju izlaznog momenta, koji je

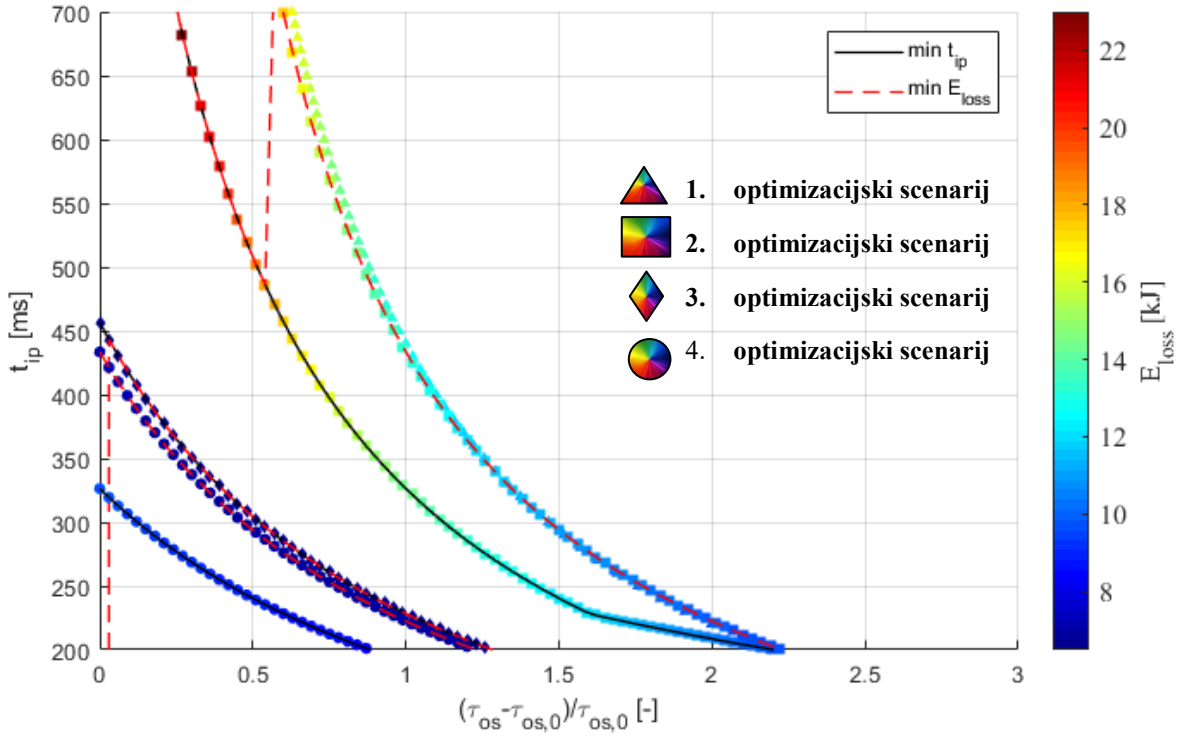
za slučaj zatvorenog pretvarača momenta dan jednadžbom (41), dok je za slučaj otvorenog pretvarača momenta dan jednadžbom (48).

4.3. Rezultati optimiranja parametara za uzlaznu promjenu 1-3

U ovom potpoglavlju prezentirat će se rezultati statičkog optimiranja parametara za uzlaznu promjenu 1-3. Analiza će biti provedena na četiri optimizacijska scenarija kao u trećem poglavlju.

4.3.1. Rezultati optimiranja na pojednostavljenom modelu

Rezultati statičkog optimiranja prikazani su na Slika 26, gdje je na x-osi dan iznos inercijskog udara, odnosno razlika izlaznog momenta tijekom inercijske faze (τ_{os}) i izlaznog momenta u višem stupnju prijenosa ($\tau_{os,0}$). Razlog uvođenja inercijskog udara kao mjere neudobnosti promjene stupnja prijenosa je taj što kod statičkog optimiranja nije moguće izračunati standardnu devijaciju trzaja vozila kao u slučaju više-kriterijskog optimiranja.



Slika 26. Pareto fronte statičkog optimiranja za četiri optimizacijska scenarija u slučaju zatvorenog pretvarača momenta

Potrebno je napomenuti da pomoću ovakvog prikaza nije moguće direktno uspoređivati rezultate više-kriterijskog i statičkog optimiranja već ih je moguće samo kvalitativno opisivati. Također, z-os (boja markera) u statičkoj optimizaciji pokazuje disipaciju energije u spojkama tijekom inercijske faze, dok rezultati više-kriterijskog optimiranja dani u trećem poglavlju prikazuju disipaciju energije u spojkama kroz cijelu promjenu stupnja prijenosa. Prikazani rezultati dobiveni su odvojenim minimiziranjem trajanja inercijske faze danim izrazom (49) (crne linije) i disipacije energije danom izrazom (50) (crvene linije).

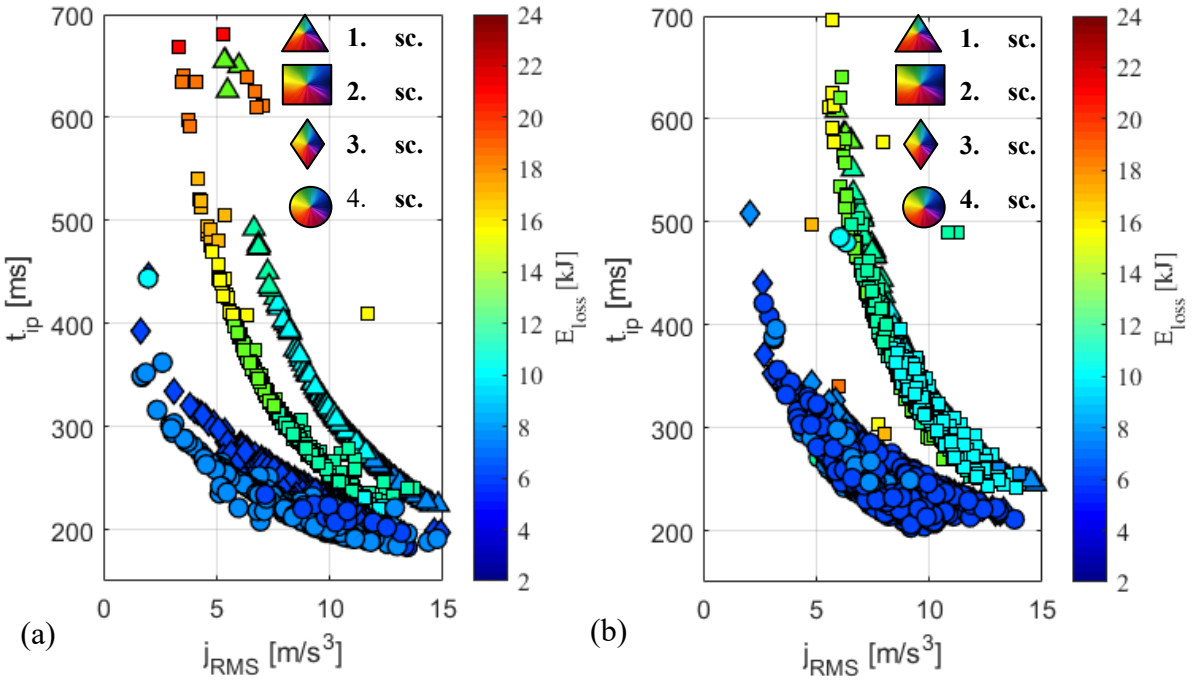
U prvom scenariju rezultat optimiranja je jednoznačno definiran jer postavljanjem bilo trajanja inercijske faze, bilo momenta izlaznog vratila ili momenta uključne spojke, ostale dvije varijable i disipacija energije se mogu algebarski izračunati [21]. Slično, u trećem scenariju minimiziranjem bilo trajanja inercijske faze ili disipacije energije dobiva se isti rezultat. Dodatno, u razmatranom slučaju u kojem je moment redukcije motora maksimalan, disipacija energija poprima minimalan, konstantni iznos [21]. U drugom i četvrtom scenariju, fronta dobivena minimiziranjem disipacije energije odstupa od fronte dobivene minimiziranjem trajanja inercijske faze, odnosno postoji prostor između ova dva ekstremna slučaja u koji padaju rješenja statičkog optimiranja istovremenog minimiziranja obje funkcije cilja [21]. Vidljivo je da u je slučaju minimalnog trajanja inercijske faze (crne linije), disipirana energija veća, odnosno momenti spojki su veći.

Ako se rezultati dobiveni statičkim optimiranjem usporede sa rezultatima više-kriterijskog optimiranja za zatvoren pretvarač momenta koji su dani u trećem poglavlju na Slika 26, može se primijetiti da se fronte za sve scenarije i oba načina optimiranja kvalitativno vrlo dobro poklapaju, no potrebno je napomenuti da u pojednostavljenom modelu nije implementirano inercijsko sprezanje ulaznog i izlaznog vratila mjenjača.

Kako bi se rezultati oba načina optimiranja mogli direktno usporediti, rezultati statičke optimizacije su bili primijenjeni u simulacijskom modelu. Kriteriji kvalitete promjene stupnja prijenosa tako mogu biti izračunati iz simulacijskih rezultata i uspoređeni s pripadajućim rezultatima više-kriterijskog optimiranja. Upravljačke varijable dobivene statičkim optimiranjem su primijenjene tokom inercijske faze u simulaciji, dok je momentna faza

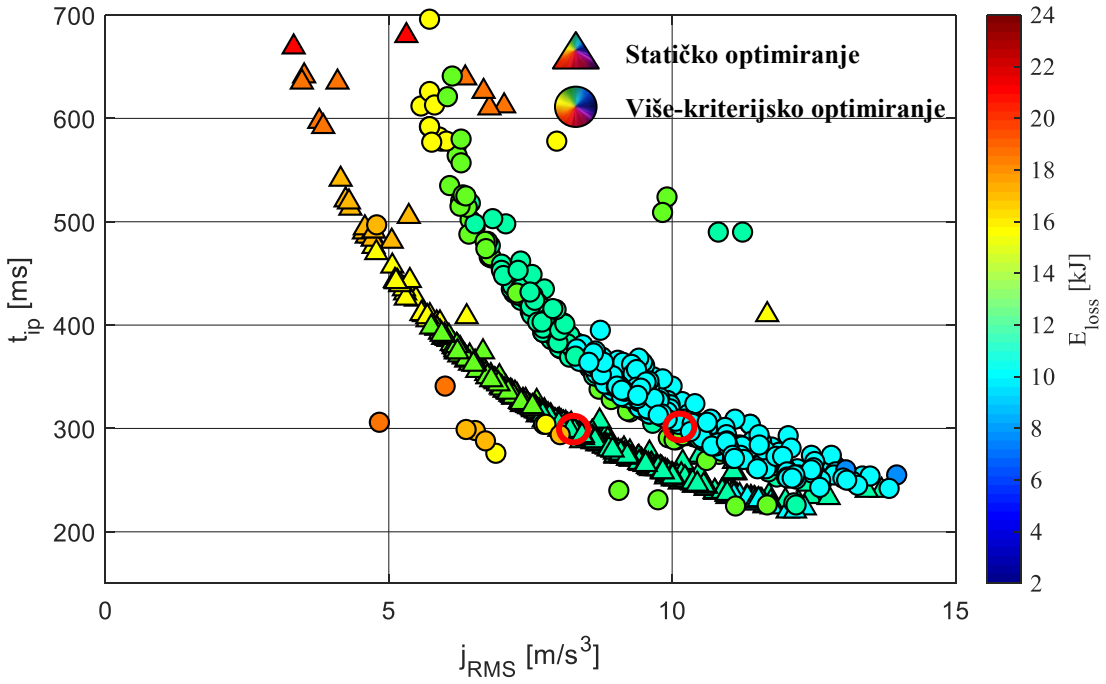
preuzeta iz više-kriterijskog optimiranja. Također, iznos rasta momenta uključne spojke morao je biti limitiran na onaj kojim je rastao moment u momentnoj fazi jer bi u protivnom nagli skok momenta uključne spojke na višu konstantnu vrijednost rezultirao vrlo visokim vrijednostima trzaja vozila [20]. Zbog jednostavnosti analize je kao ulaz u simulaciju korišten rezultat statičkog optimiranja dobiven minimizacijom trajanja inercijske faze.

