

Optimalno upravljanje automatskim mjenjačem s velikim brojem stupnjeva prijenosa

Ranogajec, Vanja

Doctoral thesis / Disertacija

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:235:318191>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-18**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Vanja Ranogajec

**OPTIMALNO UPRAVLJANJE
AUTOMATSKIM MJENJAČEM S
VELIKIM BROJEM STUPNJEVA
PRIJENOSA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2018.



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Vanja Ranogajec

**OPTIMALNO UPRAVLJANJE
AUTOMATSKIM MJENJAČEM S
VELIKIM BROJEM STUPNJEVA
PRIJENOSA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: prof. dr. sc. Joško Deur

Zagreb, 2018.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL
ARCHITECTURE

Vanja Ranogajec

**OPTIMAL SHIFT CONTROL OF AN
AUTOMATIC TRANSMISSION WITH A
LARGE NUMBER OF GEARS**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor: Joško Deur, PhD, Full Professor

Zagreb, 2018.

Podaci za bibliografsku karticu

UDK:	62-585.1.
Ključne riječi:	Automatski mjenjač, modeliranje, optimalno upravljanje, optimiranje, analiza, vrednovanje
Znanstveno područje:	Tehničke znanosti
Znanstveno polje:	Strojarstvo
Institucija:	Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje
Mentor:	prof. dr. sc. Joško Deur
Broj stranica:	212
Broj slika:	97
Broj tablica:	17
Broj korištenih bibliografskih jedinica:	91
Datum obrane:	9.1.2019.
Povjerenstvo:	dr. sc. Joško Petrić, red. prof., predsjednik (Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb) dr. sc. Josip Kasać, red. prof., član (Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb) dr. sc. Stjepan Bogdan, red. prof., član (Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb)
Institucija u kojoj je rad pohranjen:	Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Nacionalna i sveučilišna knjižnica u Zagrebu

Podaci o mentoru

Joško Deur rođen je 1966. godine u Zadru. Diplomirao je 1989. godine na Elektrotehničkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, smjer Automatika. Na istom je Fakultetu magistrirao 1993. i doktorirao 1999. godine.

Od svibnja 1990. godine uposlen je na Zavodu za robotiku i automatizaciju proizvodnih sustava, Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. U zvanje redovitog profesora u trajnom zvanju izabran je 2018. godine. Nakon jednogodišnjeg znanstvenog usavršavanja u istraživačkom centru tvrtke Ford Motor Company u Dearbornu, SAD (2000), uspostavio je široku suradnju s tvrtkama Ford Motor i Jaguar Cars kroz više od 10 znanstveno-istraživačkih projekata na području modeliranja i regulacije automobilskih sustava. Osim toga, od 2001. godine vodio je desetak znanstveno-istraživačkih projekata poduprtih od strane Ministarstva znanosti i obrazovanja Republike Hrvatske, Hrvatske zaklade za znanosti, te Europske komisije (FP7, COST, Interreg, Horizon2020). Bio je voditelj triju istraživačko-razvojnih projekata poduprtih od domaće industrije (Crosco, TPK-Nova i Helb).

Znanstveno zanimanje prof. Deura obuhvaća područja automobilske mehatronike, električnih servopogona, električnih vozila i njihove integracije u energetske sustave, te sustava upravljanja općenito. Dobitnik je Državne nagrade za znanost za 2006. godinu u kategoriji godišnje nagrade za značajno znanstveno dostignuće u području tehničkih znanosti, srebrne plakete "Josip Lončar" za izrazito uspješnu doktorsku disertaciju, te četiriju nagrada za najbolje članke na međunarodnim konferencijama. Autor je preko 56 članaka objavljenih u međunarodnim časopisima (od toga 35 objavljena u CC/SCI-indeksiranim časopisima), preko 115 radova objavljenih na međunarodnim konferencijama, četiri patenata, četiri poglavlja u međunarodnim enciklopedijama i knjigama, te jedne znanstvene knjige. Bio je organizator više specijalnih sekcija i mini-simpozija na međunarodnim konferencijama, te jedne međunarodne ljetne škole.

Prof. Deur je član društava KoREMA, IEEE, SAE i IFAC, te IFAC "Technical Committee 7.1 Automotive Control" i "IEEE Technical Committee on Automotive Control". Član je uređivačkog odbora i/ili pridruženi urednik triju časopisa (IEEE Transactions on Vehicular Technology, International Journal of Powertrain i Automatika).

Zahvale

Prije svega zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Jošku Deuru na pružanju prilike za istraživački rad na projektu u sklopu kojeg je izrađen ovaj rad, iznimnom strpljenju, te mnogim korisnim diskusijama tijekom vođenja.

Zahvaljujem članovima povjerenstva, prof. dr. sc. Jošku Petriću, prof. dr.sc. Josipu Kasaću, te prof. dr. sc. Stjepanu Bogdanu na korisnim komentarima i sugestijama koje su rad učinile boljim.

Zahvaljujem kolegama dr. sc. Branimiru Škugoru, dr. sc. Mirku Čoriću, mag. ing. Filipu Maletiću, mag. ing. Jakovu Topiću, mag. ing. Juri Soldi, te mag. ing. Igoru Ratkoviću na suradnji i prije svega prijateljstvu, uz koje je istraživanje bilo ugodnije i zabavnije. Posebnu zahvalnost dugujem i ostalim članovima istraživačke grupe koji su uvijek bili spremni pomoći.

Zahvaljujem Hrvatskoj zakladi za znanost koja je podržala moj istraživački rad kroz program “Projekt razvoja karijera mladih istraživača – izobrazba novih doktora znanosti“. Također zahvaljujem tvrtki Ford Motor Company, u sklopu čijeg projekta je izrađen ovaj rad. Na poseban način zahvaljujem dr. sc. Vladimiru Ivanoviću koji je sa mnom nesebično dijelio svoja znanja i iskustva iz područja upravljanja automatskim mjenjačima, ali i šire.

Posebno zahvaljujem svojim roditeljima i bratu na bezuvjetnoj ljubavi i podršci tijekom cjelokupnog života, a time i školovanja. Njima, kao i široj obitelji i prijateljima, zahvaljujem na zajedničkim druženjima i zajedničko provedenom vremenu općenito, koje je doprinijelo izgradnji mog identiteta.

Naposljetku, najveću zahvalnost na bezrezervnoj potpori, ljubavi i razumijevanju dugujem supruzi Mateji.

Zagreb, prosinac 2018.

Vanja Ranogajec

*Malo znanje čini ljude oholima,
a veliko skromnima.
Zato prazno klasje oholo diže glavu uvis,
a puno obara glavu ka zemlji.*

Nepoznati autor

Sažetak

Suvremeni automatski mjenjači s planetarnim prijenosnicima uključuju velik broj stupnjeva prijenosa (i do 10), s ciljem smanjenja potrošnje goriva i emisija štetnih plinova, te poboljšanja voznih performansi. U prisustvu složene strukture mjenjača s mnogostrukim kombinacijama i profilima uključivanja spojki, potrebno je postići optimalne karakteristike upravljanja mjenjačem. U radu se prvo prikazuje modeliranje dinamike pogona vozila, s naglaskom na razvoj metoda automatskog modeliranja i automatskog reduciranja reda modela automatskog mjenjača. Automatsko generiranje modela automatskog mjenjača punog reda provodi se izravno iz veznog dijagrama mjenjača, te se taj model koristi za automatsko generiranje modela mjenjača reduciranog reda za proizvoljno, korisnički-definirano stanje spojki. U nastavku rada provodi se numeričko optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa automatskog mjenjača primjenom pseudospektralne kolokacijske metode. Temeljni cilj ove aktivnosti je dobivanje uvida u optimalno ponašanje automatskog mjenjača, posebice kod složenijih promjena stupnja prijenosa s dvostrukim prijelazom, kod kojih se istovremeno koriste četiri spojke. Zatim se predlažu praktični, po odsječcima linearni profili upravljačkih varijabli, koji se definiraju temeljem uvida dobivenih primjenom općeg pristupa optimiranja upravljačkih varijabli. Optimalne vrijednosti parametara loma tako definiranih upravljačkih profila (tj. upravljačkih strategija) određuju se primjenom više-kriterijskog optimiranja, pri čemu se rezultati optimiranja koriste za vrednovanje predloženih upravljačkih strategija uz preporuke za primjenu. S ciljem dobivanja optimalnog rješenja u prisustvu statistički poznatih varijacija temeljnih parametara odziva spojki s aktuatorom, u radu se provodi i stohastičko robusno optimiranje parametara profila upravljačkih varijabli. Konačno, dobiveni rezultati koriste se za sintezu realnog sustava upravljanja u interakciji s komandama vozača i za razne uvjete vožnje. Korištenje razvijenih metoda za modeliranje i optimiranje demonstrira se na primjeru naprednog 10-brzinskog automatskog mjenjača.

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

Extended summary

A trend of increasing the number of forward gears of step-gear automatic transmissions (ATs) has emerged recently due to the legislative and market pressure for CO₂ reduction and improved fuel economy. For the increased number of AT gears (up to ten, nowadays), the number of shift types and shift events grows significantly. For instance, in new generation ATs, multi-step gear shifts may be executed frequently in order to improve the driving performance. They include double-transition shifts, which require close coordination between multiple (typically four) clutch control inputs. The increasing shift complexity makes the development of AT control system more demanding, which calls for the development of new shift control optimisation tools and requires more exhaustive control system simulation and optimisation studies. Those studies are based on AT dynamics models, which can be of full order (covering the full spectrum of simulation and optimisation tasks) or reduced order (related to specific gears or shifts, and accounting for locked clutches). The reduced-order models are simpler and computationally more efficient, but their number exponentially grows with the number of AT gears, thus, burdening the modelling effort. Therefore, the development of methods that allow for automated generation of computationally efficient mathematical models is of particular interest.

The thesis firstly presents modelling of vehicle powertrain system, where the emphasis is on automated AT modelling and automated AT model-order reduction. Next, numerical optimisation of AT control trajectory is conducted for the purpose of gaining insights into the optimal behaviour of AT for various single-transition and double-transition shifts. Finally, different viable definitions of control variable profiles (i.e. different open-loop control strategies) are proposed and multi-objective optimization of parameters of these profiles is carried out. The obtained optimisation results are employed for assessing the proposed control strategies, as well as for designing a more realistic control system that interacts with driver commands and accounts for various driving conditions.

The main aim of the thesis is to propose procedures for automated modelling and automated model-order reduction of an advanced AT with a large number of gears, and based on these models, to propose the design of an optimal shift control system that ensures high shift quality and including robustness in the presence of variations of transmission actuation parameters.

The thesis is organised in nine chapters, whose content is summarised in what follows.

Chapter 1: *Introduction*. Outlines the motivation for conducted research, presents a literature overview, and gives the main hypothesis and an overview of the thesis.

Chapter 2: *Modelling of powertrain dynamics*. Outlines a control-oriented powertrain model to be used in the simulation and optimisation studies in the next chapters. The powertrain model is divided into several submodels representing its main components (engine, torque converter, driveline and vehicle), including the key submodel that describes dynamics of a 10-speed AT. An analytical full-order state-space model of a 10-speed AT is derived by using a full-order bond graph model of the considered AT. Powertrain simulation models created in MATLAB/Simulink and 20-sim software environments are also presented.

Chapter 3: *Automated modelling and automated model-order reduction for automatic transmission*. First, a method for automated generation of a full-order numerical AT model from an AT bond graph model is proposed. The proposed numerical method is implemented within the 20-sim and MATLAB software environments, where 20-sim is used to draw the bond graph and export it to (or simulate it by) a MATLAB script. Next, an automated model-order reduction method is proposed for an arbitrary, user-specified clutch state. The method is based on determining the locked-clutch torque variables and their substitution into the full-order state-space model input vector, as well as finding a linear relation between the reduced-order and full-order model state variables. The obtained reduced-order AT models are simpler and computationally more efficient, and are therefore widely used in the remaining part of the thesis for the purpose of computer simulations and optimisations, as well as for analyses of shift dynamics and control system design.

Chapter 4: *Method for optimisation of AT shift control trajectories*. Proposes a method for optimisation of AT shift control trajectories, which aims at gaining insights into the optimal shift control performance and shift control trajectory shaping. After formulating the AT shift control optimisation problem, a pseudospectral collocation method is introduced to optimise AT clutch and engine control trajectories for comfortable and energy-efficient shifts. Since the optimisation method requires a smooth formulation of plant model, the emphasized clutch model non-linearity around the zero slip speed has been found to be a major difficulty to be

resolved through proper modelling of the optimisation problem. Therefore, different approaches of describing the friction behaviour have been considered and assessed in a wider framework of this work, starting from simple explicit static models, through explicit dynamics models, toward torque-source-based implicit approaches subject to the clutch passivity constraint. The proposed optimisation method is verified and the clutch models assessed based on the example of 10-speed AT for different single-transition shift control scenarios. The characteristic AT dynamics effects are analysed by using a systematic and illustrative graphical approach based on the bond graph methodology and an equivalent dual-clutch model.

Chapter 5: *Optimisation of AT control trajectories for double-transition shifts.* The AT control trajectory optimisation method presented in the previous chapter is utilized in this chapter for the purpose of double-transition shift control optimisation including engine torque control. With the aim to gain insights into optimal control action and coordination, six different DTS control strategies are proposed and assessed. These strategies are incorporated into the optimisation problem formulation through additional, shift phase-related constraints that the optimisation algorithm needs to satisfy. The proposed optimal strategies are assessed for an example of characteristic double-transition downshifts. Based on the summarized optimisation results obtained for different levels of clutch energy loss penalisation, it is found that the strategy characterized with quick release of the off-going clutches can provide an optimal compromise between shift comfort performance and energy loss reduction. The main features of optimised double-transition power-on downshift dynamics are analysed by using the reduced-order bond graph model.

Chapter 6: *Parameter optimisation of control profiles for single-transition shifts.* This chapter proposes a method for multi-objective parameter optimisation and assessment of piecewise-linear time profiles of AT control trajectories, which are easy to interpret, implement and calibrate. The optimisation is aimed to find parameters defining the piecewise linear shift control profiles, which provide a good trade-off between the shift comfort and performance. The optimisation problem is solved by using the multi-objective genetic algorithm MOGA-II. As an extension of the parameter optimisation approach, a method for robust parameter optimisation is proposed, which aims at ensuring high shift quality and robustness in the presence of transmission actuation parameter variations. The objective is to find shift control profile parameters that simultaneously minimize mean values of vehicle jerk and shift duration

indices as well as their standard deviations for improved robustness against change of transmission parameters. The overall optimisation approach is demonstrated on an example of a single-transition power-on upshift, and the obtained optimisation results are analysed and compared with control trajectory optimisation results.

Chapter 7: *Parameter optimisation of control profiles for double-transition shifts.* The method for multi-objective parameter optimisation of piecewise linear control profiles is applied in this chapter to the case of more demanding double-transition power-on downshift. First, different definitions of piecewise linear control profiles (i.e. control strategies) are proposed for performing such downshifts. Next, control profile parameter optimisations are run for different shift scenarios, i.e. for various double-transition downshifts and different shift control strategies. Finally, the control strategies are assessed based on several performance indices extracted from parameter optimisation results. The assessment results, including qualitative and quantitative comparisons with the control trajectory optimisation results, show that the control strategy for which the off-going clutches are quickly released gives the best overall performance.

Chapter 8: *Scalable optimal shift control law.* In this chapter, a systematic approach for proper scaling of shift control profiles obtained in chapters 6 and 7 is proposed, which aims at providing good shift quality in a wide range of shift conditions (e.g. for different transmission input torque and speed values at which the shift is initiated). In addition to such an adjustment of open-loop control profiles to driver commands, the shift control system is extended with closed-loop control actions for ensuring high shift quality and robustness in the presence of realistic powertrain uncertainties. The overall shift control system is thoroughly examined through computer simulations.

Chapter 9: *Conclusion.* Outlines the main findings and the following major contributions of the doctoral thesis: (i) a method for automated modelling of an advanced automatic transmission with a large number of gears and an automated model order reduction method for an arbitrary, user-specified clutch state; (ii) optimisation of double-transition shift control trajectories related to clutch torque capacities and engine torque, and analysis of the obtained results with the aim of defining optimal gear shift characteristics; and (iii) profiling piecewise linear control trajectories for double-transition shifts, formulation of scalable control law in

Extended summary

coordination with driver commands, and optimisation of piecewise-linear profiles including achieving robustness with respect to variation of transmission actuation parameters.

Keywords: automatic transmission, modelling, optimal control, optimisation, analysis, assessment

Sadržaj

Podaci za bibliografsku karticu	4
Podaci o mentoru.....	5
Zahvale	6
Sažetak	8
Extended summary	9
Sadržaj	I
Popis slika	VII
Popis tablica	XIV
Popis oznaka i kratica.....	XVI
Popis oznaka	XVI
Popis kratica	XXVI
1. Uvod	1
1.1. Motivacija	1
1.2. Dosadašnje spoznaje	4
1.2.1. Modeliranje dinamike automatskog mjenjača.....	4
1.2.2. Upravljanje promjenom stupnja prijenosa	6
1.2.3. Optimalno upravljanje promjenom stupnja prijenosa	10
1.3. Hipoteza	14
1.4. Pregled sadržaja rada	14
2. Modeliranje dinamike pogona vozila	18
2.1. Modeli komponenti pogonskog sustava vozila.....	19
2.1.1. Model Ottovog motora i pretvarača momenta	19
2.1.2. Model sustava prijenosa snage i uzdužne dinamike vozila.....	21
2.2. Model automatskog mjenjača punog reda	23
2.2.1. Struktura naprednog mjenjača s velikim brojem stupnjeva prijenosa.....	23
2.2.2. Vezni dijagram modela automatskog mjenjača	24
2.2.3. Model automatskog mjenjača u prostoru stanja	25
2.3. Modeli trenja spojke	27
2.3.1. Statička karakteristika trenja spojke.....	28

2.3.2.	Klasični model trenja	29
2.3.3.	Karnoppov model trenja.....	29
2.3.4.	Dahlov model trenja	30
2.3.5.	Model dinamike aktuatora spojke	31
2.4.	Simulacijski modeli pogona vozila	32
3.	Automatsko modeliranje i automatsko reduciranje reda modela automatskog mjenjača	35
3.1.	Automatsko generiranje matrica modela automatskog mjenjača	35
3.1.1.	Postupak zasnovan na izvozu modela iz 20-sim u MATLAB/Simulink okruženje	36
3.1.2.	Identifikacija matrica sustava iz modela sadržanog u MATLAB skripti.....	37
3.1.3.	Identifikacija matrica sustava temeljena na izvođenju simulacije	39
3.1.4.	Provjera metode za automatsko modeliranje	39
3.2.	Model automatskog mjenjača reduciranog reda	41
3.2.1.	Motivacija.....	41
3.2.2.	Reduciranje reda modela temeljeno na metodi veznih dijagrama.....	43
3.3.	Metoda za automatsko reduciranje reda modela.....	45
3.3.1.	Određivanje momenata zatvorenih spojki.....	45
3.3.2.	Varijable stanja i ulazna matrica prostora stanja modela reduciranog reda	46
3.3.3.	Preostale karakteristične matrice modela reduciranog reda	48
3.4.	Strukture modela automatskog mjenjača reduciranog reda za promjene s jednostrukim i dvostrukim prijelazom.....	50
3.5.	Provjera modela reduciranog reda	53
3.5.1.	Opis pristupa provjeri.....	53
3.5.2.	Rezultati i diskusija	54
3.6.	Jedinstveni alat za automatsko modeliranje dinamike automatskog mjenjača	57
4.	Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa	59
4.1.	Formulacija problema optimiranja.....	59
4.1.1.	Funkcija cilja	59
4.1.2.	Ograničenja	60
4.1.3.	Početni uvjeti i početna nagađanja	63
4.1.4.	Modeli spojki temeljeni na tretiranju spojke kao izvora momenta	64

4.1.5.	Praktični aspekti optimizacije	65
4.2.	Optimizacijski alat	66
4.2.1.	Metoda optimiranja	66
4.2.2.	Implementacija optimizacijskog alata	67
4.3.	Rezultati optimiranja.....	69
4.3.1.	Osnovne značajke optimiranog odziva uzlazne promjene stupnja prijenosa	69
4.3.2.	Uzlazne promjene za različite upravljačke scenarije	71
4.3.3.	Osnovne značajke optimiranog odziva silazne promjene stupnja prijenosa	73
4.3.4.	Analiza dinamike promjene stupnja prijenosa temeljena na metodi veznih dijagrama.....	74
4.4.	Vrednovanje različitih pristupa modeliranja trenja spojke	79
5.	Optimiranje upravljačkih varijabli za promjene s dvostrukim prijelazom.....	83
5.1.	Osnovne značajke optimiranog odziva	83
5.2.	Upravljačke strategije	84
5.2.1.	Rezultati optimiranja za bazni slučaj bez specifičnih faznih ograničenja.....	84
5.2.2.	Upravljačke strategije s dodanim pragmatičnim faznim ograničenjima	87
5.3.	Rezultati optimiranja za različite upravljačke strategije	90
5.4.	Vrednovanje performansi predloženih upravljačkih strategija temeljeno na Pareto frontama	92
5.5.	Analiza optimalne koordinacije aktuatora za predložene strategije upravljanja....	94
5.5.1.	Upravljačka strategija 1 – općenita formulacija.....	94
5.5.2.	Upravljačka strategija 2 – bez promjene predznaka momenta spojki	96
5.5.3.	Upravljačka strategija 3 – bez modulacije uključnih spojki u toku inercijske faze	98
5.5.4.	Upravljačka strategija 4 – brzo inicijalno otvaranje isključnih spojki	99
5.5.5.	Upravljačka strategija 5 – bez promjene predznaka brzine klizanja uključnih spojki	101
5.5.6.	Upravljačka strategija 6 – bez promjene predznaka momenta i brzine vrtnje spojki	102
5.5.7.	Zaključne napomene analiza optimalne koordinacije aktuatora	103
5.6.	Analiza dinamike promjene stupnja prijenosa temeljena na metodi veznih dijagrama	104

5.6.1.	Početna faza – stabilan polazni stupanj prijenosa	105
5.6.2.	Faza 1 – od inicijacije promjene stupnja do ukapčanja ONC_1 spojke	105
5.6.3.	Faza 2 – od ukapčanja ONC_1 spojke do ukapčanja ONC_2 spojke	106
5.6.4.	Faza 3 – od ukapčanja ONC_2 spojke do rasta momenta motora	106
5.6.5.	Faza 4 – od rasta momenta motora do završetka upravljačkih djelovanja	107
5.6.6.	Završna faza – stabilan ciljani stupanj prijenosa	107
5.6.7.	Analiza dinamičkih efekata promjene stupnja prijenosa za druge karakteristične upravljačke strategije	109
6.	Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s jednostrukim prijelazom	112
6.1.	Formulacija problema optimiranja	112
6.1.1.	Kriteriji optimiranja	112
6.1.2.	Ograničenja	113
6.2.	Metoda optimiranja	118
6.3.	Rezultati optimiranja parametara	121
6.3.1.	Uzlazna promjena	121
6.3.2.	Silazna promjena	125
6.4.	Pristup temeljen na robusnom optimiranju parametara	129
6.4.1.	Formulacija problema optimiranja	129
6.4.2.	Metoda optimiranja	130
6.4.3.	Rezultati optimiranja	131
7.	Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom	135
7.1.	Formulacija problema optimiranja	135
7.1.1.	Kriteriji optimiranja i zajednička ograničenja	135
7.1.2.	Upravljačka strategija A – inicijalna formulacija	136
7.1.3.	Upravljačka strategija B – značajne mogućnosti oblikovanja profila isključnih spojki	137
7.1.4.	Upravljačka strategija C – jednostavni linearni upravljački profili isključnih spojki	138
7.1.5.	Upravljačka strategija D – poseban slučaj upravljačke strategije A	140

7.1.6.	Upravljačka strategija E – bez promjene predznaka brzine vrtnje prve uključne spojke	141
7.2.	Metoda optimiranja	141
7.3.	Rezultati optimiranja parametara	142
7.3.1.	Upravljačka strategija A	142
7.3.2.	Upravljačka strategija B	144
7.3.3.	Upravljačka strategija C	146
7.3.4.	Upravljačka strategija D	148
7.3.5.	Upravljačka strategija E	150
7.4.	Vrednovanje predloženih upravljačkih strategija	152
7.4.1.	10-6 silazna promjena, konstantan i visok ulazni moment	153
7.4.2.	Ostale promjene s dvostrukim prijelazom i drugi profili ulaznog momenta....	155
7.5.	Analiza optimalnog odziva pogona vozila za različite promjene stupnjeva prijenosa i karakteristične scenarije	160
7.5.1.	8-5 silazna promjena, konstantan i visok ulazni moment	160
7.5.2.	5-2 silazna promjena, konstantan i visok ulazni moment	163
7.5.3.	10-6 silazna promjena, linearno rastući ulazni moment	165
8.	Skalabilni zakon optimalnog upravljanja promjenom stupnja prijenosa.....	168
8.1.	Promjena s jednostrukim prijelazom	168
8.1.1.	Određivanje faktora skaliranja	168
8.1.2.	Provjera skalabilnog zakona upravljanja STS promjenom	173
8.1.3.	Proširenje skalabilnog zakona upravljanja STS promjenom sustavom regulacije	174
8.1.4.	Simulacijska provjera cjelokupnog zakona upravljanja STS promjenom uključujući analizu robusnosti	178
8.2.	Promjena s dvostrukim prijelazom	180
8.2.1.	Definicija zakona upravljanja.....	181
8.2.2.	Formulacija problema optimiranja	183
8.2.3.	Rezultati optimiranja	184
8.2.4.	Provjera skalabilnog zakona upravljanja DTS promjenom.....	185
8.2.5.	Proširenje skalabilnog zakona upravljanja DTS promjenom sustavom regulacije	188

8.2.6. Simulacijska ispitivanja cjelokupnog zakona upravljanja DTS promjenom uključujući analizu robusnosti	189
9. Zaključak	192
Literatura	198
Prilozi	205
Prilog A – Elementi veznog dijagrama	205
Prilog B – Matrice modela automatskog mjenjača punog reda	206
Prilog C – Dokaz specifične relacije između ulazne matrice B i izlazne matrice U	208
Životopis	209
Curriculum vitae	212

Popis slika

<i>Slika 1-1. Osnovne komponente automatskog mjenjača s pretvaračem momenta i s planetarnim prijenosnicima</i>	<i>2</i>
<i>Slika 1-2. Udio transmisijskih sustava na različitim tržištima u 2011. godini [2]</i>	<i>3</i>
<i>Slika 1-3. Grafički prikaz povećanja broja stupnjeva prijenosa za hod unaprijed kroz povijest razvoja automatskih mjenjača.....</i>	<i>4</i>
<i>Slika 1-4. Karakteristične faze (a) uzlazne i (b) silazne promjene stupnja prijenosa s jednostrukim prijelazom.....</i>	<i>9</i>
<i>Slika 2-1. Shematski prikaz pogona vozila s automatskim mjenjačem s pretvaračem momenta</i>	<i>18</i>
<i>Slika 2-2. Ilustracija strukture pogona vozila: (a) shema i (b) vezni dijagram.....</i>	<i>18</i>
<i>Slika 2-3. Mapa motora s unutarnjim izgaranjem: (a) 3D prikaz i (b) 2D prikaz ovisnosti momenta motora o brzini vrtnje i poziciji pedale akceleratora.....</i>	<i>19</i>
<i>Slika 2-4. Osnovne komponente pretvarača momenta.....</i>	<i>20</i>
<i>Slika 2-5. Statičke karakteristike pretvarača momenta: (a) inverz faktora kapaciteta i (b) prijenosni omjer (pojačanje) momenta</i>	<i>21</i>
<i>Slika 2-6. Uzdužna statička karakteristika autogume</i>	<i>22</i>
<i>Slika 2-7. Ilustracija uzdužnog modela dinamike vozila.....</i>	<i>23</i>
<i>Slika 2-8. Shema 10-brzinskog AT mjenjača [10].....</i>	<i>24</i>
<i>Slika 2-9. 10-brzinski automatski mjenjač: (a) shema i (b) pripadajući vezni dijagram.....</i>	<i>25</i>
<i>Slika 2-10. Blokovski dijagram strukture modela automatskog mjenjača u prostoru stanja ..</i>	<i>27</i>
<i>Slika 2-11. Model trenja: (a) poopćena statička karakteristika i njena realizacija kroz (b) klasični, (c) Karnoppov model i (d) dinamički Dahlov model</i>	<i>28</i>
<i>Slika 2-12. Principni blokovski dijagram cjelokupnog modela automatskog mjenjača temeljenog na Karnoppovom modelu trenja spojki.....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 2-13. Mrtvo vrijeme modela aktuatora spojke u ovisnosti o kapacitetu momenta spojke</i>	<i>31</i>
<i>Slika 2-14. Vezni dijagram modela 10-brzinskog automatskog mjenjača u 20-sim okruženju uključujući postavke prioriteta kauzalnosti I elemenata.....</i>	<i>32</i>
<i>Slika 2-15. Simulacijski model pogona vozila u 20-sim programskom okruženju.....</i>	<i>33</i>

<i>Slika 2-16. Simulacijski model pogona vozila u MATLAB/Simulink programskom okruženju</i>	34
<i>Slika 3-1. Ilustracija procedure za automatsko generiranje matrica modela punog reda</i>	36
<i>Slika 3-2. Ilustracija definicije ulaznih i izlaznih vektora modela mjenjača u 20-sim programskom okruženju za potrebe izvoza modela u MATLAB/Simulink</i>	37
<i>Slika 3-3. Profili kapaciteta momenta spojki, momenti spojki, brzina vrtnje SUI motora i moment izlaznog vratila transmisije za 1-2 uzlaznu promjenu</i>	40
<i>Slika 3-4. Sve promjene s jednostrukim (zeleno) i dvostrukim (plavo) prijelazom razmatranog mjenjača s 10 stupnjeva prijenosa</i>	42
<i>Slika 3-5. Ilustracija stanja spojki u toku 10-6 silazne promjene s dvostrukim prijelazom</i>	43
<i>Slika 3-6. Vezni dijagram modela reduciranog reda za 10-6 promjenu</i>	44
<i>Slika 3-7. Vezni dijagram modela reduciranog reda implementiran u 20-sim okruženju</i>	45
<i>Slika 3-8. Vezni dijagram dinamike promjene s jednostrukim prijelazom (dvije aktivne spojke)</i>	51
<i>Slika 3-9. Vezni dijagram dinamike promjene s dvostrukim prijelazom (četiri aktivne spojke)</i>	52
<i>Slika 3-10. Profili kapaciteta momenta spojki, stvarnih momenata spojki, brzine vrtnje motora i momenta izlaznog vratila transmisije za: (a) 3-4 uzlaznu i (b) 5-4 silaznu promjenu</i>	54
<i>Slika 3-11. Usporedba vremena trajanja simulacije za puni i reducirani model automatskog mjenjača i za razne promjene stupnja prijenosa koristeći: (a) klasični model trenja spojke i (b) Karnoppov model trenja spojke</i>	57
<i>Slika 3-12. Ilustracija potpuno automatskog pristupa modeliranju dinamike automatskog mjenjača polazeći od veznog dijagrama modela punog reda, uključujući postupak za reduciranje reda modela</i>	58
<i>Slika 4-1. Faze tipične uzlazne promjene s jednostrukim prijelazom</i>	61
<i>Slika 4-2. Ilustracija razvijenog optimizacijskog alata za optimiranje trajektorija upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa</i>	69
<i>Slika 4-3. Usporedni rezultati optimiranja upravljačkih varijabli 1-2 uzlazne promjene, za različite pristupe modeliranja trenja spojke</i>	71
<i>Slika 4-4. Rezultati optimiranja upravljačkih varijabli za različite scenarije upravljanja 1-2 uzlaznom promjenom</i>	73

<i>Slika 4-5. Rezultati optimiranja upravljačkih varijabli za 5-3 silaznu promjenu s jednostrukim prijelazom.....</i>	<i>74</i>
<i>Slika 4-6. Vezni dijagram ekvivalentnog DCT modela za analizu 1-2 (2-1) promjene</i>	<i>75</i>
<i>Slika 4-7. Analiza 1-2 uzlazne promjene: (a) uključen 1. stupanj prijenosa, (b) momentna faza, (c) inercijska faza, (d) uključen 2. stupanj prijenosa</i>	<i>77</i>
<i>Slika 4-8. Vezni dijagram inercijske faze promjene stupnja prijenosa uz primjenu upravljanja ulaznim momentom za 1-2 uzlaznu promjenu</i>	<i>77</i>
<i>Slika 4-9. Analiza temeljena na metodi veznih dijagrama za 2-1 silaznu promjenu: (a) inercijska faza i (b) momentna faza</i>	<i>78</i>
<i>Slika 4-10. Vezni dijagram inercijske faze promjene stupnja prijenosa uz primjenu upravljanja ulaznim momentom za 2-1 silaznu promjenu</i>	<i>79</i>
<i>Slika 5-1. Rezultati optimiranja za 8-4 silaznu promjenu s dvostrukim prijelazom</i>	<i>84</i>
<i>Slika 5-2. Rezultati optimiranja za 10-6 silaznu promjenu s dvostrukim prijelazom</i>	<i>86</i>
<i>Slika 5-3. Ilustracija glavnih karakteristika upravljačkih strategija za promjenu s dvostrukim prijelazom realiziranih nametanjem dodatnih faznih ograničenja kod optimiranja upravljačkih varijabli.....</i>	<i>89</i>
<i>Slika 5-4. Usporedni rezultati optimiranja za 10-6 promjenu s dvostrukim prijelazom za različite upravljačke strategije i razne vrijednosti normiranog težinskog faktora p_w .</i>	<i>91</i>
<i>Slika 5-5. Pareto fronte za različite upravljačke strategije i za razne vrijednosti težinskog faktora p_w (10-6 silazna promjena, $\tau_e = 550$ Nm, primijenjeno upravljanje momentom motora): (a) cjeloviti graf i (b) uvećani prikaz odsječka istaknutog na (a).....</i>	<i>93</i>
<i>Slika 5-6. Pareto fronte za različite upravljačke strategije i za razne vrijednosti težinskog faktora p_w: (a) 10-6 silazna promjena i linearno rastući moment motora od 400 do 550 Nm i (b) 8-4 silazna promjena i $\tau_e = 550$ Nm (upravljanje momentom motora primijenjeno u oba slučaja).....</i>	<i>94</i>
<i>Slika 5-7. Rezultati optimiranja upravljačkih varijabli za 10-6 silaznu promjenu za Strategiju 1</i>	<i>96</i>
<i>Slika 5-8. Rezultati optimiranja upravljačkih varijabli za 10-6 silaznu promjenu za Strategiju 2</i>	<i>97</i>
<i>Slika 5-9. Rezultati optimiranja upravljačkih varijabli za 10-6 silaznu promjenu za Strategiju 3</i>	<i>99</i>

<i>Slika 5-10. Rezultati optimiranja upravljačkih varijabli za 10-6 silaznu promjenu za Strategiju 4</i>	100
<i>Slika 5-11. Rezultati optimiranja upravljačkih varijabli za 10-6 silaznu promjenu za Strategiju 5</i>	102
<i>Slika 5-12. Rezultati optimiranja upravljačkih varijabli za 10-6 silaznu promjenu za Strategiju 6</i>	103
<i>Slika 5-13. Rezultati optimiranja upravljačkih varijabli za 10-6 silaznu promjenu s dvostrukim prijelazom za Strategiju 4 ($\tau_e = 550$ Nm, primijenjeno upravljanje momentom motora, $p_w = 1$) uključujući podjelu promjene stupnja na karakteristične faze</i>	105
<i>Slika 5-14. Vezni dijagrami za analizu dinamike promjene stupnja prijenosa s dvostrukim prijelazom za: (a) inicijalnu fazu, (b) Fazu 1, (c) Fazu 2, (d) Fazu 3, (e) Fazu 4, (f) završnu fazu i za 10-6 promjenu i upravljačku strategiju 4</i>	108
<i>Slika 5-15. Vezni dijagram za analizu inercijske faze 10-6 promjene uz primjenu: (a) Strategije 1, (b) Strategije 2 i (c) Strategije 3</i>	111
<i>Slika 6-1. Definicija po odsječcima linearnih profila kapaciteta momenata spojki i redukcije momenta motora za uzlaznu promjenu s jednostrukim prijelazom</i>	114
<i>Slika 6-2. Definicija po odsječcima linearnih profila kapaciteta momenata spojki i redukcije momenta motora za silaznu promjenu s jednostrukim prijelazom</i>	116
<i>Slika 6-3. Ilustracija Pareto optimalnih rješenja</i>	119
<i>Slika 6-4. Implementacija više-kriterijskog optimiranja parametara u modeFRONTIER okruženju</i>	121
<i>Slika 6-5. Rezultati optimiranja parametara za 1-2 uzlaznu promjenu</i>	123
<i>Slika 6-6. Usporedba odziva pogona tijekom 1-2 uzlazne promjene ($p_{th} = 0.5$) dobivenih primjenom optimalnih upravljačkih profila (stupanj agilnosti = 5; puna linija) i optimalnih upravljačkih trajektorija ($t_{inertia} = 445$ ms; isprekidana linija)</i>	125
<i>Slika 6-7. Rezultati optimiranja parametara za 2-1 silaznu promjenu</i>	127
<i>Slika 6-8. Usporedba odziva pogona tijekom 2-1 silazne promjene ($p_{th} = 0.5$) dobivenih primjenom optimalnih upravljačkih profila (stupanj agilnosti = 5; puna linija) i optimalnih upravljačkih trajektorija ($t_{inertia} = 572$ ms; isprekidana linija)</i>	128
<i>Slika 6-9. Rezultati robusnog parametarskog optimiranja za 1-2 uzlaznu promjenu</i>	132

<i>Slika 6-10. Usporedba odziva pogona tijekom 1-2 uzlazne promjene ($p_{th} = 0.5$) dobivenih primjenom upravljačkih profila generiranih korištenjem robusnog parametarskog (puna linija, crna boja) i parametarskog optimiranja (isprekidana linija, siva boja) za različite vrijednosti razmatranih parametara nesigurnosti</i>	<i>133</i>
<i>Slika 6-11. Analiza dobivenih rezultata robusnog i standardnog parametarskog optimiranja: (a) indeksi performansi promjene stupnja prijenosa i (b) distribucije indeksa performansi</i>	<i>134</i>
<i>Slika 7-1. Po odsječcima linearna aproksimacija upravljačkih profila aktuatora promjene stupnja prijenosa s dvostrukim prijelazom: definicije profila kapaciteta momenta spojki za (a) Strategiju A, (b) Strategiju B, (c) Strategiju C, (d) Strategiju D, (e) Strategiju E i (g) profil redukcije momenta motora (za sve strategije)</i>	<i>139</i>
<i>Slika 7-2. Ilustracija odziva brzina klizanja spojki za 10-6 silaznu promjenu (a) te ograničenja na predznak brzine klizanja ONC1 spojke za Strategiju E (b)</i>	<i>140</i>
<i>Slika 7-3. Rezultati optimiranja parametara za 10-6 silaznu promjenu ($\tau_e = 550$ Nm, Strategija A)</i>	<i>144</i>
<i>Slika 7-4. Rezultati optimiranja parametara za 10-6 silaznu promjenu ($\tau_e = 550$ Nm, Strategija B)</i>	<i>146</i>
<i>Slika 7-5. Rezultati optimiranja parametara za 10-6 silaznu promjenu ($\tau_e = 550$ Nm, Strategija C)</i>	<i>148</i>
<i>Slika 7-6. Rezultati optimiranja parametara za 10-6 silaznu promjenu ($\tau_e = 550$ Nm, Strategija D)</i>	<i>150</i>
<i>Slika 7-7. Rezultati optimiranja parametara za 10-6 silaznu promjenu ($\tau_e = 550$ Nm, Strategija E)</i>	<i>152</i>
<i>Slika 7-8. Usporedba Pareto fronti dobivenih primjenom različitih parametarski optimiranih DTS upravljačkih strategija (10-6 silazna promjena, $\tau_e = 550$ Nm)</i>	<i>154</i>
<i>Slika 7-9. Ilustracija hipervolumnog pokazatelja i pokazatelja razapetosti Pareto fronte na normiranim Pareto frontama</i>	<i>157</i>
<i>Slika 7-10. Indeksi performansi promjene stupnja prijenosa i pokazatelj razapetosti Pareto fronte za različite DTS silazne promjene, različite DTS strategije upravljanja i za: (a) konstantan i visok ulazni moment ($\tau_e = 550$ Nm), (b) konstantan i umjeren ulazni moment ($\tau_e = 250$ Nm) i (c) linearno rastući ulazni moment ($\tau_e = 100 - 550$ Nm)</i>	<i>159</i>

<i>Slika 7-11. Usporedba Pareto fronti dobivenih primjenom različitih DTS upravljačkih strategija (8-5 silazna promjena, $\tau_e = 550$ Nm)</i>	<i>161</i>
<i>Slika 7-12. Odziv pogona za 8-5 silaznu promjenu ($\tau_e = 550$ Nm) dobiven uz primjenu optimalnih upravljačkih profila za upravljačku Strategiju B (a1)-(e1) i Strategiju C (a2)-(e2) (pune linije), uključujući usporedbu s odzivom pogona dobivenog optimiranjem upravljačkih trajektorija (upravljačka Strategija 1, odnosno 4; isprekidane linije).....</i>	<i>163</i>
<i>Slika 7-13. Rezultati parametarskog optimiranja za 5-2 silaznu promjenu ($\tau_e = 550$ Nm): (a) usporedba Pareto fronti dobivenih primjenom različitih DTS strategija upravljanja, (b) uvećani prikaz odsječka istaknutog na (a), (c)-(g) odziv pogona za Strategiju C i odabrano rješenje ($t_{inertia} = 511$ ms; pune linije), uključujući usporedbu s odzivom dobivenog optimiranjem upravljačkih trajektorija (Strategija 4; isprekidane linije)</i>	<i>165</i>
<i>Slika 7-14. Rezultati parametarskog optimiranja za 10-6 silaznu promjenu (linearno rastući τ_e od 100 Nm do 550 Nm): (a) usporedba Pareto fronti dobivenih primjenom različitih DTS strategija upravljanja, (b) uvećani prikaz odsječka istaknutog na (a), (c)-(g) odziv pogona za Strategiju A i odabrano rješenje ($t_{inertia} = 448$ ms; pune linije), uključujući usporedbu s odzivom dobivenog optimiranjem upravljačkih trajektorija (Strategija 1; isprekidane linije)</i>	<i>167</i>
<i>Slika 8-1. Optimalne trajektorije momenta uključne spojke (a) i momenta redukcije motora (b) za dva položaja pedale akceleratora ($\omega_{e0} = 2500$ okr/min).....</i>	<i>170</i>
<i>Slika 8-2. Ovisnost faktora skaliranja momenta uključne spojke i redukcije momenta motora o položaju pedale akceleratora i brzini vrtnje motora za 1-2 promjenu: (a), (b) 3D prikaz i (c), (d) 2D prikaz.....</i>	<i>171</i>
<i>Slika 8-3. Aproksimacija faktora skaliranja (a) momenta uključne spojke i (b) redukcije momenta motora sa slike 8-2 polinomima trećeg reda za 1-2 promjenu.....</i>	<i>172</i>
<i>Slika 8-4. Blokovski dijagram strukture regulacijskog kruga brzine klizanja uključne spojke</i>	<i>175</i>
<i>Slika 8-5. Definicija pojačanja parametara regulatora u ovisnosti o tijeku inercijske faze .</i>	<i>176</i>
<i>Slika 8-6. Referenca brzine klizanja uključne spojke u inercijskoj fazi uzlazne promjene s jednostrukim prijelazom.....</i>	<i>176</i>
<i>Slika 8-7. Rezultati optimiranja parametara regulatora brzine klizanja uključne spojke za 1-2 promjenu stupnja prijenosa.....</i>	<i>178</i>

<i>Slika 8-8. Distribucije parametara nesigurnosti aktuatorskog sustava i vanjskih poremećajnih parametara za ispitivanje sustava regulacije 1-2 promjene</i>	<i>179</i>
<i>Slika 8-9. Rezultati analize simulacijskih ispitivanja sustava upravljanja s i bez uključenog regulatora za 1-2 promjenu: (a) indeksi performansi za razne vrijednosti parametara nesigurnosti i vanjskih parametara i (b) distribucije indeksa performansi</i>	<i>180</i>
<i>Slika 8-10. Definicija profila kapaciteta momenta spojke i redukcije momenta motora za skalabilni zakon promjene stupnja prijenosa s dvostrukim prijelazom</i>	<i>182</i>
<i>Slika 8-11. Rezultati optimiranja parametara skalabilnog zakona upravljanja za 10-6 promjenu s dvostrukim prijelazom (10-6 primjer): (a) evolucija rješenja tijekom brojnih iteracija genetskog algoritma, (b) izdvojena Pareto optimalna rješenja</i>	<i>185</i>
<i>Slika 8-12. Odziv pogona vozila za 10-6 promjenu izvedenu korištenjem skalabilnog zakona upravljanja (pune linije), uključujući usporedbu s odzivom dobivenim primjenom optimalnih upravljačkih profila za razmatrani slučaj (isprekidane linije): (a1)-(e1) $p_{th} = 0.8$, $\omega_{e0} = 1750$ okr/min; i (a2)-(e2) $p_{th} = 1$, $\omega_{e0} = 2250$ okr/min</i>	<i>188</i>
<i>Slika 8-13. Distribucije parametara nesigurnosti aktuatorskog sustava spojke i vanjskih poremećajnih parametara za ispitivanje sustava upravljanja 10-6 promjene</i>	<i>190</i>
<i>Slika 8-14. Analiza simulacijskih ispitivanja za 10-6 promjenu: (a) indeksi performansi za razne vrijednosti parametara nesigurnosti i vanjskih parametara i (b) distribucije indeksa performansi</i>	<i>191</i>
<i>Slika A-1. Korišteni elementi veznog dijagrama i pripadajuće jednadžbe [62]</i>	<i>205</i>