Nakon izvršavanja simulacija, dobivena je Pareto fronta rezultata statičkog optimiranja u kojoj je na x-osi RMS vrijednost trzaja vozila, a koja je prikazana na Slika 27 (a). U usporedbi sa rezultatima više-kriterijskog optimiranja, danima na Slika 27 (b) može se primijetiti kako su fronte su slučaju statičke optimizacije pomaknute prema lijevo, odnosno prema manjoj vrijednosti trzaja, te prema dolje što upućuje na manju vrijednost trajanja inercijske faze. Budući da dolazi do manjeg trzaja, znatno je viša disipirana energija u spojkama, što se također može zaključiti sa slika, usporedbom z-osi (boja markera).



Slika 27. Pareto fronte svih scenarija: (a) statičkog optimiranja na pojednostavljenom modelu i (b) više-kriterijskog optimiranja

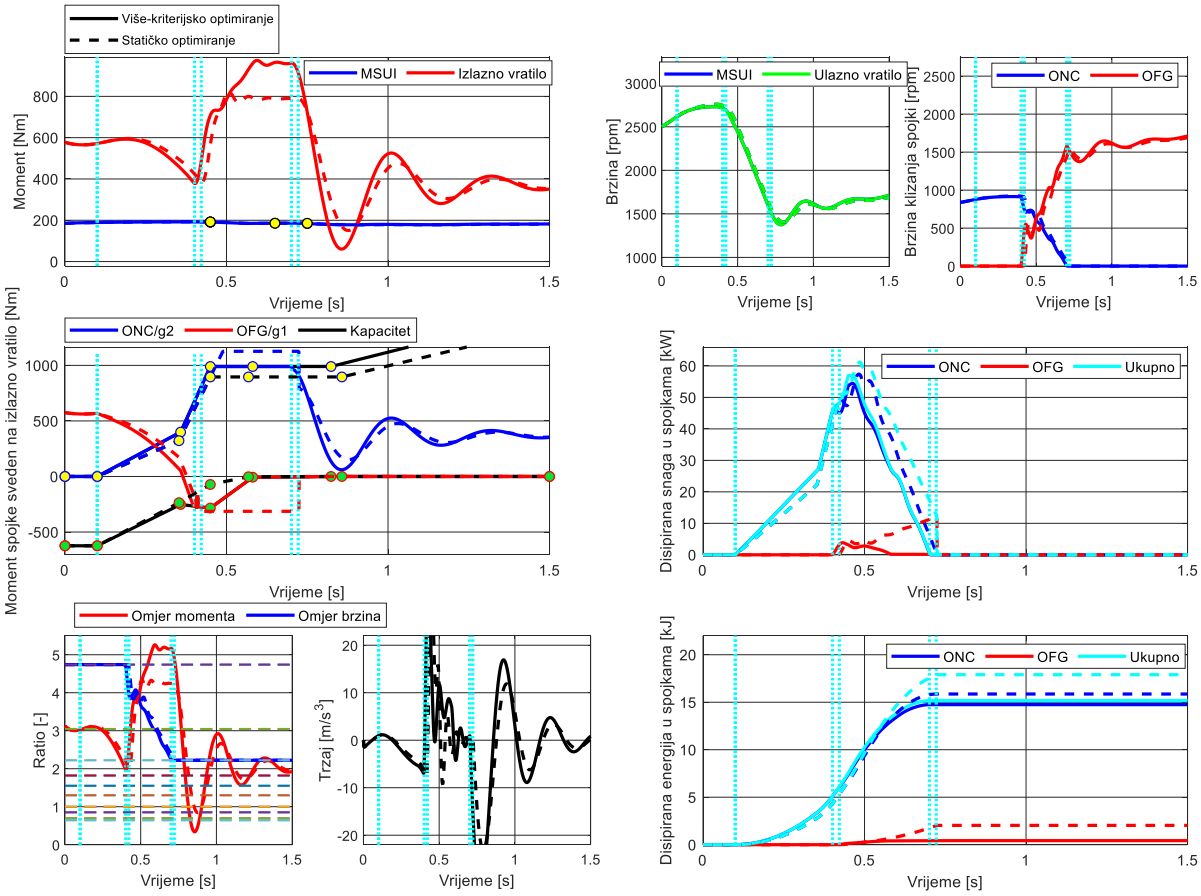
Na Slika 28, prikazane su Pareto fronte za drugi scenarij i oba načina optimiranja nam daju jasniji uvid navedene zaključke te ujedno pokazuju odabrana rješenja za usporedbu simulacijskih odziva (označeno crvenim kružnicama). Oba rješenja imaju isto vrijeme trajanja inercijske faze da bi se stekao bolji uvid u aspekte performansi koje pruža pojedini način optimiranja.



Slika 28. Pareto fronta drugog scenarija za slučaj statičkog i više-kriterijskog optimiranja

Iz simulacijskog rezultata danog na Slika 29 može se zaključiti da statička optimizacija koristi isključnu spojku što je više moguće kako bi se smanjio inercijski udar, odnosno trzaj, te skratila inercijska faza. To to rezultira i jačim korištenjem uključne spojke zbog negativne recirkulacije snage što dovodi do znatno veće disipacije energije. Naposljetku, zamjećuje se kako su zbog naglog spuštanja momenta isključne spojke na kraju inercijske faze, znatno pobuđene torzijske vibracije na izlaznom vratilu pretvarača. Pobuđivanje torzijskih vibracija je jače kod više-kriterijskog optimiranja zbog visoke razine izlaznog momenta na kraju inercijske faze, te pad tog momenta uzrokuje značajan trzaj vozila. Kada se razmotre numeričke vrijednosti kvalitete promjene stupnja prijenosa dane u Tablica 5 mogu se zaključiti ranije navedeni zaključci. Bitno je napomenuti da je trajanje inercijske faze pri statičkoj optimizaciji iznosila različito vrijeme

trajanja od vremena dobivenog simulacijom, te će to vrijeme dalje u radu biti naznačeno zvjezdicom (*) zbog dinamičkih efekata u simulacijskom modelu koje nisu mogle biti opisane statičkim modelom. Budući da je disipirana energija u spojkama poprilično velika, potrebno je poboljšati model za statičku optimizaciju.



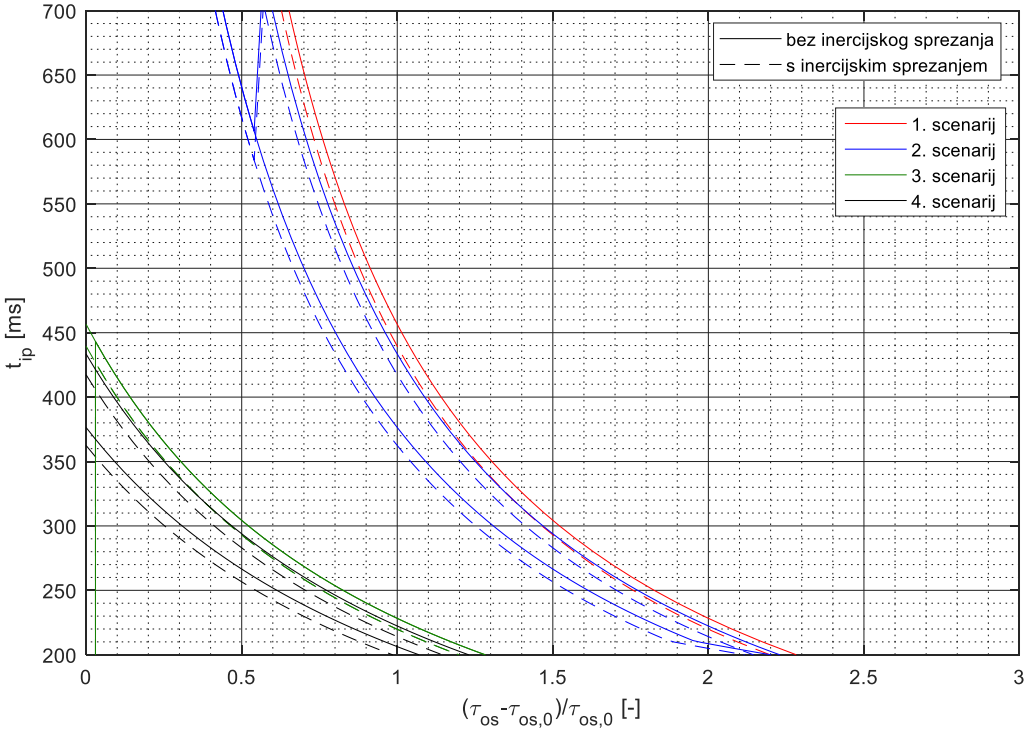
Slika 29. Simulacijski odziv rješenja drugog scenarija za slučaj statičkog i više-kriterijskog optimiranja

Tablica 5. Numerički prikaz vrijednosti rješenja funkcija cilja za drugi scenarij za slučaj statičkog i više-kriterijskog optimiranja

Rješenje	$t_{inertia}$ **[ms]**	E_{loss} **[kJ]**	j_{RMS} **[m/s^3]**
Više-kr. opt.	300	15.1753	10.1971
Stat. opt.	300 (+0%), 340*	17.8967 (+17.93%)	8.0801 (-20.76%)

4.3.2. Rezultati optimiranja na proširenom modelu

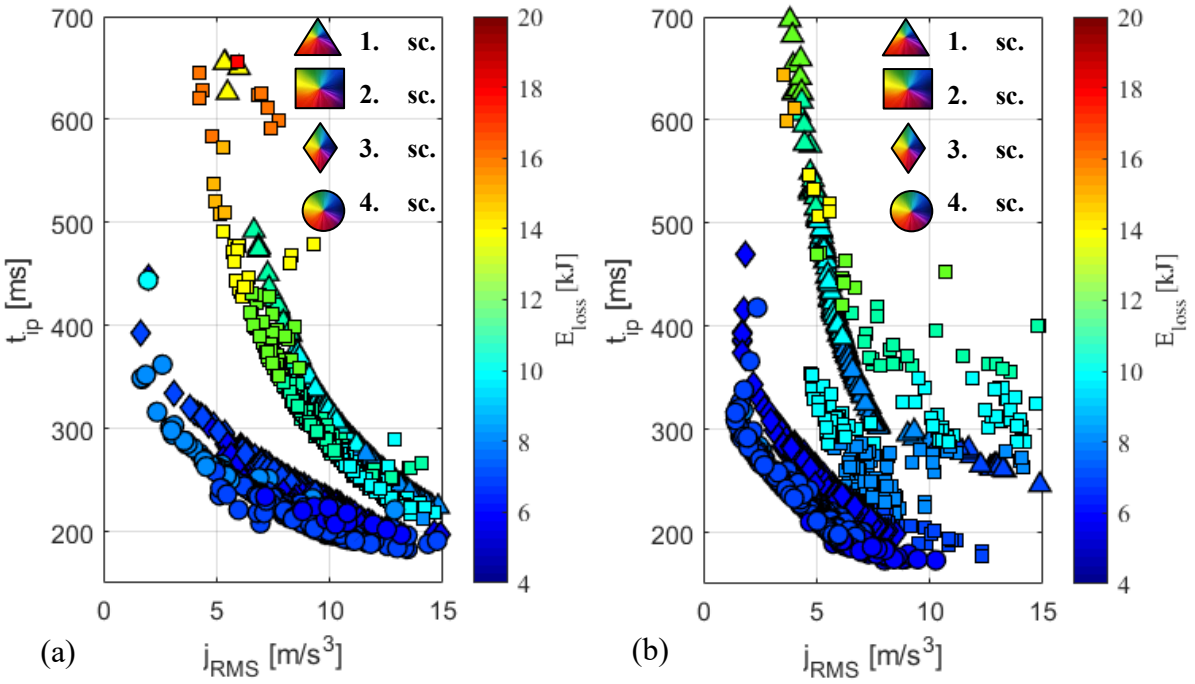
Budući da je uvođenje inercijskog sprezanja prva nadopuna proširenog modela, bitno je pokazati koliku razliku ona unosi u odnosu na pojednostavljeni model za uzlaznu promjenu stupnja prijenosa 1-3. Usporedba rezultata statičkog optimiranja sa i bez inercijskog sprezanja dana je na Slika 30. Sa slike se može vidjeti da inercijsko sprezanje pomiče fronte dobivene statičkim optimiranjem prema lijevo (prema manjem iznosu trzaja), ali sveukupno rezultati su vrlo slični, jer je utjecaj inercijskog sprezanja za slučaj uzlazne promjene 1-3 slab [17].