Popis tablica

<i>Tablica 2-1. Tablica stanja spojki u pojedinim stupnjevima prijenosa 10-brzinskog AT mjenjača [10]</i>	<i>24</i>
<i>Tablica 3-1. Usporedba RMS odstupanja između odziva momenta izlaznog vratila automatskog mjenjača dobivenog simulacijom analitički izvedenog i automatski generiranog modela mjenjača punog reda za različite uzlazne promjene s jednostrukim prijelazom.....</i>	<i>41</i>
<i>Tablica 3-2. Usporedba numeričke učinkovitosti i točnosti modela pogona vozila temeljenih na modelu mjenjača punog i reduciranog reda za različite modele trenja spojke (rezultati su uprosječeni za razne promjene stupnja prijenosa)</i>	<i>56</i>
<i>Tablica 4-1. Ograničenja aktivnih spojki vezana uz faze promjene stupnja prijenosa.....</i>	<i>61</i>
<i>Tablica 4-2. Usporedba vrijednosti indeksa trzaja vozila i energije disipirane u spojkama za 1-2 uzlaznu promjenu i za različite scenarije upravljanja i različite formulacije funkcije cilja</i>	<i>72</i>
<i>Tablica 4-3. Usporedba vrijednosti indeksa trzaja vozila za različite scenarije optimiranja .</i>	<i>80</i>
<i>Tablica 4-4. Usporedba vremena izvođenja optimiranja i stope uspješnosti za različite scenarije optimiranja</i>	<i>81</i>
<i>Tablica 5-1. Dodatna ograničenja vezana uz faze promjene stupnja prijenosa za ostvarenje različitih DTS upravljačkih strategija unutar optimizacijskog okvira (vrijedi za 10-6 primjer promjene; ograničenja za početnu, momentnu i završnu fazu ostaju ista kao što je definirano u tablici 4-1).....</i>	<i>88</i>
<i>Tablica 6-1. Vrijednosti indeksa trzaja vozila i energije disipirane u spojkama za parametarski optimiranu 1-2 uzlaznu promjenu i za različite stupnjeve agilnosti, uključujući relativna odstupanja u odnosu na rezultate optimiranja upravljačkih varijabli</i>	<i>124</i>
<i>Tablica 6-2. Usporedba vrijednosti indeksa trzaja vozila i energije disipirane u spojkama za 2-1 silaznu promjenu i za različite stupnjeve agilnosti.....</i>	<i>126</i>
<i>Tablica 7-1. Usporedba vrijednosti indeksa trzaja vozila i energije disipirane u spojkama za 10-6 silaznu promjenu za različita trajanja inercijske faze i za različite upravljačke strategije.....</i>	<i>155</i>

<i>Tablica 7-2. Rezultati konačnog vrednovanja DTS upravljačkih strategija dobiveni usrednjavanjem vrijednosti pokazatelja performansi sa slike 7-10.....</i>	<i>160</i>
<i>Tablica 8-1. Pokazatelji kvalitete prilagođenosti modela skaliranja momenta uključne spojke i redukcije momenta motora za različite početne brzine vrtnji motora</i>	<i>173</i>
<i>Tablica 8-2. Vrijednosti indeksa trzaja vozila dobivene primjenom optimalnih upravljačkih profila i skaliranih upravljačkih profila za razne radne točke motora kod kojih se inicira promjena s jednostrukim prijelazom (1-2 primjer)</i>	<i>174</i>
<i>Tablica 8-3. Optimalne vrijednosti parametara za izabrano Pareto optimalno rješenje.....</i>	<i>185</i>
<i>Tablica 8-4. Vrijednosti indeksa trzaja vozila dobivene primjenom optimalnih upravljačkih profila i skalabilnog zakona upravljanja za razne položaje pedale akceleratora i početnu brzinu vrtnje motora od 1750 okr/min.....</i>	<i>186</i>
<i>Tablica 8-5. Vrijednosti indeksa trzaja vozila dobivene primjenom optimalnih upravljačkih profila i skalabilnog zakona upravljanja za razne položaje pedale akceleratora i početnu brzinu vrtnje motora od 2250 okr/min.....</i>	<i>187</i>

Popis oznaka i kratica

Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
A	-	Matrica inercija modela automatskog mjenjača
A_d	m ²	Površina frontalnog dijela vozila
A_{red}	-	Matrica inercija modela automatskog mjenjača reduciranog reda (reducirana forma matrice A)
B	-	Ulazna matrica modela automatskog mjenjača
b_a	Ns/m	Koeficijent prigušenja ekvivalentnog elastičnog vratila
b_{hs}	Ns/m	Koeficijent prigušenja pojedinačnog poluvratila
B_{red}	-	Ulazna matrica modela automatskog mjenjača reduciranog reda (reducirana forma matrice B)
b_t	Ns/m	Koeficijent prigušenja automobilske gume
C_d	-	Koeficijent aerodinamičkog otpora
$\bar{d}_{J1}$	-	Normirana udaljenost između dvije krajnje točke Pareto fronte
E_{loss}	J	Ukupna energija disipirana u spojkama tijekom promjene stupnja prijenosa
f	-	Opća funkcija modela trenja spojke
F_{drag}	N	Sila aerodinamičkog otpora
f_e	-	Funkcija momenta motora s unutarnjim izgaranjem
F_{grade}	N	Sila otpora uslijed nagiba ceste
F_t	N	Uzdužna sila na gumi (sila trakcije)
F_L	N	Ukupna sila otpora

Popis oznaka i kratica

F_{roll}	N	Sila otpora kotrljanja
f_{sENG}	-	Faktor skaliranja redukcije momenta motora
f_{sONC}	-	Faktor skaliranja momenta uključne spojke
g_{eng}	-	Pojačanje momenta motora
$g_{h,ONC}$	-	Pojačanje kapaciteta momenta uključne spojke
H_c	-	Prijenosni omjer ciljanog stupnja prijenosa
h_i	-	Prijenosni omjer i -tog planetarnog prijenosnika
H_p	-	Prijenosni omjer polaznog stupnja prijenosa
I_{ei}	kgm ²	Ukupan moment inercije motora i pumpe pretvarača momenta
i_d	-	Prijenosni omjer diferencijala
$\bar{I}_{hv}$	-	Normirani hipervolumni pokazatelj
i_j, g_j, h_j	-	Ekvivalentni prijenosni omjeri j -te spojke modela reduciranog reda u formi veznog dijagrama
I_w	kgm ²	Moment inercije kotača
J	m ² /s ⁵	Funkcija cilja problema optimiranja trajektorija upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa
J_1	s	Ukupno trajanje promjene stupnja prijenosa – prvi kriterij više-kriterijskog optimiranja parametara upravljačkih profila promjene stupnja prijenosa (očekivana vrijednost kod robusnog optimiranja parametara)
J_2	m/s ³	Korijen srednjeg kvadrata trzaja vozila – drugi kriterij više-kriterijskog optimiranja parametara upravljačkih profila promjene stupnja prijenosa (očekivana vrijednost kod robusnog optimiranja parametara)

J_3	s	Standardno odstupanje ukupnog trajanja promjene stupnja prijenosa – treći kriterij kod robusnog optimiranja parametara
J_4	m/s ³	Standardno odstupanje korijena srednjeg kvadrata trzaja vozila – četvrti kriterij kod robusnog optimiranja parametara
J_{opt}	m ² /s ⁵	Najmanja vrijednost funkcije cilja J za razmatrani raspon broja kolokacijskih točaka
j_{RMS}	m/s ³	Indeks korijena srednjeg kvadrata trzaja vozila
k_a	N/m	Koeficijent krutosti ekvivalentnog elastičnog vratila
k_c	(kgms) ⁻²	Pomoćni težinski faktor funkcije cilja J
k_d	s	Podšavajući parametar modificiranog Dahlova modela trenja
k_{hs}	N/m	Koeficijent krutosti pojedinačnog poluvratila
K_i	rad/s(Nm) ^{1/2}	Faktor kapaciteta pretvarača momenta
K_P, K_I, K_D	-	Pojačanja PID regulatora
k_w	(kgm) ⁻²	Glavni težinski faktor funkcije cilja J
$\mathbf{L}$	-	Ekvivalentna matrica modela automatskog mjenjača
$\mathbf{L}_{red}, \mathbf{\Lambda}_{red}$	-	Ekvivalentna matrica modela automatskog mjenjača reduciranog reda (reducirana forma matrice $\mathbf{L}$)
$\mathbf{L}_{stick}, \mathbf{L}_{slip,io}$		Pod-matrice matrice $\mathbf{L}$
$\mathbf{M}$	-	Matrica vremenskih derivacija brzina klizanja spojki modela automatskog mjenjača
M	-	Broj početnih projekata genetskog algoritma
$\mathbf{M}_s, \mathbf{M}_{stick}$	-	Pod-matrica matrice $\mathbf{M}$ koja obuhvaća retke matrice $\mathbf{M}$ koji odgovaraju zatvorenim spojkama

$\mathbf{M}_{slip,io}$	-	Pod-matrica matrice $\mathbf{M}$ koja obuhvaća retke matrice $\mathbf{M}$ koji odgovaraju klizećim spojka te ulaznom i izlaznom vratilu mjenjača
m_v	kg	Masa vozila
$m_{v,add}$	kg	Dodatna masa vozila
N	-	Broj uzoraka vektora koji sadrže vrijednosti parametara nesigurnosti
n	-	Broj varijabli stanja modela automatskog mjenjača – red modela automatskog mjenjača
n_{cl}	-	Broj spojki modela automatskog mjenjača
$n_{cl,ctrl}$	-	Broj parametara upravljačkog vektora $\mathbf{p}_{ctrl}$ koji opisuju profile kapaciteta momenta spojki
n_{ctrl}	-	Dužina vektora $\mathbf{p}_{ctrl}$ - broj parametara koji se optimiraju
n_{dep0}	-	Broj polaznih energetski zavisnih varijabli modela automatskog mjenjača
n_{e0}	okr/min	Početna brzina vrtnje motora
$n_{eng,ctrl}$	-	Broj parametara upravljačkog vektora $\mathbf{p}_{ctrl}$ koji opisuju profil redukcije momenta motora
n_{in}	-	Broj ulaznih varijabli modela automatskog mjenjača
n_{red}	-	Red modela reduciranog reda
n_{st}	-	Broj zatvorenih spojki modela automatskog mjenjača
$\mathbf{p}_{cl}$	-	Pod-vektor upravljačkog vektora $\mathbf{p}_{ctrl}$ koji sadrži parametre koji opisuju profile kapaciteta momenta spojki
$\mathbf{p}_{ctrl}$	-	Upravljački vektor koji sadrži parametre loma upravljačkih profila koji se optimiraju

Popis oznaka i kratica

$\mathbf{p}_{eng}$	-	Pod-vektor upravljačkog vektora $\mathbf{p}_{ctrl}$ koji sadrži parametre koji opisuju profil redukcije momenta motora
$\mathbf{p}_{skal}$	-	Vektor koji sadrži parametre skalabilnog zakona upravljanja koji se optimiraju
PDP	%	Postotak dovršenosti promjene stupnja prijenosa
p_{th}	-	Položaj pedale akceleratora
p_w	(kgm) ⁻²	Normirani faktor penalizacije energije
r_r	m	Polumjer kolutnog zupčanika
r_s	m	Polumjer sunčanog zupčanika
r_t	m	Efektivni polumjer automobilske gume
R_τ	-	Prijenosni omjer momenata pretvarača momenta
R_ω	-	Prijenosni omjer brzina vrtnji pretvarača momenta
$\mathbf{s}$	-	Binarni vektor stanja spojki
$\mathbf{s}_p$	-	Vektor prioriteta varijabli stanja
S_{ratio}	-	Trenutni prijenosni omjer brzina mjenjača
$\mathbf{T}$	-	Matrica energetski zavisnih varijabli modela automatskog mjenjača
$\bar{T}_C$	-	Normirani Coulombov moment trenja
T_{cl}	s	Vremenska konstanta modela aktuatora spojke
$T_{Dcl}, \tilde{T}_{Dcl}$	s	Mrtvo vrijeme modela aktuatora spojke
$t_{exc,avg}$	s	Prosječno vrijeme izvođenja simulacije
$t_{exc,max}$	s	Maksimalno vrijeme izvođenja simulacije
$t_{exc,min}$	s	Minimalno vrijeme izvođenja simulacije
t_{exe}	s	Vrijeme izvođenja optimiranja trajektorija upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa

Popis oznaka i kratica

t_e	s	Trajanje završne faze promjene stupnja prijenosa
t_f	s	Vrijeme trajanja simulacije
$t_i, t_{inertia}$	s	Trajanje inercijske faze promjene stupnja prijenosa
$t_{inertia,des}$	s	Željeno trajanje inercijske faze
$t_{i,end}$	s	Vremenski trenutak u kojem završava inercijska faza promjene stupnja prijenosa
t_{init}	s	Vremenski trenutak iniciranja promjene stupnja prijenosa
$\mathbf{T}_{red}$	-	Matrica energetski zavisnih varijabli modela automatskog mjenjača reduciranog reda (reducirana forma matrice $\mathbf{T}$)
$\mathbf{T}_{red0}, \mathbf{T}_{dep}$	-	Pod-matrice matrice $\mathbf{T}$
$\bar{T}_s$	-	Normirani maksimalni statički moment trenja
t_s	s	Trajanje inicijalne faze promjene stupnja prijenosa
t_{shift}	s	Ukupno trajanje promjene stupnja prijenosa
t_t, t_{torque}	s	Trajanje momentne faze promjene stupnja prijenosa
$\mathbf{U}$	-	Proširena matrica brzina klizanja spojki modela automatskog mjenjača
$\mathbf{U}_{cl}$	-	Matrica brzina klizanja spojki modela automatskog mjenjača
$\mathbf{U}_{cl,red}$	-	Matrica brzina klizanja spojki modela automatskog mjenjača reduciranog reda (reducirana forma matrice $\mathbf{U}_{cl}$)
$\mathbf{U}_{oi}$	-	Pod-matrica matrice $\mathbf{U}$ koja obuhvaća retke matrice $\mathbf{U}$ koji odgovaraju ulaznom i izlaznom vratilu
$\mathbf{U}_{oi,red}$	-	Reducirana forma matrice $\mathbf{U}_{oi}$
$\mathbf{U}_{red}$	-	Proširena matrica brzina klizanja spojki modela automatskog mjenjača reduciranog reda (reducirana forma matrice $\mathbf{U}$)

Popis oznaka i kratica

U_{red0}, U_{dep}	-	Pod-matrice matrice U
v_v	m/s	Uzdužna brzina vozila
X	-	Ulazna matrica momenata za identifikaciju matrica modela automatskog mjenjača
Y	-	Izlazna matrica za identifikaciju matrica modela automatskog mjenjača
$Y_{\omega}, Y_{\omega_s}, Y_{\ddot{\omega}_s}, Y_{\ddot{\omega}}$	-	Pod-matrice izlazne matrice Y
z	m	Horizontalna deformacija asperitnih kontakata Dahlova modela trenja u području držanja
Z	-	Matrica linearne relacije između novih energetski zavisnih varijabli stanja i novoizabranih varijabli stanja modela automatskog mjenjača reduciranog reda
δ	-	Stribeckov faktor
$\Delta\tau_{ec}$	Nm	Iznos redukcije okretnog momenta motora s unutarnjim izgaranjem
$\Delta\omega$	rad/s	Prag brzine klizanja spojke kojim se aproksimira zona držanja
$\bar{\eta}_{sh}$	-	Normirani pokazatelj učinkovitosti promjene
η_t	m/s	Uzdužno klizanje
θ	rad	Kut nagiba ceste
$\theta\%$	%	Nagib ceste
κ	-	Faktor podešavanja pojačanja PID regulatora
Λ	-	Ekvivalentna matrica modela automatskog mjenjača nakon redukcije reda modela

Λ_{dep}	-	Pod-matrica matrice Λ koja obuhvaća retke matrice Λ koji odgovaraju novim energetski zavisnim varijablama
v_w	m/s	Brzina središta autogume
ρ	kg/m ³	Gustoća zraka
Γ	-	Matrica momenata zatvorenih spojki
σ_0	N/m	Koeficijent horizontalne krutosti kontakta Dahlova modela trenja
σ_1	Ns/m	Koeficijent prigušenja Dahlova modela trenja
σ_2	-	Normirani koeficijent viskoznog trenja
τ_e	Nm	Okretni moment motora s unutarnjim izgaranjem
$\dot{\tau}_{e,min}, \dot{\tau}_{e,max}$	Nm/s	Limiti brzine promjene momenta motora
τ_{fj}	Nm	(Stvarni) moment j -te spojke
$\dot{\tau}_{f,min}, \dot{\tau}_{f,max}$	Nm/s	Limiti brzine promjene momenta spojke
τ_{hj}	Nm	Kapacitet momenta j -te spojke
$\tau_{h,dynj}$	Nm	Dinamički kapacitet momenta j -te spojke
$\tau_{h,max}$	Nm	Gornji limit kapaciteta momenta spojke
$\dot{\tau}_{h,min}, \dot{\tau}_{h,max}$	Nm/s	Limiti brzine promjene kapaciteta momenta spojke
τ_{hs}	Nm	Okretni moment ekvivalentnog elastičnog vratila
τ_i	Nm	Okretni moment pumpe pretvarača momenta
τ_{in}, τ_{in}^*	-	Vektor ulaza modela automatskog mjenjača
τ_{is}	Nm	Okretni moment ulaznog vratila mjenjača
τ_{ONC}	Nm	Okretni moment uključne spojke
τ_{os}	Nm	Okretni moment izlaznog vratila mjenjača
$\tau_{os,RMSE}$	Nm	RMS pogreška momenta izlaznog vratila

Popis oznaka i kratica

τ_{slip}	Nm	Moment spojke koja kliže
$\mathbf{\tau}_{slip}$	Nm	Vektor momenata spojki koje kližu
$\mathbf{\tau}_{slip,io}$	Nm	Vektor $\mathbf{\tau}_{slip}$ proširen momentima ulaznog i izlaznog vratila mjenjača
τ_{stick}	Nm	Moment primijenjen na zatvorenu spojku
$\mathbf{\tau}_{stick}$	Nm	Vektor momenata primijenjenih na zatvorene spojke
τ_t	Nm	Okretni moment turbine pretvarača momenta
φ_{hs}	rad	Kut zakreta poluvratila
$\mathbf{\omega}$	-	Vektor brzina klizanja spojki i brzina vrtnji ulaznog i izlaznog vratila modela
$\tilde{\mathbf{\omega}}$	-	Vektor energetski zavisnih varijabli modela automatskog mjenjača
$\hat{\mathbf{\omega}}$	-	Jedinstveni izlazni vektor varijabli modela automatskog mjenjača
$\mathbf{\omega}_{cl}$	-	Vektor brzina klizanja spojki
$\mathbf{\omega}_{cl,st}$	-	Vektor brzina klizanja zatvorenih spojki
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
ω_{ONC}	rad/s	Brzina klizanja uključne spojke
ω_{os}	rad/s	Brzina vrtnje izlaznog vratila mjenjača
$\mathbf{\omega}_s$	-	Vektor varijabli stanja modela automatskog mjenjača
$\omega_{s1}, \omega_{s2}, \omega_{s3}$	rad/s	Varijable stanja modela automatskog mjenjača reduciranog reda koje ovise o vektoru prioriteta varijabli stanja $\mathbf{s}_p$

Popis oznaka i kratica

$\mathbf{\omega}_{s,red}$	-	Vektor varijabli stanja modela automatskog mjenjača reduciranog reda
$\mathbf{\omega}_{s,dep}$	-	Vektor novih energetski zavisnih varijabli
ω_{st}	rad/s	Stribeckova brzina
ω_t	rad/s	Brzina vrtnje turbine pretvarača momenta
ω_x	rad/s	Dodatna (treća) nezavisna varijabla stanja kod modela automatskog mjenjača reduciranog reda za promjenu s dvostrukim prijelazom
ω_w	rad/s	Brzina vrtnje kotača

Popis kratica

AM	Automatski mjenjač
DCT	Transmisija s dvostrukom spojkom (<i>engl. Dual-Clutch Transmission</i>)
DOE	Planiranje pokusa (<i>engl. Design of Experiments</i>)
DTS	Promjena s dvostrukim prijelazom (<i>engl. Double-Transition Shift</i>)
GA	Genetski algoritam (<i>engl. Genetic Algorithm</i>)
MOGA	Više-kriterijski genetski algoritam (<i>engl. Multi-Objective Genetic Algorithm</i>)
MOR	Reduciranje reda modela (<i>engl. Model Order Reduction</i>)
MORDO	Više-kriterijsko robusno optimiranje (<i>engl. Multi-Objective Robust Design Optimization</i>)
MSUI	Motor s unutarnjim izgaranjem
NLP	Nelinearno programiranje (<i>engl. NonLinear Programming</i>)
OFG	Isključna spojka (<i>engl. OFf-Going clutch</i>)
ONC	Uključna spojka (<i>engl. ONComing clutch</i>)
RMS	Korijen srednjih kvadrata (<i>engl. Root-Mean-Square</i>)
STS	Promjena s jednostrukim prijelazom (<i>engl. Single-Transition Shift</i>)

1. Uvod

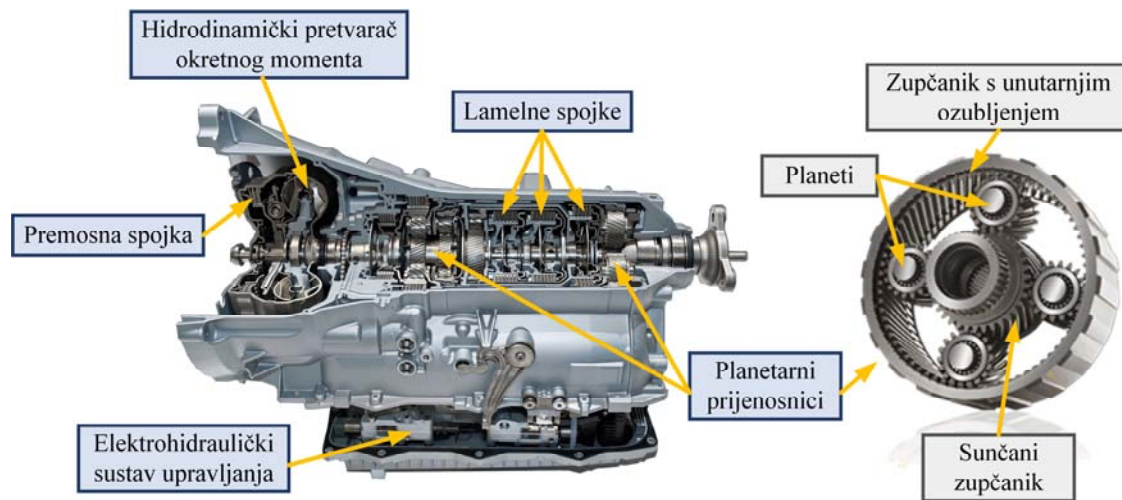
1.1. Motivacija

Mjenjač predstavlja središnji dio sustava prijenosa snage vozila i omogućuje prijenos pogonskog momenta motora s unutarnjim izgaranjem (MSUI) na kotače uz primjenu različitih prijenosnih omjera. Mjenjač se nalazi između MSUI i diferencijala, a njegovi osnovni zadaci su [1]: pojačati i prenijeti okretni moment motora, prilagoditi brzinu vrtnje, omogućiti rad motora uz zaustavljeno vozilo (prazni hod), te promijeniti smjer okretanja i omogućiti vožnju unazad. Naime, poznato je da MSUI rade u području između određenoga najmanjega i najvećeg broja okretaja te da ne mogu izravno dati zakretni moment potreban za svladavanje otpora vožnje i velikih inercijskih sila pri pokretanju vozila. Stoga se između motora i pogonske osovine kotača mora smjestiti reduktor kojim se pojačava relativno mali okretni moment motora i reducira visoki broj okretaja motora na potreban niži broj okretaja kotača. Jednom jedinom, stalnom redukcijom broja okretaja vozilo bi bilo usko ograničeno u rasponu brzina i opterećenja. Da bi se puna snaga motora mogla iskoristiti u širem području brzina vozila uz ekonomičan rad MSUI, ugrađuju se reduktori s promjenjivim prijenosnim omjerom ili mjenjači stupnja prijenosa [1].

Rad mjenjača stupnja prijenosa može biti automatiziran. Pritom razlikujemo poluautomatske i automatske mjenjače [1]. Kod poluautomatskih mjenjača isključenje, odnosno uključanje prijenosa okretnog momenta (isključenje/uključanje spojke) je automatsko, dok se sama promjena stupnja prijenosa izvodi voljom vozača (ručno). S druge strane, kod automatskih mjenjača (skraćenica AM), promjena stupnja prijenosa je automatska. Automatski mjenjači mogu biti s konačnim (diskretnim) i beskonačnim brojem prijenosnih omjera (kontinuirani). Među temeljnim izvedbama automatskih mjenjača, koje obuhvaćaju kontinuirane varijabilne transmisije (*engl. Continuously Variable Transmission, CVT*), transmisije s dvostrukom spojkom (*engl. Dual-Clutch Transmission, DCT*) i automatizirane manualne transmisije (*engl. Automated Manual Transmission, AMT*), globalnim tržištem i dalje dominiraju automatski mjenjači s planetarnim prijenosnicima (v. sliku 1-2 i [2], uz napomenu da je *engl. skraćenica* za tu vrstu automatskog mjenjača AT). Ovaj rad prvenstveno će se odnositi na automatski

1. Uvod

mjenjač s planetarnim prijenosnicima, koji je još poznat i pod nazivom automatski mjenjač s pretvaračem momenta (nadalje u radu, pod skraćenicom AM podrazumijeva se upravo ova izvedba mjenjača). Osnovne komponente AM su (slika 1-1): hidrodinamički pretvarač okretnog momenta s prenosnom spojkom, veći broj lamelnih spojki i planetarnih prijenosnika, te elektrohidraulički sustav upravljanja. Planetarni prijenosnik sastoji se od zupčanika s unutarnjim ozubljenjem, planeta s nosačima planeta, te sunčanog zupčanika (slika 1-1).

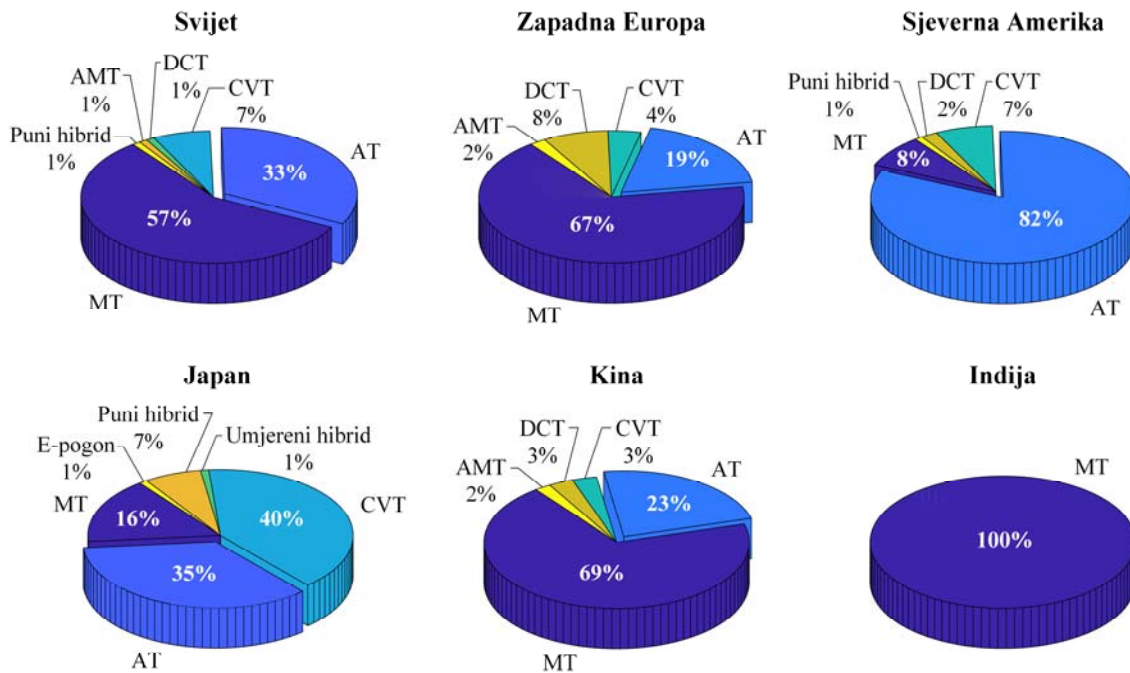


Slika 1-1. Osnovne komponente automatskog mjenjača s pretvaračem momenta i s planetarnim prijenosnicima - presječni pogled automatskog mjenjača ZF – 8HP70

U novije vrijeme, pritisnuti sve strožim propisima o emisijama štetnih plinova i potrošnji goriva, te stalnim tržišnim natjecanjem, proizvođači se okreću razvoju AM koji uključuju veliki broj stupnjeva prijenosa (i do 10), čime poboljšavaju energetska učinkovitost pogona, a time i smanjuju potrošnju goriva i emisiju štetnih plinova [3]–[5]. Slika 1-3 ilustrira povećanje broja stupnjeva prijenosa za hod unaprijed kroz povijest [6]. Povećanje broja stupnjeva prijenosa bilo je relativno sporo od pojavljivanja prvog automatskog mjenjača 1964. godine do 2002. godine, nakon čega nagib krivulje počinje značajno rasti. Iako prema nekim autorima povećanje broja stupnjeva prijenosa iznad 10 ne donosi daljnje prednosti [3], zadnjih godina pojavljuju se patenti 11-brzinskih mjenjača [7]–[9]. Osim poboljšane energetske učinkovitosti, veći broj stupnjeva prijenosa donosi poboljšanu udobnost vožnje, poboljšane performanse vozila, ali i složenije upravljanje. Naime, tijekom razvoja, AM je evoluirao u kompleksan, visoko-integrirani mehatronički sustav s visokim zahtjevima korisnika. Osim toga, kod AM s velikim brojem stupnjeva prijenosa često se javlja potreba za preskakanjem određenih stupnjeva

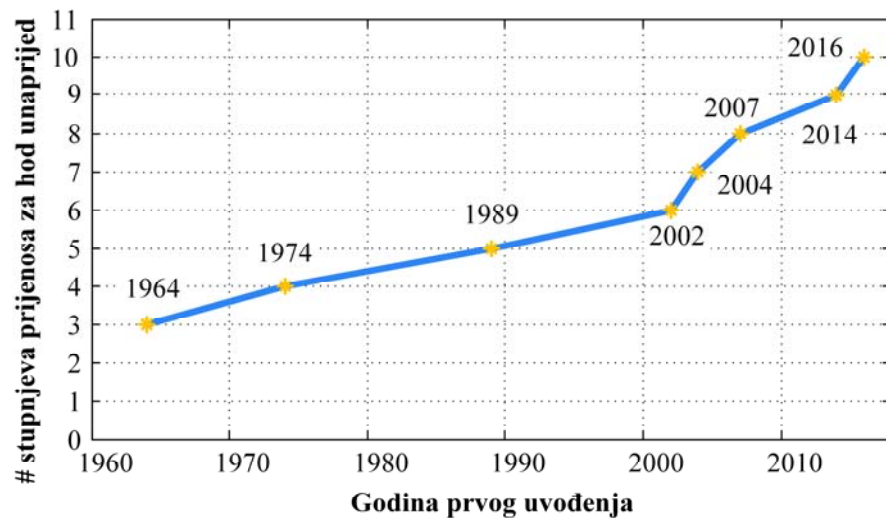
1. Uvod

prijenosa, posebice u silaznim promjenama (iz višeg stupnja prijenosa u niži). U takvim preskočno-silaznim promjenama, može se javiti tzv. promjena s dvostrukim prijelazom koja je posebno zahtjevnja sa stanovišta upravljanja jer se koristi veći broj spojki (v. odjeljak 1.2.2 za više detalja).



Slika 1-2. Udio transmisijskih sustava na različitim tržištima u 2011. godini [2]

Fokus ovog rada bit će vezan upravo uz dodatne izazove i mogućnosti koje se pojavljuju uslijed povećanja broja stupnjeva prijenosa za hod unaprijed. Kako bi se ti izazovi uspješno svladali te detaljno ispitale mogućnosti poboljšanja učinkovitosti i performansi pogona temeljenog na takvim mjenjačima, često se koriste postupci optimalnog upravljanja i općenito optimiranja, ne čemu će biti naglasak u ovom radu (više u odjeljku 1.2.3). Temelj postupka optimiranja čini matematički model pogona vozila, čiji središnji dio čini model mjenjača. Kako bi optimiranja bila numerički učinkovita, potrebno je postaviti odgovarajuće modele mjenjača minimalne realizacije, koji su za razmatrane vrste promjena stupnja prijenosa tipično reduciranog reda. Metode i alati modeliranja i sinteze sustava upravljanja AM, koji će se predložiti u ovom radu, demonstriraju se na 10-brzinskom AM iz reference [10], kao generičkom primjeru naprednog AM.



Slika 1-3. Grafički prikaz povećanja broja stupnjeva prijenosa za hod unaprijed kroz povijest razvoja automatskih mjenjača

1.2. Dosadašnje spoznaje

Predmetno područje može se podijeliti na tri temeljne cjeline: 1) modeliranje i simulacija AM, te analiza njihovog dinamičkog ponašanja pri promjeni stupnja prijenosa; 2) optimiranje upravljačkih varijabli AM s ciljem dobivanja uvida u optimalno ponašanje cjelokupnog pogona, tj. optimalne profile upravljačkih varijabli za zadanu promjenu stupnja prijenosa; te 3) sinteza realnih sustava upravljanja promjenom stupnja prijenosa u koordinaciji s komandama vozača uz postizanje robusnosti na promjene parametara pogona (npr. mase vozila, nagiba ceste, vremena odziva spojki s aktuatorom i slično). Pregled područja istraživanja za navedene cjeline dan je u narednim odjeljcima.

1.2.1. Modeliranje dinamike automatskog mjenjača

Za potrebe analize, simulacije i sinteze sustava upravljanja automatskim mjenjačima, potrebno je postaviti odgovarajuće matematičke modele dinamičkog ponašanja mjenjača [11]–[13]. Tako je u [14] predstavljen model dinamike automatskog mjenjača koji uključuje podmodele pretvarača momenta, mjenjača, hidrauličkog sustava upravljanja te modele spojki. Dinamika mjenjača uobičajeno se analitički izvodi temeljem dijagrama slobodnih tijela (engl. *free-body diagrams*) i s njima povezanih Lagrangeovih jednačbi [15] ili korištenjem metode veznih

dijagrama [16]–[18]. Za modeliranje četvero-brzinskog automatskog mjenjača za prebacivanje u 1. stupanj prijenosa ili stupanj za vožnju unatrag, u [16],[19] koristi se postupak veznih dijagrama, koji pored tvorbe modela punog reda omogućuje lako nalaženje redundantnih varijabli stanja i reduciranje reda modela. Referenca [20] ilustrira korištenje metode veznih dijagrama za modeliranje AM raznih vrsta, od mjenjača legendarnog Ford Modela T, preko šest-brzinskog AM, sve do naprednog 10-brzinskog AM.

Sa stanovišta analize dinamike sustava i sinteze sustava upravljanja, od posebnog je interesa razvoj metoda koje omogućuju automatsko generiranje računalno učinkovitih matematičkih modela [21],[22]. U području modeliranja automatskih mjenjača, automatsko modeliranje bi ultimativno podrazumijevalo generiranje matematičkog modela mjenjača punog reda koji bi bio minimalne realizacije, dan u formi prostora stanja, te generiran izravno iz sheme mjenjača. Ovaj rad (također publicirano u [23]) daje doprinos razvoju potpuno automatskog modeliranja automatskog mjenjača predlažući metodu za automatsko numeričko generiranje matematičkog modela punog reda iz veznog dijagrama koji izravno odražava strukturu automatskog mjenjača. Predložena metoda temeljena je na korištenju 20-sim [24] i MATLAB programskih paketa. 20-sim podržava modeliranje veznim dijagramima i uključuje određene značajke koje podržavaju koncept automatskog modeliranja (npr. *Scripting Toolbox* koji omogućuje automatsko izvođenje 20-sim naredbi korištenjem MATLAB skripti, uključujući izvoz modela u MATLAB).

Kako je već diskutirano, s pojavom AM s velikim brojem stupnjeva prijenosa dolazi do pojave novih vrsta promjena stupnja prijenosa (npr. promjena s dvostrukim prijelazom). Posljedično se usložnjava sinteza sustava upravljanja promjenom stupnja prijenosa te se javlja potreba za iscrpnim simulacijskim i optimizacijskim studijama [25]–[27]. Takve studije temelje se na modelima dinamike automatskog mjenjača, koji mogu biti punog reda (pokrivaju cijeli spektar simulacijskih zadataka) ili reduciranog reda (takvi modeli odnose se na konkretan stupanj prijenosa ili promjenu stupnja prijenosa te u obzir uzimaju zatvorene spojke putem kojih se mijenja/reducira struktura mjenjača) [16],[28]. Modeli reduciranog reda su jednostavniji i računalno učinkovitiji, ali njihov broj eksponencijalno raste s rastom broja stupnjeva prijenosa mjenjača, čime se značajno povećava vrijeme i trud kojeg je potrebno uložiti da bi se oni generirali na klasičan analitički (“ručni”) način.

1. Uvod

Kada se analizira određena promjena stupnja prijenosa, polazni dijagram slobodnih tijela ili vezni dijagram također se reducira (uzimajući u obzir dodatne čvrste veze koje se uspostavljaju zatvaranjem pojedinih spojki). Slijedeći pravila vezanih uz korištenu metodologiju modeliranja, a polazeći od reduciranog dijagrama, može se izvesti pripadajući analitički model reduciranog reda minimalne realizacije (pri čemu se energetske zavisne varijable stanja ispuštaju iz vektora varijabli stanja; v. [15],[16],[18]). U dostupnoj literaturi, generiranje modela reduciranog reda za korisnički-definirano stanje spojke (tj. za stupanj prijenosa ili promjenu stupnja prijenosa), pretežito se izvodi na “ručni” način [15],[29]. Na primjer, pristup prezentiran u [29] (i slično u [15]) temelji se na “ručnoj” modifikaciji matrica sustava primjenom rubnih uvjeta za određeni stupanj prijenosa ili promjenu.

U ovom radu, prezentirat će se metoda razvijena za automatsko reduciranje reda modela (engl. *Model Order Reduction method* ili skraćeno MOR metoda; predstavljena i u [30]), koja automatski konvertira model mjenjača punog reda u model reduciranog reda za korisnički-definirano stanje spojki. Kada je implementirana kao numerički alat u MATLAB-u, ova metoda oslobađa korisnika (npr. projektanta sustava upravljanja) procesa izvođenja modela za različite promjene stupnja prijenosa, time olakšavajući cjelokupni postupak automatskog projektiranja sustava upravljanja. Metoda se temelji na uvrštavanju prethodno izvedenih momenata zatvorenih spojki u model prostora stanja punog reda, te uspostavi linearnog odnosa između varijabli stanja modela reduciranog reda te preostalih varijabli stanja modela punog reda. Korištenje MOR metode u ovom će se radu demonstrirati na primjeru 10-brzinskog AM, te će se ona provjeriti za veći broj karakterističnih promjena stupnja prijenosa. Pripajanjem MOR alata alatu za automatsko generiranje modela mjenjača punog reda, stvara se jedinstveni alat za automatsko modeliranje koji generira model dinamike mjenjača minimalne realizacije izravno iz veznog dijagrama mjenjača implementiranog u 20-sim-u za proizvoljno stanje spojki.

1.2.2. Upravljanje promjenom stupnja prijenosa

Općenito, upravljanje AM uključuje dva temeljna zadatka: (i) vođenje mjenjača u smislu određivanja optimalnog stupnja prijenosa u svakom koraku uzorkovanja (strateška razina upravljanja, engl. *shift scheduling*) i (ii) upravljanje zadanom promjenom stupnja prijenosa (taktička razina, engl. *shift control*). Ovaj rad bavit će se taktičkom razinom upravljanja. Kod automatskog mjenjača (i slično kod DCT mjenjača), promjena stupnja prijenosa tipično se

1. Uvod

ostvaruje promjenom stanja dviju spojki. Takva promjena naziva se promjenom s jednostrukim prijelazom (skraćeno STS prema *engl. Single-Transition Shift*), spojka-spojka promjenom (*engl. clutch-to-clutch shift*) ili izravnom promjenom (*engl. direct shift*) [15],[31],[32]. Planetarni automatski mjenjači tipično se projektiraju na način da im sve uzastopne promjene i promjene u kojima se preskače jedna brzina spadaju u STS promjene [15]. Međutim, s ciljem postizanja dobrih svojstava voznosti (primjerice kratkog vremena odziva), u naprednim transmisijama s velikim brojem stupnjeva prijenosa javlja se potreba za preskakanjem većeg broja stupnjeva prijenosa. Neke od tih promjena su promjene s dvostrukim prijelazom, u kojoj po dva para spojki mijenjaju svoja stanja (*engl. Double-Transition Shift* ili skraćeno DTS). U literaturi ova vrsta promjene je također poznata pod nazivima promjena više elemenata (*engl. multi-element shift*), promjena s četiri elementa (*engl. four-element shift*), dvostruka spojka-spojka promjena (*engl. dual clutch-to-clutch shift*), te neizravna promjena (*engl. indirect shift*) [5],[29],[33].

Za razliku od manualnih mjenjača, automatski mjenjači mogu ostvariti promjenu stupnja prijenosa bez prekida toka pogonske snage koja dolazi od motora. Promjene stupnja prijenosa stoga se mogu podijeliti u četiri osnovne vrste [15]: 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-off upshift*), te silazna promjena bez opterećenja (*engl. power-off downshift*). Uz ove četiri bazične vrste promjene stupnja prijenosa, pojavljuju se i neke druge vrste koje nastupaju puno rjeđe, poput otkazane promjene stupnja prijenosa (*engl. canceled shift*), promjene s promijenjenom odlukom (*engl. change-of-mind shift*), te višestruke promjene (*engl. multiple shift*) koja se sastoji od dvije uzastopne STS promjene [15]. U ovom radu fokus će biti na uzlaznim i silaznim promjenama pod opterećenjem, jer su s njima pokrivena sve četiri bazične vrste promjena stupnja prijenosa uz teže zahtjeve na ostvarenje dobrih performansi.

U općem smislu, upravljanje zadanom promjenom stupnja prijenosa nadalje uključuje dva temeljna zadatka: (i) upravljanje momentom spojki u otvorenom krugu s ciljem ispunjenja međusobno suprotstavljenih kriterija minimiziranja trzaja vozila i smanjenja gubitaka energije u spojkama (a time i trošenja spojki), te (ii) regulaciju uz povratnu vezu po odabranoj varijabli pogona (npr. po brzini klizanja spojki). Iako je upravljanje promjenom stupnja prijenosa

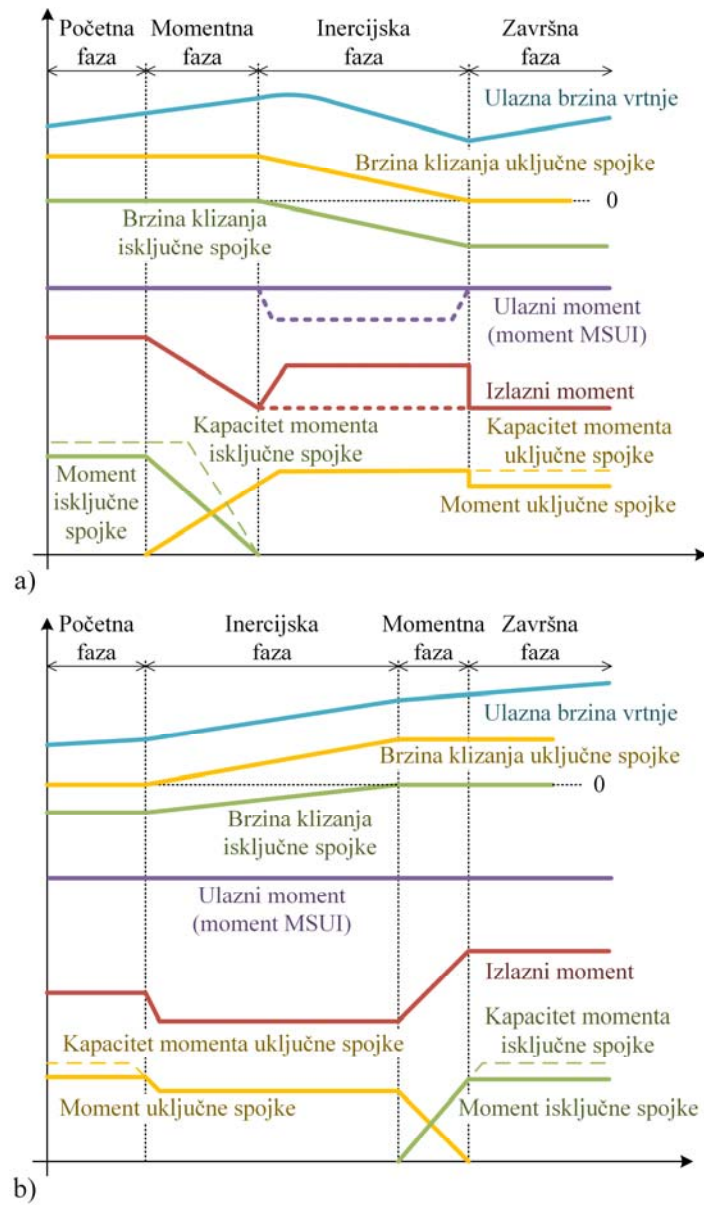
1. Uvod

dominantno temeljeno na upravljanju momentom spojki u otvorenom krugu, regulacija se često uvodi radi poboljšanja kvalitete upravljanja u prisustvu poremećajnih djelovanja [32],[34],[35]. S druge strane, u novijim generacijama AM, upravljanje promjenom stupnja prijenosa proširuje se upravljanjem momentom motora, čime se kvaliteta promjene može bitno poboljšati [15],[36],[37]. Momentom spojki upravlja se posredno upravljanim kliznim ventilom za podešavanje tlaka, kojeg pokreće namjenski hidraulički cilindar. Cilindar razvija normalnu silu kojom se djeluje na spojku. Približno razmjerno razvijenog normalnoj sili generira se okretni moment spojke, te se na taj način omogućuje moduliranje momenta spojke. Vrijedi napomenuti da se moment spojke proporcionalan okomitoj sili često naziva momentni kapacitet spojke (*engl. clutch torque capacity*, [15]), koji se zaista i ostvaruje u klizanju spojke, dok je kod zatvorene spojke moment manji ili jednak momentnom kapacitetu spojke.