Slika 30. Rezultati statičkog optimiranja za sve scenarije sa i bez inercijskog sprezanja

Na isti način kao i u prethodnom odjeljku, za korektnu usporedbu rezultata statičkog optimiranja i više-kriterijskog optimiranja provedene su simulacije. Jedina razlika je u tome što je u ovom slučaju model za statičku optimizaciju bio proširen inercijskim sprezanjem, te otvorenim pretvaračem momenta. Rezultati će biti dani za slučaj inercijskog sprezanja sa zatvorenim i sa otvorenim pretvaračem momenta.

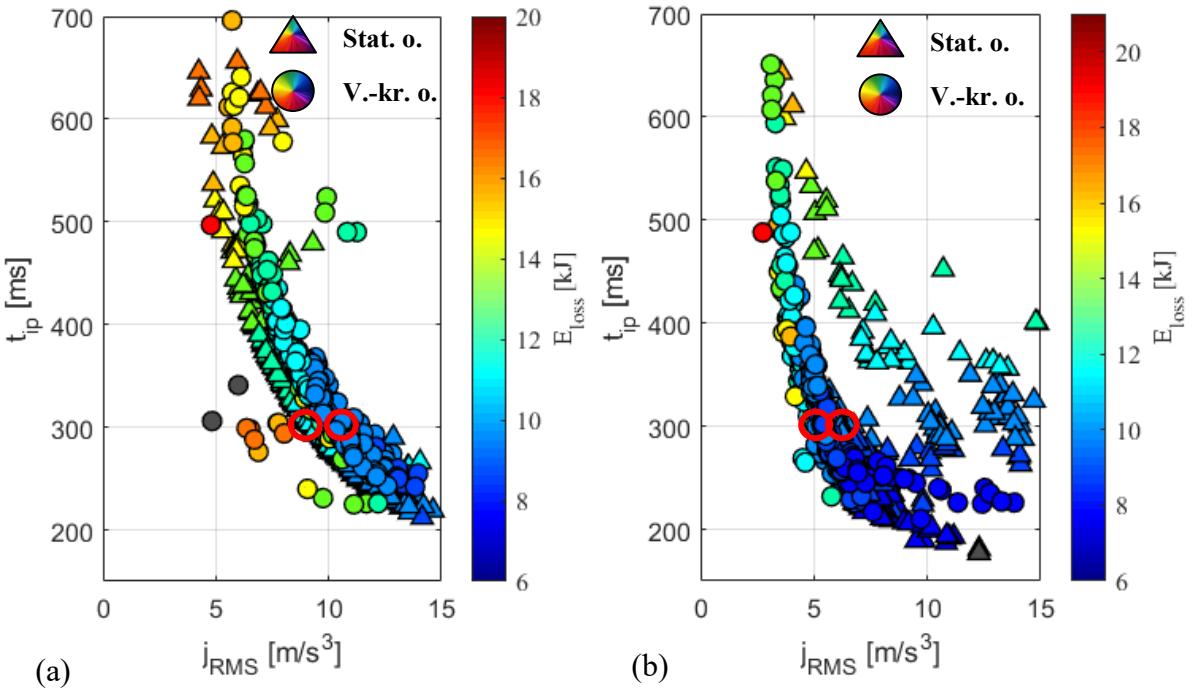
Nakon izvršavanja simulacija, dobivena je Pareto fronta za zatvoren i otvoren pretvarač momenta koja je dana na Slika 31.



Slika 31. Pareto fronte svih scenarija statičkog optimiranja dobiveni simulacijom: (a) sa zatvorenim pretvaračem momenta i (b) s otvorenim pretvaračem momenta

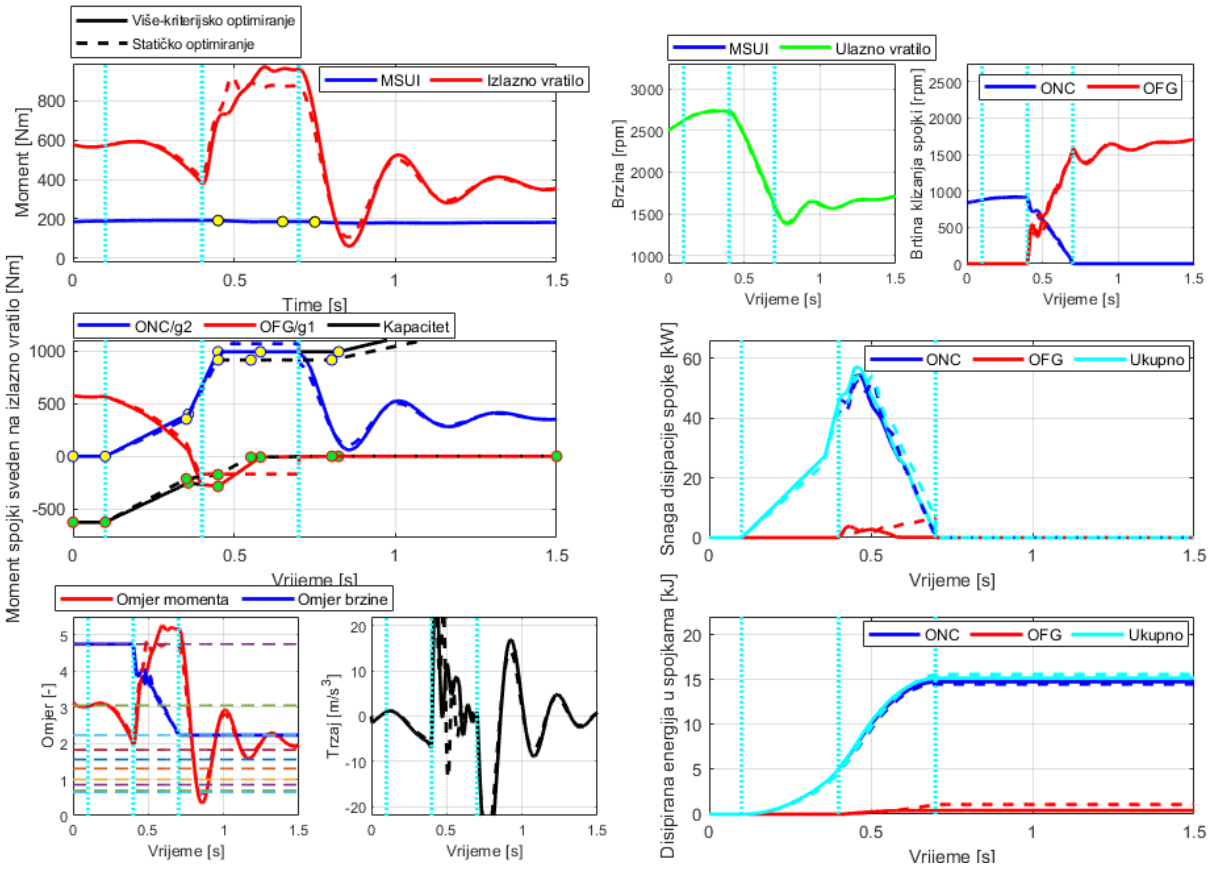
Sa rezultata se može vidjeti kako korištenje otvorenog pretvarača momenta pruže generalno bolje rezultate. Za slučaj otvorenog pretvarača momenta (Slika 31 (b)) može se primijetiti kako su ostvarene niže vrijednosti trzaja u većini scenarija nego kod zatvorenog pretvarača momenta (Slika 31 (a)), dok se u drugom scenariju dogodilo veliko rasipanje za slučaj otvorenog pretvarača momenta. No kad bi se filtrirala pod-optimalna rješenja, dobio bi se skup rješenja koji imaju znatno bolje ponašanje od slučaja s zatvorenim pretvaračem momenta. Disipirana energija u spojkama je također dosta manja za slučaj otvorenog pretvarača momenta. Jedini nedostatak otvorenog pretvarača momenta je za prvi scenarij, u kojemu se dobivaju nešto veća vremena inercijske faze nego za slučaj zatvorenog pretvarača momenta, no prednost je i dalje ta što je disipacija energije u spojkama znatno manja nego za slučaj zatvorenog pretvarača momenta.

Slika 32 (a) prikazuje usporedbu rezultata dobivenih simulacijom profila statičkog optimiranja te više-kriterijskog optimiranja, za drugi scenarij u slučaju zatvorenog pretvarača momenta , dok su na Slika 32 (b) prikazani rezultati istog scenarija u slučaju otvorenog pretvarača momenta.



Slika 32. Pareto fronta drugog scenarija za slučaj statičkog i više-kriterijskog optimiranja: (a) zatvoreni pretvarač momenta i (b) otvoreni pretvarač momenta

U drugom scenariju za zatvoreni pretvarač momenta rezultati dobiveni statičkim optimiranjem koji su dani na Slika 32 (a) su usporedivi s rezultatima višekriterijskog optimiranja po sva tri kriterija. Za isto vrijeme trajanja inercijske faze, statičko optimiranje daje nešto nižu vrijednost trzaja, ali višu vrijednost disipacije energije. Za slučaj otvorenog pretvarača momenta danom na Slika 32 (b), kvaliteta promjene stupnja je nešto lošija zbog većeg iznosa trzaja i disipirane energije. Na simulacijskim rezultatima označenim crvenim kružnicama bit će detaljnije analizirana kvaliteta promjene stupnja prijenosa.



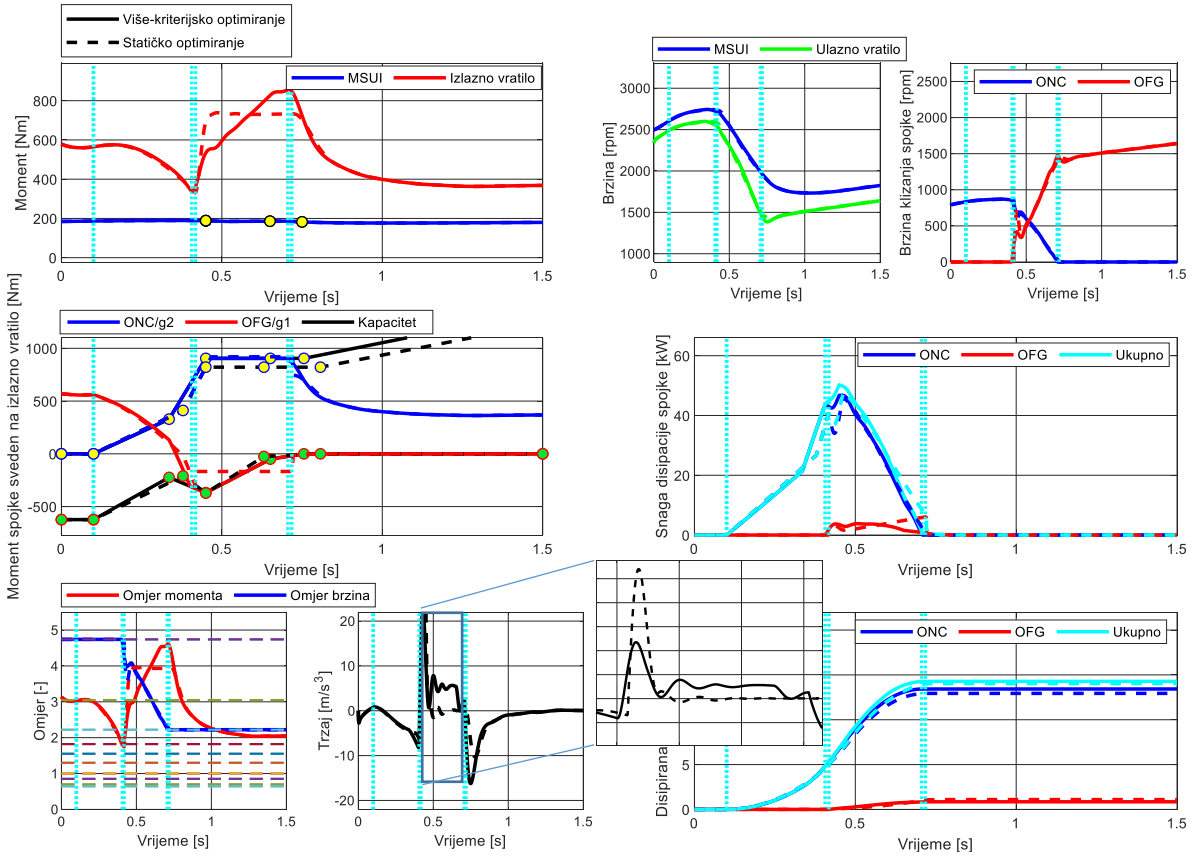
Slika 33. Simulacijski odziv rješenja drugog scenarija za slučaj statičkog i više-kriterijskog optimiranja za zatvoreni pretvarač momenta

U simulacijskom odzivu za zatvoreni pretvarač danom na Slika 33 može se zamijetiti kako je moment isključne spojke pri statičkom optimiranju konstantan i iznosi otprilike polovicu maksimalne vrijednosti koju daje više-kriterijsko optimiranje. Iz rezultata više-kriterijskog optimiranja može se primijetiti kako moment isključne spojke u određenom trenutku linearno pada na vrijednost nula. Numeričke vrijednosti kvalitete promjene stupnja prijenosa dani na Tablica 6 pokazuju da za slučaj zatvorenog pretvarača momenta statičko optimiranje daje povećanu disipaciju energije, ali RMS vrijednost trzaja je niža jer su torzijske vibracije nakon inercijske faze manje pobuđene zbog smanjenog momenta izlaznog vratila uzrokovanog jačim djelovanjem izlazne spojke.

Tablica 6. Numerički prikaz vrijednosti rješenja drugog scenarija za slučaj statičkog i više-kriterijskog optimiranja za zatvoreni pretvarač momenta

Rješenje	$t_{inertia}$ **[ms]**	E_{loss} **[kJ]**	j_{RMS} **[m/s^3]**
Više-kr. opt.	300	15.1753	10.1971
Stat. opt.	300 (+0%), 335*	15.5761 (+2.64%)	9.3321 (-8.48%)

U simulacijskom odzivu za otvoreni pretvarač momenta danom Slika 34 može se zamijetiti kako rješenje rezultira velikim iznosima trzaja zbog konstantnog momenta isključne spojke kroz inercijsku fazu za razliku od rješenja više-kriterijskog optimiranja gdje se iznos momenta isključne spojke linearno smanjuje na nulu te tako oblikuje inercijski udar na njegovom početku.



Slika 34. Simulacijski odziv rješenja drugog scenarija za slučaj statičkog i više-kriterijskog optimiranja za otvoreni pretvarač momenta

Također, sa stanovišta implementacije, linearno povećavanje ili smanjivanje momenta spojki je znatno praktičnije nego korištenje naglih skokova. Polako smanjivanje momenta isključne spojke prema kraju inercijske faze ne uzrokuje torzijske vibracije izlaznog vratila nakon inercijske faze zbog efekta filtriranja koje je karakteristično pretvaraču momenta, odnosno polako smanjivanje momenta nema utjecaja na RMS iznos trzaja nakon inercijske faze.

Numerički rezultati dani na Tablica 7 pokazuju da za slučaj otvorenog pretvarača momenta statičko optimiranje ima znatno veći iznos trzaja, što potvrđuje ranije navedeni zaključak s odziva te rezultira neznatno nižom disipacijom energije u spojkama.

Tablica 7. Numerički prikaz vrijednosti rješenja drugog scenarija za slučaj statičkog i više-kriterijskog optimiranja za otvoreni pretvarač momenta

Rješenje	$t_{inertia}$ **[ms]**	E_{loss} **[kJ]**	j_{RMS} **[m/s³]**
Više-kr. opt.	300	14.2796	5.1074
Stat. opt.	300 (+0%), 353*	14.0331 (-1.72%)	6.7607 (+32.37%)

5. STATIČKO OPTIMIRANJE PARAMETARA LINEARNIH UPRAVLJAČKIH PROFILA PROMJENE S JEDNOSTRUKIM PRIJELAZOM NA MODELU REDUCIRNOG REDA

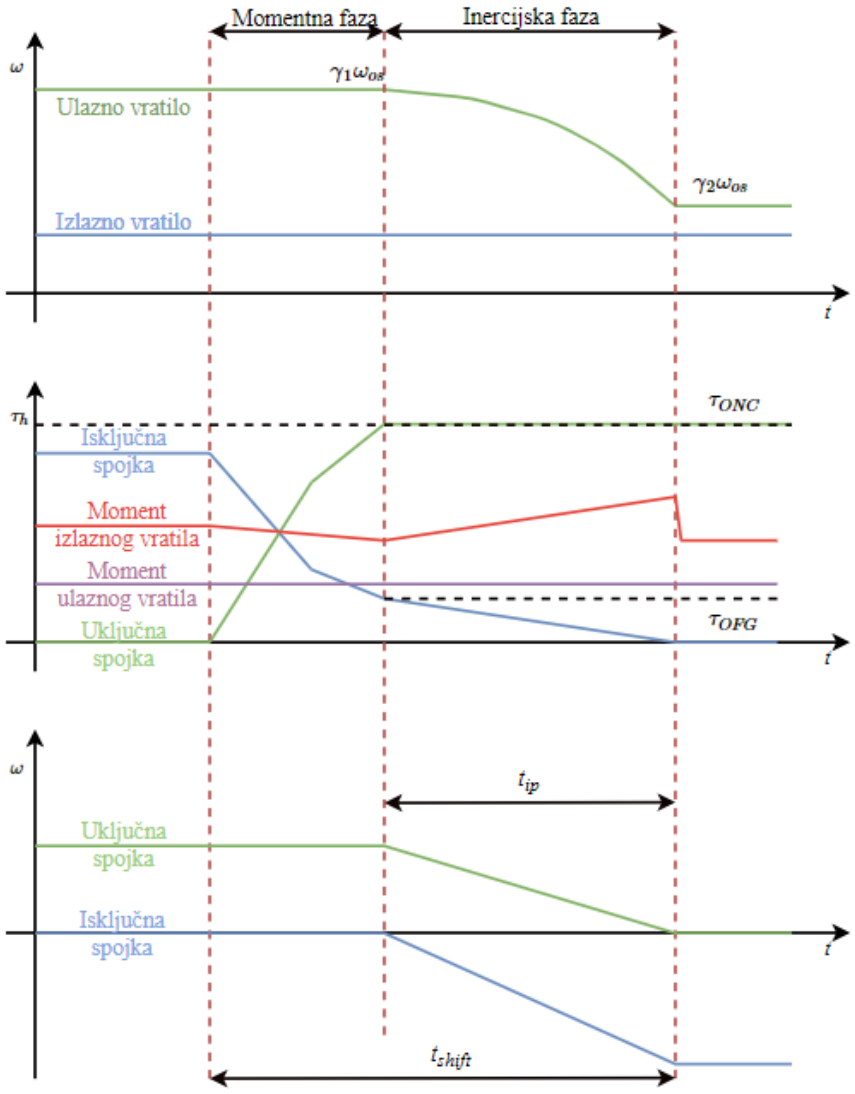
U ovom poglavlju predstavljeno je daljnje proširenje modela korištenog za statičko optimiranje, a samim time i formulacije optimizacijskog problema. Proširenje pojednostavljenog modela sastoji se od implementacije po dijelovima linearnih upravljačkih profila, jer rezultati prikazani u prethodnom poglavlju ukazuju na to da linearni upravljački profil isključne spojke dovodi do smanjenja inercijskog udara na početku inercijske faze. Također, još jedna prednost linearnih upravljačkih profila je njihova praktičnost sa stajališta implementacije na realnom vozilu, jer moment isključne spojke ionako mora pasti na nulu na kraju inercijske faze kako ne bi došlo do uzlanja transmisije (*engl. tie-up*) [8]. U ovom radu će se linearni profili nadograđivati na pojednostavljeni model iz prošlog poglavlja, a ne na prošireni, radi jednostavnije prvotne analize. Nakon što se provede formulacija problema optimiranja za izvedeni model, bit će analizirani rezultati optimiranja u usporedbi sa višekriterijskim optimiranjem genetskim algoritmima za različite scenarije za uzlaznu promjenu 1-3.

5.1. Pojednostavljeni model pogona s linearnim upravljačkim profilima

Budući da je implementacija linearnog upravljačkog profila isključne spojke u statičku optimizaciju poprilično kompleksna, implementacija je podijeljena u dva slučaja.

5.1.1. Model za prvi način (slučaj) implementacije

Slika 35 prikazuje prvi slučaj implementacije linearnog upravljačkog profila isključne spojke koji se sastoji od linearnog smanjenja momenta od početka do kraja inercijske faze. Promjena upravljačkog profila isključne spojke uzrokuje promjenu u brzini klizanja koja je sada parabola, za razliku od linearne brzine klizanja u slučaju pojednostavljenog modela s konstantnim profilima, te promjenu u izlaznom momentu koji više nije konstantan već je također linearan.



Slika 35. Ilustrativni prikaz promjene stupnja prijenosa pojednostavljenog modela s linearnim profilom isključne spojke – prvi slučaj

Pojednostavljeni model ponovno se izvodi uz nekoliko pretpostavki, koje su vrlo slične onima iz 4. poglavlja. Prva pretpostavka je jednaka kao i za slučaj pojednostavljenog modela s konstantnim upravljačkim profilima, a odnosi se na konstantnu brzinu izlaznog vratila:

$$\omega_{os} \approx const. \;\rightarrow\; \dot{\omega}_{os} = 0 \;. \tag{54}$$

Druga pretpostavka je da su svi momenti konstantni osim momenta isključne spojke:

$$\tau_{ONC} = const., \qquad \tau_{os} = const., \qquad \tau_{is} = const. \quad , \tag{55}$$

dok se sa slike može zaključiti da je moment isključne spojke sljedećeg oblika:

$$\tau_{OFG}(t) = \tau_{OFG} - \frac{\tau_{OFG}}{t_{ip}} t \ . \tag{56}$$

Brzina ulaznog vratila smanjuje se po paraboli koja se dobiva integriranjem dinamičke jednadžbe ulaznog vratila (58). Rubni uvjeti koji su potrebni za izračunavanje trajanja inercijske faze t_{ip} glase:

$$\bar{\dot{\omega}}_{is}(t) = \frac{\omega_{is,f} - \omega_{is,0}}{t_{ip}} \ , \tag{57}$$

gdje su za ovaj slučaj $\omega_{is,f} = \omega_{os}\gamma_2$, $\omega_{is,0} = \omega_{os}\gamma_1$.