Izvođenje tipične uzlazne promjene stupnja prijenosa može se podijeliti u četiri faze (slično vrijedi i za silaznu promjenu koja je zapravo reverzan proces uzlazne promjene, v. ilustraciju na slici 1-4), od kojih druga i treća faza predstavljaju stvarne (aktivne) faze, dok se prva i četvrta dodaju radi kompletiranja slike cijelog procesa promjene stupnja prijenosa [15]:

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

Tijekom početne faze ili faze punjenja (*engl. fill phase*), klip hidrauličkog cilindra uključne spojke pomiče se kako bi se eliminirao prazni hod između klipa i potisne ploče spojke. Time se vrši priprema spojke za nadolazeću momentnu fazu promjene, u kojoj dolazi do prijenosa momenta s isključne na uključnu spojku, tj. s više (početne) prema nižoj (krajnjoj) razini izlaznog momenta (slika 1-4a) [15]. U inercijskoj fazi dolazi do promjene ulazne brzine vrtnje s više razine prema nižoj koja odgovara novom stupnju prijenosa (slika 1-4a). Ovo se može ostvariti podizanjem momenta uključne spojke uz neizbježan udar (nadvišenje) izlaznog momenta (tzv. inercijski udar), ili dominantno slabljenjem momenta motora bez izraženog inercijskog udara. Kada je promjena ulazne brzine vrtnje završena, tj. kada se zatvori uključna spojka, proces promjene stupnja prijenosa je završen te slijedi završna faza.



Slika 1-4. Karakteristične faze (a) uzlazne i (b) silazne promjene stupnja prijenosa s jednostrukim prijelazom

Naglasak ovog rada bit će na kompleksnijoj promjeni s dvostrukim prijelazom (skraćeno *engl.* DTS), koja je svojstvena naprednim AM s velikim brojem stupnjeva prijenosa. DTS zahtijeva blisku koordinaciju između većeg broja aktuatora: više (tipično četiri) spojki i ulaznog momenta mjenjača [5],[27],[29],[33],[38] te je iz tog razloga zahtjevnija sa stajališta upravljanja [15]. Promjene s dvostrukim prijelazom odnose se na silazne promjene pod opterećenjem koje se s

ciljem smanjenja vremena odziva AM izvode kada vozač zatraži naglo ubrzanje vozila snažnim pritiskom pedale akceleratora [5]. S druge strane, [29] navodi kako je kalibracija i ugađanje DTS-a (sa simultanim aktiviranjem četiriju spojki) težak zadatak jer se uloga pojedinačne spojke ne može jasno identificirati. Referenca [39] prezentira rezultate simulacijske studije koja ima za cilj objasniti kompleksnu prirodu koordinacije spojki tijekom DTS-a.

Dva su osnovna načina izvođenja DTS silaznih promjena. Prvi je da se kombiniraju dvije ili više promjena s jednostrukim prijelazom, što bi se općenito trebalo izbjegavati kako bi se spriječilo dugo vrijeme promjene stupnja prijenosa, tj. loš osjećaj same promjene (*engl. shift feel*) [33]. Takva se promjena, stoga, dalje ne razmatra u ovom radu. Drugi i zahtjevniji način izvođenja DTS-a uključuje simultano upravljanje s četiri aktivne spojke u jednom cjelovitom (umjesto dvostrukom) prijelazu. Temeljni koncept upravljanja DTS-om nije temeljito istražen u postojećoj literaturi, koja uključuje tek nekolicinu publikacija koje se bave upravljanjem DTS-om. Na primjer, strategija upravljanja DTS-om iz [33] predlaže naglo otpuštanje isključnih spojki, čime se mjenjač kratkotrajno postavlja u “neutralno” stanje (tok snage kroz mjenjač se kratkotrajno prekida). U [29], proces DTS-a je podijeljen u više faza, gdje je svaka faza promjene definirana s obzirom na tijek sinkronizacije pojedinih spojki. Iako navedene publikacije daju uvid u praktične metode upravljanja DTS-om, one ne pružaju sustavnu sintezu, analizu i vrednovanje različitih upravljačkih strategija, što predstavlja okosnicu istraživanja prezentiranog u ovom radu.

1.2.3. Optimalno upravljanje promjenom stupnja prijenosa

Za bolje razumijevanje optimalnog dinamičkog ponašanja promjene stupnja prijenosa i razvoj s time povezanih strategija upravljanja, često se koriste postupci optimiranja. Tako se npr. u [25] predlaže primjena optimalnog upravljanja temeljenog na dinamičkom programiranju za izvođenje analitičkog zakona otvorenog i zatvorenog kruga upravljanja za inercijsku fazu konvencionalne promjene (s jednostrukim prijelazom). Kako je promjena stupnja prijenosa općenito vezana uz promjenu akceleracije vozila, u [40] se formulira optimizacijski problem za pronalaženje optimalne trajektorije akceleracije kojom se reducira trzaj vozila. U [41] predlaže se korištenje Pontryaginovog principa minimuma sa svrhom određivanja optimalnih trajektorija momenata spojki mjenjača, pri čemu ciljna funkcija uključuje članove vezane uz trzaj vozila i gubitke u spojkama. S obzirom na komande vozača, gubici u spojkama uzimaju se s različitim

1. Uvod

težinama, koje se određuju primjenom neizrazite baze pravila. Valja naglasiti kako su istraživanja u [25],[37],[40],[41] ograničena na elementarnu promjenu stupnja prijenosa s dvije aktivne spojke.

U ovom radu primjenjuju se dva temeljna pristupa optimiranju, pri čemu se oba izvode van realnog vremena (*engl. offline*): (i) u prvom se optimiraju upravljačke trajektorije promjene stupnja prijenosa mjenjača primjenom pseudospektralne kolokacijske metode [27],[38], dok se (ii) u drugom optimiraju parametri pojednostavljenih, po odsječcima linearnih profila upravljačkih trajektorija primjenom više-kriterijskog algoritma optimiranja [42],[43]. Temeljni cilj prvog pristupa je dobivanje uvida u optimalno ponašanje automatskog mjenjača, posebice kod složenijih promjena stupnja prijenosa mjenjača s naglaskom na one s dvostrukim prijelazom kod kojih se istovremeno koriste četiri spojke. Osim toga, općim optimiranjem trajektorija upravljačkih varijabli postavlja se referentno mjerilo (*engl. benchmark*) ostvarivih performansi promjene stupnja prijenosa, koje se potom koriste za provjeru rezultata dobivenih primjenom drugog, praktičnijeg pristupa optimiranja i konačno realiziranih strategija upravljanja.

Kolokacijske metode spadaju u kategoriju izravnih optimizacijskih metoda, pri čemu se izvorni kontinuirani problem optimalnog upravljanja transformira u konačno-dimenzionalni problem nelinearnog programiranja (*engl. NonLinear Programming*, NLP) [44]. Upravljačke varijable (također i varijable stanja) opisuju se polinomima visokog reda, čiji koeficijenti predstavljaju parametre koji se optimiraju. Prema [45], kolokacijske metode su nedvojbeno najmoćnije metode za rješavanje širokog niza problema optimiranja trajektorija, sa širokim rasponom primjena, poput onih u zrakoplovnom [46] i automobilskom inženjerstvu [47]–[49]. Ove metode zahtijevaju izračunavanje gradijenata funkcija cilja i funkcija ograničenja (tzv. Jakobijana) pa posljedično optimizacijski problem mora biti gladak (tj. mora postojati prva derivacija funkcije cilja i ograničenja). Njihova primjena u optimiranju upravljačkih varijabli automatskog mjenjača je otežana i istovremeno izazovna zbog izražene nelinearnosti/diskontinuiteta statičke krivulje trenja spojke u zoni držanja (za brzinu klizanja spojke nula). Drugim riječima, dok se različiti statički i dinamički modeli trenja uobičajeno široko koriste u računalnim simulacijama [50],[51], oni se ne mogu izravno primijeniti u formulaciji problema optimiranja.

1. Uvod

Kada je riječ o optimiranju upravljačkih trajektorija promjene stupnja prijenosa, u širem okviru ovog rada razvijeni su (izvorno publicirano u [27]): (i) računalno učinkovit i numerički stabilan pristup optimiranja upravljačkih trajektorija promjene stupnja prijenosa za opći problem upravljanja većim brojem spojki (STS, DTS i drugo) i (ii) postupak vrednovanja prikladnih modela trenja spojke za primjenu u optimiranju (s općenitijim primjenama u mehatroničkim sustavima). Upravljačke trajektorije promjene stupnja prijenosa AM optimiraju se primjenom pseudospektralne kolokacijske metode implementirane unutar TOMLAB optimizacijskog paketa [52], kojom se može riješiti opći problem optimalnog upravljanja nelinearnim sustavima s nelinearnim ograničenjima (v. npr. [53],[54]). Cilj je pronaći optimalne trajektorije upravljačkih varijabli spojki mjenjača i momenta redukcije motora, koje minimiziraju uzdužni trzaj vozila i gubitke energije u spojkama mjenjača. Takav se pristup može smatrati općim pristupom koji je prilagodljiv različitim scenarijima upravljanja promjenom stupnja prijenosa bez potrebe za prethodnim poznavanjem oblika upravljačkih trajektorija. Na temelju opisanog pristupa optimiranja, razvijen je numerički alat koji je ispitan kroz optimiranja širokog spektra promjena s jednostrukim i dvostrukim prijelazom [27],[38], kao i kroz optimiranje upravljačkih varijabli hibridne električne transmisije s dvostrukom spojkom [55].

Profili upravljačkih varijabli dobiveni optimiranjem nisu izravno primjenjivi u realnim AM, u kojima se tipično koriste pojednostavljeni profili koji se lakše interpretiraju, ostvaruju i parametriraju (kalibriraju). Naime, u nedostatku regulacije momenata spojki i motora te u prisustvu nelinearnih i vremenski-varijabilnih hidrauličkih aktuatora spojki i ograničenog upravljanja momentom motora (u smislu točnosti i brzine odziva), vrlo je zahtjevno održavati upravljačke momente promjene stupnja prijenosa na željenim referentnim trajektorijama (koje su često kompleksnih oblika). Sa svrhom dobivanja optimalnih karakteristika promjene stupnja prijenosa, uz primjenu pojednostavljenih, po odsječcima linearnih profila momenata spojki, u [56] se predlaže primjena više-kriterijskog parametarskog optimiranja korištenjem EMMA algoritma (*engl. Enhanced Model-based Multi-objective optimization Algorithm*). Primjena navedenog algoritma rezultira Pareto optimalnim skupom rješenja, koji predstavlja optimalni kompromis između voznih karakteristika i udobnosti promjene stupnja prijenosa. No, navedeno istraživanje ponovno se odnosi na tradicionalne promjene koje uključuju jedan par aktivnih spojki.

Ovaj rad (također publiciran u [42]) nadopunjuje rad prezentiran u [56] sljedećim dodatnim doprinosima: (i) definicija po odsječcima linearnih upravljačkih profila izvedena je na temelju prethodno pronađenih optimalnih trajektorija upravljanja, čime se ostvaruje potencijal za postizanje performansi bliskih optimalnim u općem slučaju, (ii) predložena parametrizacija upravljačkih profila je općenitija, čime se pruža više fleksibilnosti za oblikovanje optimalnih upravljačkih profila, (iii) predlaže se sustavna metoda vrednovanja raznih strategija upravljanja s ciljem izbora finalnog (optimalnog) rješenja, i (iv) performanse promjene stupnja prijenosa ostvarene primjenom optimalno-oblikovanih po odsječcima linearnih upravljačkih profila uspoređuju se s onima ostvarenima primjenom općeg pristupa optimiranja upravljačkih trajektorija. Parametri loma po odsječcima linearnih upravljačkih profila u ovom se radu optimiraju primjenom više-kriterijskog genetskog algoritma MOGA-II (*engl. Multi-Objective Genetic Algorithm*) [57]. MOGA-II je ukomponirana unutar modeFRONTIER okruženja, unutar kojeg se nudi cijeli niz algoritama optimiranja koji uključuju determinističke, stohastičke i heurističke metode kako za jedno-kriterijske, tako i za više-kriterijske probleme optimiranja [58]. Konačno i najvažnije, predložena metodologija više-kriterijskog optimiranja parametara primijenjena je za slučaj složenijeg upravljanja DTS-om (publicirano u [42] i [43]), te doprinosi području upravljanja DTS-om kroz: (i) predlaganje različitih definicija (strategija upravljanja) unaprijednih (*engl. feedforward*) profila upravljanja promjenom stupnja prijenosa i pripadajućih formulacija problema optimiranja, (ii) provođenje na rezultatima optimiranja-utemeljenog kvantitativnog vrednovanja predloženih upravljačkih strategija uz jasne preporuke za izbor strategija najpogodnijih za primjenu, te (iii) pružanje uvida u optimalna upravljačke djelovanja pojedinih strategija kroz detaljnu analizu rezultata optimiranja.

Robusnost se smatra jednim od primarnih zahtjeva kod razvoja sustava upravljanja promjenom stupnja prijenosa automatskog mjenjača [59],[60]. Naime, nužno je osigurati jednoliku kvalitetu promjene stupnja prijenosa (koja se očekuje od korisnika) u prisutnosti varijacija raznih parametara, poput mrtvog vremena odziva ili pojačanja momenta spojke. Kako bi se osigurala robusnost unaprijednih profila upravljanja promjenom stupnja prijenosa, u ovom se radu predlaže metoda za robusno optimiranje parametara upravljačkih profila. Takav pristup ima za cilj osigurati visoku robusnost (u smislu performansi promjene stupnja prijenosa) na varijacije temeljnih parametara sustava aktuacije mjenjača.

1. Uvod

Poznato je kako se upravljanje zadanom promjenom često sastoji i od regulacije u zatvorenom krugu, čiji je zadatak poboljšati kvalitetu upravljanja u prisustvu raznih poremećaja. Tako je u [28] predstavljen cjeloviti zakon upravljanja promjenom stupnja prijenosa primjenom estimacije okretnog momenta aktivnih spojki, PI regulatora brzine klizanja spojki i koordiniranog upravljanja motorom. Kako bi se poboljšala voznost, u [60] se predlaže uvođenje regulacije brzine vrtnje turbine pretvarača momenta u inercijskoj fazi promjene. Razmatra se korištenje robusnog PID regulatora koji uzima u obzir nesigurnosti predloženog modela. Predloženi regulator ispitan je simulacijom na primjeru konvencionalne 1-2 uzlazne promjene. U [34] se razmatra korištenje robusne regulacije brzine vrtnje klizanja spojki, koja pored samog regulatora (projektiranog primjenom μ -sinteze) uključuje i unaprijedno djelovanje koje poboljšava točnost praćenja reference, te kompenzaciju poremećaja. Za regulaciju brzine klizanja spojke, često se koriste napredne metode robusne sinteze nelinearnih sustava, poput onih vezanih uz regulaciju u kliznim režimima (*engl. sliding mode control*) [32],[61] ili *integrator backstepping* metode [35].

1.3. Hipoteza

Cilj istraživanja je predložiti postupke automatskog modeliranja i automatskog reduciranja reda modela naprednog automatskog mjenjača s velikim brojem stupnjeva prijenosa, te temeljem tih modela predložiti sintezu optimalnog sustava upravljanja mjenjačem, uključujući aspekte robusnosti na varijacije temeljnih parametara odziva aktuatorskog sustava.

Temeljna hipoteza rada jest da se odgovarajućom primjenom naprednih postupaka optimalnog upravljanja može unaprijediti kvaliteta upravljanja automatskim mjenjačima s velikim brojem stupnjeva prijenosa, posebice kod promjene stupnja prijenosa s dvostrukim prijelazom, u odnosu na postojeće algoritme upravljanja koji se često zasnivaju na ad-hoc analizama te tako formiranim profilima upravljačkih varijabli.

1.4. Pregled sadržaja rada

Modeliranje dinamike automatskog mjenjača s naglaskom na automatsko modeliranje i automatsko reduciranje reda modela, numeričko optimiranje upravljačkih varijabli spojki automatskog mjenjača, predlaganje optimalnih profila upravljačkih varijabli i postupak

optimiranja parametara tih profila, kao i njihovo prilagođavanje vozačevim komandama razrađeno je u devet poglavlja, uključujući uvod i zaključak. U nastavku je dan opis pojedinih poglavlja rada.

Drugo poglavlje: *Modeliranje dinamike pogona vozila.* Opisuje postavljene model pogona vozila koji se koristi u simulacijskim i optimizacijskim studijama u narednim poglavljima. Model je razložen na temeljne komponente pogona vozila (Ottov motor, pretvarač momenta, diferencijal s poluvratilima i pogonskim kotačima, uzdužna dinamika vozila), a njegov središnji dio odnosi se na napredni 10-brzinski automatski mjenjač. Na temelju modela mjenjača punog reda u formi veznog dijagrama, izveden je analitički model mjenjača punog reda u prostoru stanja. Predstavljene su simulacijski modeli pogona vozila u 20-sim i MATLAB/Simulink okruženju.

Treće poglavlje: *Automatsko modeliranje i automatsko reduciranje reda modela automatskog mjenjača.* Predlaže se metoda za automatsko generiranje modela automatskog mjenjača punog reda iz modela mjenjača u formi veznog dijagrama. Numerička metoda implementirana je unutar 20-sim i MATLAB programskih okruženja, pri čemu se 20-sim koristi za izradu modela veznog dijagrama i za izvoz modela u MATLAB skriptu. U istom se poglavlju predlaže postupak automatskog reduciranja reda modela mjenjača za proizvoljno stanje spojki mjenjača. Tako dobiveni reducirani model koristi se nadalje u programskim okruženjima (alatima) za optimiranje upravljačkih varijabli, te vrednovanje dinamike dinamičkog ponašanja mjenjača za proizvoljno zadani stupanj prijenosa.

Četvrto poglavlje: *Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa.* U ovom se poglavlju formulira problem optimiranja upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa, te se temeljem reduciranih modela iz prethodnog poglavlja provodi numeričko optimiranje upravljačkih varijabli pogona (momenti spojki i moment motora) u programskom okruženju TOMLAB. Optimiranje se prvo provodi za temeljne uzlazne i silazne promjene s jednostrukim prijelazom za različite scenarije upravljanja poput upravljanja promjenom stupnja prijenosa uz primjenu dodatne, normalno otvorene spojke. Korištenjem veznih dijagrama, koji na zoran način predočuju odnose okretnih momenata, brzina vrtnji i snaga u pojedinom dijelu mjenjača, analiziraju se osnovne značajke prijelaznih pojava tijekom promjene stupnja prijenosa.

Peto poglavlje: *Optimiranje upravljačkih varijabli za promjene s dvostrukim prijelazom.*

Nakon što je predstavljen optimizacijski alat i njegovo korištenje ilustrirano na primjeru promjena stupnjeva prijenosa s jednostrukim prijelazom, fokus se prebacuje na složenije promjene stupnja prijenosa s dvostrukim prijelazom kod kojih se istovremeno koriste četiri spojke. S ciljem dobivanja uvida u optimalna upravljačka djelovanja i koordinaciju aktuatora, predlaže se i vrednuje šest različitih strategija upravljanja. Te su strategije uključene u formulaciju problema optimiranja kroz dodatna fazna ograničenja vezana uz samu promjenu stupnja prijenosa, koja algoritam optimiranja mora zadovoljiti. Na taj se način omogućuje kvantitativno vrednovanje upravljačkih strategija različitih stupnjeva kompleksnosti i primjenjivosti.

Šesto poglavlje: *Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s jednostrukim prijelazom.* Rezultati optimiranja upravljačkih varijabli primjenjuju se u ovom poglavlju za profiliranje praktičnih i približno optimalnih trajektorija upravljačkih varijabli danih u obliku po odsječcima linearnih krivulja. Potom se optimiraju karakteristični parametri loma tako formuliranih upravljački varijabli. Rezultati optimiranja kvantitativno se uspoređuju s rezultatima optimiranja trajektorija upravljačkih varijabli. U ovom poglavlju, optimiranje parametara provodi se za temeljne uzlazne i silazne promjene s jednostrukim prijelazom. Nadalje, provodi se stohastičko robusno optimiranje parametara profila upravljačkih varijabli, s ciljem dobivanja optimalnog rješenja u prisustvu statistički poznatih značajki varijacija temeljenih parametara odziva spojki.

Sedmo poglavlje: *Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom.* Nakon preliminarnog izbora pogodnog algoritma optimiranja i razrade njegove primjene, optimiranje parametara provodi se za promjene s dvostrukim prijelazom. Za izvođenje takvih promjena predlažu se različite definicije po odsječcima linearnih upravljačkih profila, koje su određene temeljem uvida dobivenih optimiranjem upravljačkih trajektorija (poglavlja 4 i 5). Optimalne vrijednosti parametara kojima su definirani upravljački profili određuju se uporabom više-kriterijskog algoritma optimiranja. Nadalje, optimiranja se provode za različite scenarije promjene stupnja prijenosa, tj. za različite promjene s dvostrukim prijelazom i za različite definicije upravljačke strategije. Konačno, upravljačke strategije se

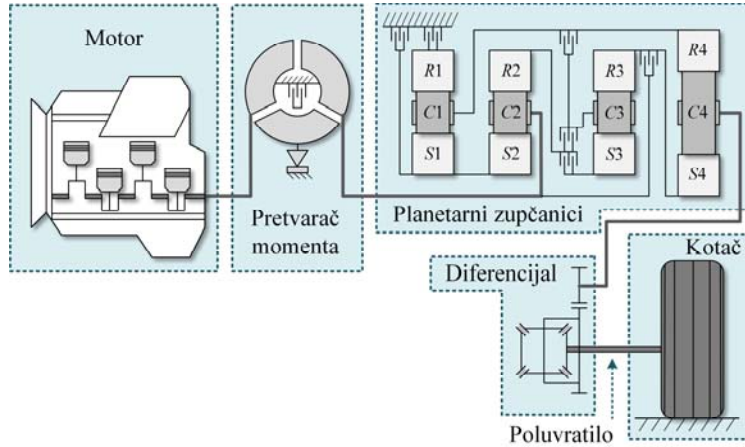
vrednuju s obzirom na pažljivo formulirane ekvivalentne indekse performansi koji se automatski računaju iz rezultata parametarskog optimiranja.

Osmo poglavlje: *Skalabilni zakon optimalnog upravljanja promjenom stupnja prijenosa.* U ovom poglavlju, nominalni optimalni upravljački profili dobiveni u poglavljima 6 i 7 prilagođavaju se vozačevim komandama, što se ostvaruje uvođenjem skalabilnog zakona upravljanja. Pored toga, upravljanje momentom aktivnih spojki u otvorenom krugu proširuje se sustavom regulacije, čime se ostvaruje korekcija upravljačkih djelovanja u prisustvu poremećajnih varijabli. Cjelokupni sustav upravljanja podrobno se ispituje putem računalnih simulacija, koristeći pritom model cjelokupnog pogonskog sustava postavljenog u prvom poglavlju.

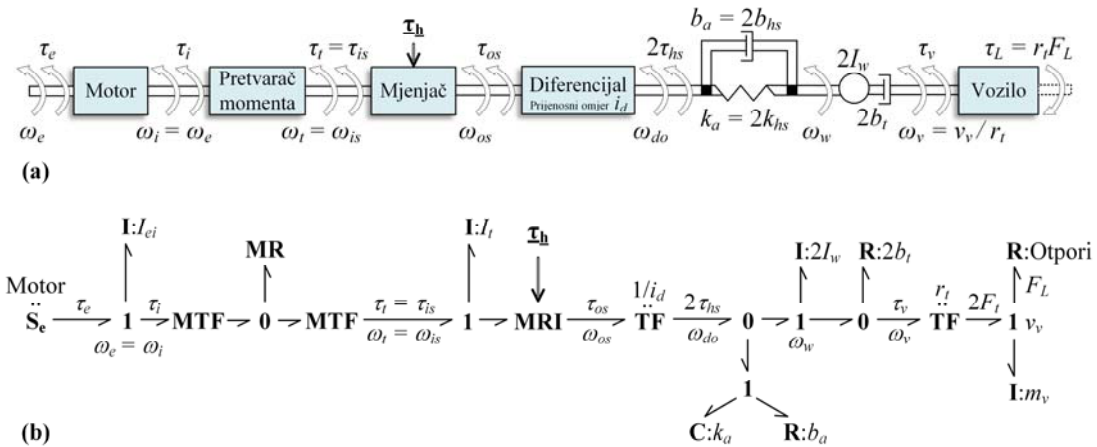
Deveto poglavlje: *Zaključak.* Na kraju rada dana su zaključna razmatranja, smjernice za buduća istraživanja, kao i znanstveni doprinosi doktorskog rada.

2. Modeliranje dinamike pogona vozila

Shematski dijagram razmatranog pogona vozila prikazan je na slici 2-1. Slika 2-2a prikazuje strukturu te ključne varijable i parametre pogona. Razmatrani pogon vozila sastoji se od sljedećih glavnih komponenata: Ottov motor, pretvarač momenta, mjenjač, diferencijal s poluvratilima i pogonskim kotačima i uzdužna dinamika vozila. Poluvratila s kotačima reprezentirana su ekvivalentnim dvo-kotačnim modelom koji je temeljen na pretpostavci jednake brzine vrtnje lijevog i desnog kotača (tj. čistog uzdužnog gibanja) [16],[17]. Slika 2-2b prikazuje model pogona u formi veznog dijagrama (v. reference [16],[62] i Prilog A za više detalja o metodi veznih dijagrama).



Slika 2-1. Shematski prikaz pogona vozila s automatskim mjenjačem s pretvaračem momenta



Slika 2-2. Ilustracija strukture pogona vozila: (a) shema i (b) vezni dijagram

2.1. Modeli komponenti pogonskog sustava vozila

2.1.1. Model Ottovog motora i pretvarača momenta

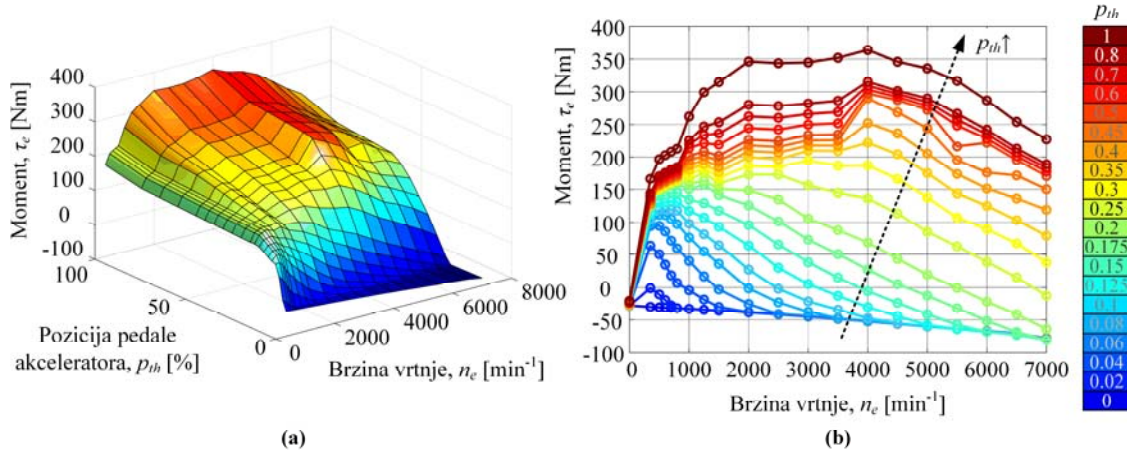
Ottov motor je stroj koji pretvara kemijsku energiju sadržanu u gorivu u mehanički rad za pogon vozila. Motor se u ovom radu opisuje kao element izvora momenta, pri čemu je okretni moment motora τ_e funkcija položaja pedale akceleratora p_{th} i brzine vrtnje motora ω_e :

$$\tau_e = f_e(p_{th}, \omega_e) . \quad (2-1)$$

Funkcija f_e definirana je nelinearnom mapom, koja je prikazana na slici 2-3a u 3D prikazu, odnosno na slici 2-3b u 2D prikazu. Rotacijska dinamika motora može se opisati izrazom

$$I_{ei} \dot{\omega}_e = (\tau_e - \Delta\tau_{ec}) - \tau_i , \quad (2-2)$$

gdje je τ_i okretni moment pumpe (impelera) pretvarača momenta (tj. moment tereta motora), dok je I_{ei} ukupan moment inercije motora sa zamašnjakom i pumpe pretvarača momenta. Član $\Delta\tau_{ec}$ označava iznos redukcije momenta motora ($\Delta\tau_{ec} < 0$), koja se općenito može ostvariti putem upravljanja kutem pretpaljenja svjećica, prekidom dovoda goriva kroz podesivi interval (brzi kanali) ili upravljanjem radom zaklopa motora (spori kanal).

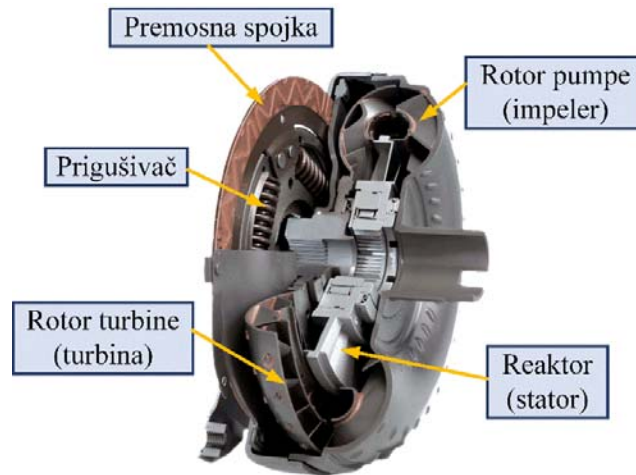


Slika 2-3. Mapa motora s unutarnjim izgaranjem: (a) 3D prikaz i (b) 2D prikaz ovisnosti momenta motora o brzini vrtnje i poziciji pedale akceleratora

Između motora i mjenjača nalazi se hidrodinamički pretvarač okretnog momenta, čiji zadaci su [1]: (i) prijenos i pojačanje okretnog momenta motora te (ii) prigušivanje torzijskih vibracija i

2. Modeliranje dinamike pogona vozila

općenito udara koji se prenose sa strane motora prema kotačima i obratno. Osnovni dijelovi pretvarača momenta su: pumpno kolo, turbinsko kolo, reaktor sa spojkom slobodnog hoda i premosna spojka (slika 2-4). Pumpno kolo pretvarača momenta (označeno u modelu indeksom i) čvrsto je spojeno na vratilo motora, dok je turbinsko kolo (indeks t) čvrsto spojeno na ulazno vratilo mjenjača. Hidrodinamički



Slika 2-4. Osnovne komponente pretvarača momenta

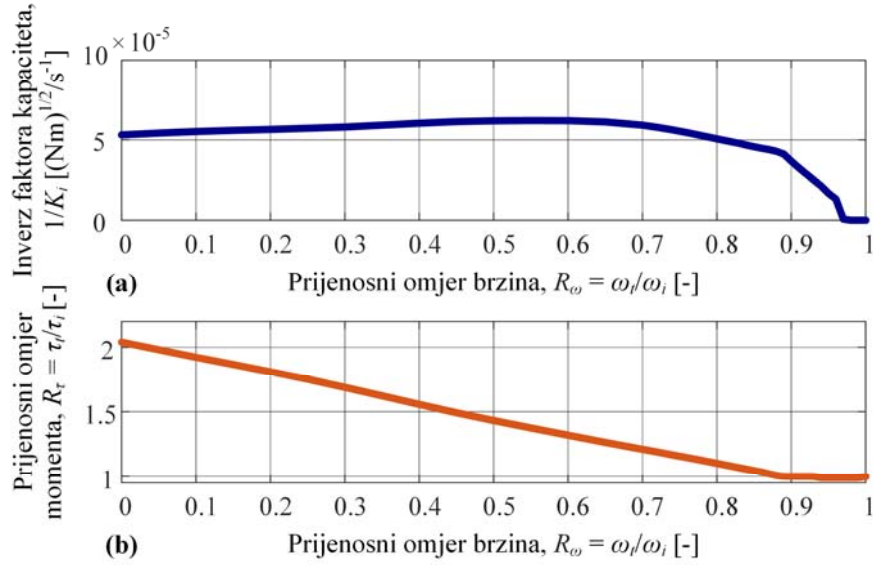
pretvarač ima dva radna područja. Kod pokretanja vozila, kada se turbinsko kolo okreće sporije od pumpnog kola, pretvarač momenta radi u području pojačanja okretnog momenta (slika 2-5b). Povećanjem brzine vrtnje turbinskog kola smanjuje se razlika brzine vrtnje pumpe i turbine, tj. klizanje pretvarača 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 (slika 2-5b) [1].

Pretvarač momenta opisan je nelinearnim statičkim karakteristikama $R_t(R_\omega)$ i $K_i(R_\omega)$ (slika 2-5), gdje je $R_t = \tau_t/\tau_i$ 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 [63]:

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

$$\tau_t = \tau_i \cdot R_t(R_\omega).$$

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]. Općeniti trend u razvoju automatskog mjenjača s pretvaračem momenta jest omogućiti moduliranje premosne spojke u što širem rasponu uvjeta rada [4],[64].



Slika 2-5. Statičke karakteristike pretvarača momenta: (a) inverz faktora kapaciteta i (b) prijenosni omjer (pojačanje) 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 na slici 2-2 modelirane ekvivalentnim elastičnim vratilom, čiji su 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}) [16],[17]:

$$\dot{\varphi}_{hs} = i_d^{-1} \omega_{os} - \omega_w, \quad (2-4)$$

$$\tau_{os} = i_d^{-1} (2\tau_{hs}) = 2i_d^{-1} (k_{hs} \varphi_{hs} + b_{hs} \dot{\varphi}_{hs}), \quad (2-5)$$

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

$$I_w \dot{\omega}_w = \tau_{hs} - r_t^{-1} F_t, \quad (2-6)$$

gdje r_t predstavlja efektivni polumjer automobilske gume (pneumatika), a F_t uzdužnu silu između gume i podloge (vučna sila; slika 2-7). Pod pretpostavkom da guma djeluje u linearnom

2. Modeliranje dinamike pogona vozila

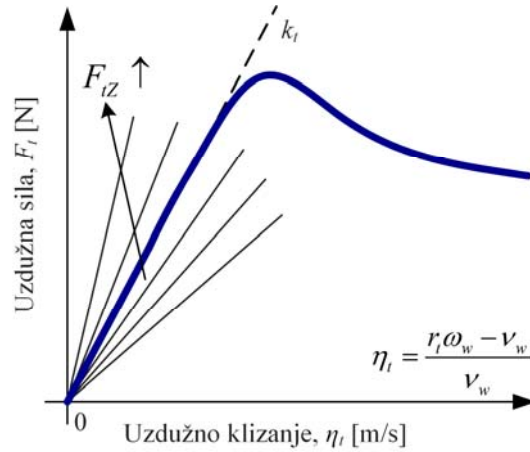
području svoje statičke karakteristike (slika 2-6; područje adhezije), njeno ponašanje može se opisati sljedećim lineariziranim modelom [17],[65]:

$$F_t = r_t^{-1} b_t (\omega_w - r_t^{-1} v_v) , \quad (2-7)$$

pri čemu je koeficijent prigušenja dan izrazom

$$b_t = k_t \frac{r_t^2}{v_w} , \quad (2-8)$$

gdje $k_t = dF_t / d\eta_t$ označava nagib statičke karakteristike gume (koji je funkcija vertikalnog opterećenja gume F_{tZ}), v_w brzinu središta gume, a η_t uzdužno klizanje definirano na slici 2-6.



Slika 2-6. Uzdužna statička karakteristika autogume

Model uzdužne dinamike vozila opisan je sljedećom jednačinom:

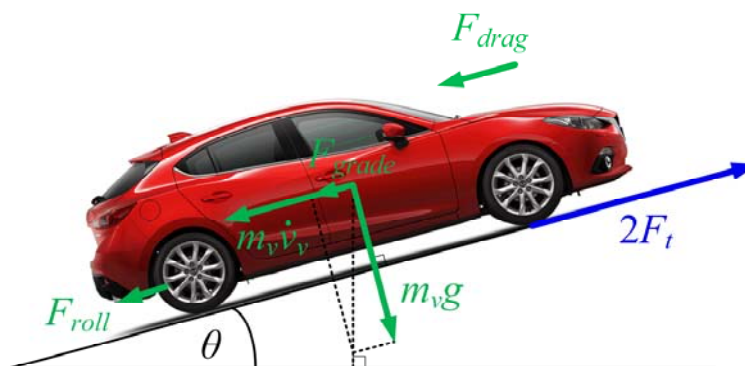
$$m_v \dot{v}_v = (2F_t - F_L) , \quad (2-9)$$

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) i otpor uslijed nagiba ceste F_{grade} (slika 2-7):

$$F_L = \underbrace{\frac{1}{2} \rho A_d C_d v_v^2 + F_{roll}}_{F_{drag}} + \underbrace{m_v g \sin \theta}_{F_{grade}} , \quad (2-10)$$

2. Modeliranje dinamike pogona vozila

pri čemu je ρ gustoća zraka, C_d je koeficijent aerodinamički otpora, A_d je površina frontalnog dijela vozila, a θ je kut nagiba ceste. Ako nije drugačije naznačeno, pretpostavlja se da je kut nagiba ceste θ jednak nuli.



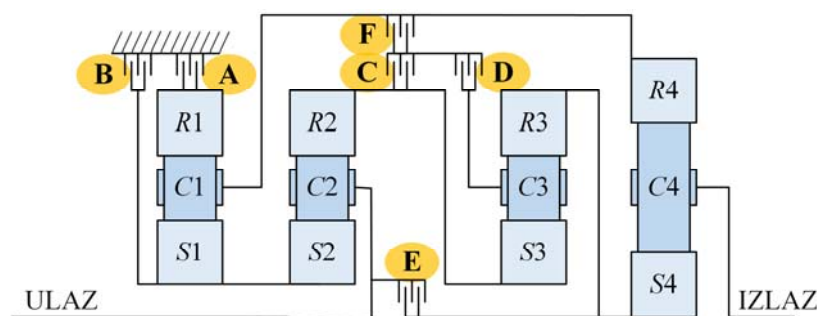
Slika 2-7. Ilustracija uzdužnog modela dinamike vozila

2.2. Model automatskog mjenjača punog reda

2.2.1. Struktura naprednog mjenjača s velikim brojem stupnjeva prijenosa

10-brzinski automatski mjenjač iz [10] se koristi kao generički primjer napredne transmisije. Slika 2-8 prikazuje shemu mjenjača, koji se sastoji od četiriju planetarnih prijenosnika i šest hidrauličkih lamelnih spojki. Planetarni prijenosnik 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*). Tablica 2-1 prikazuje stanja spojki u pojedinim stupnjevima prijenosa za razmatrani 10-brzinski mjenjač. 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. Da bi se ostvarila 1-2 promjena stupnja prijenosa, potrebno je dakle otvoriti spojku E (isključna spojka) i ukopčati i zatvoriti spojku C (uključna spojka).

2. Modeliranje dinamike pogona vozila



Slika 2-8. Shema 10-brzinskog AT mjenjača [10]

Tablica 2-1. Tablica stanja spojki u pojedinim stupnjevima prijenosa 10-brzinskog AT mjenjača [10] (korak prijenosnog omjera definiran je kao recipročna vrijednost kvocijenta prijenosnih omjera danog stupnja prijenosa i prijenosnog stupnja koji mu prethodi, dok X označava zatvorenu spojku)

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	1.37	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.	1.000	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

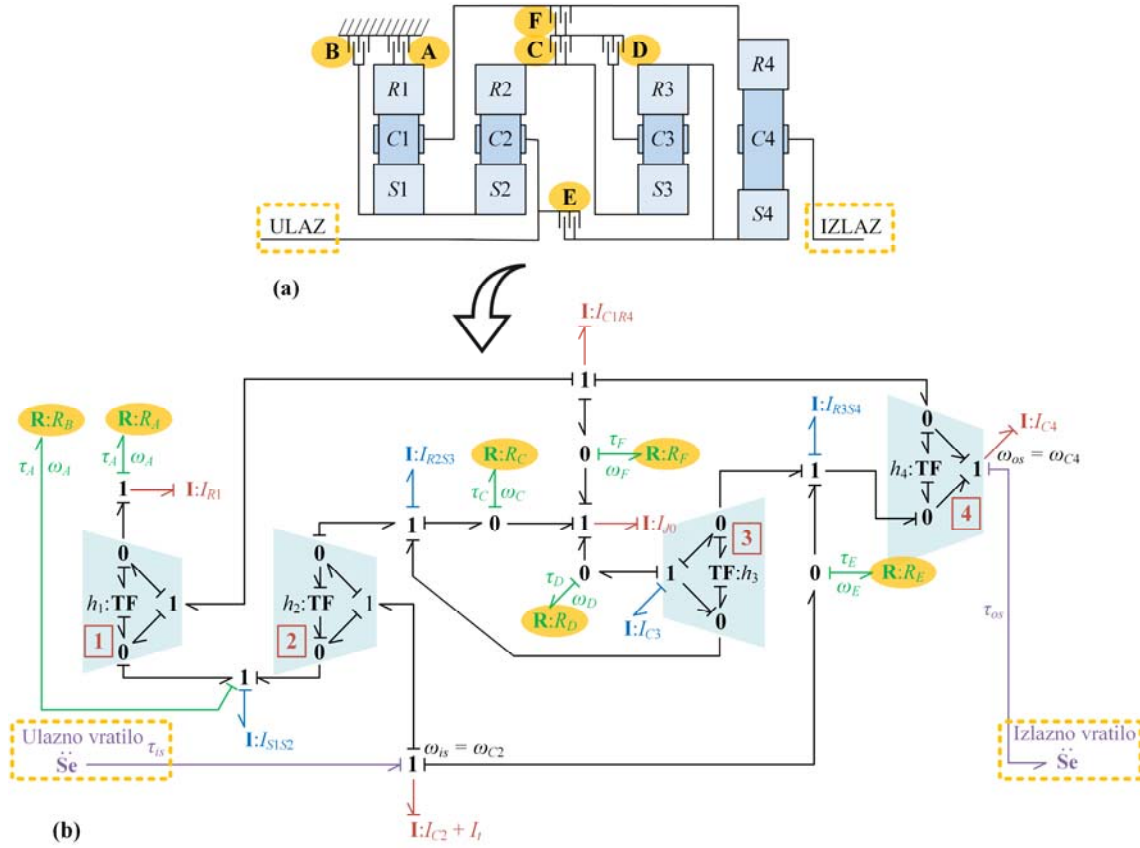
2.2.2. Vezni dijagram modela automatskog mjenjača

Slijedeći pristup modeliranja predstavljen u [16],[63], dinamika automatskog mjenjača može se opisati korištenjem modela veznog dijagrama prikazanog na slici 2-9b. Model veznog dijagrama izgrađen je oko trokutastih struktura veza koje opisuju kinematiku planetarnog prijenosnika. Prijenosni omjer planetarnog prijenosnika definiran je kao (slika 2-9b, [17])

2. Modeliranje dinamike pogona vozila

$$h_i = r_{ri}/r_{si}, \quad i = 1, \dots, 4,$$

pri čemu su r_{ri} i r_{si} redom polumjeri kolutnog i sunčanog zupčanika. Ostatak veznog dijagrama izravno reflektira mehaničku strukturu mjenjača sa slike 2-9a, gdje elementi **R** i **I** opisuju redom trenje spojke i inerciju zupčanika, dok čvorišne točke **0** i **1** reprezentiraju redom točke zbrajanja brzina vrtnji i momenata [16],[62]. Analiza kauzalnosti (povezana s okomitim crticama na krajevima veza, v. Prilog A i [62]) pokazuje da pet od devet inercijskih elemenata mjenjača ima integralu kauzalnost, tj. da je model mjenjača petog reda. Predloženi pristup modeliranja automatskog mjenjača je eksperimentalno validiran u [16] na primjeru četiri-brzinskog automatskog mjenjača te slično u [29] na primjeru osam-brzinskog mjenjača.