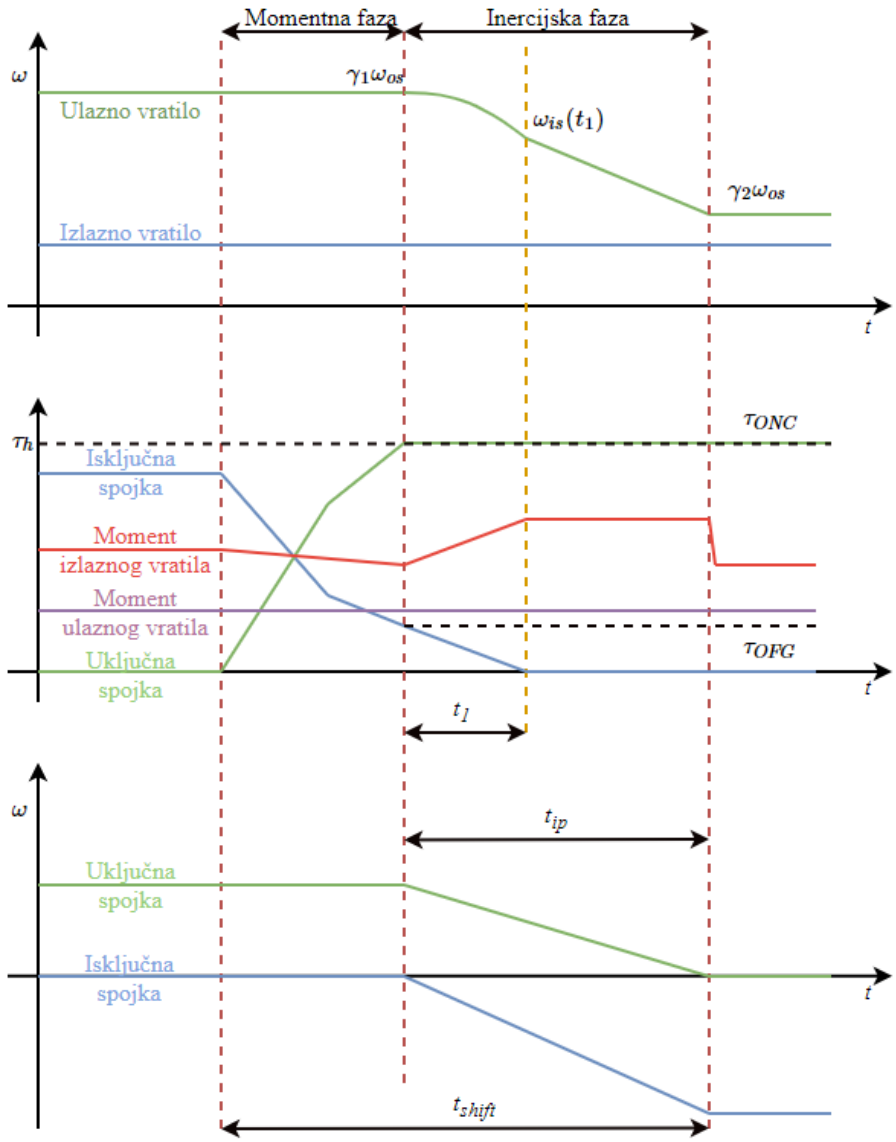
Za prikaz modela koristi se već prethodno izvedeni model dan jednadžbama (28) i (29) s uvrštenim izrazom za moment isključne spojke (56) i zamijenjenim koeficijentom a_{11} koeficijentom I_{in}:

$$I_{in}\dot{\omega}_{is}(t) = \tau_{is} - i_1\left(\tau_{OFG} - \frac{\tau_{OFG}}{t_{ip}} t\right) - i_2\tau_{ONC} \ , \tag{58}$$

$$\tau_{os} = \frac{1}{\mathrm{g}_1}\left(\tau_{OFG} \ - \frac{\tau_{OFG}}{t_{ip}} t\right) + \frac{1}{g_2}\tau_{ONC} \ . \tag{59}$$

5.1.2. Model za drugi način (slučaj) implementacije

Slika 36 prikazuje upravljačke profile drugog slučaja implementacije linearnog upravljačkog profila isključne spojke. Moment isključne spojke prvotno se linearno smanjuje od početka inercijske faze do određenog trenutka u inercijskog fazi (t_1), a nakon trenutka t_1 jednak je nuli do kraja inercijske faze.



Slika 36. Ilustrativni prikaz promjene stupnja prijenosa pojednostavljenog modela s linearnim profilom isključne spojke – drugi slučaj

Budući da inercijska faza više nije uniformna, potrebno korištenje dva različita modela. Model za prvi dio inercijske faze je istovjetan prethodno definiranom modelu jednadžbama (58) i (59) uz različit rubni uvjet jednadžbe ulaznog vratila (58) (krajnja brzina izlaznog vratila više nije jednaka $\omega_{os}\gamma_2$, već $\omega_{is}(t_1)$):

$$\bar{\omega}_{is}(t) = \frac{\omega_{is}(t_1) - \omega_{is,0}}{t_{ip}} \quad . \tag{60}$$

Model za drugi dio inercijske faze istovjetan pojednostavljenom modelu s konstantnim profilima za prvi i treći scenarij, odnosno za slučaj kad se ne koristi modulacija momenta isključne spojke.

Model za drugi dio inercijske faze dobiva se uvrštavanjem rubnog uvjeta jednadžbe ulaznog vratila (57) za vrijednosti $\omega_{is,f} = \omega_{os}\gamma_2$, $\omega_{is,0} = \omega_{is}(t_1)$:

$$I_{in}\frac{\omega_{os}\gamma_2 - \omega_{is}(t_1)}{t_{ip} - t_1} = \tau_{is} - i_2\tau_{ONC} \ , \tag{61}$$

$$\tau_{os} = \frac{1}{g_2}\tau_{ONC} \ . \tag{62}$$

5.2. Formulacija problema optimiranja na pojednostavljenom modelu pogona s linearnim upravljačkim profilima

Kao i u slučaju statičkog optimiranja pojednostavljenog modela s konstantnim upravljačkim varijablama, zadatak je minimizirati konfliktne kriterije kvalitete promjene stupnja prijenosa, disipaciju energije u spojkama (E_{loss} i t_{ip}), optimiranjem upravljačkih varijabli (τ_{OFG}, $\Delta\tau_{ec}$ i τ_{ONC}) za prvi slučaj linearnih profila, dok se za drugi slučaj još optimira vremenski trenutak t_1. Problem optimiranja bit će također riješen pomoću funkcije *fmincon* unutar MATLAB programskog okruženja.

5.2.1. Formulacija problema za prvi način (slučaj) implementacije

Prvi kriterij kvalitete promjene stupnja prijenosa koji se minimizira odnosi se na trajanje inercijske faze (t_{ip}) i on se dobiva integriranjem jednadžbe (58) od početka do kraja inercijske faze, uvrštavanjem rubnih uvjeta (57) te izlučivanjem vrijednosti t_{ip}:

$$\min t_{ip} = \frac{I_{in}\omega_{os}(\gamma_2 - \gamma_1)}{\tau_{is} - i_1\frac{\tau_{OFG}}{2} - i_2\tau_{ONC}} \ . \tag{63}$$

Iz izraza se može zamijetiti kako je gotovo identičan izrazu (49) imajući još samo faktor dijeljenja 2 uz moment isključne spojke. Takva formulacija ima smisla jer za razliku od

pojednostavljenog modela s konstantnim upravljačkim profilima, linearni upravljački moment isključne spojke od početka do kraja inercijske faze ima dvostruko manju srednju vrijednost momenta isključne spojke.

Drugi kriterij kvalitete promjene stupnja koji se minimizira odnosi se na gubitak energije kroz disipaciju u spojkama tokom inercijske faze. Budući da brzine klizanja spojki više nisu linearne, već ovise o brzini ulaznog vratila, ne može se koristiti pretpostavka srednje vrijednosti brzine klizanja spojke kroz inercijsku fazu. Zbog toga se mora računati integral umnoška trenutnog momenta i brzine klizanja pojedine spojke kroz cijelo vrijeme trajanja inercijske faze:

$$E_{loss} = \int_0^{t_{ip}} \tau_{OFG}(t)\, \omega_{OFG}(t)\, dt + \int_0^{t_{ip}} \tau_{ONC}(t)\, \omega_{ONC}(t)\, dt \ , \tag{64}$$

gdje su:

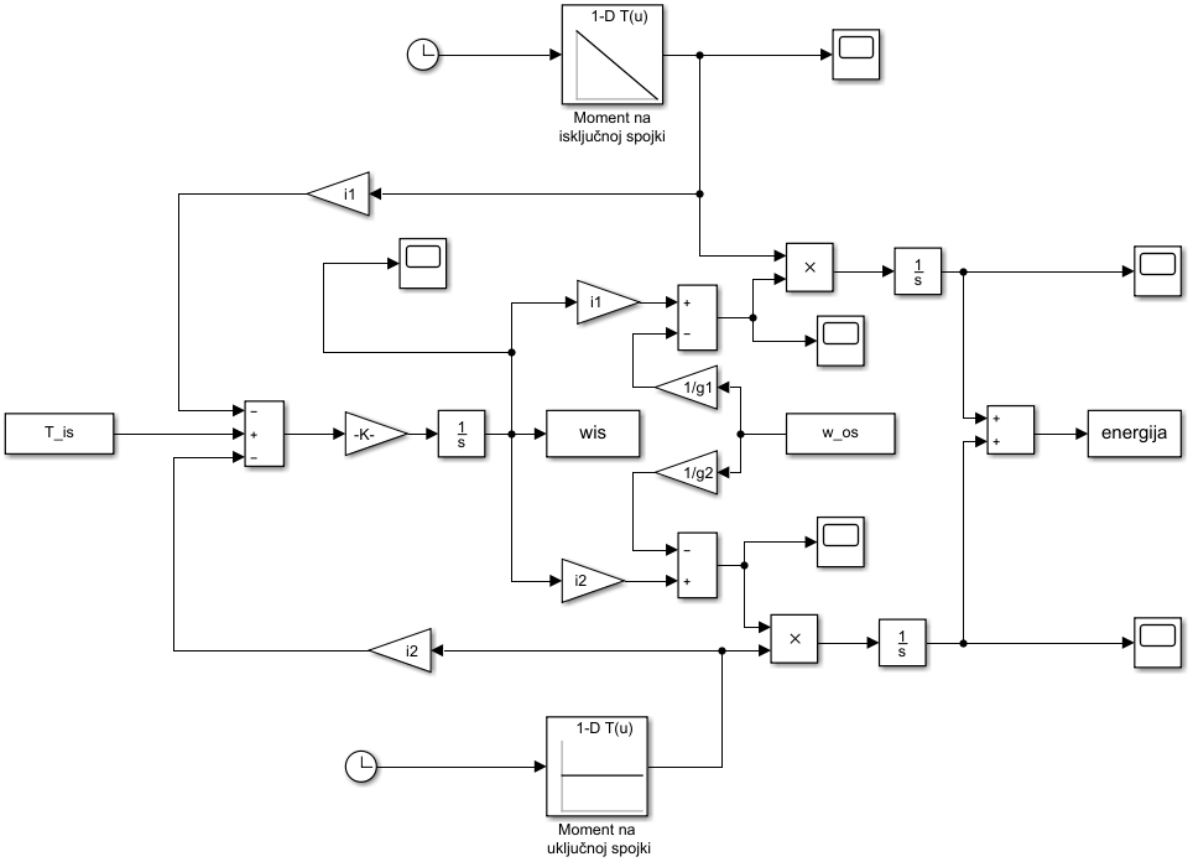
$$\omega_{ONC}(t) = i_2 \omega_{is}(t) - \frac{1}{g_2}\omega_{os}, \quad \omega_{OFG}(t) = i_1 \omega_{is}(t) - \frac{1}{g_1}\omega_{os} \ . \tag{65}$$

Nakon uvrštavanja momenata spojki definiranih izrazima (55) i (56) u jednadžbu (64), te uvrštavanja rezultata nedefinitnog integriranja jednadžbe (58) koji definira brzinu ulaznog vratila u jednadžbu (65) koja definira brzine klizanja spojki u jednadžbu (65) dobiva se konačni izraz disipacije snage u spojkama. Integriranjem izraza (64) dobiva se disipacija energije u spojkama koji se minimizira kao druga funkcija cilja:

$$\min E_{loss} = \frac{\tau_{ONC} t_{ip}\left(3\tau_{is} i_2 t_{ip} - 3\tau_{ONC} {i_2}^2 t_{ip} + 6\gamma_1 I_{in} i_2 \omega_{os} - 2\tau_{OFG} i_1 i_2 t_{ip}\right)}{6 I_{in}} - \frac{\tau_{ONC} t_{ip} \omega_{os}}{g_2}$$
$$- \frac{\tau_{OFG} t_{ip} \omega_{os}}{2 g_1} + \frac{\tau_{OFG} t_{ip}\left(4\tau_{is} i_1 t_{ip} - 3\tau_{OFG} {i_1}^2 t_{ip} + 12\gamma_1 I_{in} i_1 \omega_{os} - 4\tau_{ONC} i_1 i_2 t_{ip}\right)}{24 I_{in}} \ . \tag{66}$$

Zbog kompleksnosti koju izraz za disipaciju energije u spojkama može poprimiti te radi bržeg izvođenja izraza, on je dobiven pomoću simboličkog rješavanja jednadžbi korištenjem MATLAB-ovog *Symbolic Math Toolbox-a.*

Kako bi se verificirala ispravnost dobivenog izraza, izrađen je simulacijski model prikazan na Slika 37 koji reflektira strukturu modela pogona danog izrazima (58) i (59) i računa gubitak energije u svakom trenutku. Ako se rezultat u zadnjem vremenskom trenutku simulacijskog modela poklapa s analitički izračunatom vrijednosti, može se zaključiti da je analitički izraz za disipiranu energiju u spojkama ispravno formuliran. Isti simulacijski model je korišten za provjeru izraza u drugom slučaju implementacije linearnog momenta isključne spojke.



Slika 37. Simulacijski model korišten za provjeru izraza disipacije energije u spojkama

Problem optimiranja podložan je ograničenjima identičnim kao i u odjeljku 4.2.1, uz drukčiji oblik jednadžbe ograničenja momenta na izlaznom vratilu. Jednadžba ograničenja momenta na izlaznom vratilu dobiva se integriranjem jednadžbe (59) od početka do kraja inercijske faze te rezultira sljedećim izrazom:

$$\tau_{os} = \frac{0.5}{\mathrm{g}_1}\tau_{OFG} + \frac{1}{g_2}\tau_{ONC} \ , \tag{67}$$

što je u skladu s prethodno navedenom tvrdnjom o srednjem iznosu momenta isključne spojke. Obje navedene funkcije cilja su podložna ograničenjima (52) i (53).

5.2.2. Formulacija problema za drugi način (slučaj) implementacije

Zbog toga što inercijska faza u drugom slučaj nije uniformna, konačne funkcije cilja dobivene su u dva dijela. Sukladno tomu izraz za trajanje inercijske sastojat će se od dva dijela koji će se pomoću rubnog uvjeta $\omega_{is}(t_1)$ (Slika 36) spojiti u jedan izraz. Izraz za prvi dio inercijske faze dobiva se integriranjem jednadžbe (58) od početka inercijske faze do trenutka (t_1) i uvrštavanjem rubnog uvjeta (60):

$$\omega_{is}(t_1) = \frac{1}{I_{in}}\left(\tau_{is}t_1 - i_1\frac{\tau_{OFG}t_1}{2} - i_2\tau_{ONC}t_1\right) + \omega_{os}\gamma_1 \ . \tag{68}$$

Umetanjem dobivenog izraza (68) u (61) dobiva se konačan izraz za vrijeme trajanje inercijske faze koji predstavlja funkciju cilja koja se minimizira:

$$\min t_{ip} = \frac{I_{in}\omega_{os}(\gamma_2 - \gamma_1) + i_1\frac{\tau_{OFG}t_1}{2}}{\tau_{is} - i_2\tau_{ONC}} \ . \tag{69}$$

Drugi kriterij kvalitete promjene stupnja koji se odnosi se na gubitak energije kroz disipaciju u spojkama tokom inercijske faze se dobiva na sličan način kao i prošlom odjeljku, uz dodatak drugog dijela inercijske faze. Izraz za energiju disipacije u spojkama je formuliran na sljedeći način:

$$E_{loss} = \int_0^{t_1}\tau_{OFG}(t)\ \omega_{OFG}(t_{0-1})\ dt + \int_0^{t_1}\tau_{ONC}\ \omega_{ONC}(t_{0-1})\ dt + \int_{t_1}^{t_{ip}}\tau_{ONC}\ \omega_{ONC}(t_{1-ip})\ dt \ , \tag{70}$$

gdje su:

$$\omega_{OFG}(t_{0-1}) = \frac{i_1}{I_{in}}\left[\tau_{is}t - i_1\left(\frac{-\tau_{OFG}}{t_{ip}}\frac{t^2}{2} + \tau_{OFG}t\right) - i_2\tau_{ONC}t\right] - \frac{1}{g_1}\omega_{os} \ , \qquad (71)$$

$$\omega_{ONC}(t_{0-1}) = \frac{i_2}{I_{in}}\left[\tau_{is}t - i_1\left(\frac{-\tau_{OFG}}{t_{ip}}\frac{t^2}{2} + \tau_{OFG}t\right) - i_2\tau_{ONC}t\right] - \frac{1}{g_2}\omega_{os} \ , \qquad (72)$$

$$\omega_{ONC}(t_{1-ip}) = \frac{\tau_{is}t - i_2\tau_{onc}t}{I_{in}} + \frac{1}{I_{in}}\left(\tau_{is}t_1 - i_1\frac{\tau_{OFG}t_1}{2} - i_2\tau_{ONC}t_1\right) + \omega_{os}\gamma_1 \ . \qquad (73)$$

Uvrštavanjem jednadžbi (55), (56), (71), (72) i (73) u jednadžbu (70) i njenim integriranjem, dobiva se konačan izraz za disipaciju energije u spojkama koji se minimizira kao drugi kriterij kvalitete promjene stupnja prijenosa:

$$\begin{aligned}\min E_{loss} = {} & \frac{\tau_{\mathrm{ONC}}t_1\left(3\tau_{\mathrm{is}}i_2t_1 - 3\tau_{\mathrm{ONC}}{i_2}^2t_1 + 6\gamma_1 I_{\mathrm{in}}i_2\omega_{\mathrm{os}} - 2\tau_{\mathrm{OFG}}i_1i_2t_1\right)}{6I_{\mathrm{in}}} - \frac{\tau_{\mathrm{OFG}}t_1\omega_{\mathrm{os}}}{2g_1} \\ & - \frac{\tau_{\mathrm{ONC}}t_1\omega_{\mathrm{os}}}{g_2} - \tau_{\mathrm{ONC}}\left\{i_2\left[\gamma_1\omega_{\mathrm{os}} - \frac{t_1\left(\frac{\tau_{\mathrm{OFG}}i_1}{2} - \tau_{\mathrm{is}} + \tau_{\mathrm{ONC}}i_2\right)}{I_{\mathrm{in}}}\right] - \frac{\omega_{\mathrm{os}}}{g_2}\right\}\left(t_1 - t_{\mathrm{ip}}\right) \\ & + \frac{\tau_{\mathrm{OFG}}t_1\left(4\tau_{\mathrm{is}}i_1t_1 - 3\tau_{\mathrm{OFG}}{i_1}^2t_1 + 12\gamma_1 I_{\mathrm{in}}i_1\omega_{\mathrm{os}} - 4\tau_{\mathrm{ONC}}i_1i_2t_1\right)}{24I_{\mathrm{in}}} \\ & + \frac{\tau_{\mathrm{ONC}}i_2\left(t_1 - t_{\mathrm{ip}}\right)^2\left(\tau_{\mathrm{is}} - \tau_{\mathrm{ONC}}i_2\right)}{2I_{\mathrm{in}}} \ . \end{aligned} \qquad (74)$$

Obje navedene funkcije cilja su podložna ograničenjima (52) i (53) uz dodatak sljedećeg ograničenja:

$$t_{1,min} \le t_1 \le t_{1,max} \ , \qquad (75)$$

te drukčiji oblik jednadžbe ograničenja momenta na izlaznom vratilu.

Integriranje jednadžbe (59) od 0 do t_{ip} rezultira:

$$\tau_{os}t_1 = \frac{1}{\mathrm{g_1}}\frac{\tau_{OFG}}{2}t_1 + \frac{1}{g_2}\tau_{ONC}t_1 \ , \qquad (76)$$

te i integriranje jednadžbe (62) od t_1 do t_{ip} rezultira:

$$\tau_{os}(t_{ip} - t_1) = \frac{1}{g_2}\tau_{ONC}(t_{ip} - t_1) \ . \tag{77}$$

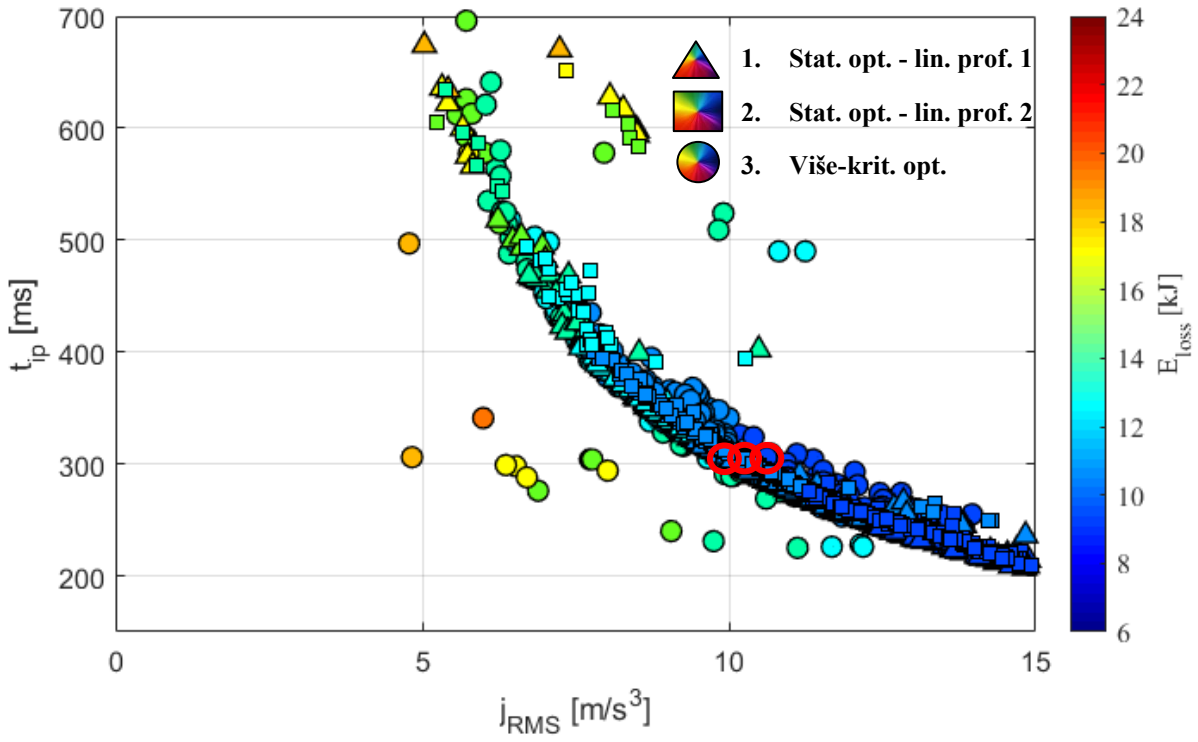
Uvrštavanjem jednadžbi (76) i (69) u jednadžbu (77) rezultira izrazom srednjeg momenta izlaznog vratila mjenjača:

$$\tau_{os,mean} = \frac{1}{g_1}\frac{\tau_{OFG}}{2}\frac{t_1(\tau_{is} - i_2\tau_{ONC})}{I_{in}\omega_{os}(\gamma_2 - \gamma_1) + i_1\frac{\tau_{OFG}t_1}{2}} + \frac{1}{g_2}\tau_{ONC} \ , \tag{78}$$