Slika 2-9. 10-brzinski automatski mjenjač: (a) shema i (b) pripadajući vezni dijagram

2.2.3. Model automatskog mjenjača u prostoru stanja

Korištenjem metodologije modeliranja veznim dijagramima [16],[62], vezni dijagram sa slike 2-9b može se transformirati u sljedeći model u prostoru stanja:

2. Modeliranje dinamike pogona vozila

$$\begin{aligned} \mathbf{A} \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\omega}_{is} & \dot{\omega}_{R1} & \dot{\omega}_{C1R4} & \dot{\omega}_{J0} & \dot{\omega}_{os} \end{bmatrix}^T}_{\dot{\boldsymbol{\omega}}_s} = \\ = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{B}_{cl} & \vdots & \mathbf{B}_{oi} \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}} \underbrace{\begin{bmatrix} \tau_{fA} & \tau_{fB} & \tau_{fC} & \tau_{fD} & \tau_{fE} & \tau_{fF} & \tau_{os} & \tau_{is} \end{bmatrix}^T}_{\boldsymbol{\tau}_{in}}, \end{aligned} \quad (2-11)$$

gdje je $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ matrica inercija, dok je $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times n_{in}}$ ulazna matrica (za konkretan model 10-brzinskog mjenjača vrijedi $n = 5$ i $n_{in} = 8$). Ulazna matrica $\mathbf{B}$ je podijeljena u dvije pod-matrice: $\mathbf{B}_{cl} \in \mathbb{R}^{n \times n_{cl}}$ koja množi momente spojki (τ_{fi} , $i = A, \dots, F$; $n_{cl} = n_{in} - 2 = 6$) i $\mathbf{B}_{oi} \in \mathbb{R}^{n \times 2}$ koja množi momente ulaznog i izlaznog vratila τ_{os} i τ_{is} . Analitički izrazi za matrice $\mathbf{A}$ i $\mathbf{B}$ dane su u Prilogu B ovog rada. Nakon uvođenja matrice $\mathbf{L} \in \mathbb{R}^{n \times n_{in}}$:

$$\mathbf{L} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}, \quad (2-12)$$

izraz (2-11) transformira se u

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_s = \mathbf{L} \boldsymbol{\tau}_{in}. \quad (2-13)$$

Integriranjem jednadžbe stanja (2-13) dobiva se vektor brzine vrtnje varijabli stanja $\boldsymbol{\omega}_s \in \mathbb{R}^n$, koji se koristi za određivanje vektora brzina klizanja spojki te za izdvajanje brzine vrtnje ulaznog i izlaznog vratila ω_s i ω_{is} :

$$\begin{aligned} \underbrace{\begin{bmatrix} \omega_A & \omega_B & \omega_C & \omega_D & \omega_E & \omega_F & \vdots & \omega_{os} & \omega_{is} \end{bmatrix}^T}_{\boldsymbol{\omega}} \\ = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{cl} \\ \vdots \\ \mathbf{U}_{oi} \end{bmatrix}}_{\mathbf{U}} \underbrace{\begin{bmatrix} \omega_{is} & \omega_{R1} & \omega_{C1R4} & \omega_{C3} & \omega_{os} \end{bmatrix}^T}_{\dot{\boldsymbol{\omega}}_s}, \end{aligned} \quad (2-14)$$

gdje je matrica $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{n_{in} \times n}$ također dana u Prilogu B. Korištenjem zakona očuvanja snage, može se dokazati (v. Prilog C) kako općenito vrijedi sljedeća relacija između matrica $\mathbf{B}$ i $\mathbf{U}$ (v. Prilog B za konkretan primjer):

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{cl} \\ \mathbf{u}_o^T \\ \mathbf{u}_i^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{B}_{cl} & -\mathbf{b}_o & \mathbf{b}_i \end{bmatrix}^T, \quad (2-15)$$

pri čemu vrijedi $\mathbf{B} = [\mathbf{B}_{cl} \ \mathbf{b}_o \ \mathbf{b}_i]^T$, dok su $\mathbf{u}_o \in \mathbb{R}^n$ i $\mathbf{u}_i \in \mathbb{R}^n$ pod-vektori matrice $\mathbf{U}_{oi}$ sadržane u izrazu (2-14) (na sličan su način $\mathbf{b}_o$ i $\mathbf{b}_i$ sadržani u $\mathbf{B}_{oi}$ iz izraza (2-11)).

2. Modeliranje dinamike pogona vozila

Vektor ω_s se po potrebi može iskoristiti za algebarsko izračunavanje energetski zavisnih varijabli (onih koje odgovaraju inercijskim elementima s diferencijalnom kauzalnošću na veznom dijagramu sa slike 2-9b):

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \omega_{s1s2} & \omega_{r2s3} & \omega_{r3s4} & \omega_{c3} \end{bmatrix}^T}_{\tilde{\omega}} = \mathbf{T} \underbrace{\begin{bmatrix} \omega_{is} & \omega_{r1} & \omega_{c1r4} & \omega_{c3} & \omega_{os} \end{bmatrix}^T}_{\omega_s}, \quad (2-16)$$

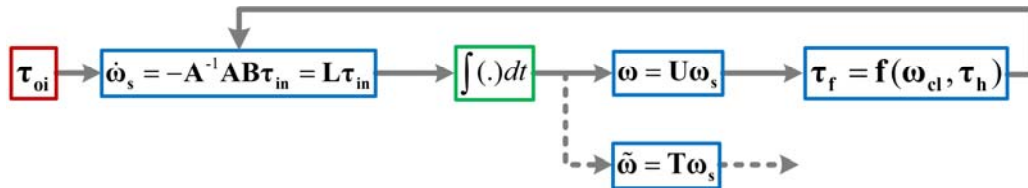
Momenti trenja spojki sadržani u vektoru τ_{in} određuju se iz brzina klizanja spojki sadržanih u vektoru ω_{cl} , pri čemu se koristi model trenja spojki:

$$\tau_{fi} = f(\omega_i), \quad i \in \{A, B, C, D, E, F\}, \quad (2-17)$$

te se prosljeđuju u polaznu jednadžbu stanja (2-11). Funkcija f odgovara primijenjenom modelu trenja, koji će biti predstavljen u potpoglavlju 2.3. U slučaju korištenja Karnoppovog modela trenja potrebno je izračunati vremenske derivacije brzina klizanja, $\dot{\omega}_{cl} \in \mathbb{R}^{n_{cl}}$, koje se mogu dobiti diferenciranjem izraza (2-14) i korištenjem izraza (2-13):

$$\dot{\omega}_{cl} = \mathbf{U}_{cl} \mathbf{L} \tau_{in} = \mathbf{M} \tau_{in}. \quad (2-18)$$

Cjelovita struktura modela automatskog mjenjača ilustrirana je blokovskim dijagramom na slici 2-10.



Slika 2-10. Blokovski dijagram strukture modela automatskog mjenjača u prostoru stanja

2.3. Modeli trenja spojke

Model trenja spojke predstavljen općim izrazom (2-17) uključuje šest podmodela trenja za šest spojki razmatranog mjenjača. Sljedeći odjeljci opisat će statičku karakteristiku trenja spojke, te različite načine realizacije modela trenja.

2.3.1. Statička karakteristika trenja spojke

Slika 2-11a prikazuje poopćenu statičku karakteristiku trenja [16],[50]. Statička karakteristika 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):

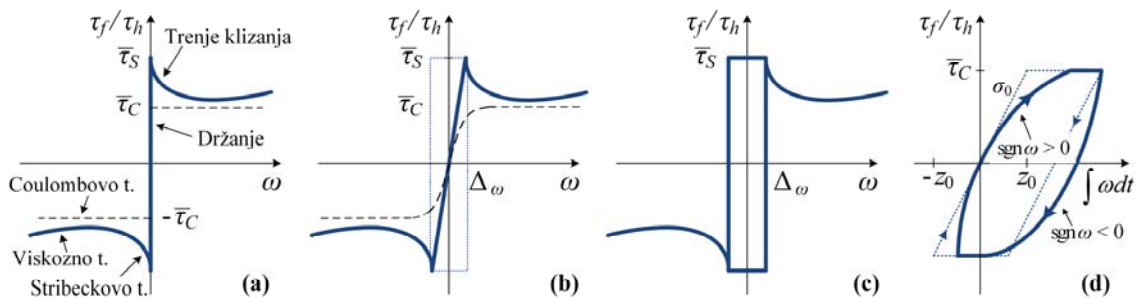
$$\tau_f(\tau_h, \omega) = \tau_h \left[\bar{T}_C + (\bar{T}_S - \bar{T}_C) e^{-|\omega/\omega_{st}|^\delta} + \sigma_2 \omega \right] \text{sgn } \omega . \quad (2-19)$$

gdje $\bar{T}_C = 1$ označava normirani Coulombov moment trenja, $\bar{T}_S = 1$ 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 $\delta \in [0.5, 2]$. U specijalnom slučaju za koji vrijedi $\bar{T}_C = \bar{T}_S$ i ne uzimajući u obzir viskozno trenje, dobiva se jednostavni Coulombov model trenja (v. isprekidane linije na slici 2-11a):

$$\tau_f(\tau_h, \omega) = \tau_h \bar{T}_C \text{sgn } \omega . \quad (2-20)$$

Zbog jednostavnosti, a bez gubitka općenitosti ciljanih analiza, u optimizacijskim i simulacijskim studijama predstavljenim u ovom radu koristit će se Coulombov opis trenja.

Statička karakteristika trenja prikazana na slici 2-11a nije jednoznačno definirana za brzinu klizanja nula (u tzv. području držanja, *engl. stiction*) te se kao takva ne može implementirati u simulacijskim i optimizacijskim modelima. Različiti načini implementacije modela trenja diskutiraju se u narednim odjeljcima na temelju radova [16],[50],[66],[67].



Slika 2-11. Model trenja: (a) poopćena statička karakteristika i njena realizacija kroz (b) klasični, (c) Karnoppov model i (d) dinamički Dahlov model

2.3.2. Klasični model trenja

Krivulja statičkog trenja (područje držanja) može se aproksimirati strmim pravcem kroz ishodište, što rezultira tzv. klasičnim modelom trenja prikazanim na slici 2-11b. Nagib pravca, tj. vrijednost parametra Δ_ω postavljena je kao kompromis između točnosti (manji Δ_ω) i numeričke učinkovitosti modela (veći Δ_ω). Kako bi se izbjegla diskontinuiranost klasičnog modela trenja kod brzina klizanja između $\pm\Delta_\omega$ te pospješila numerička učinkovitost rješavanja problema optimiranja upravljačkih trajektorija (poglavlje 4), klasični model trenja se modificira. Umjesto diskontinuirane sgn funkcije, u konačnom optimizacijskom modelu koristi se glatka i kontinuirana $\tanh$ funkcija, što u slučaju korištenog Coulombovog opisa trenja rezultira modelom (isprekidana linija na slici 2-11b):

$$\tau_f(\tau_h, \omega) = \tau_h \bar{T}_C \tanh(\omega/\Delta_\omega) . \quad (2-21)$$

2.3.3. Karnoppov model trenja

Kako bi se izbjegle numeričke poteškoće vezane uz strmu aproksimaciju statičkog trenja u području držanja te određena fizikalna nekonzistentnost (puzanje umjesto držanja), može se koristiti Karnoppov model trenja (v. ilustraciju na slici 2-11c i [66]). Ovaj model uvodi usko područje $|\omega| \leq \Delta_\omega$ u kojem moment trenja ne ovisi o relativnoj brzini klizanja, već ovisi o primijenjenom momentu na frikcijski element (spojku). U slučaju Coulombove krivulje trenja, Karnoppov model može se opisati kao

$$\tau_f = \begin{cases} \tau_{fslip}(\omega) = \tau_h \bar{T}_C \text{sgn } \omega, & \text{za } |\omega| \geq \Delta_\omega \\ \tau_{fstick} = \text{sat}(\tau_{stick}, \tau_h \bar{T}_C), & \text{inače} \end{cases} , \quad (2-22)$$

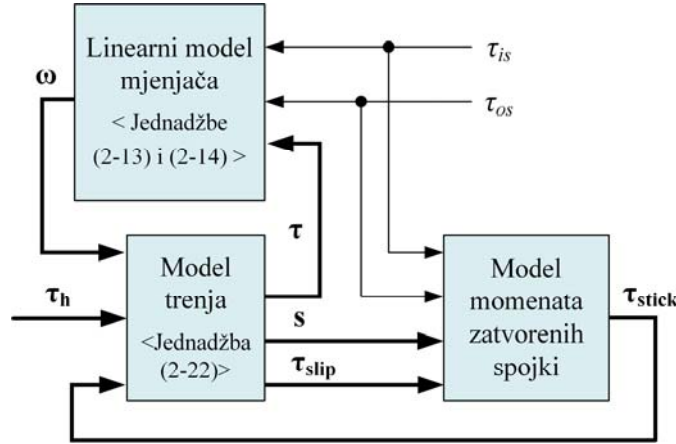
pri čemu funkcija $\text{sat}(x, Y)$ zasićuje ulaz x na razinu $\pm Y$, dok τ_{stick} označava moment primijenjeni moment na zatvorenu spojku. Taj se moment kod automatskog mjenjača, kao sustava s više frikcijskih elementa, određuje na relativno složen način (uključujući upotrebu logičkih funkcija; [66]). Slika 2-12 prikazuje strukturu modelu mjenjača temeljenog na Karnoppovom modelu trenja spojki [16] (usp. sliku 2-10). Vektor primijenjenog momenta τ_{stick} određuje se iz vanjskih (ulazno/izlaznih) momenata mjenjača τ_{is} i τ_{os} , frikcijskih momenata spojki koje klizu τ_{slip} , te informacije o zatvorenim ($s_i = 1$) i otvorenim/klizajućim spojkama ($s_i = 0$), koja je sadržana u korisnički-definiranom binarnom vektoru $\mathbf{s}$:

2. Modeliranje dinamike pogona vozila

$$\mathbf{s} = [s_A \quad s_B \quad s_C \quad s_D \quad s_E \quad s_F] . \quad (2-23)$$

Vektor primijenjenih momenata τ_{stick} može se odrediti iz uvjeta da su brzine klizanja zatvorenih spojki (a time i derivacije brzina klizanja, usp. izraz (2-18)) jednake nuli. Izdvajanjem redaka matrice $\mathbf{M}$ iz izraza (2-18) koji odgovaraju zatvorenim spojkama i izjednačavanjem pripadajućih derivacija brzina klizanja s nulom, dolazi se do jednadžbe (3-9), čijim se rješavanjem konačno određuju momenti zatvorenih spojki [16]. Više detalja o određivanju vektora primijenjenih momenata može se naći u odjeljku 3.3.1.

Kako bi bio primjenjiv kod optimiranja upravljačkih trajektorija, Karnoppov model trebao bi se učiniti glatim, primjerice korištenjem glatkih prijelaza za logičke funkcije podmodela za male brzine klizanja (u području $|\omega| \leq \Delta\omega$). Međutim, zbog strukturne varijabilnosti Karnoppovog modela, 'glađenje' modela nije moguće provesti jednostavno i precizno kako je to bio slučaj s glađenjem Coulombove karakteristike trenja na slici 2-11b.



Slika 2-12. Principni blokovski dijagram cjelokupnog modela automatskog mjenjača temeljenog na Karnoppovom modelu trenja spojki

2.3.4. Dahlov model trenja

Dahlov pristup modeliranju trenja uzima u obzir detaljniji fizikalni mehanizam razvoja statičkog trenja na temelju dobro poznate Hookove krivulje naprežanje-istezanje čvrstih materijala (v. [50],[67] i sliku 2-11d). Dahlov model je opisan sljedećim sustavom prvog reda [67]:

2. Modeliranje dinamike pogona vozila

$$\frac{dz}{dt} = \left(1 - \frac{\sigma_0 z}{T_C} \operatorname{sgn} \omega \right) \omega , \quad (2-24)$$

$$\tau_f = \left(\sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} \right) \frac{\tau_h}{T_C} , \quad (2-25)$$

gdje je z horizontalna deformacija asperitnih kontakata u području držanja (slika 2-11d), σ_0 je koeficijent horizontalne krutosti kontakta a σ_1 je (opcijski) koeficijent prigušenja.

Za potrebe primjene ovog modela kod optimiranja upravljačkih trajektorija, jednadžba stanja Dahlova modela (2-24) modificira se zamjenom diskontinuirane funkcije $\operatorname{sgn} \omega$ glatkom funkcijom $\tanh(k_d \omega)$:

$$\frac{dz}{dt} = \left[1 - \frac{\sigma_0 z}{T_C} \tanh(k_d \omega) \right] \omega , \quad (2-26)$$

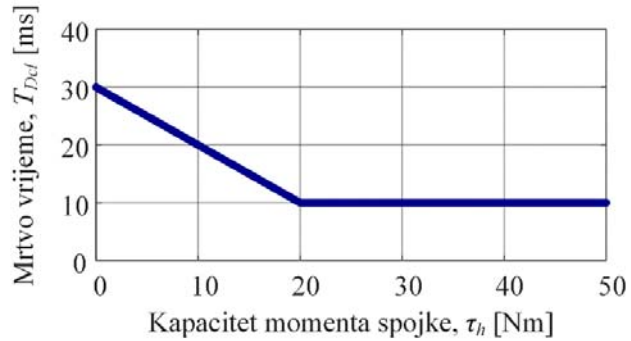
gdje se parametar k_d izabire kao kompromis između numeričke učinkovitosti i točnosti.

2.3.5. Model dinamike aktuatora spojke

S ciljem dobivanja realističnijih rezultata, u nekim se optimizacijskim studijama (npr. više-kriterijsko optimiranje parametara upravljačkih profila) model spojke proširuje podmodelom dinamike spojke uključujući njen aktuator. Dinamika uljne spojke može se pojednostavljeno opisati kombinacijom člana s mrtvim vremenom i proporcionalnog člana s kašnjenjem prvog reda:

$$T_{cl} \dot{\tau}_{h,dyn} = -\tau_{h,dyn} + \tau_h (t - T_{Dcl}) , \quad (2-27)$$

gdje je T_{cl} vremenska konstanta modela aktuatora, dok je $T_{Dcl} = f(\tau_{h,dyn})$ mrtvo vrijeme dano u obliku ogledne tablice u ovisnosti o kapacitetu momenta spojke τ_h (slika 2-13). U slučaju korištenja dinamičkog podmodela (2-27), kapacitet momenta $\tau_{h,dyn}$ ulazi umjesto τ_h u statički model trenja spojke opisan u prethodnim potpoglavljima.

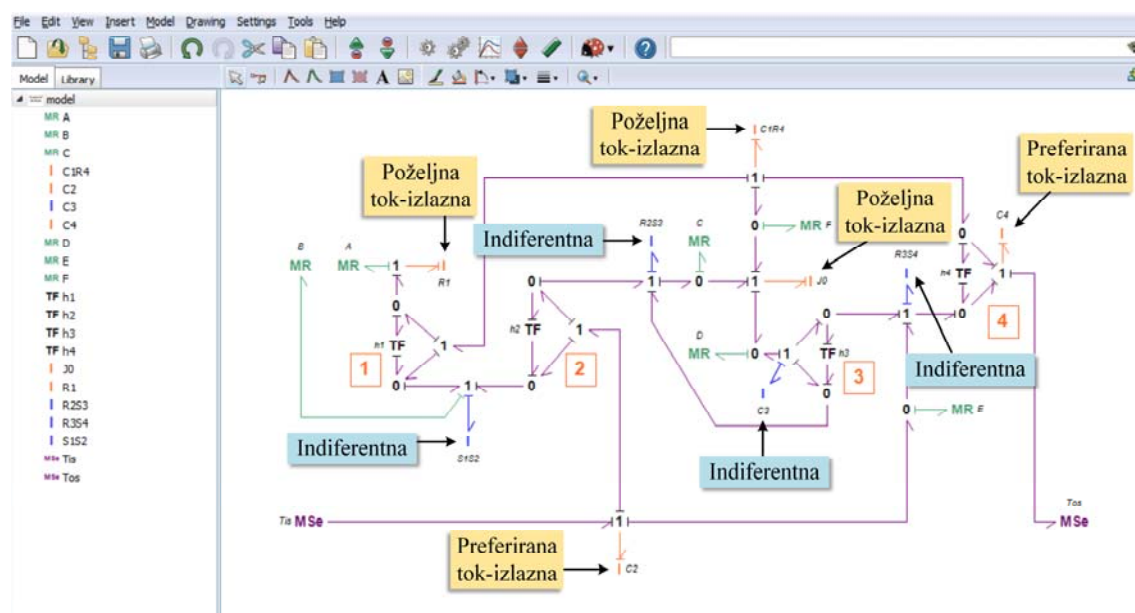


Slika 2-13. Mrtvo vrijeme modela aktuatora spojke u ovisnosti o kapacitetu momenta spojke

2.4. Simulacijski modeli pogona vozila

Predstavljeni matematički model pogona vozila, uključujući model automatskog mjenjača kao njegov središnji dio, može se implementirati u različitim simulacijskim okruženjima poput MATLAB/Simulink i 20-sim okruženja.

Polazni model mjenjača u obliku veznog dijagrama (slika 2-9b) može se na jednostavan način prenijeti (tj. ponovno ručno iscrtati) u 20-sim okruženju korištenjem ugrađene biblioteke standardnih elemenata veznih dijagrama (slika 2-14). Kako bi se omogućilo moduliranje (kapaciteta) momenta spojke u računalnim simulacijama, **R** elementi su na slici 2-14 zamijenjeni **MR** (*engl. Modulated Resistor*) elementima. Analiza kauzalnosti se u 20-sim-u izvodi automatski, tj. alat automatski određuje da razmatrani model mjenjača ima pet nezavisnih varijabli stanja. Kauzalnost inercijskih elemenata **I** dodjeljuje se temeljem postavki prioriteta kauzalnosti [24]. Nudi se sljedeći izbor postavki prioriteta kauzalnosti: 1) fiksna kauzalnost, 2) preferirana kauzalnost, 3) poželjna kauzalnost, te 4) indiferentno [24]. Kako bi se kauzalnost dodijelila u skladu s modelom veznog dijagrama sa slike 2-9b, postavke prioriteta **I** elemenata veznog dijagrama postavljene su kao što je naznačeno na slici 2-14.

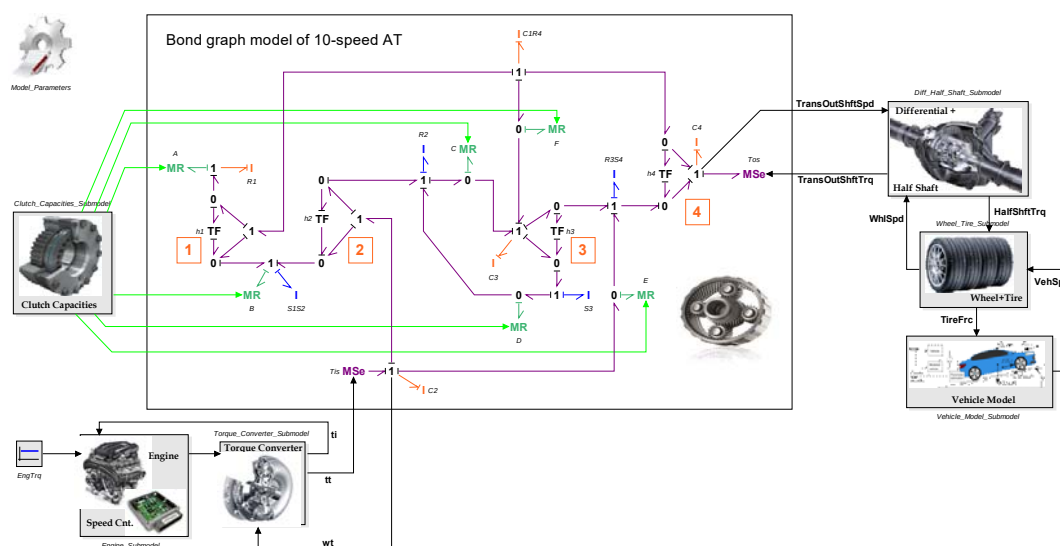


Slika 2-14. Vezni dijagram modela 10-brzinskog automatskog mjenjača u 20-sim okruženju uključujući postavke prioriteta kauzalnosti **I** elemenata

2. Modeliranje dinamike pogona vozila

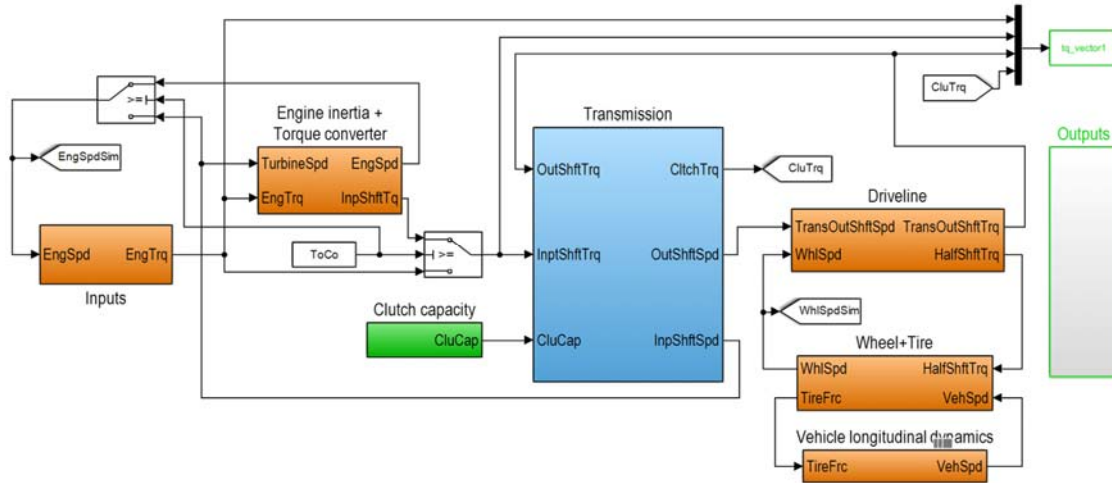
Model automatskog mjenjača implementiran u 20-sim okruženju može se jednostavno proširiti preostalim elementima pogonskog sustava vozila (slika 2-15). Tako implementirani simulacijski model može se izravno simulirati unutar 20-sim okruženja. Osim izvođenja simulacija, 20-sim nudi i različiti skup alata za izvođenje analiza poput izvođenja niza simulacija pri čemu se vrijednost izdvojenog parametra mijenja u zadanom intervalu, traženja optimalnih vrijednosti određenih parametara/početnih vrijednosti s ciljem postizanja minimuma/maksimuma definirane funkcije cilja, provođenja analiza osjetljivosti, generiranja lineariziranog modela u prostoru stanja, itd. [24].

Iako 20-sim predstavlja moćan alat za modeliranje dinamičkih sustava, u većini simulacijskih studija prezentiranih u ovom radu koristit će se MATLAB/Simulink programsko okruženje (v. model pogona na slici 2-16), prvenstveno zbog veće fleksibilnosti, širih mogućnosti (npr. proširivanje funkcionalnosti 20-sim alata razvojem dodatnih specijaliziranih skripti), te bolje interakcije s drugim vanjskim alatima (npr. s optimizacijskim okruženjima TOMLAB i modeFRONTIER).



Slika 2-15. Simulacijski model pogona vozila u 20-sim programskom okruženju

2. Modeliranje dinamike pogona vozila



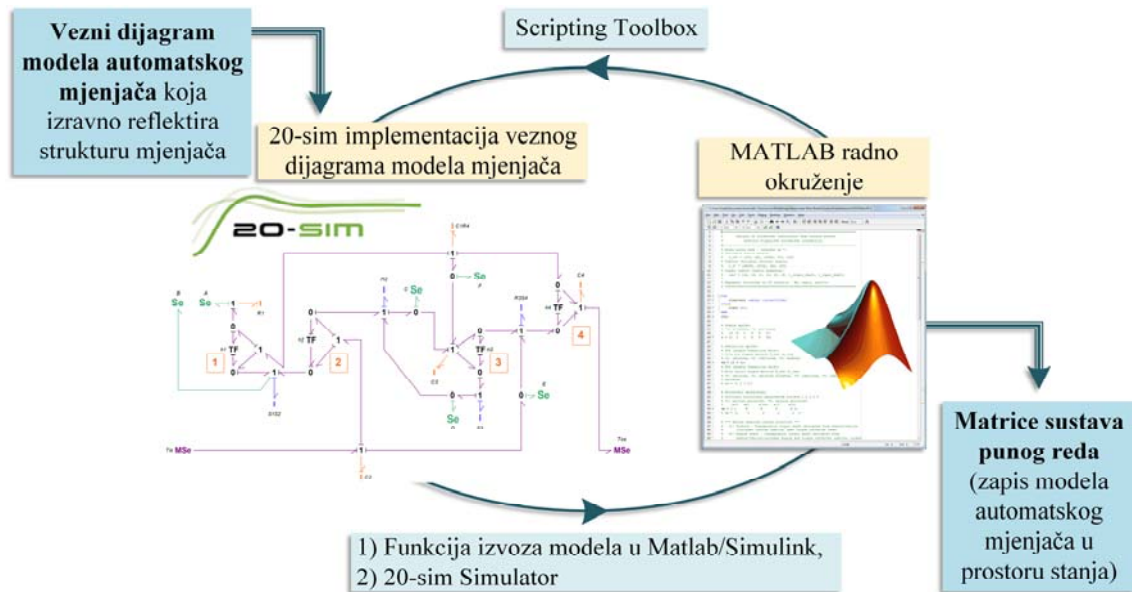
Slika 2-16. Simulacijski model pogona vozila u MATLAB/Simulink programskom okruženju

3. Automatsko modeliranje i automatsko reduciranje reda modela automatskog mjenjača

3.1. Automatsko generiranje matrica modela automatskog mjenjača

U prethodnom poglavlju, model mjenjača u prostoru stanja, tj. matrice punog reda modela mjenjača određene su analitički korištenjem metode veznih dijagrama [16], pri čemu su konačni analitički izrazi dani u Prilogu B. Kako bi se ubrzao proces modeliranja, matrice modela punog reda mogu se odrediti na automatski način. U ovom potpoglavlju predlažu se dvije metode automatskog modeliranja mjenjača, koje su bazirane na 20-sim programskom alatu i njegovoj interakciji s MATLAB-om. Obje metode kreću od veznog dijagrama modela implementiranog u 20-sim okruženju (slika 2-14). Prva metoda temelji se na identifikaciji matrica sustava iz simboličkih jednadžbi sadržanih u MATLAB skripti koja se izvozi iz 20-sim programa, dok drugi pristup primjenjuje identifikaciju temeljenu na automatiziranoj simulaciji modela veznog dijagrama implementiranog u 20-sim-u. Cjelokupni postupak automatskog modeliranja ilustriran je na slici 3-1. Procedura je potpomognuta korištenjem tzv. *Scripting Toolbox*-a dostupnog unutar 20-sim-a, koji omogućuje pokretanje 20-sim naredbi izravno iz MATLAB skripte [24].

3. Automatsko modeliranje i automatsko reduciranje reda modela automatskog mjenjača



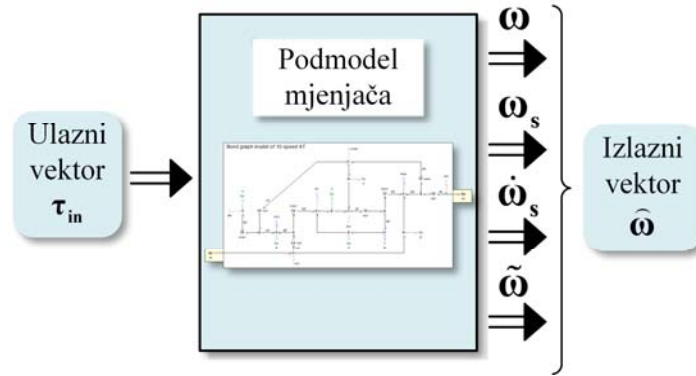
Slika 3-1. Ilustracija procedure za automatsko generiranje matrica modela punog reda

3.1.1. Postupak zasnovan na izvozu modela iz 20-sim u MATLAB/Simulink okruženje

20-sim alat pruža mogućnost izvoza modela veznog dijagrama u MATLAB skriptu koja sadrži simboličke jednadžbe modela u prostoru stanja. U svrhu određivanja matrica modela, model veznog dijagrama sa slike 2-14 treba se ponešto preoblikovati. Preoblikovanje obuhvaća sljedeće: (i) implementiranje modela u formi podmodela kako bi se eksplicitno definirali ulazi i izlazi modela i (ii) zamjena nelinearnih elemenata otpora kojima su reprezentirane spojke (**R/MR** elementi) elementima izvora poriva/momenta (**Se**). Time se omogućuje formiranje cjelokupnog ulaznog vektora momenata $\tau_{in} \in \mathbb{R}^{n_{in}}$ iz jednadžbe (2-11). Nadalje, izlazi podmodela mjenjača u 20-sim-u definirani su kao sljedeća četiri vektora (v. ilustraciju na slici 3-2 i izraze (2-11)-(2-18)):

- Vektor brzina klizanja spojki i brzina vrtnji ulaznog i izlaznog vratila, $\omega \in \mathbb{R}^{n_{in}}$
- Vektor varijabli stanja, $\omega_s \in \mathbb{R}^n$
- Vektor vremenskih derivacija varijabli stanja, $\dot{\omega}_s \in \mathbb{R}^n$
- Vektor energetski zavisnih varijabli, $\tilde{\omega} \in \mathbb{R}^{ndep0}$.

Za potrebe izvoza modela u MATLAB, gornji vektori su povezani tako da formiraju jedan izlazni vektor označen kao $\hat{\omega} = [\omega \quad \omega_s \quad \dot{\omega}_s \quad \tilde{\omega}] \in \mathbb{R}^{n_{in}+2n+ndep0}$.



Slika 3-2. Ilustracija definicije ulaznih i izlaznih vektora modela mjenjača u 20-sim programskom okruženju za potrebe izvoza modela u MATLAB/Simulink

3.1.2. Identifikacija matrica sustava iz modela sadržanog u MATLAB skripti

Iz simboličnih jednadžbi tj. kôda sadržanog u uvezenoj MATLAB skripti, matrice sustava $\mathbf{L}$, $\mathbf{U}$ i $\mathbf{T}$ punog reda mogu se odrediti korištenjem metoda identifikacije sustava. Naime, višestruka izvršavanja uvezene MATLAB skripte mogu se provesti za različite skupove ulaznih podataka, te se dobiveni ulazno-izlazni podaci koriste za identifikaciju matrica modela. Budući da matrice sustava imaju maksimalno $n_{in} = 8$ nepoznanica u jednoj dimenziji (npr. $\mathbf{L} \in \mathbb{R}^{n \times n_{in}}$ i $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{n_{in} \times n}$), dovoljno je “pobuditi” sustav, tj. pokrenuti uvezenu MATLAB skriptu osam puta, pod uvjetom da je skup ulaznih podataka dovoljno bogat (tj. pod uvjetom da sustav nije pobuđen relativno zavisnim ulaznim podacima). Tako se dobiva matrica momenata $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{n_{in} \times n_{in}}$ koja sadrži $n_{in} = 8$ ulaznih (momentnih) vektora τ_{in} u svojim redcima. Ova matrica ne smije biti singularna, što se osigurava slučajnim generiranjem elemenata matrice $\mathbf{X}$ u intervalu od 1 Nm do 100 Nm. Za svaki ulazni vektor τ_{in} sadržan u matrici $\mathbf{X}$, svako izvršenje skripte daje jedan izlazni vektor $\hat{\omega}$ (slika 3-2), čime se formira izlazna matrica $\mathbf{Y} \in \mathbb{R}^{(n_{in}+2n+ndep0) \times n_{in}}$. Matrica $\mathbf{Y}$ tada se dijeli u četiri pod-matrice sa slike 3-2 ($\mathbf{Y} = [\mathbf{Y}_{\omega} \quad \mathbf{Y}_{\omega_s} \quad \mathbf{Y}_{\dot{\omega}_s} \quad \mathbf{Y}_{\ddot{\omega}}]^T$), koje odgovaraju vektorima sustava definiranih izrazima (2-11)-(2-18). Pozivajući se na jednadžbu (2-13), ulazna matrica modela u prostoru stanja $\mathbf{L}$ može se odrediti rješavanjem sljedećeg sustava linearnih algebarskih jednadžbi:

$$\mathbf{Y}_{\dot{\omega}_s} = \mathbf{L}\mathbf{X} , \quad (3-1)$$

3. Automatsko modeliranje i automatsko reduciranje reda modela automatskog mjenjača

koji ima jedinstveno rješenje, budući da je prije opisana ulazna matrica $\mathbf{X}$ kvadratna i nesingularna [68]. Slično, matrice $\mathbf{U}$ i $\mathbf{T}$ se određuju rješavanjem sljedećih matričnih jednažbi (usp. jednažbe (2-14) i (2-16)):

$$\mathbf{Y}_{\omega_s} = \mathbf{U} \mathbf{Y}_{\omega_s}, \quad (3-2)$$

$$\mathbf{Y}_{\tilde{\omega}} = \mathbf{T} \mathbf{Y}_{\omega_s}. \quad (3-3)$$

Iako $\mathbf{Y}_{\omega_s}^T$ nije kvadratna matrica, jedinstvenost rješenja jednažbi (3-2) i (3-3) dokazuje se nalaženjem reducirane redčane ešalonske forme proširenih matrica $\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{\omega_s}^T & \mathbf{Y}_{\omega_s}^T \end{bmatrix}$ i $\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{\omega_s}^T & \mathbf{Y}_{\tilde{\omega}}^T \end{bmatrix}$ (korištenjem MATLAB-ove *rref* funkcije), te provjeravanjem njihovih struktura, u smislu da ona treba biti gornje- ili donje-trokutaste matrica. Nakon dobivanja matrica sustava $\mathbf{L}$ i $\mathbf{U} = [\mathbf{U}_d \ \mathbf{U}_{oi}]^T$, matrica $\mathbf{B}$ modela u prostoru stanja (jednažba (2-11)) može se odrediti temeljem izraza (2-15). Naime, matrica $\mathbf{B}$ ekstrahira se izravno iz matrice $\mathbf{U}$:

$$\mathbf{B} = [-\mathbf{U}_d \quad -\mathbf{u}_o \quad \mathbf{u}_i]^T. \quad (3-4)$$

Slijedeći definiciju matrice $\mathbf{L} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}$, matrica inercija $\mathbf{A}$ može se dobiti rješavanjem pripadajućeg linearnog sustava jednažbi:

$$\mathbf{A} \mathbf{L} = \mathbf{B}. \quad (3-5)$$

Budući da $\mathbf{L}$ nije kvadratna matrica, jedinstvenost rješenja matrice (3-5) ponovno se dokazuje nalaženjem reducirane redčane ešalonske forme proširene matrice (ovdje $[\mathbf{L}^T \ \mathbf{B}^T]$) i provjeravanjem njezine strukture.

Gore predstavljena metoda numeričke identifikacije karakterizirana je visokom točnošću, zato što uvezena MATLAB skripta definira matematički model u simboličkoj formi. K tome, izvršavanje ovog postupka je vrlo brzo jer se temelji na bazičnim numeričkim operacijama, a ne na simulaciji modela. Određeni (praktični) nedostatak metode vezan je uz činjenicu da se izvoz modela u MATLAB skriptu treba izvršiti unutar 20-sim okruženja, tj. cijela procedura modeliranja ne može se izvršiti isključivo iz MATLAB-a (dakle, ne na potpuno automatski način, barem za korištenu verziju 20-sim paketa).

3.1.3. Identifikacija matrica sustava temeljena na izvođenju simulacije

Izvoz 20-sim modela u MATLAB skriptu može se izbjeći generiranjem izlaznih podataka sustava putem kratkotrajne simulacije 20-sim modela s obzirom na proizvoljno odabrani ulazni vektor momenata τ_{in} sa slike 3-2. Simulacija se izvršava $n_{in} = 8$ puta za osam nasumično generiranih vremenski-invarijantnih ulaznih vektora momenata τ_{in} , te se izlazni vektor/matrica popunjava rezultatima simulacije u zadnjem koraku izvođenja simulacije (ovdje je vrijeme simulacije $t_f = 0.1$ s). Ulazna i izlazna matrica potom se koriste za određivanje matrica modela na isti način kao što je opisano u prethodnom odjeljku (tj. rješavanjem jednadžbi (3-1)-(3-5)). Cijela procedura automatskog modeliranja može se jednostavno izvesti izravno iz MATLAB skripte. Međutim, glavni nedostaci metode temeljene na izvođenju simulacije očituju se u reduciranoj računalnoj učinkovitosti i nešto nižoj točnosti. Prvotno je zbog potrebe za višestrukim izvođenjem simulacija modela, dok je potomje zbog dobivanja izlaznih podataka simulacijom umjesto da se izračunavaju izravno iz simboličkih jednadžbi sadržanih u MATLAB skripti.

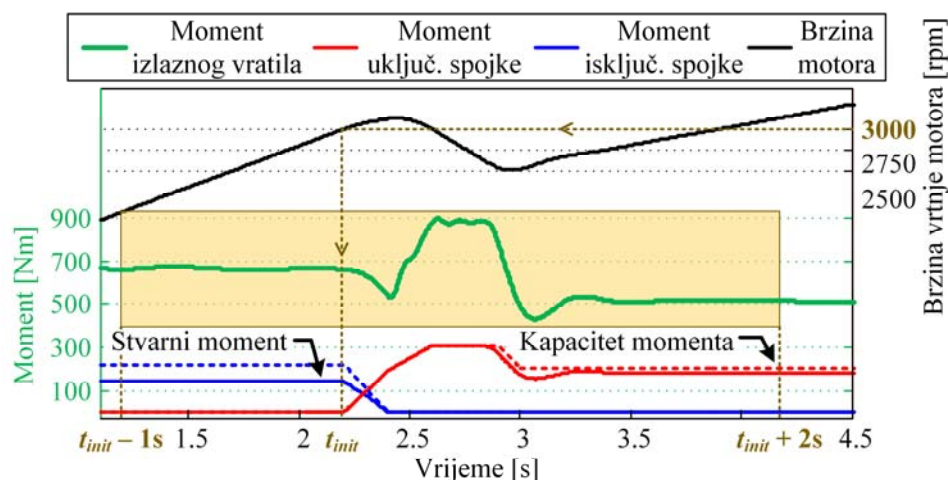
3.1.4. Provjera metode za automatsko modeliranje

Kako bi se provjerili predloženi pristupi automatskog modeliranja, provedene su simulacije raznih promjena stupnjeva prijenosa s jednostrukim prijelazom korištenjem modela mjenjača punog reda izvedenog analitički (poglavlje 2) i automatskim numeričkim metodama modeliranja prikazanim u prethodnim odjeljcima (pritom se razlikuju dvije različite metode, v. prethodna dva odjeljka). Simulacije su temeljene na Karnoppovom modelu trenja spojke (v. poglavlje 2) i pojednostavljenim profilima kapaciteta momenta spojki prikazanim na slici 3-3 isprekidanim crvenim i plavim linijama za slučaj 1-2 uzlazne promjene pod opterećenjem. Moment motora je postavljen da bude konstantan, a kanal upravljanja momentom motora se ne koristi. Trajanje simulacije je 15 s, pri čemu sama promjena stupnja prijenosa traje 0.7 s (slika 3-3). Promjena stupnja prijenosa inicira se u vremenskom trenutku t_{init} , u kojem brzina vrtnje motora doseže vrijednost od 3000 okr/min.

Model mjenjača punog reda izveden korištenjem dviju metoda automatskog modeliranja simuliran je za devet uzastopnih uzlaznih promjena s jednostrukim prijelazom, navedenih u tablici 3-1. Točnost predloženih metoda automatskog modeliranja provjerena je u smislu

3. Automatsko modeliranje i automatsko reduciranje reda modela automatskog mjenjača

korijena srednjeg kvadratnog odstupanja (*engl. Root-Mean-Square, RMS*) između odziva momenta izlaznog vratila mjenjača dobivenog simuliranjem analitičkog modela i modela dobivenog automatskom metodom. RMS odstupanje izračunava se za vrijeme trajanja prijelazne pojave promjene stupnja prijenosa, tj. u vremenskom intervalu $[t_{init} - 1s, t_{init} + 2s]$ (slika 3-3).



Slika 3-3. Profili kapaciteta momenta spojki, momenti spojki, brzina vrtnje SUI motora i moment izlaznog vratila transmisije za 1-2 uzlaznu promjenu

Završni rezultati prikazani su u tablici 3-1. Prosječne vrijednosti RMS odstupanja izlaznog momenta dvaju pristupa modeliranja padaju u raspon od $1.79 \cdot 10^{-12}$ Nm do $48.2 \cdot 10^{-12}$ Nm, što se smatra zanemarivim odstupanjem. Valja primijetiti kako pristup temeljen na identifikaciji matrica sustava simulacijom 20-sim modela rezultira nešto manjom točnošću u usporedbi s onim temeljenim na izvozu 20-sim modela.

3. Automatsko modeliranje i automatsko reduciranje reda modela automatskog mjenjača

Tablica 3-1. Usporedba RMS odstupanja između odziva momenta izlaznog vratila automatskog mjenjača dobivenog simulacijom analitički izvedenog i automatski generiranog modela mjenjača punog reda za različite uzlazne promjene s jednostrukim prijelazom

Metoda Promjena	RMS pogreška momenta izlaznog vratila [Nm]	
	Identifikacija temeljena na izvozu 20-sim modela u MATLAB skriptu	Identifikacija temeljena na izvođenju simulacije
1-2	$6.929 \cdot 10^{-12}$	$48.158 \cdot 10^{-12}$
2-3	$9.596 \cdot 10^{-12}$	$9.916 \cdot 10^{-12}$
3-4	$11.267 \cdot 10^{-12}$	$10.836 \cdot 10^{-12}$
4-5	$2.12 \cdot 10^{-12}$	$2.524 \cdot 10^{-12}$
5-6	$2.209 \cdot 10^{-12}$	$3.576 \cdot 10^{-12}$
6-7	$5.071 \cdot 10^{-12}$	$8.633 \cdot 10^{-12}$
7-8	$3.891 \cdot 10^{-12}$	$5.701 \cdot 10^{-12}$
8-9	$1.787 \cdot 10^{-12}$	$2.473 \cdot 10^{-12}$
9-10	$2.505 \cdot 10^{-12}$	$3.275 \cdot 10^{-12}$
Prosjeak	$5.042 \cdot 10^{-12}$	$10.566 \cdot 10^{-12}$

3.2. Model automatskog mjenjača reduciranog reda

Osim modela mjenjača punog reda, modeli reduciranog reda široko se koriste u raznim studijama (npr. u simulacijama, optimiranjima, analizama, sintezi upravljanja i sl.). U ovom se potpoglavlju predlažu dvije metode redukcije reda sustava (*engl. Model Order Reduction*, skraćeno MOR): (i) korištenjem veznog dijagrama modela mjenjača reduciranog reda i (ii) provođenjem matematičke redukcije reda modela implementirane kroz namjensku MATLAB skriptu.