5.3. Rezultati optimiranja na pojednostavljenom modelu pogona s linearnim upravljačkim profilima

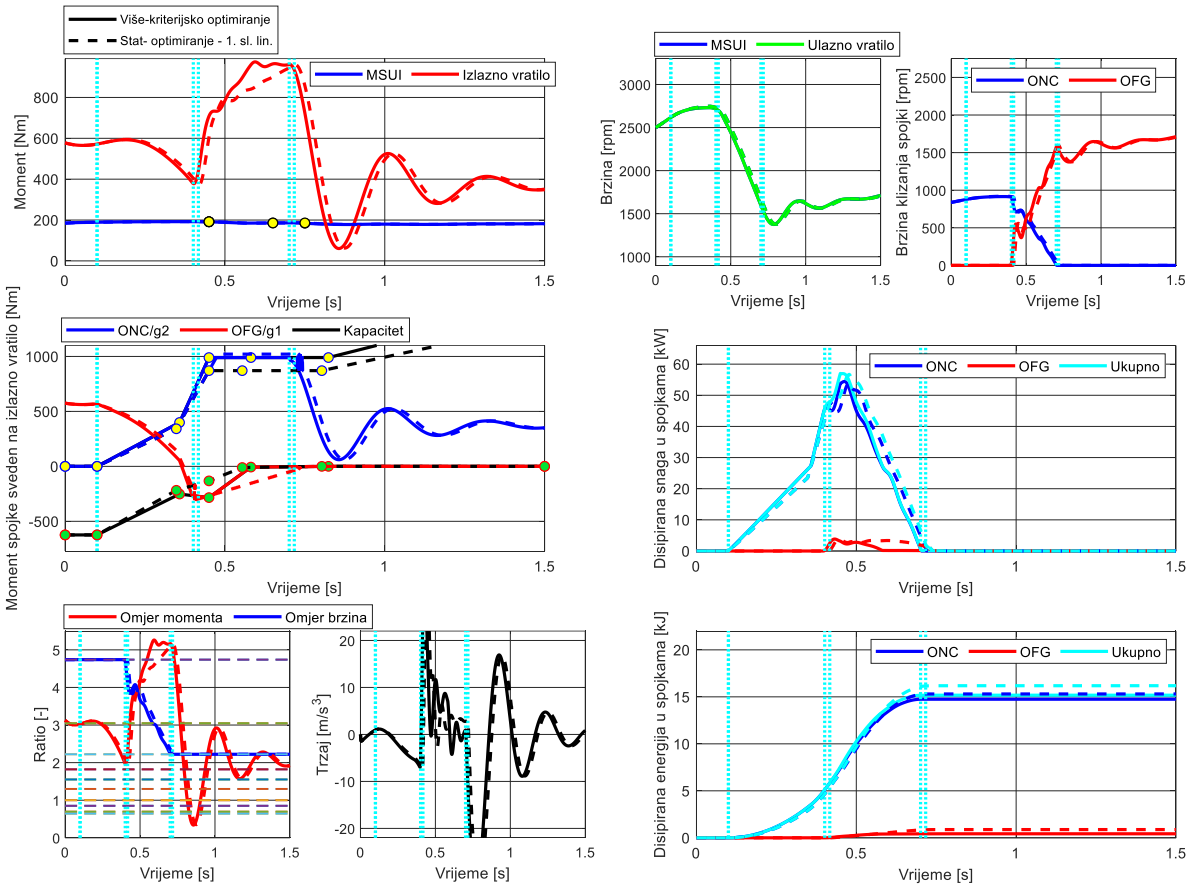
U ovom potpoglavlju prezentirat će se rezultati statičkog optimiranja parametara za uzlaznu promjenu 1-3. Isto kao i u prethodnim poglavljima, rezultati statičkog optimiranja i više-kriterijskog optimiranja su uspoređeni simulacijski. Rezultati će biti dani za prvi i drugi način implementiranja linearnog momenta isključne spojke.

Nakon izvršavanja simulacija, na Slika 38 dobivena je Pareto fronta izražena po RMS vrijednosti trzaja vozila za prethodno spomenuti prvi i drugi način implementacije momenta isključne spojke i rezultat više-kriterijskog optimiranja za vrijeme trajanja inercijske faze. Rezultati dobiveni statičkim optimiranje linearnih upravljačkih profila vrlo su slični rezultatima više-kriterijskog optimiranja po RMS-u trzaja i trajanja inercijske faze. Vrijednosti disipirane energije nešto su veće u prvom slučaju (linearni profil momenta isključne spojke kroz cijelu inercijsku fazu) u odnosu na drugi slučaj i više-kriterijsko optimiranje, što bi se moglo objasniti dužim i većim korištenjem isključne spojke. Kako bi se detaljnije usporedili rezultati optimiranja, dani su simulacijski odzivi za jedno rješenje sva tri navedena slučaja optimiranja (označeni crvenim kružnicama).



Slika 38. Pareto fronte više-kriterijskog optimiranja i statičkog optimiranja linearnim upravljačkim profilima za drugi scenarij

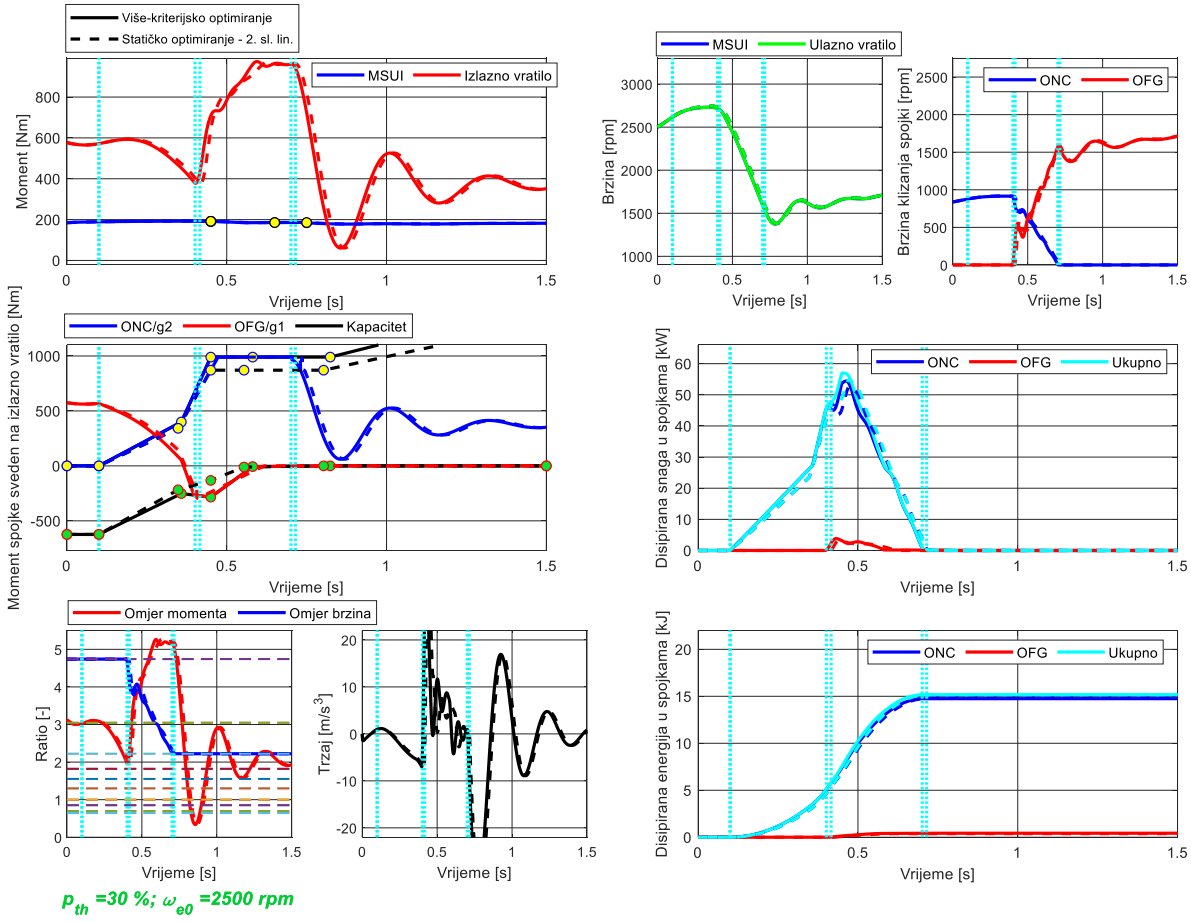
Slika 39 prikazuje simulacijski odziv rješenja višekriterijskog optimiranja i statičkog optimiranja za prvi slučaj linearnog momenta isključne spojke. Statičkim optimiranjem u prvom slučaju dolazi do razlike u odnosu na više-kriterijsko optimiranje jer se moment isključne spojke linearno spušta moment do kraja inercijske faze, što negativno utječe na iznos ukupne disipirane energije u spojkama. U više-kriterijskom optimiranju, moment isključne spojke pada na nulu približno na sredini inercijske faze, što je bliže drugom slučaju statičkog optimiranja. Moment izlaznog vratila je dosta bolje opisan za prvi slučaj linearnog momenta isključne spojke nego za slučaj konstantnog momenta isključne spojke jer je smanjen nagli skok momenta na početku inercijske faze, što je sličnije rezultatu više-kriterijskog optimiranja.



Slika 39. Rješenja višekriterijskog optimiranja i statičkog optimiranja za prvi slučaj linearnog momenta isključne spojke za drugi scenarij

Slika 40 prikazuje simulacijski odziv rješenja rješenja višekriterijskog optimiranja i statičkog optimiranja za prvi slučaj linearnog momenta isključne spojke. Simulacijski odziv dobiven statičkim optimiranjem drugog slučaja rezultira gotovo identičnim rezultatom kao i više-kriterijsko optimiranje. Moment isključne spojke pada na nulu prije završetka inercijske faze. Time se smanjuje disipirana energija u odnosu na prvi slučaj uz zadržavanje razine izlaznog momenta, ali nešto povećanog trzaja.