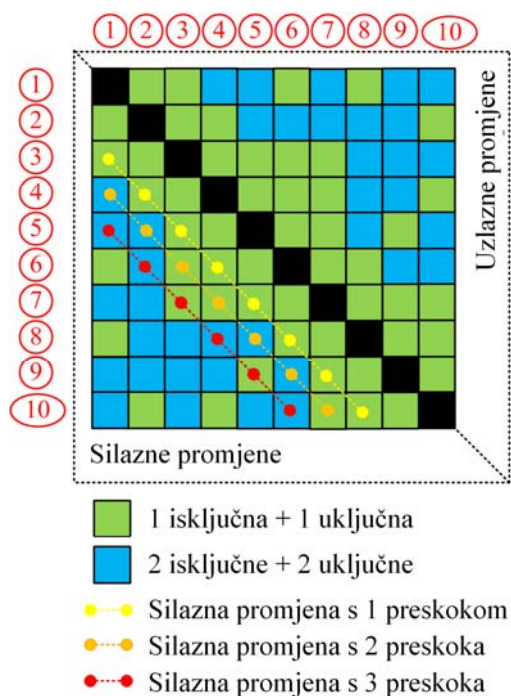
3.2.1. Motivacija

Kako bi se postigla računalna učinkovitost simulacija i optimiranja upravljačkih trajektorija, model mjenjača punog reda koji je izveden u odjeljku 2.2.3 može se reducirati uzimajući u obzir čvrste veze koje se uspostavljaju kroz zatvorene spojke. Valja napomenuti kako bi se ulazi koji odgovaraju momentima otvorenih spojki (onih koje se tipično ne moduliraju u toku promjene stupnja prijenosa) trebali zadržati u reduciranoj formi modela mjenjača, jer se time pruža mogućnost razmatranja i analize nekonvencionalnog pristupa upravljanju promjenom

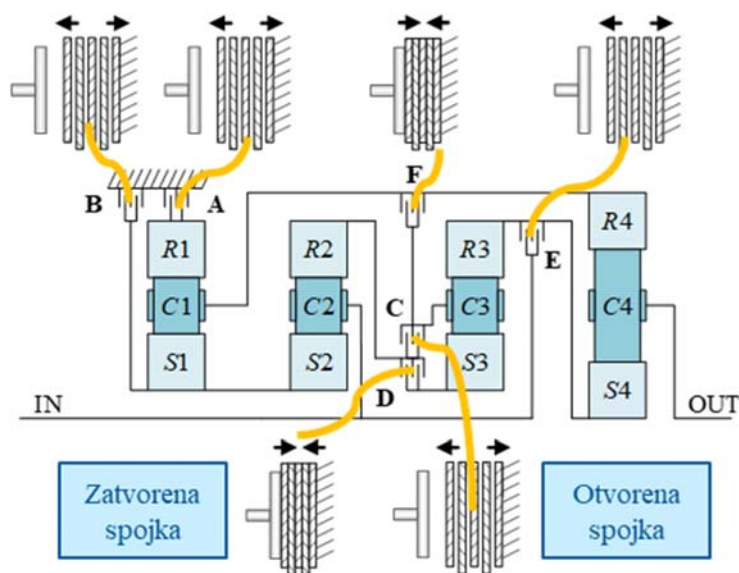
3. Automatsko modeliranje i automatsko reduciranje reda modela automatskog mjenjača

temeljenog na moduliranju momenta jedne ili više normalno otvorenih spojki (tzv. dodatne spojke [69],[70]).

Teorijski, za razmatrani automatski mjenjač sa šest spojki postoje $2^6 = 64$ moguće kombinacije stanja spojki. Među tih 64 stanja spojki, može se pokazati kako 35 stanja odgovara promjenama stupnja prijenosa s jednostrukim, odnosno dvostrukim prijelazom, dok dodatnih 11 stanja odgovara stabilnim stupnjevima prijenosa (10 stupnjeva za hod unaprijed i stupanj za hod unatrag, v. tablicu 2-1 i ilustraciju na slici 3-4). Na slici 3-5 dana je ilustracija stanja spojki u toku 10-6 silazne promjene s dvostrukim prijelazom (spojke A, B, C i E mijenjaju stanja u toku promjene, dok su spojke F i D zatvorene, v. tablicu 2-1). Kako bi se analizirale/projektirale sve te promjene kao i prijelazne pojave u stabilnim stupnjevima prijenosa korištenjem modela s minimalnom realizacijom, trebalo bi izvesti 46 modela mjenjača reduciranog reda. Budući da bi “ručno” izvođenje brojnih modela reduciranog reda bio dugotrajan i mukotrpan zadatak, prikladno bi bilo takve modele odrediti automatskim numeričkim rutinama.



Slika 3-4. Sve promjene s jednostrukim (zeleno) i dvostrukim (plavo) prijelazom razmatranog mjenjača s 10 stupnjeva prijenosa

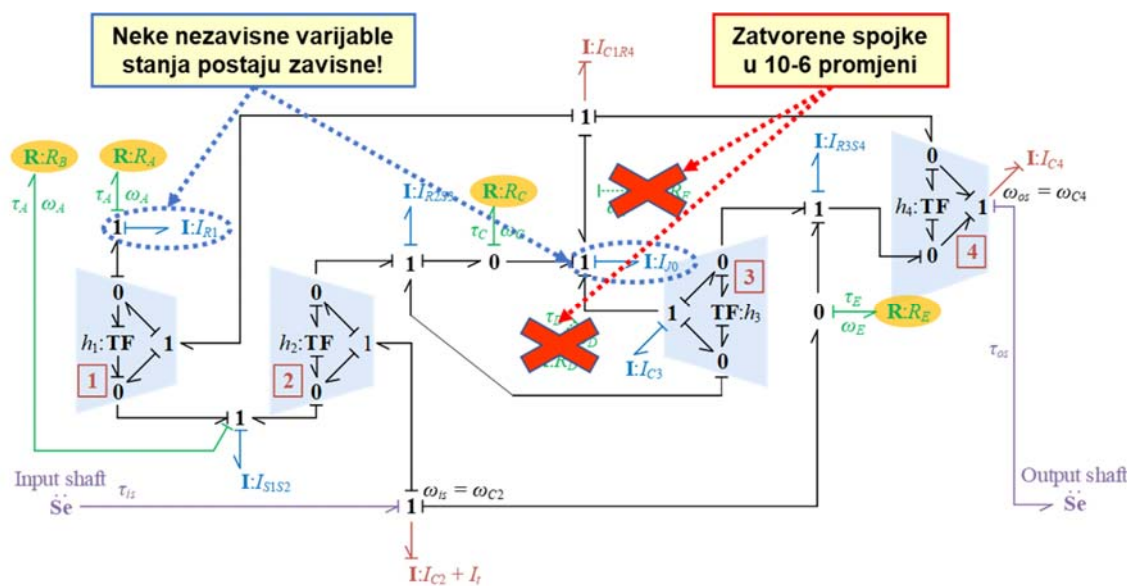


Slika 3-5. Ilustracija stanja spojki u toku 10-6 silazne promjene s dvostrukim prijelazom

3.2.2. Reduciranje reda modela temeljeno na metodi veznih dijagrama

Jedna od prednosti modeliranja dinamike automatskog mjenjača metodom veznih dijagrama jest jednostavnost reduciranja strukture modela (tj. reda modela) [16]. U određenim stupnjevima prijenosa ili promjenama stupnjeva prijenosa pojedine spojke su zatvorene, što znači da su njihove brzine klizanja jednake nuli. Iz tog razloga uklanjaju se pripadajuće veze u vезnom dijagramu, čime se mijenja i struktura vезnog dijagrama (a time i kauzalnost te red modela). Slika 3-6 prikazuje vезni dijagram reduciranog reda za 10-6 silaznu promjenu s dvostrukim prijelazom u toku koje su spojke D i F zatvorene (v. tablicu 2-1 i sliku 3-5). Valja uočiti kako su uklanjanjem pripadajućih veza inercijski elementi $I:R_1$ i $I:J_0$ poprimili derivativnu kauzalnost, čime je red modela spušten s pet na tri (usp. sliku 3-6 s vезnim dijagramom modela punog reda sa slike 2-9b).

3. Automatsko modeliranje i automatsko reduciranje reda modela automatskog mjenjača



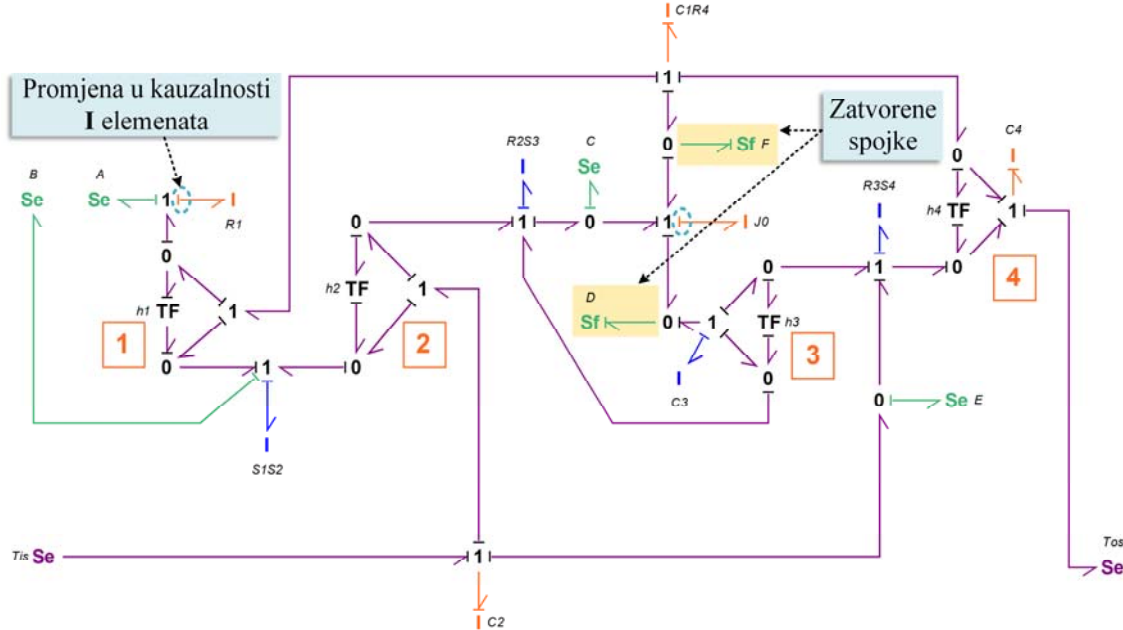
Slika 3-6. Vezni dijagram modela reduciranog reda za 10-6 promijenu

Procedura reduciranja reda modela može se automatizirati korištenjem 20-sim alata. U polaznom 20-sim modelu mjenjača punog reda korištenog za izvoz modela u MATLAB skriptu (slika 3-1), spojke su bile reprezentirane elementima izvora poriva/momenta (**Se** elementi). Kako je brzina klizanja zatvorene spojke jednaka nuli, u 20-sim modelu reduciranog reda, zatvorene spojke reprezentirane su **Sf** elementima (elementi izvora toka/brzine) s vrijednošću nula. Takvim mijenjanjem strukture modela, automatski se mijenja kauzalnost inercijskih elemenata (u smislu redukcije broja elemenata s integralnom kauzalnošću). Primjer 20-sim modela reduciranog reda koji se odnosi na 10-6 silaznu promjenu prikazan je na slici 3-7. Za ovaj primjer, 20-sim je ustanovio da tri inercijska elementa imaju integralnu kauzalnost (model trećeg reda), koja je dodijeljena elementima **I:C2**, **I:C1R4** i **I:C4**. Iako elementi **I:R1**, **I:J0** i **I:C1R4** imaju iste postavke prioriteta kauzalnosti (preferirana tok-izlazna kauzalnost; v. sliku 2-14), potonji je odabran jer abecedno prethodi ostalima.

Nakon što se reducirani 20-sim model obradi, primjenjuje se jedna od prethodno predstavljenih metoda automatskog modeliranja (potpoglavlje 3.1) kako bi se numerički dobile matrice $\mathbf{L}$, $\mathbf{U}$ i $\mathbf{T}$ reduciranog reda (uključujući odvojene matrice inercija i ulazne matrice $\mathbf{A}$ i $\mathbf{B}$, po potrebi). Iako je ova metoda karakterizirana opće-razumljivom implementacijom i vrlo dobrim performansama, njezin glavni nedostatak odnosi se na nemogućnost njenog potpunog automatiziranja. Naime, metoda je ograničena zbog nužnosti ručnog prebacivanja elemenata

3. Automatsko modeliranje i automatsko reduciranje reda modela automatskog mjenjača

zatvorenih spojki u **Sf** elemente. To je zbog toga što aktualna verzija 20-sim alata ne može automatski promijeniti strukturu modela (ovdje npr. na temelju specificiranog stanja spojki).



Slika 3-7. Vezni dijagram modela reduciranog reda implementiran u 20-sim okruženju

3.3. Metoda za automatsko reduciranje reda modela

U ovom potpoglavlju predstavlja se numerička metoda za potpuno-automatsko reduciranje reda modela. Konačni cilj je generiranje modela reduciranog reda minimalne realizacije za proizvoljno, korisnički-definirano stanje spojki, polazeći od modela mjenjača punog reda u prostoru stanja koji je izveden (ili automatski generiran) u prethodnim poglavljima.

3.3.1. Određivanje momenata zatvorenih spojki

Metoda reduciranja reda modela (skraćeno MOR metoda) temeljena je na određivanju momenata zatvorenih spojki i njihovom uvrštavanju u polaznu jednadžbu stanja (2-13). Uvodi se vektor $\omega_{cl,st} \in \mathbb{R}^{n_{st}}$ koji sadrži brzine klizanja zatvorenih spojki (n_{st} označava broj elemenata vektora s koji su jednaki 1, gdje je s definiran izrazom (2-23)). Budući da vrijedi $\omega_{cl,st} = 0$ (brzine klizanja zatvorenih spojki jednake su nuli), vrijedi i $\dot{\omega}_{cl,st} = 0$, te se korištenjem jednadžbe (2-18) dobiva:

3. Automatsko modeliranje i automatsko reduciranje reda modela automatskog mjenjača

$$\dot{\mathbf{w}}_{cl,st} = \mathbf{M}_s \boldsymbol{\tau}_{in} = 0, \quad (3-6)$$

gdje matrica $\mathbf{M}_s \in \mathbb{R}^{n_{st} \times n_{in}}$ obuhvaća one retke polazne matrice $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{n_{cl} \times n_{in}}$ koji odgovaraju zatvorenim spojkama. Podjelom ulaznog vektora $\boldsymbol{\tau}_{in} \in \mathbb{R}^{n_{in}}$ jednadžbe (2-11) (koji se sada označava kao $\boldsymbol{\tau}_{in}^*$, budući da se redosljed varijabli unutar vektora može mijenjati ovisno o zatvorenim spojkama) na pod-vektor momenata zatvorenih spojki $\boldsymbol{\tau}_{stick} \in \mathbb{R}^{n_{st}}$ i na pod-vektor $\boldsymbol{\tau}_{slip,io} \in \mathbb{R}^{n_{in} - n_{st}}$ koji sadrži momente preostalih (klizećih) spojki te vanjske momente τ_{os} i τ_{is} , te čineći isto za matricu $\mathbf{M}_s$

$$\boldsymbol{\tau}_{in}^* = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_{stick} \\ \boldsymbol{\tau}_{slip,io} \end{bmatrix}, \quad (3-7)$$

$$\mathbf{M}_s^* = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{stick} & \mathbf{M}_{slip,io} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_{stick} \in \mathbb{R}^{n_{st} \times n_{st}}, \quad \mathbf{M}_{slip,io} \in \mathbb{R}^{n_{st} \times (n_{in} - n_{st})}, \quad (3-8)$$

jednadžba (3-6) može se zapisati kao

$$\mathbf{M}_{stick} \boldsymbol{\tau}_{stick} = -\mathbf{M}_{slip,io} \boldsymbol{\tau}_{slip,io}, \quad (3-9)$$

sa sljedećim rješenjem za vektor momenata zatvorenih spojki (koji se također koristi u simulacijskom modelu temeljenom na Karnoppovom modelu trenja, slika 2-12):

$$\boldsymbol{\tau}_{stick} = \underbrace{-\mathbf{M}_{stick}^{-1} \mathbf{M}_{slip,io}}_{\mathbf{\Gamma}} \boldsymbol{\tau}_{slip,io}. \quad (3-10)$$

Za razmatrani mjenjač, matrica $\mathbf{M}_{stick}$ je singularna za $\mathbf{s} = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$, pa posljedično jednadžba (3-10) nema rješenja. Međutim, stanje u kojem su sve spojke zatvorene nema praktično značenje, te se može smatrati zabranjenom kombinacijom stanja spojki kod implementacije MOR metode.

3.3.2. Varijable stanja i ulazna matrica prostora stanja modela reduciranog reda

Kako bi se odredila reducirana forma ulazne matrice $\mathbf{L}$ modela u prostoru stanja danog jednadžbom (2-13), polazna matrica $\mathbf{L}$ podijeljena je u dvije pod-matrice (usp. izraz (3-8)):

$$\mathbf{L}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{stick} & \mathbf{L}_{slip,io} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}_{stick} \in \mathbb{R}^{n \times n_{st}}, \quad \mathbf{L}_{slip,io} \in \mathbb{R}^{n \times (n_{in} - n_{st})}. \quad (3-11)$$

Kombiniranjem jednadžbe (3-11) s jednadžbom (2-13) te uzimanjem u obzir jednadžbi (3-7) i (3-10) konačno se dobiva

3. Automatsko modeliranje i automatsko reduciranje reda modela automatskog mjenjača

$$\dot{\omega}_s = \underbrace{(\mathbf{L}_{stick} \mathbf{\Gamma} + \mathbf{L}_{slip,io})}_{\mathbf{\Lambda}} \boldsymbol{\tau}_{slip,io} , \quad \mathbf{\Lambda} \in \mathbb{R}^{n \times (n_{in} - n_{st})} . \quad (3-12)$$

Kako se red modela reducira uzimajući u obzir zatvorene spojke (tj. kako se reducira broj varijabli stanja), svi redci dobivene matrice $\mathbf{\Lambda}$ više nisu linearno nezavisni. Stoga se red reduciranog modela (n_{red}) može dobiti određivanjem ranga matrice $\mathbf{\Lambda}$

$$n_{red} = \text{rang } \mathbf{\Lambda} . \quad (3-13)$$

Kako se ispostavlja da red modela reduciranog reda, n_{red} , zadovoljava jednadžbu $n_{red} = n - n_{st}$, postoji šest stanja spojki (npr. $\mathbf{s} = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0]$) za koje je red modela reduciranog reda nije definiran ($n_{red} = 0$). Takve kombinacije stanja spojki trebaju se pribrojiti skupu zabranjenih stanja.

Za potrebe odabira varijabli stanja modela reduciranog reda iz skupa polaznih varijabli stanja iz jednadžbe (2-11), vektor prioriteta varijabli stanja $\mathbf{s}_p$ definira se od strane korisnika:

$$\mathbf{s}_p = \begin{bmatrix} s_{pC2} & s_{pR1} & s_{pC1R4} & s_{pJ0} & s_{pC4} \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

kao proizvoljni perturbirani skup skupa $\{1, 2, 3, 4, 5\}$, pri čemu manja vrijednost znači viši prioritet u odabiru stanja modela reduciranog reda. Na temelju vektora prioriteta $\mathbf{s}_p$, vektor varijabli stanja dijeli su u pod-vektor stanja modela reduciranog reda i pod-vektor novih energetski zavisnih varijabli, $\boldsymbol{\omega}_s^* = [\boldsymbol{\omega}_{s,red} \ \boldsymbol{\omega}_{s,dep}]^T$. Nakon takve podjele vektora varijabli stanja, matrica $\mathbf{\Lambda}$ dana izrazom (3-12) može se podijeliti u dvije pod-matrice:

$$\mathbf{\Lambda}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{\Lambda}_{red} \\ \dots \\ \mathbf{\Lambda}_{dep} \end{bmatrix} . \quad (3-15)$$

Ako vrijedi $\text{rang } \mathbf{\Lambda}_{red} = \text{rang } \mathbf{\Lambda}^* = n_{red}$, izbor varijabli stanja modela reduciranog reda temeljen na vektoru prioriteta stanja je ostvariv, te se ulazna matrica reduciranog reda prostora stanja $\mathbf{L}_{red} \in \mathbb{R}^{n_{red} \times (n_{in} - n_{st})}$ dobiva kao

$$\mathbf{L}_{red} = \mathbf{\Lambda}_{red} . \quad (3-16)$$

3. Automatsko modeliranje i automatsko reduciranje reda modela automatskog mjenjača

Ako je rang matrice Λ_{red} manji od ranga matrice Λ^* , izabire se novi vektor varijabli stanja s inkrementalno reduciranim prioritetom, te se proces ponavlja u petlji sve dok se ne zadovolji uvjet $\text{rang } \Lambda_{\text{red}} = \text{rang } \Lambda^*$.

Nadalje, uvodi se matrica $\mathbf{Z} \in \mathbb{R}^{(n - n_{\text{red}}) \times n_{\text{red}}}$, koja uspostavlja linearnu relaciju između novih energetski zavisnih varijabli $\omega_{\text{s,dep}} \in \mathbb{R}^{n - n_{\text{red}}}$ i novoizabranih varijabli stanja modela reduciranog reda $\omega_{\text{s,red}} \in \mathbb{R}^{n_{\text{red}}}$:

$$\omega_{\text{s,dep}} = \mathbf{Z} \omega_{\text{s,red}} . \quad (3-17)$$

Matrica $\mathbf{Z} \in \mathbb{R}^{(n - n_{\text{red}}) \times n_{\text{red}}}$ se dobiva rješavanjem sljedećeg sustava linearnih algebarskih jednadžbi:

$$\Lambda_{\text{dep}} = \mathbf{Z} \Lambda_{\text{red}} . \quad (3-18)$$

Budući da matrica $\Lambda_{\text{red}} \in \mathbb{R}^{n_{\text{red}} \times (n_{\text{in}} - n_{\text{st}})}$ nije kvadratna matrica, gornji sustav jednadžbi može imati jedinstveno rješenje, može biti bez rješenja ili može imati beskonačno mnogo rješenja [68]. Kako vrijedi relacija $\text{rang } \Lambda_{\text{red}} = \text{rang } \Lambda^* = n_{\text{red}}$, sustav jednadžbi $\Lambda_{\text{dep}} = \mathbf{Z} \Lambda_{\text{red}}$ ima jedinstveno rješenje prema Rouché-Capelli teoremu [71].

3.3.3. Preostale karakteristične matrice modela reduciranog reda

Nakon određivanja matrice $\mathbf{Z}$, mogu se odrediti reducirane forme matrica $\mathbf{T} \in \mathbb{R}^{n_{\text{dep}0} \times n}$ iz jednadžbe (2-16) (matrica $\mathbf{T}_{\text{red}} \in \mathbb{R}^{n_{\text{dep}0} \times n_{\text{red}}}$, gdje je $n_{\text{dep}0} = 4$ broj polaznih energetski zavisnih varijabli iz jednadžbe (2-16)) i $\mathbf{U}$ iz jednadžbe (2-14) (matrica $\mathbf{U}_{\text{red}} \in \mathbb{R}^{n_{\text{in}} \times n_{\text{red}}}$). Za tu svrhu, polazna matrica $\mathbf{T}$ je podijeljena u dvije pod-matrice: matricu $\mathbf{T}_{\text{red}0} \in \mathbb{R}^{n_{\text{dep}0} \times n_{\text{red}}}$, koja sadrži stupce matrice $\mathbf{T}$ koji odgovaraju izabranim varijablama stanja modela reduciranog reda $\omega_{\text{s,red}}$ i matricu $\mathbf{T}_{\text{dep}} \in \mathbb{R}^{n_{\text{dep}0} \times (n - n_{\text{red}})}$, koja sadrži preostale stupce matrice $\mathbf{T}$. Izraz (2-16) za polazne energetski zavisne varijable sada se može izraziti kao

$$\tilde{\omega} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{\text{red}0} & \vdots & \mathbf{T}_{\text{dep}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{\text{s,red}} \\ \cdots \\ \omega_{\text{s,dep}} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{\text{red}0} \omega_{\text{s,red}} + \mathbf{T}_{\text{dep}} \omega_{\text{s,dep}} . \quad (3-19)$$

Uvrštavanje jednadžbe (3-17) u jednadžbu (3-19) daje matricu $\mathbf{T}_{\text{red}}$

3. Automatsko modeliranje i automatsko reduciranje reda modela automatskog mjenjača

$$\tilde{\omega} = \underbrace{(\mathbf{T}_{\text{red}0} + \mathbf{T}_{\text{dep}} \mathbf{Z})}_{\mathbf{T}_{\text{red}}} \omega_{\text{s,red}} . \quad (3-20)$$

Polazne energetski zavisne varijable dane jednadžbom (3-20) pridodaju se onima iz vektora $\omega_{\text{s,dep}}$, čime se dobiva ukupan broj energetski zavisnih varijabli, koji iznosi $n - n_{\text{red}} + n_{\text{dep}0}$.

Slijedeći gore prikazani postupak u slučaju matrice $\mathbf{U}$ iz jednadžbe (2-14), matrica $\mathbf{U}_{\text{red}} \in \mathbb{R}^{n_{\text{in}} \times n_{\text{red}}}$ modela reduciranog reda može se dobiti kao:

$$\omega = \underbrace{(\mathbf{U}_{\text{red}0} + \mathbf{U}_{\text{dep}} \mathbf{Z})}_{\mathbf{U}_{\text{red}}} \omega_{\text{s,red}} . \quad (3-21)$$

Prema izrazu (2-14), matrica $\mathbf{U}_{\text{red}}$ može se razdvojiti u matrice $\mathbf{U}_{\text{cl,red}} \in \mathbb{R}^{n_{\text{cl}} \times n_{\text{red}}}$ i $\mathbf{U}_{\text{oi,red}} \in \mathbb{R}^{2 \times n_{\text{red}}}$:

$$\mathbf{U}_{\text{red}} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{\text{cl,red}} \\ \dots \\ \mathbf{U}_{\text{oi,red}} \end{bmatrix} . \quad (3-22)$$

Redci matrice $\mathbf{U}_{\text{cl,red}}$ koji odgovaraju zatvorenim spojkama moraju biti jednaki nul-vektoru kako bi dali brzinu klizanja nula zatvorenih spojki. Stoga se ti redci mogu provjeriti kako bi se evaluirao postupak generiranja modela reduciranog reda. Isto tako, ti se redci mogu izostaviti iz finalnih izraza zajedno s pripadajućim brzinama klizanja.

Korištenjem matrica $\mathbf{U}_{\text{red}}$ i $\mathbf{L}_{\text{red}}$, mogu se odrediti reducirane forme matrice inercija $\mathbf{A}$ (matrica $\mathbf{A}_{\text{red}} \in \mathbb{R}^{n_{\text{red}} \times n_{\text{red}}}$) i ulazne matrice $\mathbf{B}$ (matrica $\mathbf{B}_{\text{red}} \in \mathbb{R}^{n_{\text{red}} \times (n_{\text{red}} - n_{\text{st}})}$) iz jednadžbe (2-11). Budući da izraz (2-15) vrijedi kako za model punog reda, tako i za model reduciranog reda (v. Prilog C), matrica $\mathbf{B}_{\text{red}}$ može se izdvojiti iz matrice $\mathbf{U}_{\text{red}} \in \mathbb{R}^{n_{\text{in}} \times n_{\text{red}}}$. Međutim, valja se prisjetiti kako su momenti zatvorenih spojki iščeznuli iz početnog ulaznog vektora τ_{in} (v. jednadžbu (2-11)). Stoga se redci matrice $\mathbf{U}_{\text{red}}$ koji odgovaraju zatvorenim spojkama izostavljaju kod izračuna matrice $\mathbf{B}_{\text{red}}$, što rezultira matricom $\mathbf{U}_{\text{redB}} \in \mathbb{R}^{(n_{\text{in}} - n_{\text{st}}) \times n_{\text{red}}}$, te konačno matricom $\mathbf{B}_{\text{red}}$ (usp. izraz (2-15)):

$$\mathbf{B}_{\text{red}} = \begin{bmatrix} -\mathbf{U}_{\text{redB}} & -\mathbf{u}_{\text{o,red}} & \mathbf{u}_{\text{i,red}} \end{bmatrix}^T . \quad (3-23)$$

Slijedeći jednadžbu (2-12), matrica inercija $\mathbf{A}_{\text{red}}$ reduciranog reda može se dobiti rješavanjem pripadajućeg linearnog sustava:

$$\mathbf{A}_{\text{red}} \mathbf{L}_{\text{red}} = \mathbf{B}_{\text{red}} \quad (3-24)$$

Iako $\mathbf{L}_{\text{red}}$ nije kvadratna matrica, jedinstvenost rješenja matrične jednadžbe (3-24) dokazuje se ponovno nalaženjem reducirane redčane ešalonske forme proširene matrice $\begin{bmatrix} \mathbf{L}_{\text{red}}^T & \mathbf{B}_{\text{red}}^T \end{bmatrix}$ i provjerom njezine strukture.

3.4. Strukture modela automatskog mjenjača reduciranog reda za promjene s jednostrukim i dvostrukim prijelazom

U ovom potpoglavlju predstaviti će se matematički oblici modela reduciranog reda za promjene s jednostrukim i dvostrukim prijelazom, koji će se široko koristiti u simulacijskim i optimizacijskim studijama u nastavku ovog rada. Temeljem matematičkih modela izvesti će se i odgovarajući vezni dijagrami.

Primjena MOR metode prezentirane u prethodnom potpoglavlju rezultira sljedećom općom formom modela mjenjača drugog reda za promjene s jednostrukim prijelazom (tijekom kojih su tri od šest spojki zatvorene za razmatranu transmisiju, v. tablicu 2-1):

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{\text{red}} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_{s1} & \dot{\omega}_{s2} \end{bmatrix}^T &= \mathbf{B}_{\text{red}} \begin{bmatrix} \tau_{fa} & \tau_{fb} & \tau_{fc} & \tau_{os} & \tau_{is} \end{bmatrix}^T \\ \begin{bmatrix} \omega_a & \omega_b & \omega_c \end{bmatrix}^T &= \mathbf{U}_{\text{cl,red}} \begin{bmatrix} \omega_{s1} & \omega_{s2} \end{bmatrix}^T, \\ \tau_{fi} &= f(\omega_i), \quad i \in \{a, b, c\} \end{aligned} \quad (3-25)$$

gdje se varijable stanja ω_{s1} i ω_{s2} odabiru temeljem vektora prioriteta stanja danog izrazom (3-14)), dok indeksi a , b i c odgovaraju aktivnim spojkama za danu promjenu stupnja prijenosa (npr. za 1-2 uzlaznu promjenu vrijedi sljedeća notacija: $a = C$ – uključna spojka, $b = E$ – isključna spojka i $c = F$ – normalno otvorena i potencijalno dodatna/modulirana spojka [69],[70]; v. tablicu 2-1). MOR postupak daje i konkretne vrijednosti parametara modela (tj. matrica $\mathbf{A}_{\text{red}}$, $\mathbf{B}_{\text{red}}$ i $\mathbf{U}_{\text{cl,red}}$) za danu promjenu stupnja prijenosa. Van-dijagonalni elementi $a_{ij} = a_{ji}$, $i \neq j$, matrice inercija $\mathbf{A}_{\text{red}}$ reprezentiraju članove koji se javljaju uslijed sprege inercije, te koji mogu značajnije utjecati na dinamiku promjene stupnja prijenosa [6],[20],[72],[73].

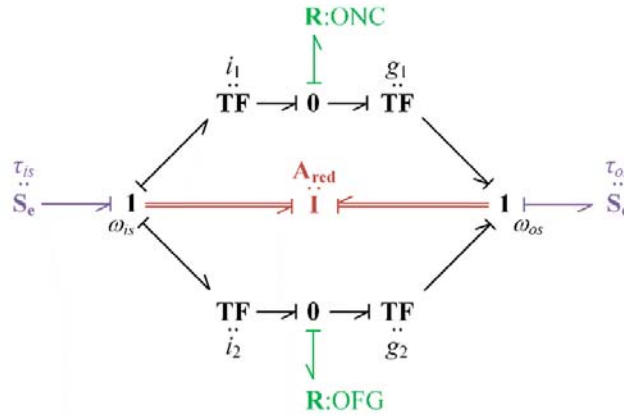
Dinamika mjenjača za promjenu s jednostrukim prijelazom zapisana izrazom (3-25) može se predstaviti veznim dijagramom prikazanim na slici 3-8. Valja uočiti kako je ovdje oznaka

3. Automatsko modeliranje i automatsko reduciranje reda modela automatskog mjenjača

uključne spojke ONC, dok se isključna spojka označava kao OFG. U veznom dijagramu nije prikazana treća, normalno otvorena spojka, tj. dodatna grana koja se u tom slučaju javlja (v. [70] za više detalja). Ekvivalentni prijenosni omjeri modela u formi veznog dijagrama dobivaju se iz elemenata b_{ij} ulazne matrice $\mathbf{B}_{\text{red}}$ na sljedeći način:

$$\begin{aligned} i_j &= -b_{1j} \\ g_j &= 1/b_{2j} \end{aligned}, \quad j = 1, 2.$$

Vezni dijagram modela sa slike 3-8 uključuje članove sprege inercije koji su reprezentirani matričnim elementom $\mathbf{I}:\mathbf{A}_{\text{red}}$. 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) [73].



Slika 3-8. Vezni dijagram dinamike promjene s jednostrukim prijelazom (dvije aktivne spojke)

Primjena MOR metode za slučaj promjene s dvostrukim prijelazom (tijekom kojih su dvije od šest spojki zatvorene za razmatrani mjenjač, tablica 2-1) rezultira sljedećim modelom trećeg reda u prostoru stanja:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{\text{red}} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_{s1} & \dot{\omega}_{s2} & \dot{\omega}_{s3} \end{bmatrix}^T &= \mathbf{B}_{\text{red}} \begin{bmatrix} \tau_{fa} & \tau_{fb} & \tau_{fc} & \tau_{fd} & \tau_{os} & \tau_{is} \end{bmatrix}^T \\ \begin{bmatrix} \omega_a & \omega_b & \omega_c & \omega_d \end{bmatrix}^T &= \mathbf{U}_{\text{cl,red}} \begin{bmatrix} \omega_{s1} & \omega_{s2} & \omega_{s3} \end{bmatrix}^T, \\ \tau_{fi} &= f(\omega_i), \quad i \in \{a, b, c, d\} \end{aligned} \quad (3-26)$$

gdje se varijable stanja ω_{s1} , ω_{s2} i ω_{s3} ponovno odabiru na temelju vektora prioriteta stanja (v. izraz (3-14)), dok indeksi a , b , c i d označavaju četiri aktivne/upravljanje spojke. Primjer

3. Automatsko modeliranje i automatsko reduciranje reda modela automatskog mjenjača

promjene s dvostrukim prijelazom je 10-6 silazna promjena kod koje su isključne spojke $b = B : OFG_2$ i $c = C : OFG_1$, dok su uključne spojke $a = A : ONC_2$ i $d = E : ONC_1$ (v. tablicu 2-1 i sliku 3-5). Ovdje se numerički indeksi 1 i 2 odnose na iznose brzina klizanja potpuno otvorenih spojki (1 = niža brzina klizanja, 2 = viša brzina klizanja) i to na početku promjene stupnja prijenosa za uključne spojke i na kraju promjene za isključne spojke. Uvedena notacija označavanja spojki primjenjivat će se u preostalom dijelu ovog rada.

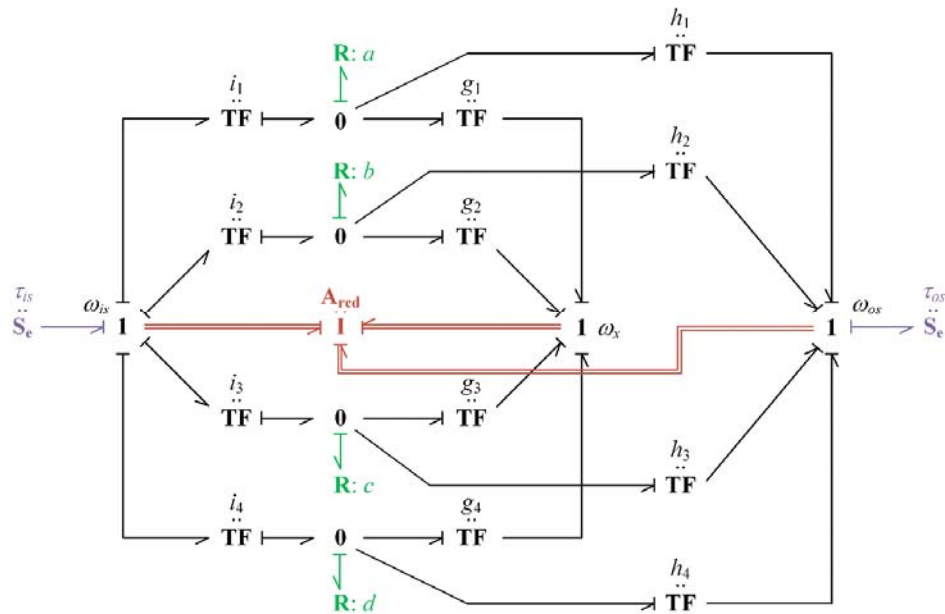
Slika 3-9 prikazuje vezni dijagram modela dinamike promjene s dvostrukim prijelazom reduciranog reda opisanog izrazom (3-26). Ekvivalentni prijenosni omjeri modela reduciranog reda dobivaju se iz elemenata b_{ij} ulazne matrice $\mathbf{B}_{red}$ kao:

$$i_j = -b_{1j}$$

$$g_j = 1/b_{2j}, \quad j = 1, \dots, 4.$$

$$h_j = 1/b_{3j}$$

Glavna strukturalna proširenja DTS modela sa slike 3-9 u odnosu na STS model prikazan na slici 3-8 su sljedeća: (i) javljaju se dodatne dvije grane snage koje su povezane s dodatnim parom uključne i isključne spojke te (ii) postoji dodatna nezavisna varijabla stanja koja je na slici 3-9 označena kao ω_x .



Slika 3-9. Vezni dijagram dinamike promjene s dvostrukim prijelazom (četiri aktivne spojke)

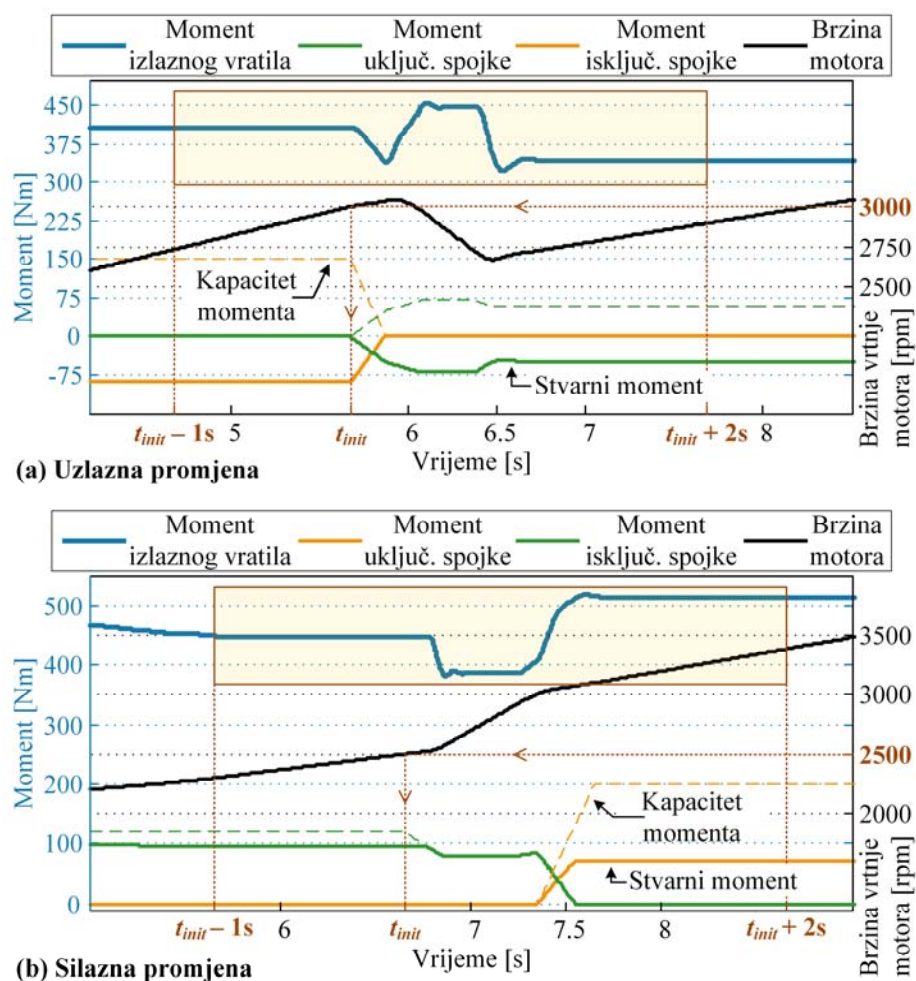
3.5. Provjera modela reduciranog reda

Kako bi se predložena MOR metoda provjerila i kako bi se ilustrirala njezina računalna učinkovitost, u ovom se potpoglavlju provode simulacije raznih promjena s jednostrukim prijelazom korištenjem modela mjenjača punog reda (potpoglavlje 2.2) i automatski reduciranog modela mjenjača (potpoglavlje 3.3). Za tu svrhu, ponovno se koristi MATLAB/Simulink implementacija modela pogona vozila sa slike 2-16.

3.5.1. Opis pristupa provjeri

Kao model mjenjača reduciranog reda koristi se model drugog reda opisan izrazom (3-25). Simulacije su temeljene na pojednostavljenim profilima kapaciteta momenta spojke danim na slici 3-10 isprekidanim zelenim i žutim linijama. Na slici 3-10 prikazan je i stvarni moment spojke (označen punim zelenim i žutim linijama), koji je jednak kapacitetu momenta spojke sve dok spojka proklizava (tj. za $\omega \neq 0$ i uz napomenu da je korišten Coulombov model trenja). Kvantitativno, profili kapaciteta momenta spojki na slici 3-10 dani su za 3-4 uzlaznu promjenu i 5-4 silaznu promjenu, te su ispravno skalirani po amplitudi za druge promjene s ciljem dobivanja ujednačene kvalitete promjene stupnja prijenosa. Moment motora postavljen je kao konstantan, a kanal upravljanja momentom motora se ne koristi. Trajanje simulacije iznosi 15 s, od čega sama promjena stupnja prijenosa traje 0.7 s (slika 3-10). Za uzlazne promjene, promjena stupnja se inicira u vremenskom trenutku t_{init} u kojem brzina vrtnje motora doseže vrijednost od 3000 okr/min, dok za silazne promjene taj prag brzine vrtnje iznosi 2500 okr/min (slika 3-10). Za svaku promjenu stupnja prijenosa, simulacije se izvode 10 puta u petlji korištenjem osobnog računala temeljenog na Intel® Xeon® centralnoj procesnoj jedinici takta 2.8 GHz.

3. Automatsko modeliranje i automatsko reduciranje reda modela automatskog mjenjača



Slika 3-10. Profili kapaciteta momenta spojke, stvarnih momenata spojke, brzine vrtnje motora i momenta izlaznog vratila transmisije za: (a) 3-4 uzlaznu i (b) 5-4 silaznu promjenu

3.5.2. Rezultati i diskusija

Modeli reduciranog reda su vrednovani za 24 različite promjene stupnja prijenosa s jednostrukim prijelazom, uključujući sve uzastopne uzlazne promjene (1-2, 2-3, ..., 9-10) i silazne promjene (10-9, 9-8, ..., 2-1) te nekolicinu preskočno-silaznih promjena (4-2, 7-5, 10-8, 6-3, 7-4, 7-3). Za svaku vrstu promjene (uzlazne, silazne i preskočno-silazne) u tablici 3-2 dane su minimalne, maksimalne i prosječne vrijednosti vremena izvođenja simulacije (za cijeli simulacijski vremenski interval od 15 s) za model mjenjača punog i reduciranog reda, te za oba razmatrana modela trenja spojke (klasični i Karnoppov model). Zadnji stupac tablice 3-2 daje korijen srednjeg kvadratnog (RMS) odstupanja između odziva momenata izlaznog vratila

3. Automatsko modeliranje i automatsko reduciranje reda modela automatskog mjenjača

dobivenih simuliranjem modela punog i reduciranog reda u vremenskom intervalu $[t_{init} - 1 \text{ s}, t_{init} + 2 \text{ s}]$, tj. tijekom trajanja prijelazne pojave promjene stupnja prijenosa (slika 3-10).

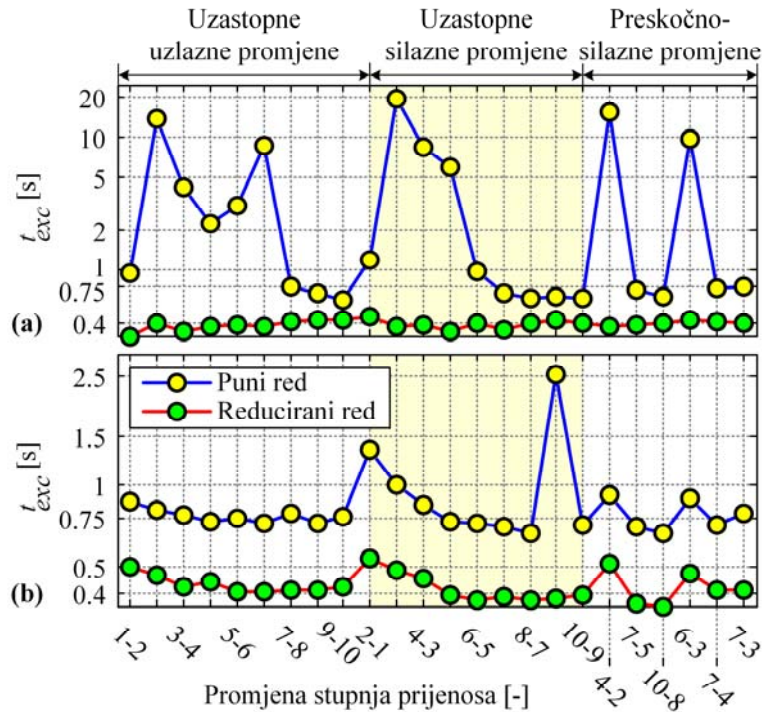
Rezultati dani u tablici 3-2 pokazuju da je redukcija vremena izvođenja simulacije uslijed korištenja modela reduciranog reda posebno izražena u slučaju korištenja klasičnog modela trenja (prosječno vrijeme izvođenja je otprilike 10 puta manje za model reduciranog reda). To se objašnjava računalnom neučinkovitošću klasičnog modela trenja kada se simuliraju zatvorene spojke (tj. moment držanja; [16]). U slučaju Karnoppova modela trenja, model pogona temeljen na modelu mjenjača reduciranog reda izvodi se ugrubo oko dva puta brže od izvornog (s modelom mjenjača punog reda), čime se i dalje ostvaruju značajne uštede računalnog vremena kod opsežnih simulacijskih studija, te posebno kod optimizacijskih studija. Prosječne vrijednosti RMS odstupanja izlaznog momenta dvaju modela padaju u raspon od 0.1 do 0.5 Nm, što čini od 0.03% do 0.17% prosječne vrijednosti izlaznog momenta u punom rasponu od 300 Nm. Takvo malo odstupanje potvrđuje ispravnost MOR metode i njegove automatizirane numeričke implementacije.

Slika 3-11 prikazuje vremena izvođenja simulacije za individualne promjene stupnja prijenosa, čime se dodatno ilustriraju nalazi računalne učinkovitosti temeljeni na agregiranim rezultatima iz tablice 3-2. Vrijedno je napomenuti kako su vremena izvođenja simulacije prilično neovisna o vrsti promjene kada se koristi model reduciranog reda, dok ona mogu biti izrazito visoka za neke promjene u slučaju korištenja modela punog reda (posebice kada se koristi klasični model trenja).

3. Automatsko modeliranje i automatsko reduciranje reda modela automatskog mjenjača

Tablica 3-2. Usporedba numeričke učinkovitosti i točnosti modela pogona vozila temeljenih na modelu mjenjača punog i reduciranog reda za različite modele trenja spojke (rezultati su uprosječeni za razne promjene stupnja prijenosa)

Red modela mjenjača	Uzastopne uzlazne promjene			Prosječan $\tau_{os, RMSE}$ [Nm]
	$t_{exc, min}$ [s]	$t_{exc, max}$ [s]	$t_{exc, avg}$ [s]	
Klasični model trenja				
Puni	0.6053	13.6793	3.8794	0.0906
Reducirani	0.3212	0.4278	0.3856	
Karnoppov model trenja				
Puni	0.724	0.8732	0.771	0.2933
Reducirani	0.4058	0.5011	0.4339	
	Uzastopne silazne promjene			
Klasični model trenja				
Puni	0.6068	19.4137	4.2706	0.3544
Reducirani	0.3412	0.4478	0.3911	
Karnoppov model trenja				
Puni	0.6677	2.5239	1.0273	0.4425
Reducirani	0.3804	0.541	0.4233	
	Preskočno-silazne promjene			
Klasični model trenja				
Puni	0.6353	15.717	4.7	0.2016
Reducirani	0.3761	0.4218	0.4005	
Karnoppov model trenja				
Puni	0.6654	0.9236	0.7806	0.4797
Reducirani	0.3612	0.5192	0.4244	



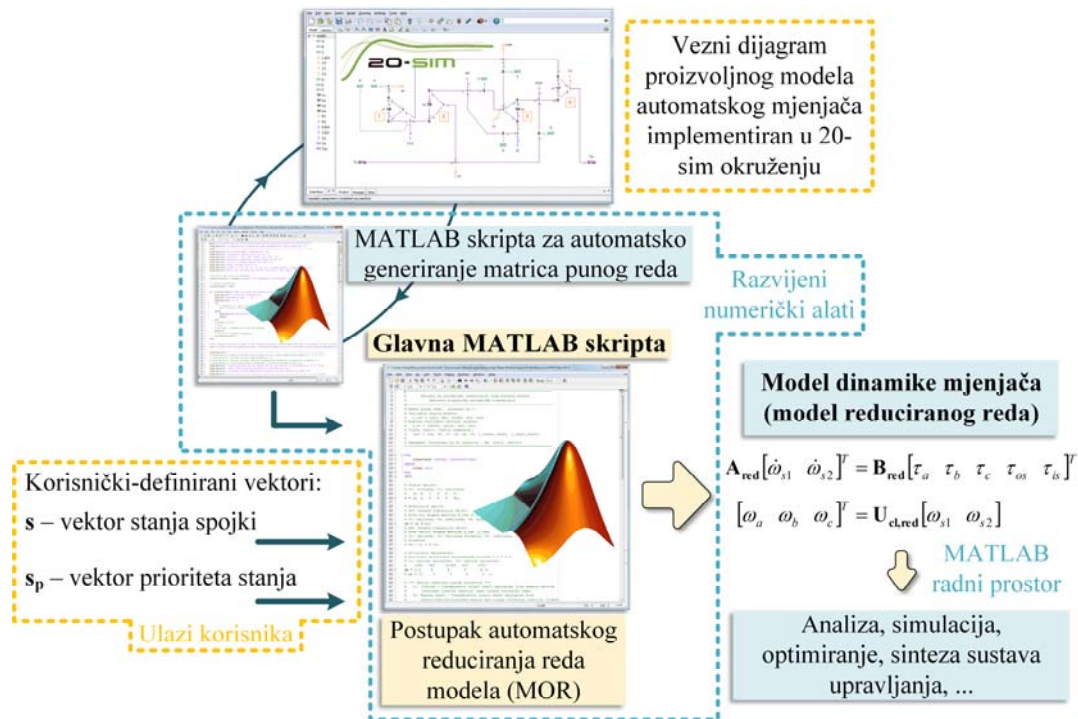
Slika 3-11. Usporedba vremena trajanja simulacije za puni i reducirani model automatskog mjenjača i za razne promjene stupnja prijenosa koristeći: (a) klasični model trenja spojke i (b) Karnoppov model trenja spojke

3.6. Jedinstveni alat za automatsko modeliranje dinamike automatskog mjenjača

Predložena MOR procedura implementirana je kao MATLAB skripta, koja automatski procesira matrice modela mjenjača punog reda, te temeljem vektora stanja spojki $\mathbf{s}$ i vektora prioriteta stanja $\mathbf{s}_p$ generira matrice modela reduciranog reda. Kombiniranjem alata za automatsko generiranje modela mjenjača punog reda i MOR alata, stvoren je jedinstveni alat za automatsko modeliranje dinamike automatskog mjenjača. Naime, kada se poveže s MOR alatom, vezni dijagram modela mjenjača implementiran u 20-sim okruženju može se izravno transformirati u matrice modela reduciranog reda za bilo koji stupanj prijenosa ili promjenu stupnja prijenosa. Cijeli postupak pokreće se unutar MATLAB programskog okruženja, te se automatski generiraju matrice modela u prostoru stanja koje su dostupne unutar radnog prostora

3. Automatsko modeliranje i automatsko reduciranje reda modela automatskog mjenjača

(engl. *workspace*) MATLAB-a za daljnje analize, te simulacijske i optimizacijske studije. Cjelokupni postupak automatskog modeliranja ilustriran je na slici 3-12.



Slika 3-12. Ilustracija potpuno automatskog pristupa modeliranju dinamike automatskog mjenjača polazeći od veznog dijagrama modela punog reda, uključujući postupak za reduciranje reda modela

4. Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa

Ovo poglavlje temeljem rada [27] daje formulaciju problema optimiranja upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa, opisuje korištenu pseudospektralnu kolokacijsku metodu optimiranja, predstavlja alternative metode modeliranja trenja spojke za potrebe optimiranja (temeljene na tretiranju spojke kao izvora pasivnog momenta), te diskutira praktične aspekte formulacije problema optimiranja. Kao potvrda valjanosti postupka optimiranja, prikazuju se rezultati optimiranja te analiziraju glavne značajke temeljnih uzlaznih i silaznih promjena stupnja prijenosa.

4.1. Formulacija problema optimiranja

4.1.1. Funkcija cilja

Problem optimiranja je pronaći trajektorije kapaciteta momenta aktivnih spojki (τ_h u izrazu (2-21)), kao i trajektoriju upravljačkog signala motora ($\Delta\tau_{ec}$ u izrazu (2-2)), koje minimiziraju funkciju cilja J na optimizacijskom horizontu $[0, t_f]$:

$$J = \int_0^{t_f} \left(\dot{v}_v^2 + k_w \sum_i (\omega_i \tau_{fi})^2 + k_c \sum_i \tau_{hi}^2 \right) dt, \quad i \in \{A, \dots, F\}. \quad (4-1)$$

Prvi član gornje funkcije cilja odgovara integralu kvadrata uzdužnog trzaja vozila, koji je vezan uz neudobnost promjene stupnja prijenosa. Drugi član penalizira energiju disipiranu u spojkama (i posljedično potrošnju goriva i trošenje spojki), pri čemu se koristi kvadrat snage spojki kako bi se izbjegao utjecaj malih negativnih vrijednosti snage koje se mogu pojaviti u zoni držanja modela spojke. Treći izraz funkcije cilja (4-1) penalizira snažno forsiranje te napose oscilacije upravljačkih varijabli.

Glavni težinski faktor k_w predstavlja podešavajući parametar koji više značaja daje minimiziranju gubitaka energije u mjenjaču (kada je postavljen na višu vrijednost) ili poboljšanju udobnosti vožnje (kada je postavljen na nižu vrijednost). Pomoćni težinski faktor

4. Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa

empirijski je postavljen na $k_c = 1 \text{ (kgms)}^{-2}$, kao donju vrijednost za gladak odziv. Ovisno o vrijednosti težinskog faktora, u ovom se poglavlju razlikuju tri scenarija optimiranja:

- 1) Samo kriterij trzaja vozila: $k_w = 0$.
- 2) Slabo penaliziranje gubitaka energije: $k_w = 4 \cdot 10^{-8} \text{ (kgm)}^{-2}$.
- 3) Jako penaliziranje gubitaka energije: $k_w = 4 \cdot 10^{-7} \text{ (kgm)}^{-2}$.

4.1.2. Ograničenja

Problem optimiranja uključuje razna ograničenja, koja se mogu podijeliti u četiri kategorije: 1) ograničenja vezana uz faze promjene stupnja prijenosa, 2) ograničenja vezana uz realne limite komponenti pogona, 3) dodatna ograničenja vezana uz praktične aspekte optimiranja i 4) dodatna ograničenja vezana uz modele u kojima se spojka tretira kao izvor momenta.

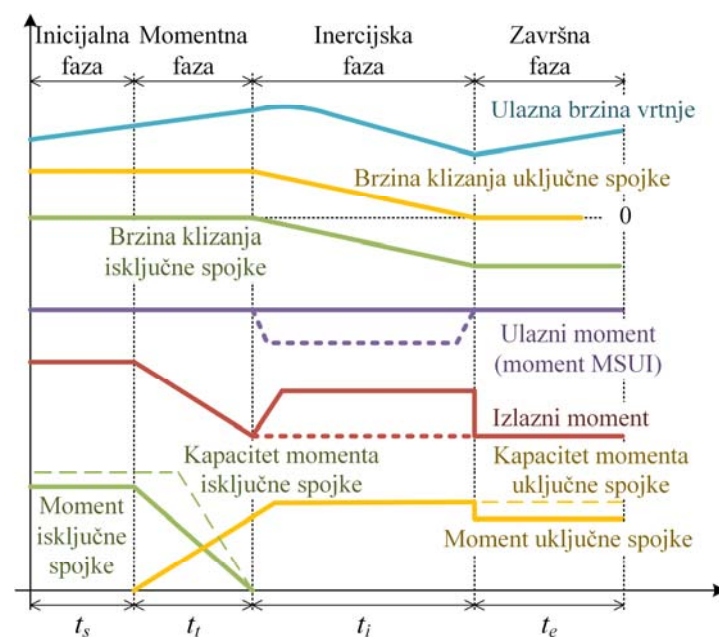
1) Ograničenja vezana uz faze promjene stupnja prijenosa. Kao što je rečeno u uvodu ovog rada, uzlazna ili silazna promjena pod opterećenjem može biti podijeljena u četiri faze, koje uključuju dvije glavne tj. aktivne faze (momentna i inercijska faza) te inicijalnu i završnu fazu (v. sliku 4-1 i [15]). Ovisno o fazi promjene stupnja prijenosa, različite spojke mogu biti definirane kao zatvorene ($\omega = 0$), otvorene ($\tau_f = 0$) ili modulirane ($\omega \neq 0$ i $\tau_f \neq 0$; ograničenja se ne primjenjuju).

Tablica 4-1 definira ograničenja za različite faze uzlazne promjene, gdje indeksi ONC i OFG označavaju redom uključne i isključne spojke. Ograničenja vrijede kako za promjene s jednostrukim prijelazom (skraćenica STS), tako i za promjene s dvostrukim prijelazom (skraćenica DTS), gdje za DTS slučaj varijable koje označavaju brzine klizanja spojki i momente spojki postaju vektori. Parametar $\Delta\omega$ u ograničenjima tipa nejednakosti definira zonu u kojoj se spojka smatra zatvorenom (usp. sliku 2-11). Ovdje treba napomenuti kako se moment držanja spojke (moment koji je potrebno primijeniti da bi se spojku držalo zatvorenom) određuje “automatski“. U slučaju silaznih promjena pod opterećenjem, redoslijed momentne i inercijske faze u tablici 4-1 (i slici 4-1) se zamjenjuje, budući da se silazna promjena pod opterećenjem može smatrati reverznim procesom uzlazne promjene pod opterećenjem [15].

Tablica 4-1 definira ograničenja za nominalno aktivne spojke (uključne i isključne redom označene s ONC i OFG). Za konvencionalne promjene stupnja prijenosa, preostale spojke se

4. Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa

postavljaju u njihova nominalna stanja za vrijeme trajanja promjene stupnja prijenosa (v. tablicu 2-1), nametanjem ograničenja $\tau_f = 0$ za otvorene spojke i $\omega = 0$ za zatvorene spojke. U slučaju u kojem se razmatra nekonvencionalni pristup upravljanja temeljen na moduliranju normalno otvorenih spojki (uključujući isključne spojke u uzlaznoj promjeni), ograničenje $\tau_f = 0$ se ispušta u inercijskoj fazi za takve spojke. Povrh toga, sve normalno neaktivne spojke (bilo otvorene ili zatvorene) mogu se učiniti slobodno upravljivima u inercijskoj fazi (u tom slučaju na njih nisu nametnuta ograničenja), kako bi se istražio ultimativni potencijal nekonvencionalnog pristupa upravljanju promjenom stupnja prijenosa.



Slika 4-1. Faze tipične uzlazne promjene s jednostrukim prijelazom

Tablica 4-1. Ograničenja aktivnih spojki vezana uz faze promjene stupnja prijenosa

	Ograničenja	
	Uzlazna promjena	Silazna promjena
Početna faza	$-\Delta_{\omega} \leq \omega_{OFG} \leq \Delta_{\omega}$ $\tau_{fONC} = 0$	$-\Delta_{\omega} \leq \omega_{OFG} \leq \Delta_{\omega}$ $\tau_{fONC} = 0$
Momentna faza	$-\Delta_{\omega} \leq \omega_{OFG} \leq \Delta_{\omega}$	Nema
Inercijska faza	$\tau_{fOFG} = 0$	$-\Delta_{\omega} \leq \omega_{OFG} \leq \Delta_{\omega}$
Završna faza	$-\Delta_{\omega} \leq \omega_{ONC} \leq \Delta_{\omega}$ $\tau_{fOFG} = 0$	$-\Delta_{\omega} \leq \omega_{ONC} \leq \Delta_{\omega}$ $\tau_{fOFG} = 0$

4. Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa

2) Ograničenja vezana uz realne limite komponenti pogona. Ova ograničenja odnose se na sljedeće fizikalne limite motora i spojki.

(1) Limiti motora

- a. Pretpostavlja se da je brzo upravljanje motorom tijekom promjene stupnja prijenosa izvedivo samo u smjeru redukcije momenta (v. diskusiju uz izraz (2-2))

$$\Delta\tau_{ec} \leq 0 . \quad (4-2)$$

- b. Donji limit momenta motora (nakon primjene redukcije iznosa $\Delta\tau_{ec}$) je postavljen na nulu

$$\tau_e \geq 0 . \quad (4-3)$$

- c. Limiti brzine promjene momenta motora

$$\dot{\tau}_{e,\min} \leq \dot{\tau}_e [\text{Nm/s}] \leq \dot{\tau}_{e,\max} . \quad (4-4)$$

(2) Limiti spojke

- a. Limiti kapaciteta momenta spojke

$$0 \leq \tau_h [\text{Nm}] \leq \tau_{h,\max} . \quad (4-5)$$

- b. Limiti brzine promjene kapaciteta momenta spojke

$$\dot{\tau}_{h,\min} \leq \dot{\tau}_h [\text{Nm/s}] \leq \dot{\tau}_{h,\max} . \quad (4-6)$$

3) Dodatna ograničenja vezana uz praktične aspekte optimiranja. Pod određenim uvjetima, algoritam optimiranja nalazi rješenje u kojem se momentna faza izvodi u vrlo kratkom vremenu, kako bi se na taj način izbjegao efekt rupe momenta tijekom uzlaznih promjena pod opterećenjem. Međutim, greške uslijed nepravovremenog uključenja/isključenja spojki u stvarnoj primjeni mogu dovesti do problema vezanih uz fenomen uzlanja transmisije (*engl. tie-up phenomenon*) i s time povezanih oscilacija izlaznog momenta. Zbog toga se brza momentna faza sprječava (kada se pojavi) primjenom dodatnih tvrdih ograničenja na brzinu promjene momenta isključne spojke tijekom momentne faze

$$\dot{\tau}_{f,\min} \leq \frac{d\tau_f}{dt} \leq \dot{\tau}_{f,\max} \text{ (u intervalu } t_t\text{)}. \quad (4-7)$$

4. Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa

pri čemu su parametri $\tau_{f,min}$ i $\tau_{f,max}$ definirani su kao funkcije početnog momenta isključne spojke (moment držanja u početnoj fazi) τ_0 i trajanja momentne faze t_i .

$$\dot{\tau}_{f,min} = -\frac{\tau_{f0}}{t_i - 0.1}, \quad \dot{\tau}_{f,max} = -\frac{\tau_{f0}}{t_i + 0.1} . \quad (4-8)$$

4.1.3. Početni uvjeti i početna nagađanja

Početni uvjeti varijabli stanja i upravljačkih varijabli ne mogu se odrediti analitički za dani nelinearni model pogona vozila. Dodatna poteškoća je što je pogon inicijalno u kvazi-stacionarnom stanju (brzina vrtnje motora i brzina vozila rastu za primijenjenu pedal akceleratora p_{th}). Stoga se početni uvjeti određuju temeljem simulacije modela pogona vozila i programskog alata za optimiranje, polazeći od sljedećih korisnički-definiranih početnih uvjeta:

- (1) Početne vrijednosti kapaciteta momenta spojki, temeljem poznatih početnih stanja spojki definiranih u tablici 2-1

$$\tau_h [\text{Nm}] = 0 , \quad \text{za otvorene (uključne) spojke.} \quad (4-9)$$

- (2) Kako bi se ostvarili realistični početni uvjeti promjene stupnja prijenosa, početna brzina vrtnje ω_{e0} je za uzlazne promjene iskustveno postavljena kao linearna funkcija položaja pedale akceleratora p_{th} . Za slučaj silazne promjene, postavljena je na konstantnu, relativno nisku vrijednost.

Početni moment motora τ_{e0} potom se dobiva iz ω_{e0} i p_{th} korištenjem mape motora (v. sliku 2-3). Početna brzina vrtnje turbine pretvarača momenta (ω_{t0}) određuje se simuliranjem nelinearnog modela pogona dok ne dosegne (kvazi) stacionarno stanje. Temeljem tako dobivenih početnih vrijednosti upravljačkih varijabli ω_e i ω_t , osmišljen je postupak optimiranja za precizno određivanje početnih uvjeta preostalih varijabli stanja.

Početna nagađanja vektora varijabli stanja i upravljačkih varijabli postavljana su kako slijedi: (i) na pripadajuće početne vrijednosti u slučaju varijabli ω_e , ω_t i τ_e ; (ii) na vrijednost nula za kapacitet momenata spojki; i (iii) na vrijednosti određene iz jednadžbi modela pogona vozila za preostale varijable (ω_{os} , φ_{hs} , ω_w , v_v ; v. sliku 2-2).

4.1.4. Modeli spojki temeljeni na tretiranju spojke kao izvora momenta

Uz eksplicitne modele spojki predstavljene u potpoglavlju 2.3, u ovom se odjeljku uvodi alternativni pristup temeljen na opisivanju spojke kao izvora momenta koji je podložan ograničenju tipa pasivnosti.

Pristup temeljen na propisivanju odnosa po fazama. Za konvencionalno upravljanje STS promjenom, predznak brzine klizanja spojke je poznat u svakoj fazi promjene stupnja prijenosa. Stoga se umjesto korištenja računalno zahtjevnog eksplicitnog modela spojke, modularana spojka (na primjer, u inercijskoj fazi) može smatrati izvorom momenta za koji je poznati predznak brzine klizanja i odgovarajući predznak momenta. Naime, ako je brzina klizanja i -te spojke propisana kao negativna, njezin moment se ograničava da bude negativan i obratno (snaga spojke je uvijek pozitivna – svojstvo pasivnosti, v. sliku 2-11a):

$$\omega_i \leq 0, \tau_{fi} \leq 0 \quad \text{ili} \quad \omega_i \geq 0, \tau_{fi} \geq 0 . \quad (4-10)$$

Gornji pristup zamjene eksplicitnog modela spojke odgovarajućim ograničenjima tipa nejednakosti predstavlja vrlo regularnu formulaciju problema optimiranja, tako da bi ovaj pristup trebao biti numerički učinkovitiji i općenito precizniji od drugih. Međutim, on se ne može koristiti u općem slučaju upravljanja većim brojem spojki (npr. DTS slučaj), jer broj faza (s nepromjenjivim predznacima brzina klizanja spojki) može biti velik, te posljedično broj kombinacija koje bi se trebale ispitati progresivno raste.

Pristup temeljen na ograničenju tipa pasivnosti. Kako bi se prevladao nedostatak koji se odnosi na propisivanje predznaka brzina vrtnje, sljedeće kompaktno ograničenje tipa nejednakosti može se primijeniti na sve modularane spojke kako bi se opisalo svojstvo pasivnosti:

$$\omega_i \tau_{fi} \geq 0 . \quad (4-11)$$

Međutim, ovo ograničenje je nelinearno i nekonveksno za $\omega_i = 0$, te kao takvo može rezultirati numerički manje učinkovitim optimizacijama u usporedbi s linearnim ograničenjima iz izraza (4-10).

Treba napomenuti da kada se koriste modeli u kojima se spojka tretira kao izvor momenta umjesto eksplicitnih modela spojki, kapacitet momenta spojke τ_h gubi smisao kao upravljačka varijabla. Stoga se kod tih modela, kapaciteti momenata spojki τ_{hi} , $i = A, \dots, F$ zamjenjuju u

4. Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa

izrazima (4-1) i (4-6) sa stvarnim momentima spojki τ_{fi} , koji su podložni ograničenju tipa nejednakosti $-\tau_{f,max} \leq \tau_f \text{ [Nm]} \leq \tau_{f,max}$ kojim se limitira moment spojke (usp. izraz (4-5) uz napomenu da ovdje vrijedi $\tau_{f,max} = \tau_{h,max}$). K tome, početni momenti zatvorenih spojki (τ_{fi0}) određuju se postupkom optimiranja početnih stanja, umjesto da se postavljaju kao u izrazu (4-9).

4.1.5. *Praktični aspekti optimizacije*

Uvođenje nove pomoćne varijable stanja. Kolokacijske metode optimiranja tretiraju jednadžbe stanja kao ograničenja tipa jednakosti. U tom smislu, pokazalo se vrlo korisnim uvesti nove pomoćne varijable stanja za trzaj (j) i momente spojki (τ_{fi}), koje su povezane s modelom pogona kroz ograničenja tipa jednakosti koja se moraju zadovoljiti kod optimiranja:

$$j = \ddot{v}_v = \frac{d}{dt} \underbrace{\left(\frac{2F_t - F_L}{m_v} \right)}_{\dot{v}_v}, \quad (4-12)$$

$$\tau_{fi} = \tau_{fi0}, \quad i \in \{A, \dots, F\}. \quad (4-13)$$

gdje je $\ddot{v}_v$ varijabla trzaja dobivena iz $\dot{v}_v$ korištenjem automatske diferencijacije (funkcionalnost dostupna unutar TOMLAB optimizacijskog okruženja), j je novo-uvodena pomoćna varijabla stanja optimizacijskog modela (koja se koristi u funkciji cilja (4-1)), τ_{fi0} je izlaz modela spojke i τ_{fi} je pripadajuća varijabla stanja koja se uvodi u podmodel dinamike mjenjača i koja se koristi u funkciji cilja i ograničenjima. Iako se dodatna ograničenja tipa jednakosti (4-12) i (4-13) primjenjuju u svim razmatranim modelima spojke (uključujući one kod kojih se spojka tretira kao izvor momenta), ograničenje (4-13) je posebno relevantno za eksplicitne modele spojke, jer ono “izolira” nezaglađenost modela spojke od modela mjenjača i ograničenja.

Normiranje. Model pogona je normiran kako bi se omogućilo numerički bolje uvjetovano optimiranje. Normiranje počiva na baznim vrijednostima za varijable stanja, upravljanja i ograničenja, koje se postavljaju na iznose početnih nagađanja za te varijable (odjeljak 4.1.3), s iznimkom (kapaciteta) momenta spojke, brzine klizanja spojke i varijable stanja Dahlova modela, za koje bazne vrijednosti redom iznose: $\tau_{(f,h)b} = 100 \text{ Nm}$, $\omega_b = 1 \text{ rad/s}$, $z_b = 2 \text{ rad}$.

4. Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa

Višestruko optimiranje za povećanu točnost. Kada se koriste kolokacijske metode, važno je odabrati odgovarajući broj kolokacijskih točaka, koji predstavlja kompromis između točnosti rješenja i računalne učinkovitosti algoritma optimiranja. S ciljem dobivanja uvida u sklonost optimiranja da završi u lokalnom minimumu i dobivanja rješenja koje je bliže globalnom minimumu (u smislu manje vrijednosti funkcije cilja), svako se optimiranje provodi u petlji za različiti broj kolokacijskih točaka u rasponu od 46 do 65. Rješenje s najmanjom vrijednošću funkcije cilja (J_{opt}) uzima se kao konačno rješenje. U isto vrijeme, parametar stope uspješnosti (*engl. success rate parameter*) definiran je kao postotak broja optimiranja koja daju vrijednosti funkcije cilja manje od $1.15J_{opt}$, pri čemu manja stopa uspješnosti pokazuje veću sklonost višestrukim lokalnim minimumima.

Konzistentnost rezultata optimiranja provjerava se računalnim simulacijama, koje su temeljene na istom modelu pogona kao kod optimiranja, i primjeni upravljačkih varijabli jednakih onim optimiranim.

4.2. Optimizacijski alat

4.2.1. Metoda optimiranja

Problemi optimalnog upravljanja se zbog svoje složenosti uglavnom rješavaju numeričkim putem, pri čemu se odgovarajuće metode mogu podijeliti na izravne i neizravne. Izravne metode transformiraju originalni problem optimalnog upravljanja u problem nelinearnog programiranja (NLP) [74]. Pritom se razlikuju dvije vrste izravnih metoda: (i) metode gađanja, kod kojih se polinomima aproksimiraju samo upravljačke varijable [75], te (ii) metode kolokacije kod kojih se polinomima aproksimiraju varijable stanja i upravljačke varijable [76],[77]. Izravne kolokacijske metode dalje se dijele na lokalne i globalne kolokacijske metode. Lokalne kolokacijske metode dijele razmatrani vremenski interval na veći broj podintervala pri čemu se u svakom podintervalu koristi mali broj kolokacijskih točaka. Kod globalnih kolokacijskih metoda koristi se jedan (globalni) polinom kroz čitavi razmatrani vremenski interval [77]. U praksi se najčešće koriste pseudospektralne kolokacijske metode koji pripadaju skupu globalnih kolokacijskih metoda, a koje aproksimiraju varijable stanja pomoću ortogonalnih polinoma. Većina pseudospektralnih metoda koristi Lagrangeove polinome za aproksimaciju varijabli

4. Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa

stanja, pri čemu je zbog svojstva izolacije Jakobijan matrica NLP problema u velikoj mjeri prazna (“rijetka“ matrica; *engl. sparse matrix*) [77],[78].

Kao što je istaknuto u uvodu ovog rada, problem optimiranja upravljačkih trajektorija promjene stupnja prijenosa rješava se upravo primjenom pseudospektralne kolokacijske metode, koja je dostupna unutar TOMLAB optimizacijskog okruženja. TOMLAB je programski alat za modeliranje, optimiranje i optimalno upravljanje [52], a sastoji se od niza različitih modula, od kojih su najvažniji modul za formulaciju problema optimalnog upravljanja (PROPT), modul za automatsku diferencijaciju (MAD) i moduli koji sadržavaju različite algoritme za rješavanje problema nelinearnog programiranja (poput SNOPT, KNITRO i CPLEX) [77]. Rezultirajući problem nelinearnog programiranja može se riješiti primjenom različitih rješavača (*engl. solver*). U ovom radu koristit će se SNOPT rješavač [79], koji je posebno prikladan za probleme velikih dimenzija jer iskorištava svojstvo rijetkosti matrica. SNOPT je temeljen na metodi sekvencijalnog kvadratičnog programiranja (SQP) koja pripada skupu gradijentnih algoritama [44],[74].

4.2.2. Implementacija optimizacijskog alata

TOMLAB programski alat implementiran je unutar MATLAB sučelja, tj. koristi se izravno unutar MATLAB okruženja. Za potrebe izvođenja postupka optimiranja za razne razmatrane scenarije upravljanja, u širem kontekstu ovog istraživanja razvijen je alat za optimiranje upravljačkih trajektorija automatskog mjenjača u formi MATLAB skripte (tj. MATLAB GUI sučelja). Razvijeni optimizacijski alat ilustriran je na slici 4-2. Korisnički definirani ulazi u optimizacijski alat su sljedeći: 1) upravljačke varijable koje se optimiraju, tj. momenti aktivnih spojki (ili kapaciteti momenta aktivnih spojki, ovisno o korištenom modelu spojke) $\tau_{f(h)}$ i opsijska upravljačka varijabla momenta motora $\Delta\tau_{ec}$, 2) ciljana uzlazna ili silazna promjena stupnja prijenosa s jednostrukim ili dvostrukim prijelazom za koju se provodi optimiranje, 3) vrijednost glavnog težinskog faktora k_w iz izraza (4-1), 4) maksimalna trajanja faza promjene stupnja prijenosa, 5) scenarij upravljanja (s/bez upravljanja momentom motora, s/bez upravljanja dodatnom, normalno otvorenom spojkom, i sl.), 6) strategija upravljanja DTS-om (v. poglavlje 5 za više detalja) i 7) profil ulaznog momenta (npr. konstantan otklon pedale akceleratora, konstantan ulazni moment, linearno rastući moment u toku promjene stupnja prijenosa, i sl.). Nakon što su zadani svi potrebni ulazi, optimiranje se provodi u petlji za veći

4. Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa

broj kolokacijskih točaka i izolira optimalno rješenje tj. ono s minimalnom vrijednošću ciljne funkcije (v. odjeljak 4.1.5), te se automatski generiraju grafovi koji prikazuju optimirane trajektorije upravljačkih varijabli te ostale relevantne varijable pogona vozila.

Uz optimirane trajektorije upravljačkih varijabli, alat generira vrijednosti dvaju indeksa performansi kojima se karakterizira kvaliteta promjene stupnja prijenosa. Prvi je indeks korijena srednjeg kvadrata (RMS) trzaja vozila, j_{RMS} , koji se koristi kao mjera neudobnosti promjene stupnja prijenosa (usp. izraz (4-1)):

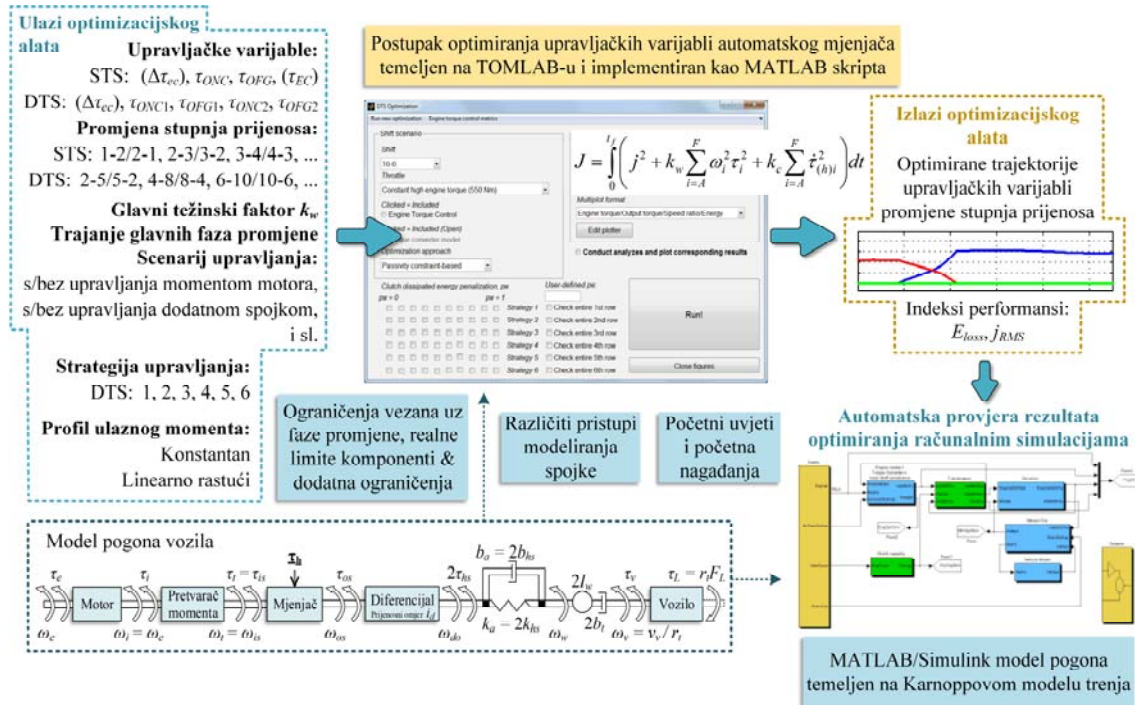
$$j_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} \ddot{v}_v^2 dt} . \quad (4-14)$$

Drugi indeks performansi odnosi se na ukupnu disipiranu energiju u spojkaama tijekom promjene stupnja prijenosa, E_{loss} , koji se koristi kao mjera neučinkovitosti promjene stupnja prijenosa (te ujedno i trošenja spojke) i koji je definiran kao

$$E_{loss} = \int_0^{t_f} \sum_i \omega_i \tau_{fi} dt, \quad i \in \{A, ..., F\} . \quad (4-15)$$

Kao što je spomenuto u odjeljku 4.1.5, optimizacijski alat na kraju provodi automatsku simulacijsku provjeru konzistentnosti rezultata optimiranja temeljem dobivenih optimalnih trajektorija i modela pogona jednakog onom korištenom u optimiranju.

4. Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa



Slika 4-2. Ilustracija razvijenog optimizacijskog alata za optimiranje trajektorija upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa

4.3. Rezultati optimiranja

Osim ako nije navedeno drugačije, rezultati optimiranja prezentirani u ovom potpoglavlju odnose se na položaj pedale akceleratora od 50% ($p_{th} = 0.5$) i zatvoreni pretvarač momenta ($\omega_t = \omega_e$). Ovisno o vrsti promjene stupnja prijenosa, nominalna (tj. maksimalna) trajanja faza definirana na slici 4-1 postavljena su kako slijedi:

Uzlazna promjena: $t_s = 0.05$ s, $t_t = 0.2$ s, $t_i = 0.5$ s, $t_e = 0.2$ s.

Silazna promjena: $t_s = 0.2$ s, $t_t = 0.5$ s, $t_i = 0.1$ s, $t_e = 0.3$ s.

Razmatraju se samo promjene pod opterećenjem, budući da su one najčešće [11] i najzahtjevnije sa stanovišta upravljanja.

4.3.1. Osnovne značajke optimiranog odziva uzlazne promjene stupnja prijenosa

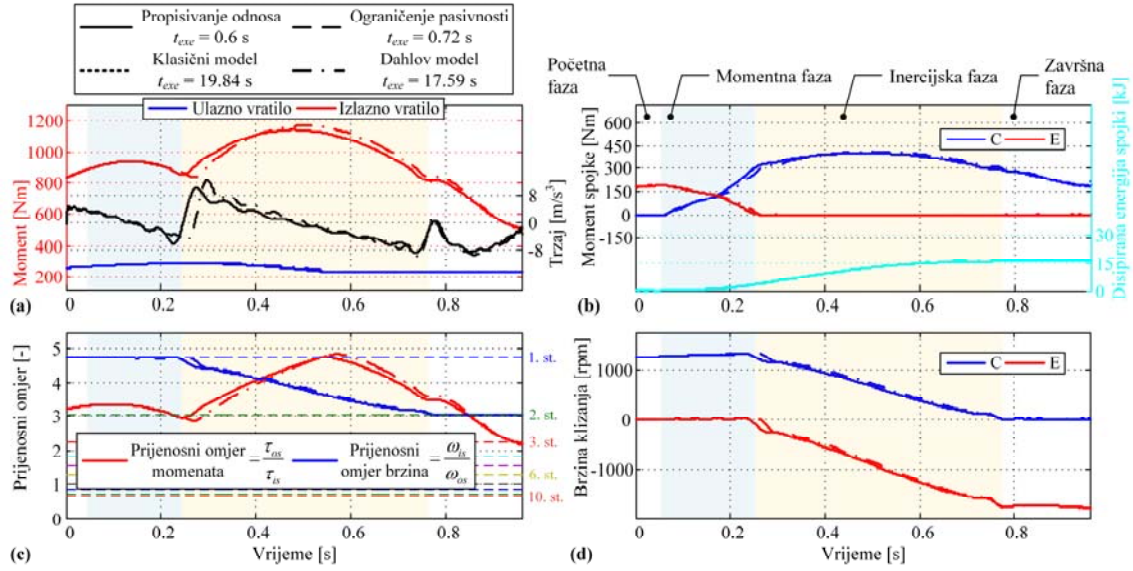
Slika 4-3 prikazuje usporedne rezultate optimiranja dobivene za 1-2 uzlaznu promjenu, primjenu samo kriterija trzaja vozila ($k_w = 0$ u izrazu (4-1)), neaktivnu isključnu spojku E

4. Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa

tijekom inercijske faze (pripadajuće ograničenje u tablici 4-1 se primjenjuje), te za četiri pristupa modeliranja spojke uz primjenu $\Delta\omega = 1$ okr/min (v. poglavlje 2 i odjeljak 4.1.4). Kao što se može vidjeti na slici 4-3, rezultati su vrlo slični za različite razmatrane pristupe modeliranja spojke. Blaga nepodudarnost primjećuje se samo za Dahlov model trenja, što se objašnjava utjecajem dinamike trenja (za razumno visoki koeficijent krutosti σ_0 u izrazima (2-24), (2-25)) te *tanh*-aproksimacije predznačne funkcije (izraz (2-26)). Vremena izvođenja optimiranja (t_{exe}) dane u legendi slike 4-3 pokazuju da su optimiranja temeljena na pristupima kod kojih se spojka tretira kao izvor momenta značajno brža od onih temeljenih na eksplicitnim modelima spojke.

Optimirani odzivi na slici 4-3 dočaravaju glavne značajke uzlazne promjene stupnja prijenosa koje su prethodno ilustrirane na slici 4-1. Tijekom momentne faze, moment uključne spojke raste (ona se ukapča), dok istovremeno reaktivni moment isključne spojke pada, tj. moment se prenosi s isključne spojke na uključnu spojku (slika 4-3b). Tijekom inercijske faze, brzina vrtnje motora pada (slika 4-3a) tako da se prijenosni omjer brzina smanjuje s razine koja odgovara polaznom (prvom) stupnju prijenosa na razinu koja odgovara ciljanom (drugom) stupnju prijenosa (slika 4-3c). Istovremeno, izlazni moment raste značajno iznad razine koja odgovara ciljanom stupnju prijenosa (slika 4-3a), što je pojava poznata kao efekt inercijskog udara [15],[70]. Inercijski udar manifestira se kroz značajni šiljak u odzivu trzaja vozila (slika 4-3a) te ga je stoga poželjno izbjeći. Optimirani odziv je takav da je izbjegnuta skok momenta uključne spojke pri njenom zatvaranju (tj. kada njena brzina klizanja padne na nulu, $t = 0.8$ s), a time i pobuda torzijskih vibracija u završnoj fazi promjene (*engl. shuffle mode*, [72]). Utvrđeno je da su rezultati optimiranja vrlo slični u slučaju otvorenog pretvarača momenta, ali se optimiranje u tom slučaju izvodi nešto sporije (i općenito je osjetljivije).

4. Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa



Slika 4-3. Usporedni rezultati optimiranja upravljačkih varijabli 1-2 uzlazne promjene, za različite pristupe modeliranja trenja spojke (samo kriterij trzaja vozila; bez modulacije isključne i dodatne spojke u inercijskoj fazi promjene; $p_{th} = 0.5$; oznaka rpm označava okr/min)

4.3.2. Uzlazne promjene za različite upravljačke scenarije

Slika 4-4 prikazuju rezultate optimiranja za razne scenarije upravljanja 1-2 uzlaznom promjenom. Pritom se primjenjuje pristup modeliranja spojki temeljen na ograničenju tipa pasivnosti. U svrhu vrednovanja kvalitete promjene stupnja prijenosa koriste se indeksi performansi definirani izrazima (4-14) i (4-15).

Slika 4-4 ilustrira prednosti primjene dvaju nekonvencionalnih pristupa upravljanja, koji se odnose na korištenje isključne spojke u inercijskoj fazi promjene (ograničenje $\tau_{fOFG} = \tau_{fE} = 0$ u tablici 4-1 se izostavlja) i korištenje dodatne spojke F u inercijskoj fazi. Glavna prednost ovih pristupa očituje se u značajnoj redukciji inercijskog udara u usporedbi s konvencionalnom promjenom (slika 4-4a i 4-4b). To rezultira značajno smanjenim indeksom trzaja vozila j_{RMS} , što se s druge strane plaća većim gubicima energije u spjkama E_{loss} (v. referencu [70] za detaljniju analizu). Konačne vrijednosti indeksa performansi dane su u tablici 4-2.