Usporedbom iznosa funkcija cilja danih u Tablica 8. za prikazane slučajeve može se zaključiti kako oba slučaja statičkog optimiranja rezultiraju sličnim performansama, dok drugi slučaj statičkog optimiranja rezultira istim trajanjem inercijske faze i istim RMS trzajem, dok mu je disipirana energija u spojkama neznatno manja.



Slika 40. Rješenja višekriterijskog optimiranja i statičkog optimiranja za drugi slučaj linearnog momenta isključne spojke za drugi scenarij

Tablica 8. Numerički prikaz vrijednosti rješenja drugog scenarija za slučaj statičkog i više-kriterijskog optimiranja

Rješenje	$t_{inertia}$ [ms]	E_{loss} [kJ]	j_{RMS} [m/s^3]
Više-kr. opt.	300	15.1753	10.1971
St. opt. lin. prof. 1	300 (+0%), 362*	16.1833 (+6.64%)	10.1055 (-0.90%)
St. opt. lin. prof. 2	300 (+0%), 362*	15.1753 (+0%)	10.3522 (+1.52%)

6. ZAKLJUČAK

Na početku rada predstavljen je dinamički model pogona te njegov reducirani model za jednostruku promjenu stupnja prijenosa. Nadalje, prikazani su rezultati više-kriterijskog optimiranja parametara profila upravljačkih varijabli primjenom genetskog algoritma [11], koji su dali referentno mjerilo za razvoj numerički učinkovitog optimiranja zasnovanog na pojednostavljenom statičkom modelu pogona i primjeni algoritma traženja optimuma (tzv. statičko optimiranje). Rezultati više-kriterijskog optimiranja pokazali su da su optimalne upravljačke performanse mjenjača karakterizirane širokim skupom Pareto optimalnih rješenja, kojima se korisniku omogućava odabir željenog kompromisa između trajanja promjene stupnja prijenosa, trzaja vozila i gubitaka energije u spojkama mjenjača.

Nastavno na više-kriterijski pristup optimiranja prvo je bilo potrebno obaviti redukciju dinamičkog modela pogona u statički model pogona. Redukcija je bila izvedena uz pretpostavku zanemarivog inercijskog sprezanja te zatvorenog pretvarača momenta, te pojednostavljenjem pojedinih aspekata promjene stupnja prijenosa u inercijskoj fazi, što uključuje sljedeće pretpostavke: konstantna brzina izlaznog vratila mjenjača, linearno padajuća brzina klizanja uključne spojke tj. ulaznog vratila mjenjača, linearno rastuća brzina klizanja isključne spojke te konstantne vrijednosti svih upravljačkih momenata (moment uključne, ali i isključne spojke, te redukcija momenta motora). Nakon formuliranja problema optimizacije i izvršenja same statičke optimizacije dobivene su konstantne vrijednosti upravljačke varijable momenata uključne i isključne spojke te iznosa redukcije momenta motora u inercijskoj fazi. Uvrštavanjem tih vrijednosti u simulacijski model, dobivena je Pareto fronta koja se pokazala usporediva s rezultatima više kriterijskog optimiranja, unatoč pojednostavljenjima modela pogona. Analizom pripadajućih karakterističnih vremenskih odziva utvrđeno je da za vrijeme inercijske faze dolazi do naglog skoka primijenjenog momenta na spojkama što rezultira velikom disipacijom energije u spojkama. No, velik primijenjen moment također rezultira znatno smanjenom RMS vrijednosti trzaja zbog smanjene pobude torzijskih vibracija nakon inercijske faze (*engl. shuffle mode*).

Pojednostavljeni statički model pogona je nadalje proširen inercijskim sprezanjem te pojednostavljenim modelom (otvorenog) pretvarača momenta. U pogledu pretvarača momenta bilo je potrebno uvesti dodatne pretpostavke kako bi se dobio statički model pogona; tj. omjer brzina i ubrzanja pretvarača momenta su pretpostavljeni konstantnim za dani stupanj prijenosa. Rezultati optimiranja su pokazali kvalitativno vrlo slične rezultate u usporedbi s više-kriterijskim optimiranjem. Također, u usporedbi s pojednostavljenim statičkim modelom došlo je do smanjenja disipirane energije u spojkama te povećanog iznosa trzaja. S tog stanovišta, linearna redukcija momenta isključne spojke, koja je uočena u višekriterijskom optimiranju, donosi osjetnu prednost jer snižava trzaj uzrokovan inercijskim udarom na početku inercijske faze.

Iz tih razloga rad je nastavljen u smjeru implementacije po odsječcima linearnih upravljačkih profila isključne spojke. Zbog kompleksnosti analize, odlučeno je da će se razmatrati samo pojednostavljeni statički model. Linearni profil upravljačkog momenta isključne spojke realiziran je na dva načina. Prvi način uključuje linearno spuštanje momenta isključne spojke od definirane početne vrijednosti do vrijednosti nula na samom kraju inercijske faze. Drugi je nešto općenitiji, te se svodi na spuštanje momenta isključne spojke od definirane početne vrijednosti na vrijednost nula u određenom trenutku inercijske faze (koji se također optimira), te držanje nulte vrijednosti do kraja inercijske faze. Nakon provedbe optimiranja, pokazano je da drugi način upravljanja isključnom spojkom daje vrlo slične rezultate referentnom mjerilu, dok je kod prvog načina dobiven nešto viši iznos energije disipacije u spojkama, dok je trzaj bio neznatno niži.

Usporedbom numeričkih vrijednosti danih u Tablica 9 (postotne vrijednosti se odnose na usporedbu s referentnim mjerilom), može se vidjeti napredak statičkog optimiranja u opisivanju rezultata više-kriterijskog optimiranja do kojeg se došlo postupnim uklanjanjem pojednostavljenja u formulaciji modela pogona i profila upravljačkih varijabli.

Tablica 9. Prikaz brojčanih vrijednosti kriterija optimiranja za drugi scenarij upravljanja i različite slučajeve optimiranja za slučaj zatvorenog pretvarača momenta

Rješenje	$t_{inertia}$ [ms]	E_{loss} [kJ]	j_{RMS} [m/s^3]
Više-kriterijsko optimiranje	300	15.1753	10.1971
Statičko optimiranje konstantnim profilima	300 (+0%), 340*	17.8967 (+17.93%)	8.0801 (-20.76%)
Statičko optimiranje konstantnim profilima – inercijsko sprezanje	300 (+0%), 335*	15.5761 (+2.64%)	9.3321 (-8.48%)
Statičko optimiranje linearnim profilima -slučaj 1	300 (+0%), 362*	16.1833 (+6.64%)	10.1055 (-0.90%)
Statičko optimiranje linearnim profilima -slučaj 2	300 (+0%), 362*	15.1753 (+0%)	10.3522 (+1.52%)

Daljnje unaprjeđenje prikazanog postupka statičke optimizacije koji može ići u nekoliko pravaca. Prvi pravac bi bio određivanje analitičkog izraza kojim bi se određivali omjeri brzina i ubrzanja pretvarača momenta. Trenutni način određivanja je temeljen na rezultatima više-kriterijskog optimiranja. Olakotna okolnost je ta što se vrijednosti tih parametara ne kreću u širokim granicama, te tako ni određeno odstupanje u njihovom iznosu ne utječe značajno na devijaciju rezultata [20]. Nadalje, postojeći statički model s linearnim profilima potrebno je implementirati i za druge scenarije, analizirati njihova rješenja, te iz toga zaključiti idući pravac rada. Naposljetku, moguće je proširiti više-kriterijski i statički način optimiranja s mogućnošću linearno smanjujućeg momenta uključne spojke pred kraj inercijske faze, omogućujući koristan rad isključne spojke na početku inercijske faze uz sprječavanje torzijskih vibracija izlaznog vratila pri izlasku iz inercijske faze.

7. **LITERATURA**

[1] R. Fischer, R. Gscheidle i U. Heider, Tehnika motornih vozila, 27. ur., Zagreb: Pučko otvoreno učilište, 2004.

[2] J. Marano, S. Moorman, J. Czoykowski i C. Ghike, »Automatic Transmission Rotational Inertia Effect on,« *SAE International,* br. 2011-01-0393, p. 9, 2011.

[3] J. Greiner i M. Grumbach, »Automatic Transmission Systems Beyond 2020 - Challenges and Competition,« *SAE International,* br. 2013-01-1273, p. 6, 2003.

[4] S. Bai, J. Maguire i H. Peng, Dynamic Analysis and Control System Design of Automatic Transmissions, Warrendale, PA: SAE International, 2013.

[5] G. Bingzhao, H. Chen, K. Sanada i Y. Hu, »Design of clutch-slip controller for automatic transmission using backstepping,« *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,* svez. 18, br. 3, p. 11, 2011.

[6] G. Li, Y. Huang i G. Yanwu, »Engine Coordinated Control for Automatic,« *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, IEEE,* p. 137–141, 2013.

[7] V. Ranogajec, J. Deur i M. Čorić, »Bond Graph Analysis of Automatic Transmission Shifts including Potential of Extra Clutch Control,« *SAE International Journal of Engines,* p. 17, 2016.

[8] V. Rangajec, »Optimalno upravljanje automatskim mjenjačem s velikim brojem stupnjeva prijenosa (Doktorski rad),« Zagreb, 2018.

[9] V. Ranogajec, M. Čorić, J. Deur i V. Ivanović, »Multi-objective Parameter Optimization of Automatic Transmission Shift Control Profiles,« *SAE International,* p. 14, 2018.

[10] S. Poles, »MOGA-II An improved Multi-Objective Genetic Algorithm,« ESTECO, Trieste, 2003.

[11] I. Cvok, V. Ranogajec i J. Deur, »Multi-objective Parameter Optimization of Control Profiles for Different 1-2, 1-3, 2-3, 2-4, 4-5, 4-6, 8-9, 8-10 Shift Control Scenarios (Internal Report),« University of Zagreb, Zagreb, 2018.

[12] J. Deur, J. Asgari, D. Hrovat i P. Kovač, »Modeling and Analysis of Automatic Transmission engagement Dynamics-Linear Case,« *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control,* svez. 168, p. 15, 2006.

[13] D. Hrovat i W. E. Tobler, »Bond graph modeling of automotive power trains,« *Journal of the Franklin Institute,* p. 40, 1991.

[14] D. C. Karnopp, D. L. Margolis i R. C. Rosenberg, System Dynamics: A Unified Approach, New York: Wiley-Interscience, 1990.

[15] D. Hrovat i W. E. Tobler, Bond graph modeling and computer simulation of automotive torque converters, Philadelphia: Journal of the Franklin Institute, 1985.

[16] G. B. R. Goleski, »Multi-speed automatic transmission«. Sjedinjene Američke Države Patent 9,759,291 B2, 2016.

[17] V. Ranogajec i J. Deur, »Analysis of Influence of Inertia Coupling on Automatic Transmission Shift Dynamics,« u *Powertrain Modelling and Control Conference (PMC 2018)*, Loughborough, 2018.

[18] D. Karnopp, »Computer Simulation of Stick-Slip Friction in Mechanical Dynamic Systems,« *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME,* 1985.

[19] M. Čorić, J. Deur, J. Kasać i H. D. Tseng HE, »Optimization of active suspension control inputs for improved vehicle handling performance,« *Vehicle System Dynamics,* 2016.

[20] M. Hihlik, I. Cvok i J. Deur, »Extension of the Static Model-based Approach of Upshift Control Parameter Optimization Taking into Account Inertia Coupling and Torque Converter Effects (Intenal Report),« University of Zagreb, Zagreb, 2019.

[21] I. Cvok, V. Ranogajec i J. Deur, »An Analytical Approack for Interpretation of Multi-objective Parameter Optimization Results for Different Upshifts and Control Scenarios (Internal report),« University of Zagreb, Zagreb, 2019..

PRILOZI

I. CD-R disc