Slika 4-4c prikazuje odziv pogona vozila za slučaj kada je u formulaciji problema optimiranja omogućeno upravljanje momentom motora za istu 1-2 uzlaznu promjenu. Optimalno ponašanje

4. Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa

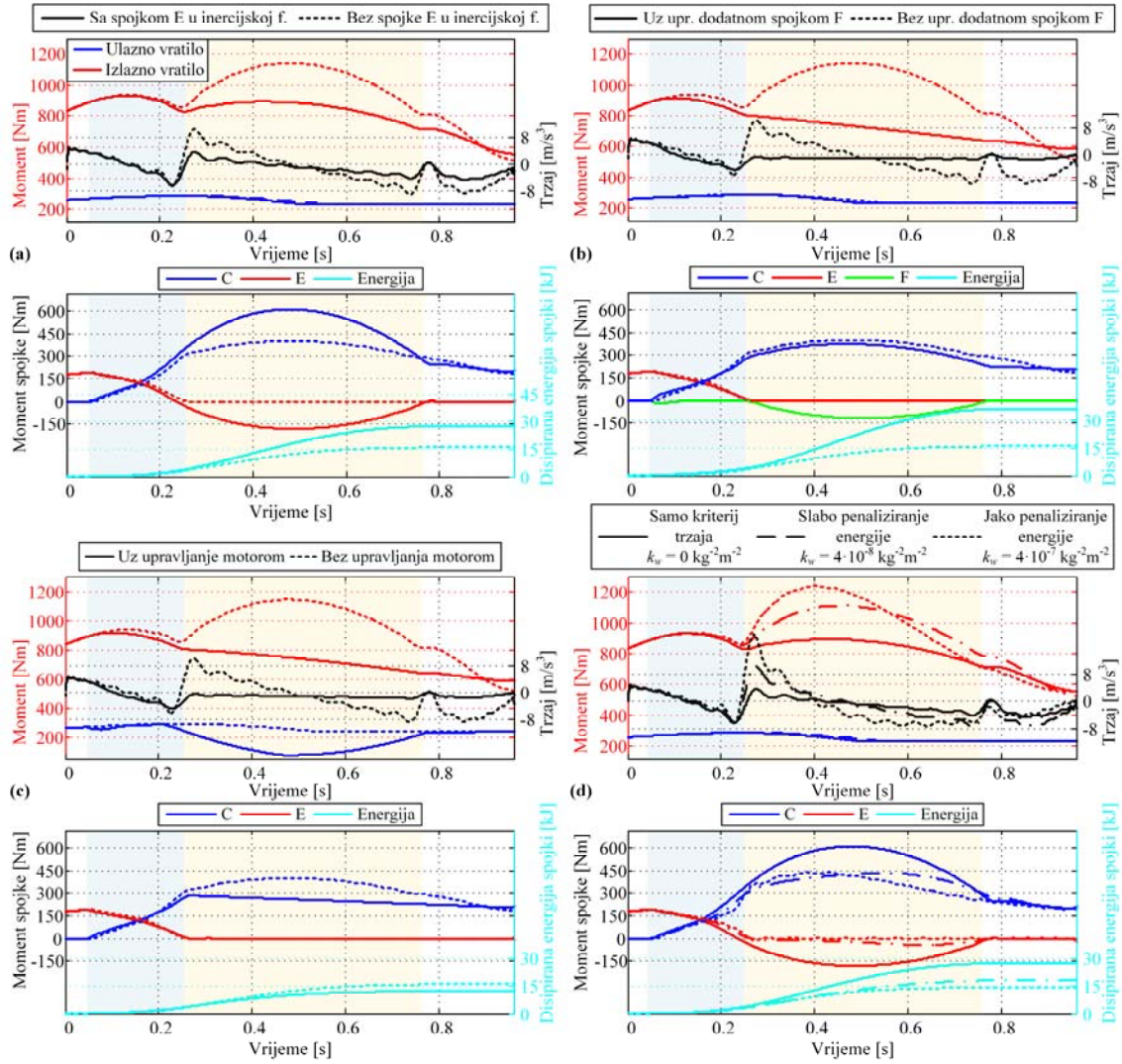
je takvo da se brzina vrtnje motora reducira na razinu drugog stupnja prijenosa dominantno reduciranjem momenta motora. Na taj je način izbjegnuta pojava efekta inercijskog udara (RMS indeks trzaja vozila je smanjen 2.6 puta) bez povećanja ukupnih gubitaka energije u spojka (zapravo, gubici energije u spojka su smanjeni za 23.9%, tablica 4-2).

Rezultati optimiranja prikazani na slici 4-4d i pripadajući indeksi performansi dani u tablici 4-2 ilustriraju efekt podešavanja glavnog težinskog faktora k_w funkcije cilja (4-1). Ovi su rezultati dobiveni za scenarij u kojem je dopušteno korištenje isključne spojke (ali ne i dodatne spojke) u inercijskoj fazi. Uvođenjem slabog penaliziranja gubitka energije ($k_w = 4 \cdot 10^{-8} \text{ (kgm)}^{-2}$), energija disipirana u spojka se reducira slabljenjem aktivnosti isključne spojke u inercijskoj fazi. Daljnjim povećanjem vrijednosti težinskog faktora ($k_w = 4 \cdot 10^{-7} \text{ (kgm)}^{-2}$), redukcija gubitaka energije postaje izraženija, ali, zauzvrat, inercijski udar i trzaj postaju sve veći (tablica 4-2). U tom slučaju, isključna spojka E uopće se ne koristi u inercijskoj fazi.

Tablica 4-2. Usporedba vrijednosti indeksa trzaja vozila i energije disipirane u spojka za 1-2 uzlaznu promjenu i za različite scenarije upravljanja i različite formulacije funkcije cilja

Scenarij upravljanja 1-2 uzlaznom promjenom pod opterećenjem	Težinski faktor k_w [$\text{kg}^{-2}\text{m}^{-2}$]	j_{RMS} [m/s^3]	E_{loss} [kJ]
Konvencionalna promjena	0	4.0	16.6
Upravljanje isključnom spojkom u inercijskoj fazi	0	1.9	30.9
Upravljanje dodatnom spojkom	0	0.78	42.3
Upravljanje motorom	0	0.83	12.4
Samo kriterij trzaja	0	1.9	30.9
Slabo penaliziranje gubitka energije	$4 \cdot 10^{-8}$	3.9	17.3
Jako penaliziranje gubitka energije	$4 \cdot 10^{-7}$	6.6	11.4

4. Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa



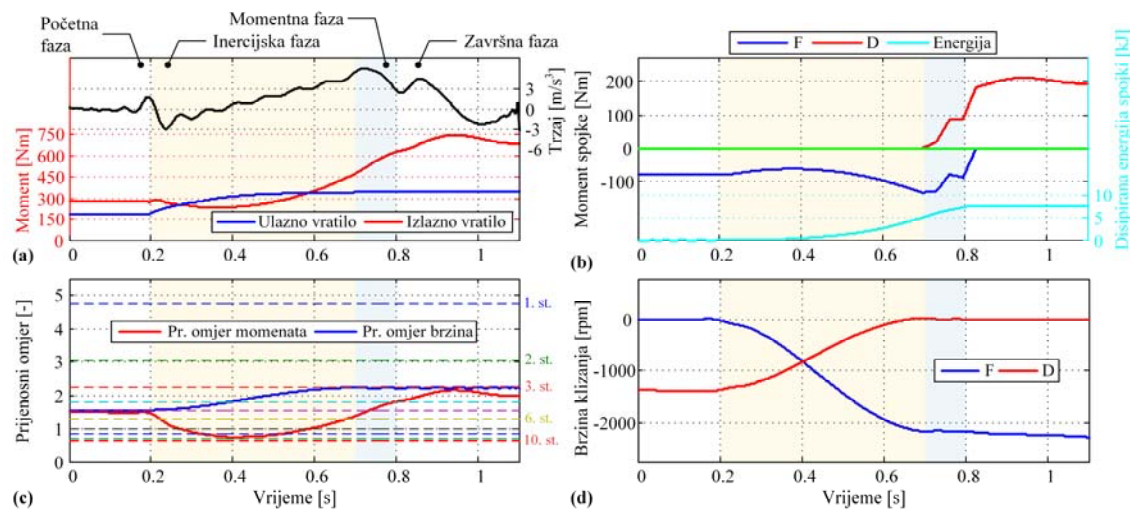
Slika 4-4. Rezultati optimiranja upravljačkih varijabli za različite scenarije upravljanja 1-2 uzlaznom promjenom (model spojke temeljen na svojstvu pasivnosti; $p_{th} = 0.5$): (a) sa i bez modulacije isključne spojke u inercijskoj fazi, (b) sa i bez upravljanja dodatnom spojkom, (c) sa i bez upravljanja momentom motora, te (d) za različita podešenja glavnog težinskog faktora k_w

4.3.3. Osnovne značajke optimiranog odziva silazne promjene stupnja prijenosa

Slika 4-5 prikazuje rezultate optimiranja za 5-3 preskočno-silaznu promjenu s jednostrukim prijelazom. Položaj pedale akceleratora inicijaliziran je na vrijednost $p_{th} = 0.3$ i počinje eksponencijalno rasti u $t = 0.2$ s prema krajnjoj vrijednosti $p_{th} = 1$. 5-3 silazna promjena inicira

4. Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa

se reduciranjem kapaciteta momenta isključne spojke (spojke F u ovom primjeru, slika 4-5b), čime se ostvaruje rast ulazne brzine vrtnje na razinu koja odgovara ciljanom stupnju prijenosa (inercijska faza je prva aktivna faza). Posljedično, tijekom inercijske faze reducira se i izlazni moment, tj. javlja se efekt rupe momenta (slika 4-5a, [15],[70],[80]). Optimalno rješenje je takvo da isključna spojka F upravlja promjenom prijenosnog omjera brzina (slika 4-5c) na način da se njezin moment povećava prema kraju inercijske faze, čime se usporava promjena prijenosnog omjera i istovremeno povećava izlazni moment prije nadolazeće momentne faze. Time se stvaraju povoljni početni uvjeti za pravovremen i tečan prijenos momenta među spojkama u momentnoj fazi promjene.



Slika 4-5. Rezultati optimiranja upravljačkih varijabli za 5-3 silaznu promjenu s jednostrukim prijelazom (samo kriterij trzaja vozila, model spojke temeljen na svojstvu pasivnosti, p_{th} eksponencijalno raste od 0.3 u $t = 0.2s$ do 1 u $t = 0.8s$)

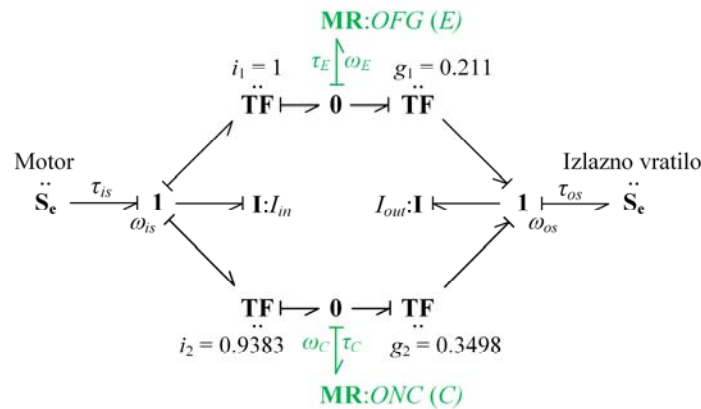
4.3.4. Analiza dinamike promjene stupnja prijenosa temeljena na metodi veznih dijagrama

Dinamički efekti promjene stupnja prijenosa uočeni u rezultatima optimiranja iz prethodnih odjeljaka mogu se analizirati korištenjem sistematičnog i ilustrativnog grafičkog pristupa temeljenog na metodologiji veznih dijagrama [62],[70]. Analiza je temeljena na ekvivalentnom DCT modelu prikazanom na slici 4-6 za 1-2 promjenu (usp. opći model na slici 3-8). Za potrebe pojednostavljene analize, u ekvivalentnom DCT modelu zanemaren je utjecaj sprege inercija

4. Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa

na dinamiku promjene stupnja prijenosa. Iako je ova pretpostavka opravdana za starije generacije automatskih mjenjača¹ te za neke konvencionalne promjene stupnja prijenosa razmatrane transmisije [73], ona se treba uzeti s rezervom za širi spektar uvjeta promjene stupnja prijenosa.

Ovdje će se analizirati slučajevi koji odgovaraju konvencionalnoj strategiji upravljanja promjenom stupnja prijenosa (korištenjem samo dvije aktivne spojke; v. npr. sliku 4-3), strategiji upravljanja kod koje se koristi upravljanje momentom motora (slika 4-4c). Detalji ovih ali i širih analiza (npr. slučajevi korištenja isključne i dodatne spojke u inercijskoj fazi) prikazani su u referenci [70]. Valja napomenuti kako su, s ciljem pružanja ilustrativnijeg prikaza, u veznim dijagramima modela korištene linije različitih debljina i boja. Tako debljina svake veze ilustrira količinu snage koja se prenosi kroz pripadajući dio mjenjača, dok pune plave strelice označavaju promjenu referentnog smjera pripadajućih varijabli momenta ili brzine vrtnje (i posljedično snage). Ako je varijabla momenta promijenila referentni smjer, plava strelica se dodaje lijevo ili iznad veze (a desno ili ispod ako varijabla brzine vrtnje mijenja referentni smjer).



Slika 4-6. Vezni dijagram ekvivalentnog DCT modela za analizu 1-2 (2-1) promjene

Uzlazna promjena pod opterećenjem. U početnoj (inicijalnoj) fazi promjene, uključen je prvi stupanj prijenosa i ulazni se moment prenosi putem isključne spojke (isključna spojka je

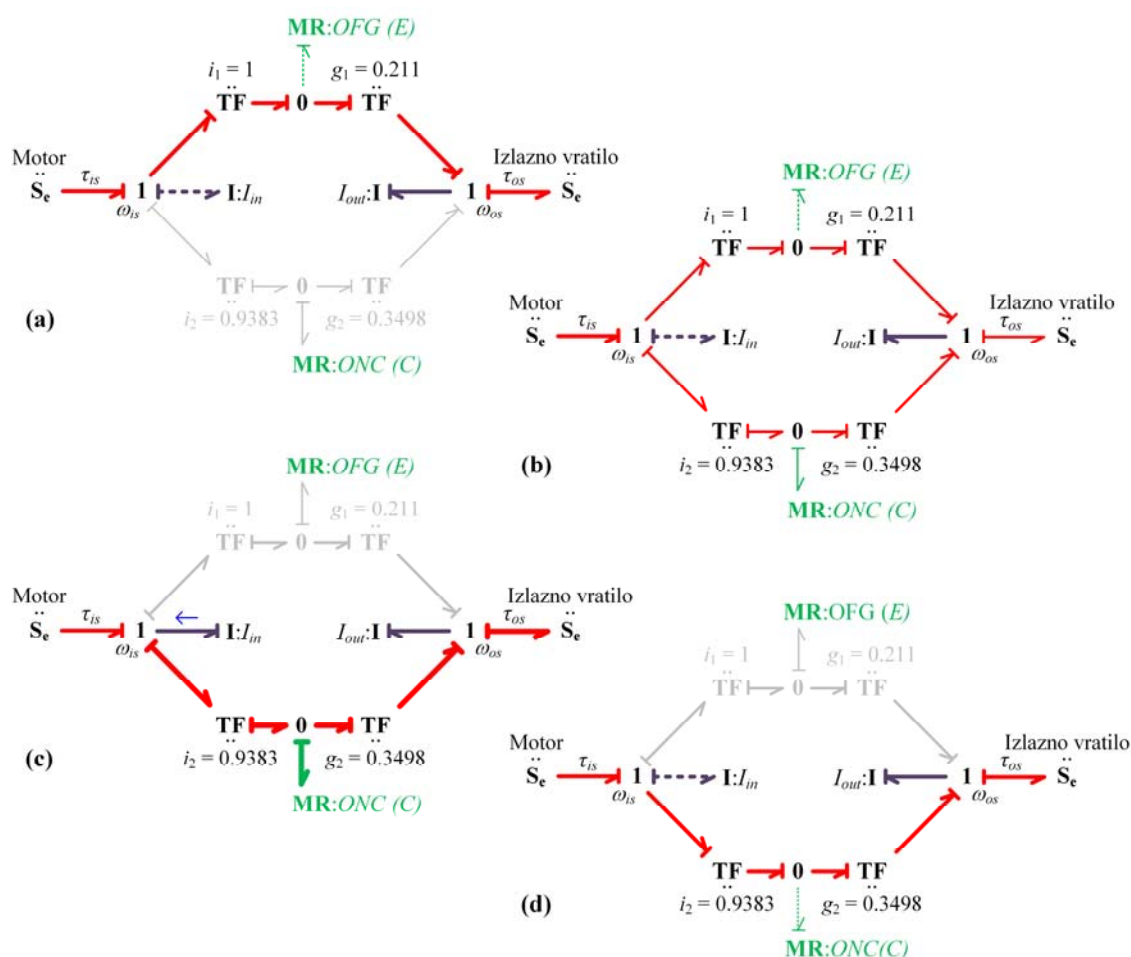
¹ Kako bi razvili automatski mjenjač s velikim brojem stupnjeva prijenosa, koji su uz to malih ugradbenih dimenzija i relativno male mase, projektanti se okreću kompleksnim strukturama mjenjača. U takvim mjenjačima, na ulazno, odnosno izlazno vratilo mjenjača veže se povećan broj rotacijskih elemenata. Zbog toga neke promjene stupnja prijenosa mogu biti karakterizirane izraženom spregom inercija (v. [6],[72],[73]).

4. Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa

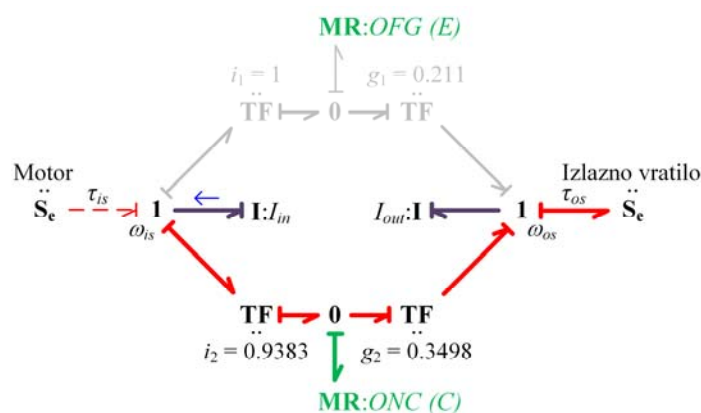
zatvorena, a uključna spojka je otvorena; slika 4-7a). Uzlazna promjena inicira se uključanjem spojke ONC. Budući da je isključna spojka zatvorena ($\omega_{OFG} = \omega_E = 0$) i parametri mjenjača su takvi da vrijedi $i_1 \cong i_2$ i $g_2 > g_1$, brzina klizanja uključne spojke ω_{ONC} je pozitivna, tako da ona prenosi pozitivni moment (slika 4-3). Budući da je $\tau_{is} = \tau_e$ približno konstantan, reaktivni moment zatvorene isključne spojke pada kako bi se zadovoljila jednadžba ravnoteže momenta ulazne čvorišne točke **1**. Zbog $1/g_1 > 1/g_2$ uz $i_1 \cong i_2$, pad momenta isključne spojke ima veći utjecaj na izlazni moment nego rast momenta uključne spojke. To rezultira padom izlaznog momenta prema momentu koji odgovara novom stupnju prijenosa (slika 4-7b i 4-3a). Istovremeno s rastom kapaciteta momenta uključne spojke, kapacitet momenta isključne spojke reducira se tijekom momentne faze, tako da bi trebao pasti na nulu kada moment isključne spojke padne na nulu. U vremenskom trenutku u kojem se isključna spojka otvori (slika 4-3d), izlazni moment doseže razinu koja odgovara drugom stupnju prijenosa (slika 4-3a), te momentna faza završava. Kako bi se ulazna brzina vrtnje ω_{is} reducirala na razinu drugog stupnja prijenosa i zatvorila uključna spojka (za približno konstantan τ_{is}), potrebno je primijeniti dodatan kapacitet momenta na uključnu spojku (v. sliku 4-3b). Povećani moment uključne spojke se u isto vrijeme prenosi preko prijenosnog omjera $1/g_2$ na izlaznu točku zbrajanja momenta **1** (slika 4-7c). Budući da je moment isključne spojke sada jednak nuli, to rezultira rastom izlaznog momenta iznad razine koja odgovara drugom stupnju prijenosa, tj. efektom inercijskog udara [15] (v. sliku 4-3a). Kada se uključna spojka zatvori, njen moment (i posljedično izlazni moment) pada prema razini koja odgovara drugom stupnju prijenosa. Ako se taj prijelaz ne izvede glatko doći će do pobuđivanja torzijskih vibracija vezanih uz elastičnost poluvratila (v. diskusiju uz sliku 4-3). U završnoj fazi promjene, slika 4-7d, uključen je drugi stupanj prijenosa i sva se ulazna snaga prenosi kroz donju granu snage (uključna spojka je zatvorena, a isključna spojka je otvorena).

Uzlazna promjena pod opterećenjem uz upravljanje momentom motora. Umjesto dodavanja momenta na uključnu spojku u inercijskoj fazi, ulazna brzina vrtnje može se reducirati reduciranjem ulaznog momenta (tj., momenta motora, slika 4-8). Posljedično, moment uključne spojke, a time i izlazni moment, mogu se držati približno konstantnima, čime se u potpunosti izbjegava ili snažno potiskuje efekt inercijskog udara (usp. slike 4-8 i 4-7c te v. sliku 4-4). Redukcija inercijskog udara tipično se odražava u skraćenju trajanja promjene stupnja prijenosa i značajnom smanjenju disipirane energije (uključne) spojke.

4. Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa



Slika 4-7. Analiza 1-2 uzlazne promjene: (a) uključen 1. stupanj prijenosa, (b) momentna faza, (c) inercijska faza, (d) uključen 2. stupanj prijenosa

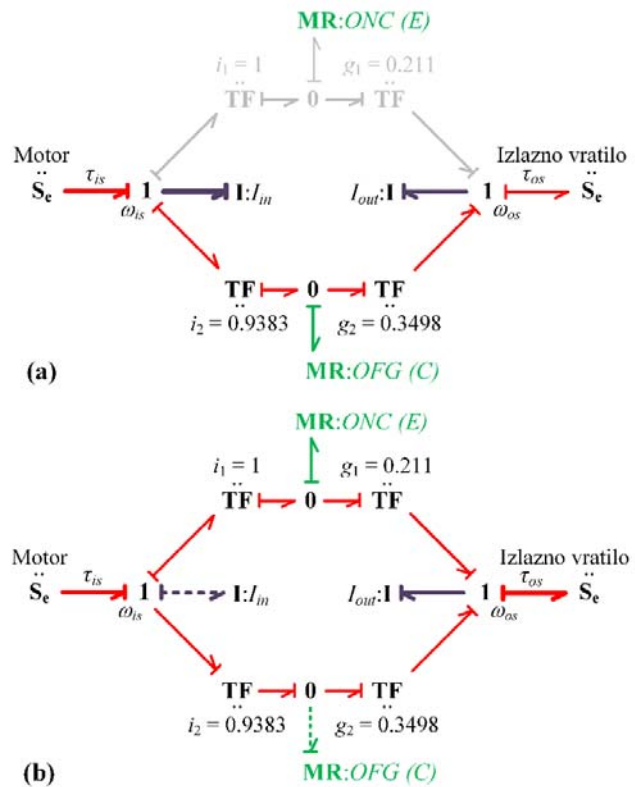


Slika 4-8. Vezni dijagram inercijske faze promjene stupnja prijenosa uz primjenu upravljanja ulaznim momentom za 1-2 uzlaznu promjenu

4. Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa

Silazna promjena pod opterećenjem. Silazna promjena inicira se reduciranjem kapaciteta momenta isključne spojke, kako bi se ulazna brzina vrtnje podigla na razinu koja odgovara prvom stupnju prijenosa (slika 4-9a). Usporedno s padom momenta isključne spojke, u inercijskoj fazi silazne promjene reducira se i izlazni moment, što uzrokuje rupe momenta [15],[81] (v. sliku 4-5a za 5-3 promjenu). Budući da ulazna brzina vrtnje ω_{is} raste i da je izlazna brzina vrtnje ω_{os} približno konstantna (zbog velike izlazne inercije I_{out} tj. velike mase vozila), te budući da vrijedi $i_1 \equiv i_2$, $1/g_1 > 1/g_2$, brzina klizanja uključne spojke $-\omega_{ONC} > 0$ se smanjuje i konačno doseže vrijednost nula. U vremenskom trenutku u kojem ω_{ONC} padne na vrijednost nula naglo se podiže kapacitet momenta

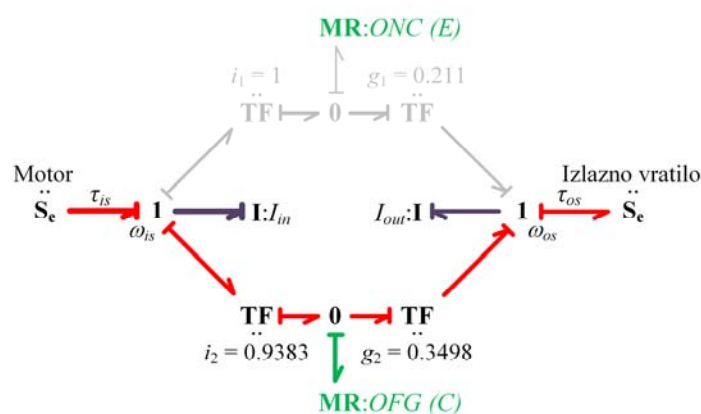
uključne spojke, te se ona zatvara, čime završava inercijska faza. U momentnoj fazi, reducira se kapacitet momenta isključne spojke, što rezultira transferom ulaznog momenta s donje grane veznog dijagrama sa slike 4-9b na gornju granu preko reaktivnog momenta zatvorene uključne spojke. Zbog $1/g_1 > 1/g_2$, rast momenta uključne spojke dominira nad padom momenta isključne spojke, što rezultira rastom izlaznog momenta prema razini koja odgovara prvom stupnju prijenosa (v. odziv za 5-3 promjenu na slici 4-5a). U vremenskom trenutku u kojem moment isključne spojke pada na nulu, uključna spojka preuzima cijelo opterećenje, te time momentna faza završava.



Slika 4-9. Analiza temeljena na metodi veznih dijagrama za 2-1 silaznu promjenu: (a) inercijska faza i (b) momentna faza

Valja napomenuti da bi se, slično kao kod uzlazne promjene, ulazna brzine vrtnje mogla u inercijskoj fazi podići povećanjem momenta motora. Time bi se u velikoj mjeri mogla izbjeći pojava rupe momenta u inercijskoj fazi promjene (usp. slike 4-10 i 4-9a i v. [81]). Međutim,

implementacija ove strategije ograničena je u primjeni, budući da je teško isporučiti snažan impuls dodatnog momenta motora u relativno kratkom vremenu. Međutim, u elektrificiranim transmisijama, ulogu pojačivača ulaznog momenta može preuzeti izvršno upravljiv elektromotor [82], čime se omogućava efikasno reduciranje rupe momenta [55].



Slika 4-10. Vezni dijagram inercijske faze promjene stupnja prijenosa uz primjenu upravljanja ulaznim momentom za 2-1 silaznu promjenu

Prvi uvid u performanse različitih pristupa modeliranja trenja spojke, dobiven kroz diskusiju rezultata prikazanih na slici 4-3, produbljuje se i kvantificira u ovom potpoglavlju za širi raspon scenarija upravljanja 1-2 uzlaznom promjenom.

Tablica 4-3 prikazuje iznose indeksa trzaja (RMS trzaja) za različite scenarije upravljanja 1-2 promjenom. Dobiveni podaci potvrđuju nalaze iznesene u odjeljku 4.3.1:

4. Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa

- Indeks RMS-a trzaja, kao glavna komponenta funkcije cilja, poprima slične vrijednosti za sve modele trenja.
- Modulacija momenta dodatne spojke u inercijskoj fazi promjene reducira indeks trzaja za oko 10% u odnosu na scenarij u kojem je omogućena modulacija samo isključne spojke.
- Primjena upravljanja momentom motora rezultira smanjenjem indeksa trzaja za 16% u slučaju kada se ne primjenjuje penaliziranje gubitaka energije. Poboljšanje performansi u vidu smanjenja trzaja vozila raste i do 72% kada se primjenjuje jaka penalizacija gubitaka energije, jer je u tim slučajevima isključna spojka manje aktivna u reduciranju inercijskog udara.

Tablica 4-3. Usporedba vrijednosti indeksa trzaja vozila za različite scenarije optimiranja

Iznos RMS-a trzaja [m/s ³]						
Penalizacija gubitka energije	Upravljanje momentom motora	Upravljanje dodatnom spojkom	Pristup temeljen na propisivanju odnosa po fazama	Pristup temeljen na ograničenju tipa pasivnosti	Klasični model trenja	Dahlov model trenja
Ne	Ne	Ne	0.386	0.396	0.399	0.373
Ne	Ne	Da	0.348	0.359	0.359	0.355
Ne	Da	Ne	0.326	0.339	0.343	0.336
Ne	Da	Da	0.305	0.316	0.319	0.327
Slaba	Ne	Ne	0.761	0.761	0.750	0.710
Slaba	Ne	Da	0.583	0.583	0.578	0.563
Slaba	Da	Ne	0.373	0.378	0.362	0.359
Slaba	Da	Da	0.342	0.343	0.335	0.329
Jaka	Ne	Ne	1.535	1.535	1.529	1.561
Jaka	Ne	Da	1.310	1.310	1.303	1.358
Jaka	Da	Ne	0.430	0.451	0.417	0.457
Jaka	Da	Da	0.402	0.402	0.385	0.444

Tablica 4-4 uspoređuje vremena izvođenja optimiranja i vrijednosti stope uspješnosti za četiri razmatrana modela spojke i za iste scenarije upravljanja promjenom stupnja prijenosa kao u tablici 4-3. pristupi temeljeni na unaprijednom propisivanju faza i ograničenju tipa pasivnosti karakterizirani su kratkim vremenom izvođenja (svega nekoliko sekundi za jedno optimiranje),

4. Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa

koje je obično red veličine manje od onog dobivenog korištenjem eksplicitnih modela trenja. Pristup temeljen na propisivanju faza ima visoku stopu uspješnosti (većinom između 70% i 95%), dok pristup temeljen na ograničenju tipa pasivnosti ima stope uspješnosti usporedive s onima dobivenima korištenjem klasičnog modela trenja spojke (s krutom aproksimacijom zone držanja, $\Delta\omega = 1$ okr/min). Korištenje Dahlova modela trenja ne donosi nikakve prednosti u odnosu na korištenje klasičnog modela, budući da je stopa uspješnosti općenito niža, a vrijeme izvođenja duže (uz to niža je i točnost, tablica 4-3).

Tablica 4-4. Usporedba vremena izvođenja optimiranja i stope uspješnosti za različite scenarije optimiranja

Vrijeme izvođenja [s]; Stopa uspješnosti [%]						
Penalizacija gubitka energije	Upravljanje momentom motora	Upravljanje dodatnom spojkom	Pristup temeljen na propisivanju odnosa po fazama	Pristup temeljen na ograničenju pasivnosti	Klasični model trenja ($\Delta\omega=1$ okr/min)	Dahlov model trenja ($\Delta\omega=1$ okr/min)
Ne	Ne	Ne	1.5s; 65%	2.2s; 45%	23.3s; 40%	15.3s; 70%
Ne	Ne	Da	2.7s; 75%	4.4s; 45%	26.5s; 60%	28.2s; 40%
Ne	Da	Ne	4.7s; 65%	3.6s; 40%	14.3s; 50%	28.7s; 15%
Ne	Da	Da	7.3s; 75%	8.4s; 40%	27.6s; 35%	40.4s; 20%
Slaba	Ne	Ne	1.7s; 95%	2.3s; 60%	14.3s; 60%	9.0s; 90%
Slaba	Ne	Da	2.9s; 95%	3.7s; 70%	22.2s; 65%	21.6s; 65%
Slaba	Da	Ne	3.7s; 55%	6.0s; 55%	16.8s; 40%	28.0s; 40%
Slaba	Da	Da	7.3s; 75%	11.2s; 45%	27.0s; 40%	37.1s; 20%
Jaka	Ne	Ne	1.1s; 95%	1.8s; 60%	10.2s; 80%	7.6s; 70%
Jaka	Ne	Da	2.5s; 90%	2.7s; 75%	19.1s; 85%	18.8s; 35%
Jaka	Da	Ne	4.0s; 90%	5.7s; 75%	17.5s; 65%	21.5s; 35%
Jaka	Da	Da	8.5s; 85%	11.1s; 75%	20.7s; 70%	39.0s; 15%

U radu [27] analizirani su i složeni (ultimativni) pristupi upravljanja svim spojkama u toku promjene stupnja prijenosa. Vrednovanjem različitih pristupa modeliranja spojke pokazano je kako je takav ultimativni testni slučaj zahtjevan za eksplicitne modele trenja u smislu numeričke stabilnosti optimiranja. S druge strane, primjena pristupa temeljenog na propisivanju odnosa po fazama znatno je ograničena zbog velikog broja mogućih kombinacija predznaka brzina klizanja spojki. Stoga se za scenarije optimiranja kod kojih se razmatra složenija koordinacija

4. Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa

aktuatora (npr. promjena stupnja s dvostrukim prijelazom) preporučuje korištenje pristupa kod kojeg se model spojke temelji na svojstvu pasivnosti.

5. Optimiranje upravljačkih varijabli za promjene s dvostrukim prijelazom

U ovom poglavlju, alat za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa, predstavljen u prethodnom poglavlju, iskoristit će se za dobivanje uvida u optimalna upravljačka djelovanja prilikom izvođenja kompleksnije promjene s dvostrukim prijelazom (DTS), kod koje se istovremeno koriste četiri spojke. Nakon što se izdvoje osnovne značajke DTS optimiranog odziva, predložit će se šest strategija upravljanja različitim stupnjevima kompleksnosti i primjenjivosti. Konačno, te će se strategije kvantitativno vrednovati u smislu ostvarivih performansi promjene stupnja prijenosa.

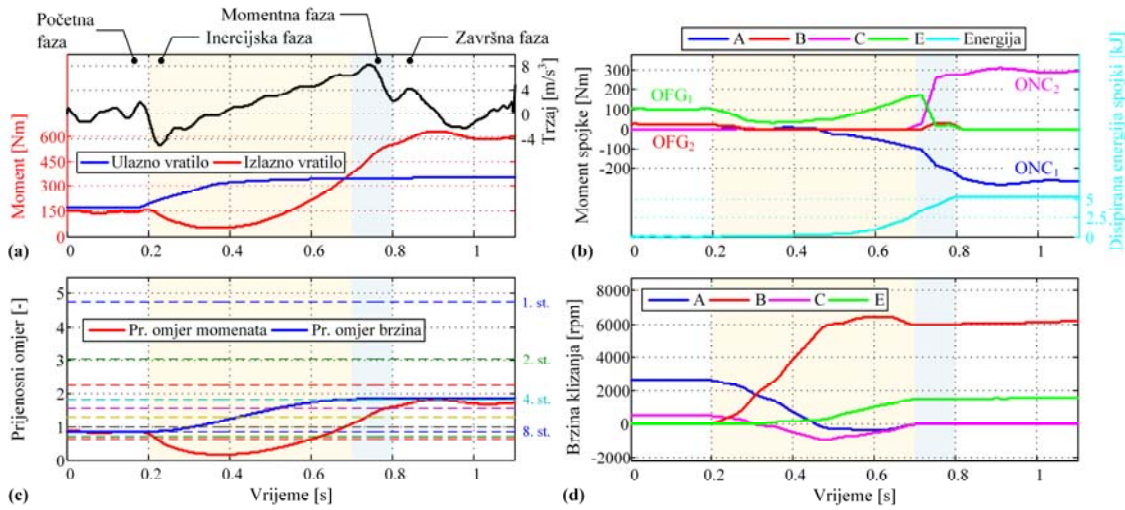
5.1. Osnovne značajke optimiranog odziva

Kao što je rečeno u uvodu ovog rada, postoje dva osnovna načina izvođenja DTS-a. Prvi je da se takva promjena izvede kao kombinacija dvije ili više promjena s jednostrukim prijelazom, što bi općenito trebalo izbjegavati da se spriječi dugo trajanje promjene. Drugi i izazovniji način podrazumijeva simultano upravljanje svim četirima spojkama u jednoj promjeni stupnja prijenosa. Upravo je taj način glavni predmet istraživanja ovog rada.

Slika 5-1 prikazuje rezultate optimiranja za 8-4 silazni DTS (v. tablicu 2-1 i sliku 3-4), koji su dobiveni uz osnovnu formulaciju problema optimiranja danu u potpoglavlju 4.1 (pri čemu je primijenjen samo kriterij trzaja vozila, $k_w = 0$, te se ne upravlja momentom motora). Nominalna trajanja faza jednaka su onima definiranim u potpoglavlju 4.3 za silaznu promjenu stupnja prijenosa (inercijska faza je trajanja 0.5 s, dok je momentna faza trajanja 0.1 s). Za razliku od strategije upravljanja iz reference [33] koja predlaže brzo otpuštanje isključnih spojki i ukapčanje uključnih spojki u njihovim točkama sinkronizacije (tj. kada dosegnu brzinu klizanja nula), rezultati optimiranja na slici 5-1 indiciraju kako bi se za optimalno dinamičko ponašanje jedna od isključnih spojki (spojka E) trebala modulirati u toku inercijske faze (slično kao u silaznoj promjeni s jednostrukim prijelazom, usp. slike 5-1b i 4-5b). U točki sinkronizacije jedne od dvije uključnih spojki (spojke A; slika 5-1d), njen moment počinje raste, te se spojka modulira na način da se drži na malim brzinama klizanja do kraja inercijske faze. Inercijska

5. Optimiranje upravljačkih varijabli za promjene s dvostrukim prijelazom

faza DTS-a završava zatvaranjem obiju uključnih spojki ($t = 0.7$ na slici 5-1d). U momentnoj fazi promjene dolazi do prijenosa momenta s OFG_1 spojke (čiji se moment podigao na kraju inercijske faze kako bi se oblikovao prijenosni omjer brzina) na ONC_2 spojku, koja se brzo (i u potpunosti) ukapča u svojoj točki sinkronizacije (na samom kraju inercijske faze). Slično kao kod promjene s jednostrukim prijelazom, u inercijskoj fazi dolazi do pojave rupe momenta (v. odziv izlaznog momenta na slici 5-1a). Koordinacija aktuatora je takva da se ostvaruje blag prijelaz izlaznog momenta na razinu ciljanog četvrtog stupnja prijenosa (uočiti kako je polazna razina izlaznog momenta bitno manja od ciljane razine zbog velikog skoka prijenosnog omjera u promjeni u kojoj se odjednom preskače više stupnja prijenosa).



Slika 5-1. Rezultati optimiranja za 8-4 silaznu promjenu s dvostrukim prijelazom (samo kriterij trzaja vozila, model spojke temeljen na svojstvu pasivnosti, p_{th} eksponencijalno raste od 0.3 u $t = 0.2s$ do 1 u $t = 0.8s$)

5.2. Upravljačke strategije

5.2.1. Rezultati optimiranja za bazni slučaj bez specifičnih faznih ograničenja

Optimalna koordinacija aktuatora za promjene s dvostrukim prijelazom u nastavku će se analizirati na primjeru 10-6 silazne promjene. Dosad se moment motora izračunavao kao funkcija položaja pedale akceleratora, p_{th} i brzine vrtnje motora, ω_e (v. sliku 2-3). S ciljem utvrđivanja optimalnog ponašanja mjenjača u ultimativnim uvjetima promjene stupnja prijenosa, u ovom je poglavlju pretpostavljen konstantan i visok moment motora u toku

5. Optimiranje upravljačkih varijabli za promjene s dvostrukim prijelazom

promjene stupnja² ($\tau_e = 550$ Nm). U rezultatima u nastavku ovog poglavlja redukcija momenta motora kroz odgovarajuće upravljačko djelovanje je omogućena (upravljački ulaz $\Delta\tau_{ec} < 0$ se koristi temeljem izraza (2-2)).

Slika 5-2 prikazuje optimirani odziv 10-6 silazne promjene, koji je dobiven uz primjenu samo kriterija trzaja vozila ($k_w = 0$) i za opću DTS upravljačku strategiju (u kojoj su aktivna samo bazna ograničenja dana u potpoglavlju 4.1). Nominalna trajanja faza promjene stupnja prijenosa označenih na slici 5-2 su: $t_s = 0.2$ s, $t_i = 0.5$ s (trajanje inercijske faze), $t_t = 0.1$ s (trajanje momentne faze) i $t_e = 0.3$ s.

Temeljem dobivenih rezultata optimiranja mogu se izvesti sljedeća opažanja:

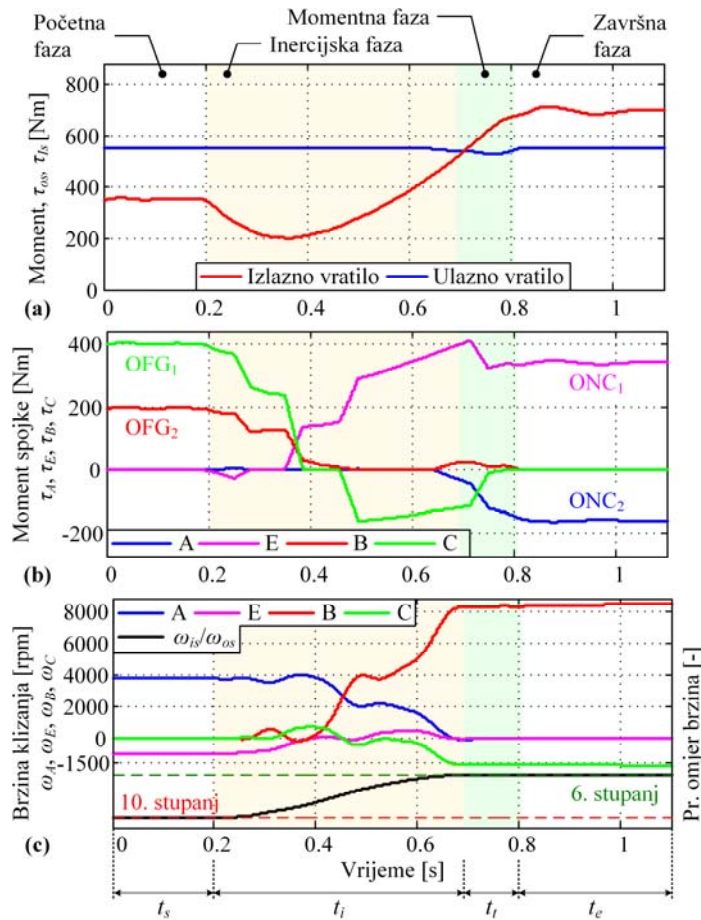
- Promjena stupnja započinje otpuštanjem obiju isključnih (OFG) spojki (slika 5-2b).
- Isključne spojke se koriste se sve dok jedna od uključnih spojki ne dosegne točku sinkronizacije, tj. brzinu klizanja nula (prva uključna spojka, ONC₁; spojka E u ovom slučaju; slika 5-2c). Potom se odvija prijenos momenta s isključnih spojki na prvu uključnu spojku (spojku E) održavajući pritom njenu brzinu klizanja blizu nule. Valja uočiti kako prijenosni omjer brzina vrtnji (slika 5-2c) i dalje naglašeno raste tijekom tog intervala prijenosa momenta.
- Nakon dovršetka prijenosa momenta (oko $t = 0.38$ s), promjenom prijenosnog omjera brzina upravlja se klizanjem prve uključne spojke (spojke E) i simultanom modulacijom njenog momenta, kao i momenta isključne spojke s manjom završnom brzinom klizanja (tj. s manjim potencijalom disipacije energije; spojke C u ovom slučaju). Promjena prijenosnog omjera brzina završava kada su obje uključne spojke sinkronizirane, što se događa u istom vremenskom trenutku ($t = 0.7$ s). Podizanje momenta druge uključne spojke (spojke A) započinje netom prije dovršetka promjene prijenosnog omjera brzina, čime se ta spojka priprema za nadolazeću momentnu fazu.

² Takav scenarij zapravo se ne viđa u praksi jer se silazne promjene pod opterećenjem tipično iniciraju kada vozač zatraži snažniju akceleraciju vozila pritiskom na pedalu akceleratora, što rezultira rastom momenta motora do kojeg ne dolazi trenutno (razvoj momenta motora ima svoju dinamiku). Međutim, promjena pod konstantnim visokim ulaznim momentom predstavlja zahtjevniji slučaj u usporedbi s promjenom kod koje je ulazni moment inicijalno nizak, jer isključne spojke prenose veći moment i koordinacija njihovog otpuštanja s primjenom uključnih spojki postaje zahtjevnija.

5. Optimiranje upravljačkih varijabli za promjene s dvostrukim prijelazom

- Promjena stupnja završava prijenosom momenta između još uvijek upravljane isključne spojke i druge uključne spojke koja se konačno u potpunosti ukapča (tj. koja se zatvara).
- Redukcija momenta motora gotovo se i ne koristi, iako je omogućena.

Predložena upravljačka djelovanja uključuju kompleksnu koordinaciju spojki tijekom drugog dijela promjene prijenosnog omjera brzina, tj. nakon što prva uključna spojka dosegne točku sinkronizacije (poput moduliranja spojki na maloj brzini klizanja i promjene predznaka brzina klizanja spojki), što može biti zahtjevno s gledišta praktične realizacije. S ciljem dobivanja uvida u optimalna, i u isto vrijeme, praktična DTS upravljačka djelovanja, sljedeći odjeljak predlaže pet strategija upravljanja koje sprječavaju određena upravljačka djelovanja koja bi bila zahtjevnija za implementaciju.



Slika 5-2. Rezultati optimiranja za 10-6 silaznu promjenu s dvostrukim prijelazom (samo kriterij trzaja vozila, primijenjeno upravljanje redukcijom momenta motora, $\tau_e = 550$ Nm)

5.2.2. Upravljačke strategije s dodanim pragmatičnim faznim ograničenjima

Pragmatične DTS upravljačke strategije implementirane su unutar optimizacijskog okvira nametanjem dodatnih ograničenja vezanih uz faze promjene stupnja prijenosa, koja su zbirno prikazana u tablici 5-1 za 10-6 primjer promjene stupnja prijenosa. Za druge promjene s dvostrukim prijelazom, potrebno je promijeniti samo predznake ograničenja tipa nejednakosti, koji se mogu odrediti na automatski način temeljem poznatih predznaka brzina klizanja spojki u početnoj i završnoj fazi promjene. Glavne karakteristike svake strategije ilustrirane su na slici 5-3, a mogu se opisati kako slijedi.

Strategija 1: Najopćenitija upravljačka strategija bez dodatnih ograničenja vezanih uz faze promjene stupnja prijenosa (strategija koja je primijenjena i diskutirana u odjeljku 5.2.1).

Strategija 2: U ovoj strategiji nije dozvoljena promjena predznaka momenta spojki u toku promjene stupnja prijenosa (v. ilustraciju na slici 5-3b). To je ostvareno nametanjem ograničenja da su predznaci momenata spojki tijekom aktivnih faza jednaki njihovim predznacima u početnoj fazi za uključne spojke, odnosno završnoj fazi za isključne spojke.

Strategija 3: Nije dozvoljena modulacija momenta uključnih spojki u toku inercijske faze (slika 5-3c). Kako bi se to ostvarilo, moment obiju spojki ograničava se na vrijednost nula u toku inercijske faze (tablica 5-1). Ovo ograničenje se uvodi jer se uključna spojka tradicionalno ne koristi tijekom faze promjene prijenosnog omjera brzina u silaznim promjenama s jednostrukim prijelazom [15].

Strategija 4: Još jedan pragmatični pristup upravljanja DTS-om, sličan onom predloženom u [33], jest da se isključne spojke žustro otpuste unutar 0.1 s od početka promjene stupnja prijenosa (slika 5-3d), nakon čega se one više ne koriste u ostatku promjene. U svrhu ispravne formulacije problema optimiranja, inercijska faza se dijeli u dvije pod-faze: 1) isključne spojke su aktivne, 2) isključne spojke su otvorene, tj. vrijedi $\tau_{JFG1,2} = 0$ (tablica 5-1).

Strategija 5: U ovoj strategiji nije dopuštena promjena predznaka brzina klizanja uključnih spojki, što znači da se uključne spojke trebaju u potpunosti zatvoriti u njihovim točkama sinkronizacije (tj. kada postignu brzinu klizanja nula, slika 5-3e). U formulaciji problema

5. Optimiranje upravljačkih varijabli za promjene s dvostrukim prijelazom

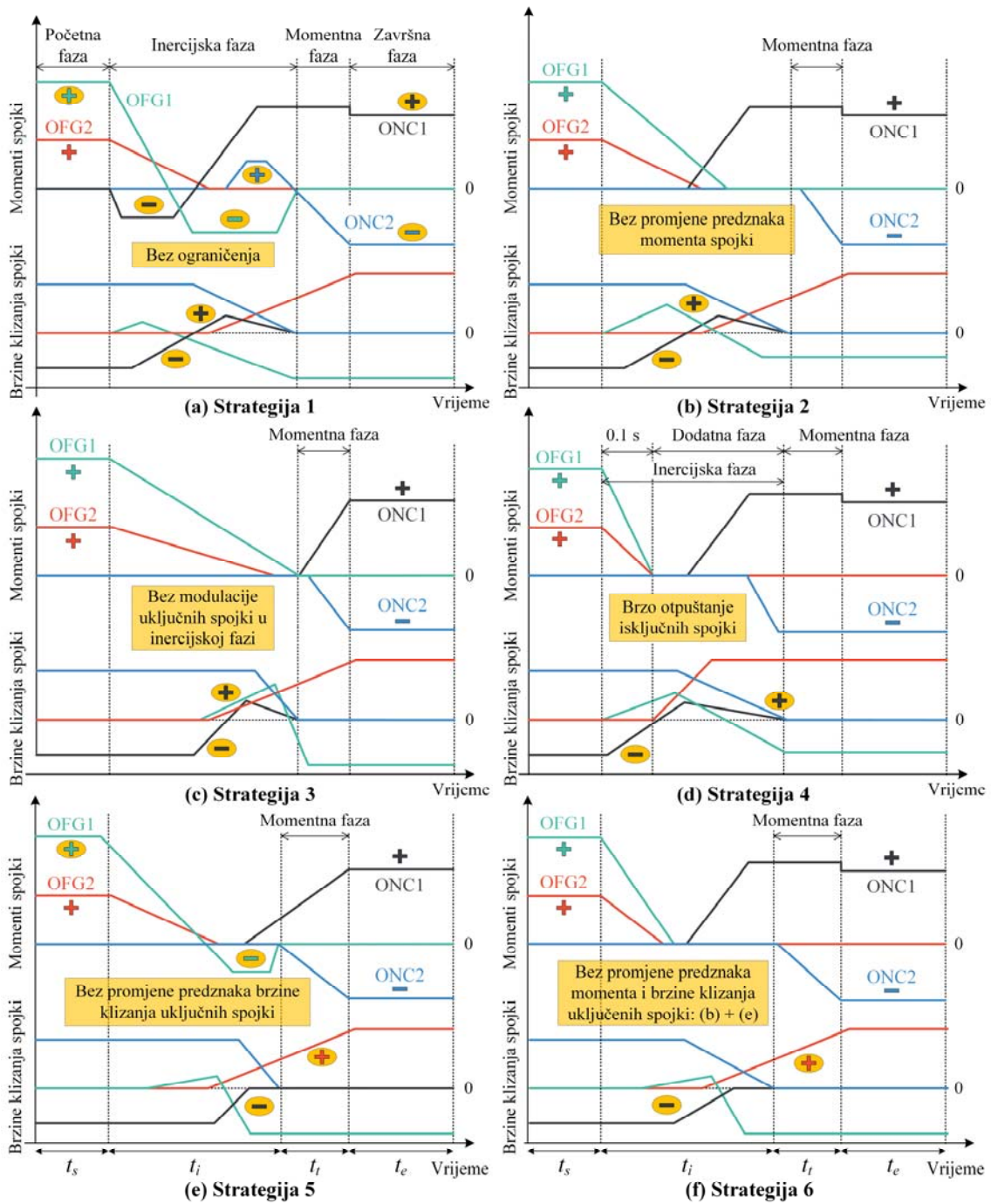
optimiranja to se postiže nametanjem ograničenja da su predznaci brzina klizanja uključenih spojki jednaki predznacima koje one imaju u polaznom stupnju prijenosa.

Strategija 6: Nije dozvoljena niti promjena predznaka brzine klizanja spojki niti promjena predznaka momenta spojki u inercijskoj fazi (slika 5-3f), tj. ova strategija kombinira Strategije 2 i 5.

Tablica 5-1. Dodatna ograničenja vezana uz faze promjene stupnja prijenosa za ostvarenje različitih DTS upravljačkih strategija unutar optimizacijskog okvira (vrijedi za 10-6 primjer promjene; ograničenja za početnu, momentnu i završnu fazu ostaju ista kao što je definirano u tablici 4-1)

	Strategija 1	Strategija 2	Strategija 3	Strategija 4	Strategija 5	Strategija 6
Inercijska faza (ograničenje trajanja: ≤ 500 ms)	Nema	$\tau_{JOFG1,2} \geq 0$ $\tau_{JONC1} \geq 0$ $\tau_{JONC2} \leq 0$	$\tau_{JONC1,2} = 0$	$\tau_{JOFG1,2} \geq 0$ $\tau_{JONC1} \geq 0$ $\tau_{JONC2} \leq 0$	$\omega_{ONC1} \leq 0$ $\omega_{ONC2} \geq 0$	$\tau_{JOFG1,2} \geq 0$ $\tau_{JONC1} \geq 0$ $\tau_{JONC2} \leq 0$ $\omega_{ONC1} \leq 0$ $\omega_{ONC2} \geq 0$
Dodatna faza (≤ 400 ms)				$\tau_{JOFG1,2} = 0$		

5. Optimiranje upravljačkih varijabli za promjene s dvostrukim prijelazom



Slika 5-3. Ilustracija glavnih karakteristika upravljačkih strategija za promjenu s dvostrukim prijelazom realiziranih nametanjem dodatnih faznih ograničenja kod optimiranja upravljačkih varijabli

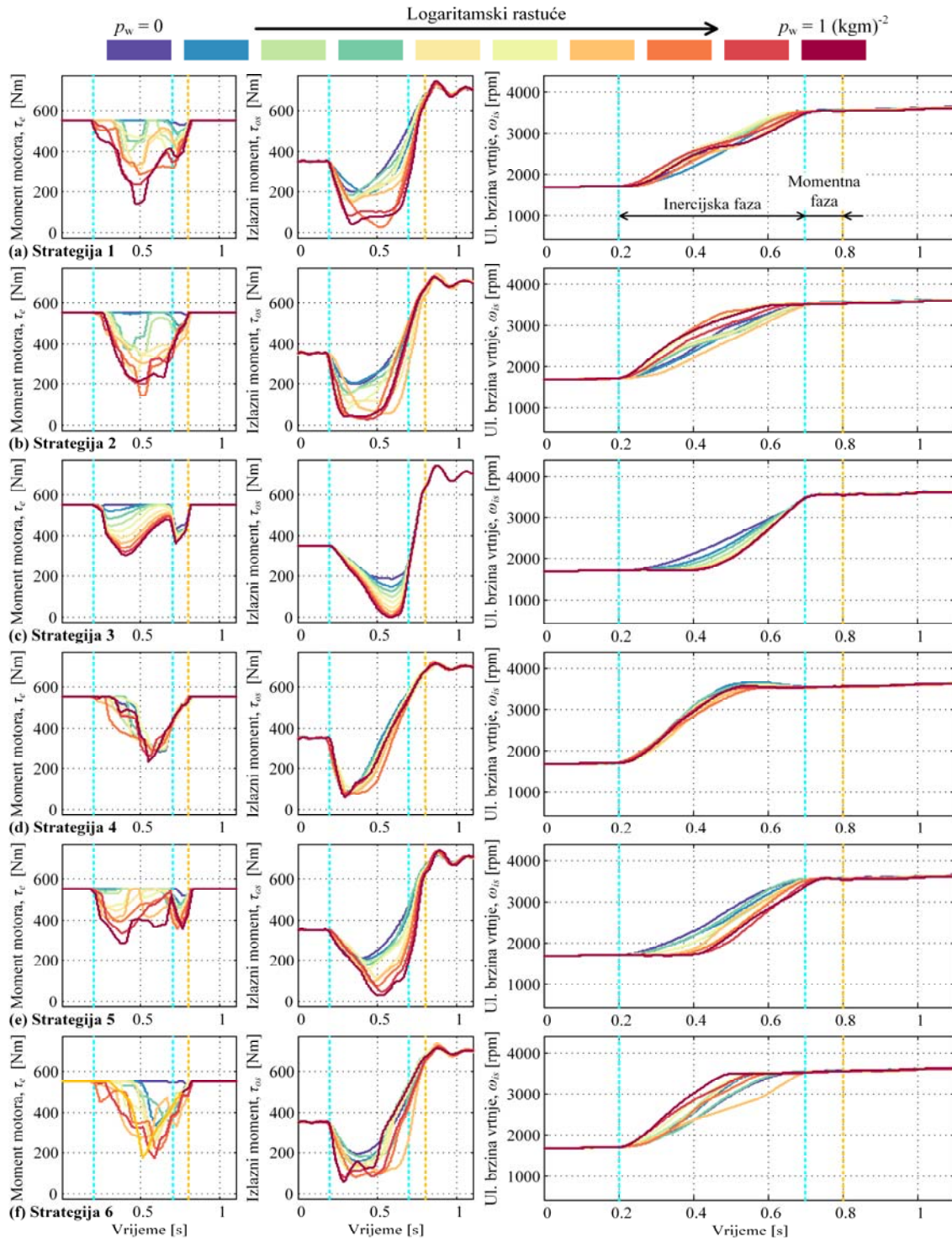
5.3. Rezultati optimiranja za različite upravljačke strategije

Kvaliteta predloženih strategija upravljanja vrednuje se temeljem rezultata optimiranja koja su provedena za različite vrijednosti težinskog faktora k_w funkcije cilja (4-1). Normirani faktor penalizacije energije p_w ($p_w = k_w/0.4 \cdot 10^5$) generiran je kao vektor devet logaritamski razmaknutih točaka između 0.01 i 1. Zbirni rezultati optimiranja prikazani su na slici 5-4.

Za **Strategiju 1** (slika 5-4a), brzine promjene momenta izlaznog vratila, koji je usko povezan s trzajem vozila, slični su na početku i na kraju promjene stupnja prijenosa. Željeno vrijeme odziva prijenosnog omjera brzina od 500 ms je zadovoljeno za sve vrijednosti faktora penalizacije energije p_w (v. odziv varijable ω_{is} uz približno konstantan ω_{os}). Vrlo slični rezultati dobiveni su za **Strategiju 2** (slika 5-4b), uz iznimku vremena odziva prijenosnog omjera brzina, koje može biti kraće od specificiranog. **Strategija 3** karakterizirana je visokim gradijentima izlaznog momenta na kraju promjene stupnja prijenosa, zbog ukapčanja uključnih spojki na kraju promjene stupnja prijenosa (u momentnoj fazi). Posljedično, indeksi trzaja vozila općenito su najveći za ovu strategiju. Za **Strategiju 4**, relativno visoki gradijenti izlaznog momenta mogu se uočiti na početku promjene stupnja prijenosa, do kojih dolazi zbog agresivnog otpuštanja isključnih spojki. Odziv prijenosnog omjera brzina je kraći od specificiranog za cijeli skup težinskih faktora. Za **Strategiju 5**, brzina promjene izlaznog momenta je relativno mala na početku promjene i odziv prijenosnog omjera brzina je inicijalno zakašnjen (slično kao u Strategiji 3, u kojoj nije dopuštena modulacija uključnih spojki u inercijskoj fazi). **Strategija 6** kombinira karakteristike Strategija 2 i 5, te je karakterizirana brzim odzivom prijenosnog omjera brzina i umjerenim gradijentima izlaznog momenta za većinu težinskih faktora. Značajno pogoršanje performansi u smislu primjetnog prebačaja/oscilacija izlaznog momenta uočava se za jake penalizacije gubitaka energije (visoke p_w).

Rezultati optimiranja prikazani na slici 5-4 također pokazuju da snažnije penaliziranje gubitaka energije u spojkama povećava iznos redukcije momenta motora i produbljuje rupu momenta. Iznimka je Strategija 4 u kojoj se obje isključne spojke brzo otpuštaju i u slučaju koje su propad i oblik momenta motora te rupa izlaznog momenta uglavnom neovisne o stupnju penalizacije energije spojki.

5. Optimiranje upravljačkih varijabli za promjene s dvostrukim prijelazom



Slika 5-4. Usporedni rezultati optimiranja za 10-6 promjenu s dvostrukim prijelazom za različite upravljačke strategije i razne vrijednosti normiranog težinskog faktora p_w (primijenjeno upravljanje momentom motora, konstantan moment motora, $\tau_e = 550$ Nm)

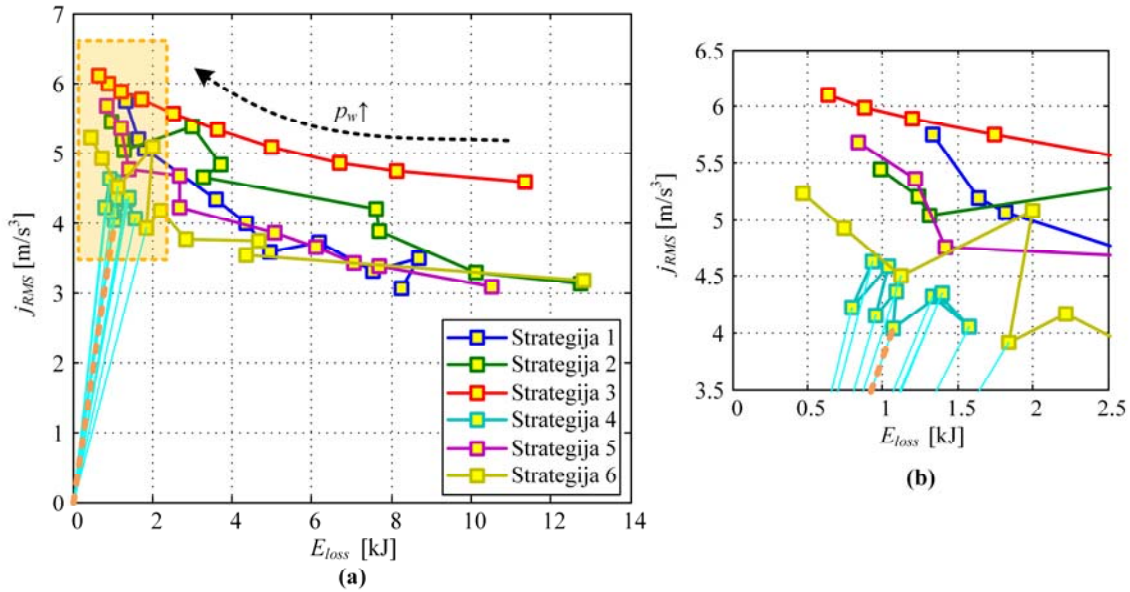
5.4. Vrednovanje performansi predloženih upravljačkih strategija temeljeno na Pareto frontama

Analiza rezultata optimiranja iz prethodnog potpoglavlja provodi se za dva relevantna kriterija performansi kako bi se pružio bolji uvid u značajke optimalnog ponašanja i s njima povezanih kompromisa. Prvi kriterij je indeks trzaja vozila, j_{RMS} (za definiciju v. izraz (4-14)), dok je drugi iznos ukupne energije disipirane u spojkama u toku promjene stupnja prijenosa, E_{loss} (v. izraz (4-15)).

Slika 5-5a (i njezin detalj na slici 5-5b) prikazuju navedene indekse performansi iscrtane u E_{loss} - j_{RMS} ravnini, gdje oni formiraju Pareto frontu (više detalja o konceptu Pareto optimalnosti i definiciji Pareto optimalnih točaka može se naći u narednom poglavlju 6). Svaka boja reprezentira jednu strategiju upravljanja, dok svaka žuta točka reprezentira jednu vrijednost normiranog težinskog faktora p_w . Svijetlo plave linije označavaju najkraću udaljenost od ishodišta E_{loss} - j_{RMS} koordinatnog sustava za svaku vrijednost težinskog faktora, koja se uzima kao agregatni kriterij performansi u svrhu ilustrativnog vrednovanja DTS upravljačkih strategija.

Slika 5-5 pokazuje da je **Strategija 4** karakterizirana najmanjim agregatnim indeksom performansi za najveći broj stupnjeva penalizacije gubitaka energije spojki. To se objašnjava brzim otpuštanjem isključenih spojki tj. njihovom kratkom aktivnošću. **Strategija 6** daje najbolje performanse za težinske faktore $p_w = 0.1$ (srednje-jaka penalizacije energije) i $p_w = 0.316$ (jaka penalizacija energije), te je druga po performansama za veliku većinu preostalih vrijednosti težinskog faktora. **Strategija 3** ima najskromnije performanse zbog zakašnjele promjene prijenosnog omjera brzina i kompleksne koordinacije među svim aktuatorima u momentnoj fazi promjene (i s time povezanih oscilacija u odzivu izlaznog momenta i trzaja, v. odjeljak 5.5.3). Valja napomenuti da se činjenica da najopćenitija formulacija problema optimiranja (**Strategija 1**) često ne daje najmanje vrijednosti funkcije cilja objašnjava pojavom izraženijih lokalnih minimuma za ovaj scenarij koji često rezultira kompleksnom koordinacijom aktuatora.

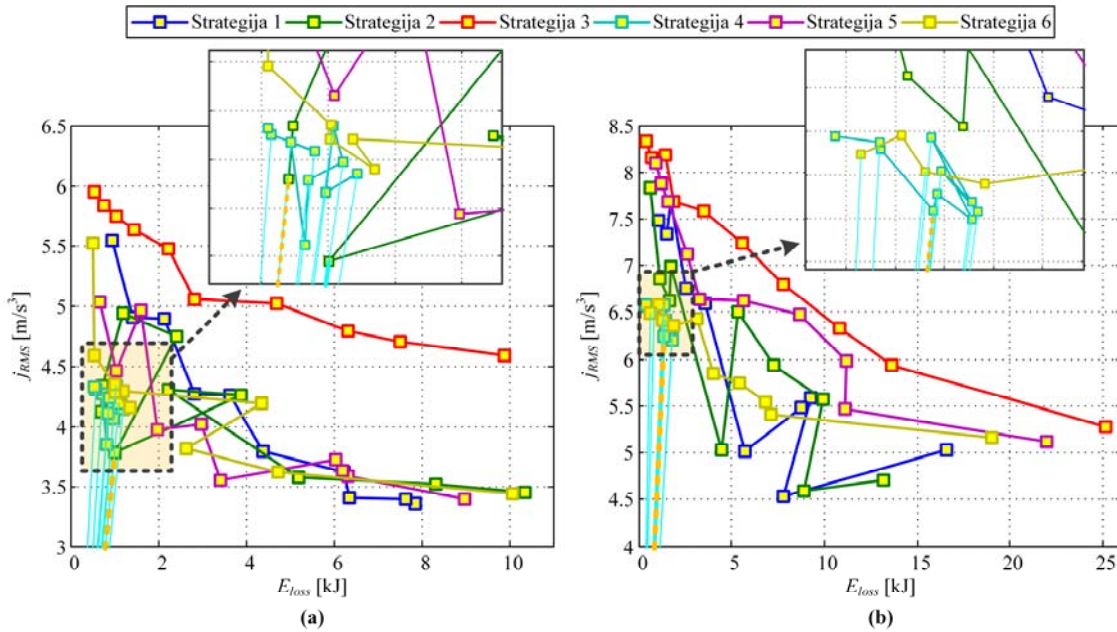
5. Optimiranje upravljačkih varijabli za promjene s dvostrukim prijelazom



Slika 5-5. Pareto fronte za različite upravljačke strategije i za razne vrijednosti težinskog faktora p_w (10-6 silazna promjena, $\tau_e = 550$ Nm, primijenjeno upravljanje momentom motora): (a) cjeloviti graf i (b) uvećani prikaz odsječka istaknutog na (a)

Slika 5-6a prikazuje rezultate optimiranja (tj. indekse performansi) za istu 10-6 silaznu promjenu, ali uz drugačiji profil momenta motora (linearno rastući od 400 Nm do 550 Nm u toku promjene stupnja prijenosa). Nadalje, primjena istog postupka optimiranja za drugi primjer DTS-a (8-4 promjene) i konstantan i visok moment motora ($\tau_e = 550$ Nm) daje rezultate prikazane na slici 5-6b. Rezultati optimiranja prezentirani na slici 5-6 su kvalitativno vrlo slični onima koji se odnose na bazni primjer sa slike 5-5. Naime, **Strategija 4** pruža superiorne performanse za većinu težinskih faktora, a njima se najbliže primiče **Strategija 6**.

5. Optimiranje upravljačkih varijabli za promjene s dvostrukim prijelazom



Slika 5-6. Pareto fronte za različite upravljačke strategije i za razne vrijednosti težinskog faktora p_w : (a) 10-6 silazna promjena i linearno rastući moment motora od 400 do 550 Nm i (b) 8-4 silazna promjena i $\tau_e = 550$ Nm (upravljanje momentom motora primijenjeno u oba slučaja)

5.5. Analiza optimalne koordinacije aktuatora za predložene strategije upravljanja

Naredni odjeljci analiziraju vremenske odzive rezultata optimiranja pojedinačno za svaku upravljačku strategiju, uz otežanje gubitaka energije za koje se najbolje ilustrira karakter i značajke pojedine strategije temeljem subjektivnog vrednovanja rezultata (pripadajuća vrijednost težinskog faktora dana je u naslovu slike).

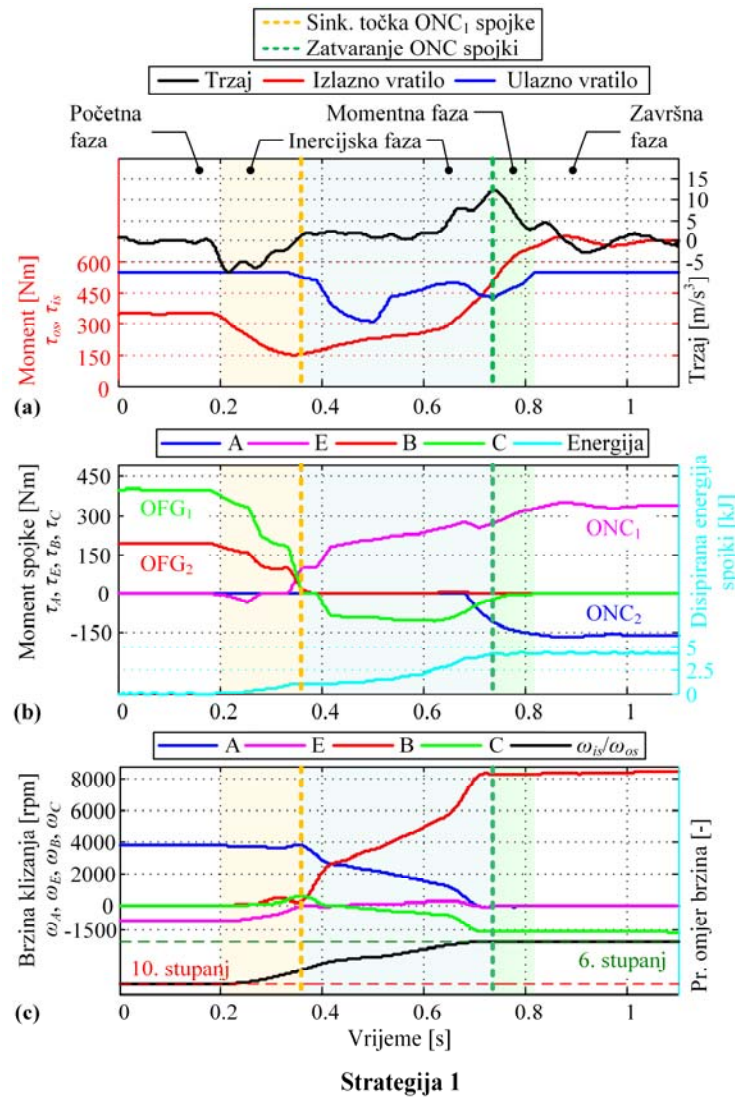
5.5.1. Upravljačka strategija 1 – općenita formulacija

Slika 5-7 pokazuje optimalni odziv pogona vozila za Strategiju 1 i vrijednost težinskog faktora $p_w = 0.1$, koji predstavlja srednje-jaku penalizaciju gubitaka energije spojke. Slično kao na slici 5-2, obje isključne spojke se otpuštaju prije nego ONC_1 spojka dosegne prvu sinkronizacijsku točku ($t \cong 0.36$ s; v. isprekidanu žutu liniju na slici 5-7b). Upravljanje promjenom prijenosnog omjera brzina mjenjača (inercijska faza, slika 5-7c) nakon te točke ostvaruje se korištenjem

5. Optimiranje upravljačkih varijabli za promjene s dvostrukim prijelazom

prve uključne spojke (spojke E) i prve isključne spojke (spojke C, tj. one s manjom brzinom klizanja), na način da se obje uključne spojke sinkroniziraju u isto vrijeme na kraju inercijske faze (slika 5-7c). Kako bi se osiguralo meko zatvaranje ONC_1 spojke na kraju inercijske faze (što je važno iz perspektivne udobnosti promjene stupnja), njezina se brzina klizanja drži na vrlo malim vrijednostima tijekom ove faze (slika 5-7c), što se postiže postupnim povećanjem momenta ONC_1 spojke. Što se tiče upravljanja momentom motora, optimalno ponašanje je takvo da se ulazni moment reducira neposredno prije završetka inercijske faze, te se vraća natrag (na polaznu vrijednost) tijekom momentne faze (slika 5-7a) s ciljem oblikovanja odziva omjera brzina. Osim toga, ulazni moment se reducira i tijekom srednjeg dijela inercijske faze ili preciznije nakon prve točke sinkronizacije ONC_1 spojke (slika 5-7a). Ovo upravljačko djelovanje reducira energiju disipiranu u spojkama, ali u isto vrijeme unosi zadržku u odzivu prijenosnog omjera brzina (slika 5-7c u $t \cong 0.4$ s). Usprkos tome, odziv trzaja vozila je gladak, te je karakteriziran umjerenim, gotovo linearnim rastom koji započinje u $t = 0.6$ s. Maksimalna vrijednost od 12 m/s^3 postiže se na samom kraju inercijske faze.

5. Optimiranje upravljačkih varijabli za promjene s dvostrukim prijelazom



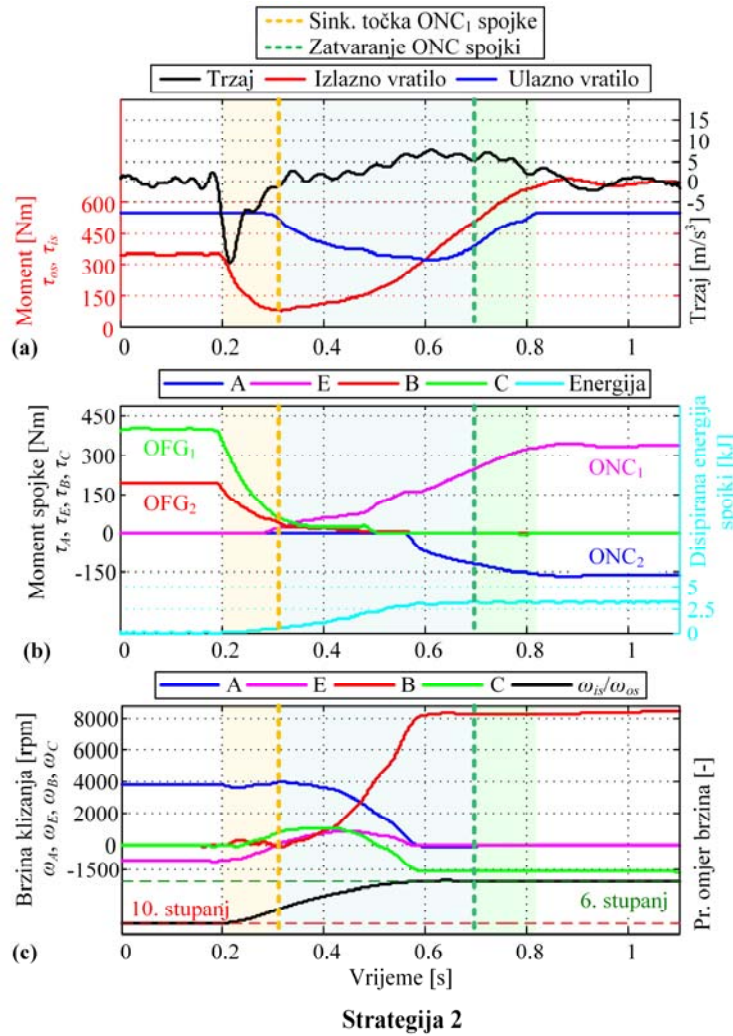
Slika 5-7. Rezultati optimiranja upravljačkih varijabli za 10-6 silaznu promjenu za Strategiju 1 ($\tau_e = 550$ Nm, primijenjeno upravljanje momentom motora, $p_w = 0.1$)

5.5.2. Upravljačka strategija 2 – bez promjene predznaka momenta spojki

U Strategiji 2, obje isključne spojke otpuštaju se brže nego u Strategiji 1 (one se gotovo u potpunosti otvaraju već u $t \approx 0.28$ s, slika 5-8b), posljedica čega je značajan negativni šiljak koji se javlja u odzivu trzaja vozila (i do -20 m/s³, slika 5-8a). Optimalno ponašanje je takvo da se isključne spojke ne koriste nakon što postignu prvu točku sinkronizacije (slika 5-8b), gdje bi promijenile svoj nominalni predznak momenta (usp. sliku 5-7b). Tečno i energetski učinkovito upravljanje promjenom prijenosnog omjera brzina ostvareno je bliskom

5. Optimiranje upravljačkih varijabli za promjene s dvostrukim prijelazom

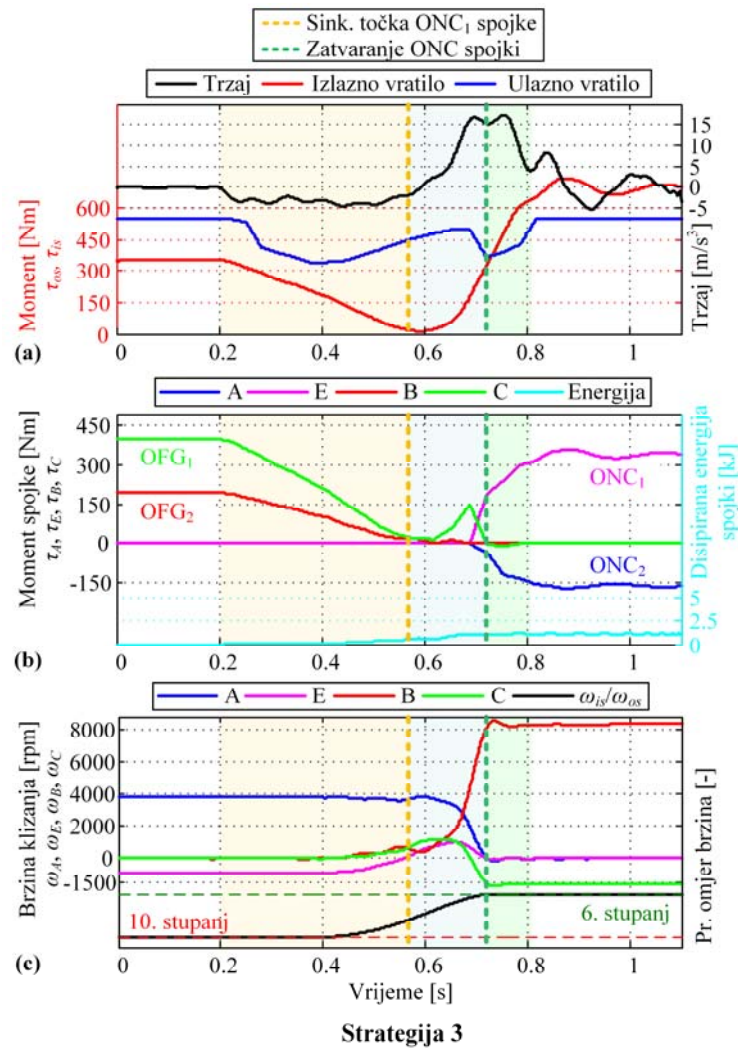
koordinacijom prve uključne spojke (spojke ONC_1) i motora, gdje se moment motora počinje reducirati nakon prve točke sinkronizacije ONC_1 spojke, a vraćati natrag na zadanu vrijednost netom prije početka momentne faze (slika 5-7a). Tijekom relativnog dugog intervala prije završetka inercijske faze ($0.58 \text{ s} < t < 0.7 \text{ s}$), obje uključne spojke drže se blizu stanja u kojem su zatvorene (one su upravljane/modulirane na način da kližu vrlo malim brzinama, slika 5-8c), što je energetski učinkovito, ali iz perspektivne praktične implementacije vrlo izazovno za ostvariti.



Slika 5-8. Rezultati optimiranja upravljačkih varijabli za 10-6 silaznu promjenu za Strategiju 2 ($\tau_e = 550 \text{ Nm}$, primijenjeno upravljanje momentom motora, $p_w = 0.0562$)

5.5.3. Upravljačka strategija 3 – bez modulacije uključnih spojki u toku inercijske faze

U Strategiji 3, početak promjene prijenosnog omjera je odgođen. Naime, iako se promjena stupnja prijenosa inicira u $t = 0.2$ s, brzine klizanja isključnih spojki drže se blizu nule sve do $t = 0.4$ s (slika 5-9c). Tijekom tog vremena počeka, reduciranjem ulaznog momenta smanjuje se izlazni moment (slika 5-9a), dok se momenti isključnih spojki drže tek malo ispod momenata držanja, što rezultira jedva primjetnim, minijaturnim klizanjem tih spojki. Odgađanje promjene prijenosnog omjera je općenito nepoželjno iz perspektive percepcije kvalitete promjene stupnja prijenosa jer se doživljava kao neželjeno kašnjenje u odzivu sustava. Nakon faze počeka nastupa stvarna promjena prijenosnog omjera brzina (slika 5-9c), koja se ostvaruje istovremenim povećanjem ulaznog momenta i smanjenjem momenata isključnih spojki. Prva isključna spojka (spojka C) se koristi pri kraju inercijske faze tako da se podiže njen moment kako bi oblikovala (tj. usporila) odziv prijenosnog omjera brzina i omogućila istovremenu sinkronizaciju obje uključne spojke (slike 5-9b i 5-9c). Brzim zatvaranjem uključnih spojki dolazi do naglog rast izlaznog momenta, što rezultira snažnim trzajem na kraju promjene stupnja prijenosa (vršna vrijednost prelazi 15 m/s^3). Moment druge isključne spojke (spojke E) nastavlja se smanjivati prema nuli (tj. prema punom otpuštanju) u završnom dijelu inercijske faze. Takav dovršetak promjene prijenosnog omjera brzina zahtijeva blisku koordinaciju većeg broja aktuatora, što može biti zahtjevan zadatak za stvarni (*on-line*) sustav upravljanja.



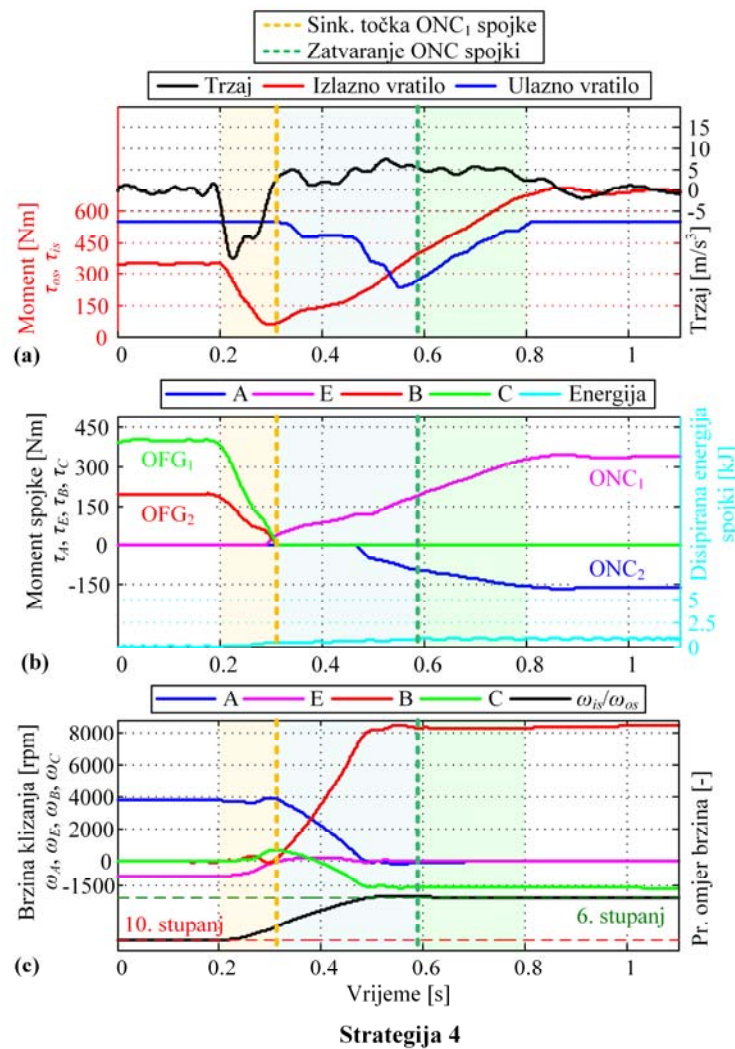
Slika 5-9. Rezultati optimiranja upravljačkih varijabli za 10-6 silaznu promjenu za Strategiju 3 ($\tau_e = 550 \text{ Nm}$, primijenjeno upravljanje momentom motora, $p_w = 0.316$)

5.5.4. Upravljačka strategija 4 – brzo inicijalno otvaranje isključnih spojki

U Strategiji 4, zahtijeva se potpuno otvaranje isključnih spojki u toku prvih 100 ms promjene stupnja prijenosa (slika 5-3d). Isključne spojke moduliraju se na način da ONC₁ spojka dosegne svoju prvu točku sinkronizacije u isto vrijeme (slika 5-10c) kada se isključne spojke u potpunosti otvaraju. Brzim otpuštanjem isključnih spojki dolazi do oštrog pada izlaznog momenta, što uzrokuje pojavu snažnog negativnog šiljka u odzivu trzaja vozila u prvom dijelu inercijske faze. Reduciranje momenta motora i moduliranje E spojke (ONC₁) koriste se u preostalom dijelu inercijske faze (tj. tijekom dodatne faze) kako bi upravljali promjenom

5. Optimiranje upravljačkih varijabli za promjene s dvostrukim prijelazom

prijenosnog omjera brzina reduciranjem ulaznog momenta (slika 5-10a) i podizanjem momenta spojke (slika 5-10b) na način da se obje uključne spojke sinkroniziraju istovremeno (slika 5-10c). Vrijeme odziva prijenosnog omjera brzina postaje kraće od maksimalne predefinirane vrijednosti od 500 ms (za oko 100 ms, slika 5-10c). Prijenos momenta u momentnoj fazi promjene oblikuje se bliskom koordinacijom momenta motora i momenata uključnih spojki, što zahtijeva držanje uključnih spojki na malim brzinama klizanja prije nego što se one u potpunosti zatvore pri kraju momentne faze. Praktična implementacija takvog upravljanja DTS-om mogla bi biti vrlo zahtjevna.

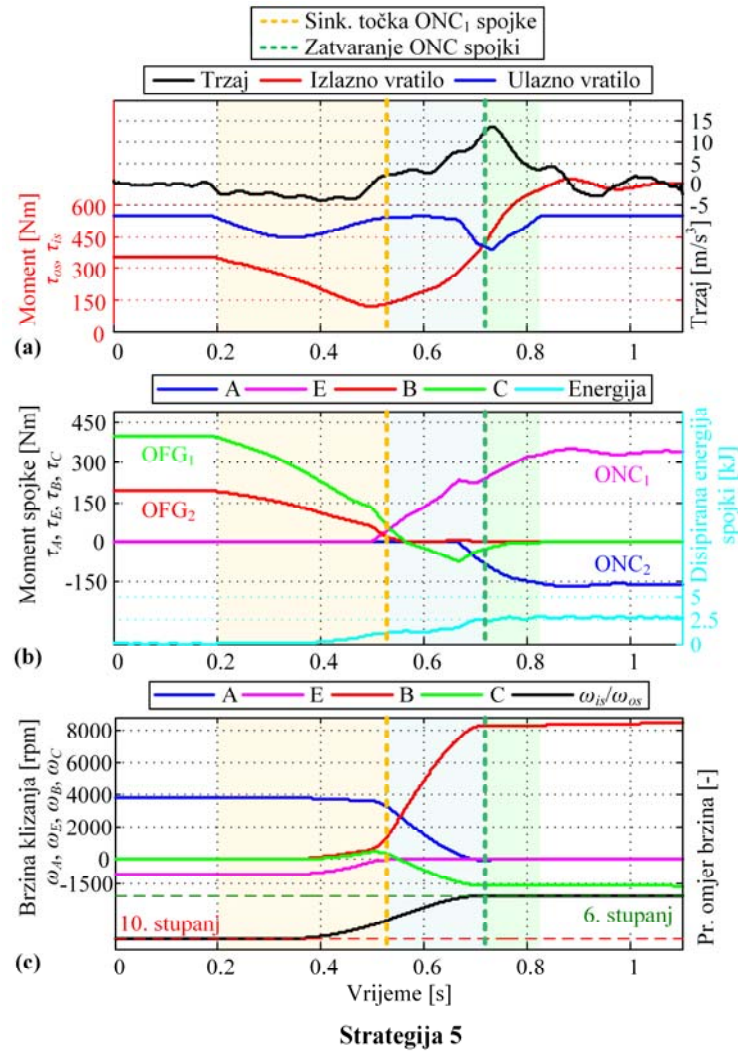


Slika 5-10. Rezultati optimiranja upravljačkih varijabli za 10-6 silaznu promjenu za Strategiju 4 ($\tau_e = 550$ Nm, primijenjeno upravljanje momentom motora, $p_w = 1$)

5.5.5. Upravljačka strategija 5 – bez promjene predznaka brzine klizanja uključenih spojki

U Strategiji 5, ulazni se moment na početku inercijske faze reducira zajedno s momentima isključenih spojki, čime se odgađa promjena prijenosnog omjera brzina (slično kao u Strategiji 3, usp. slike 5-11a i 5-9c). Promjena prijenosnog omjera brzina inicira se daljnjim spuštanjem momenata isključenih spojki i povećanjem ulaznog momenta (u $t = 0.4$ s). Meko zatvaranje ONC_1 spojke realizira se spuštanjem momenata isključenih spojki i podizanjem momenta uključne spojke (u $t = 0.5$ s), što predstavlja glavni izazov sustava upravljanja predloženog rješenja. Isključna spojka s manjom disipacijom energije (OFG_1 ili spojka C) se koristi za upravljanje prijenosnim omjerom brzina u preostalom dijelu inercijske faze (slika 5-11b), zajedno s upravljačkim djelovanjem redukcije momenta motora (5-11a). Promjena stupnja prijenosa završava momentnom fazom u kojoj se moment motora podiže na polaznu razinu i moment OFG_1 spojke spušta (tj. podiže iz negativnih vrijednosti) na nulu. Odziv trzaja vozila sličan je onom dobivenom primjenom Strategije 1, tj. karakteriziran je umjerenim rastom koji započinje u $t = 0.5$ s (a koji je povezan s rastom momenta uključne spojke i posljedično izlaznog momenta; usp. slike 5-11a i 5-7a). Najveća vrijednost trzaja vozila u iznosu od 14 m/s^3 (u odnosu na 12 m/s^3 za Strategiju 1) ponovno se postiže na samom kraju inercijske faze (slika 5-11a).

5. Optimiranje upravljačkih varijabli za promjene s dvostrukim prijelazom



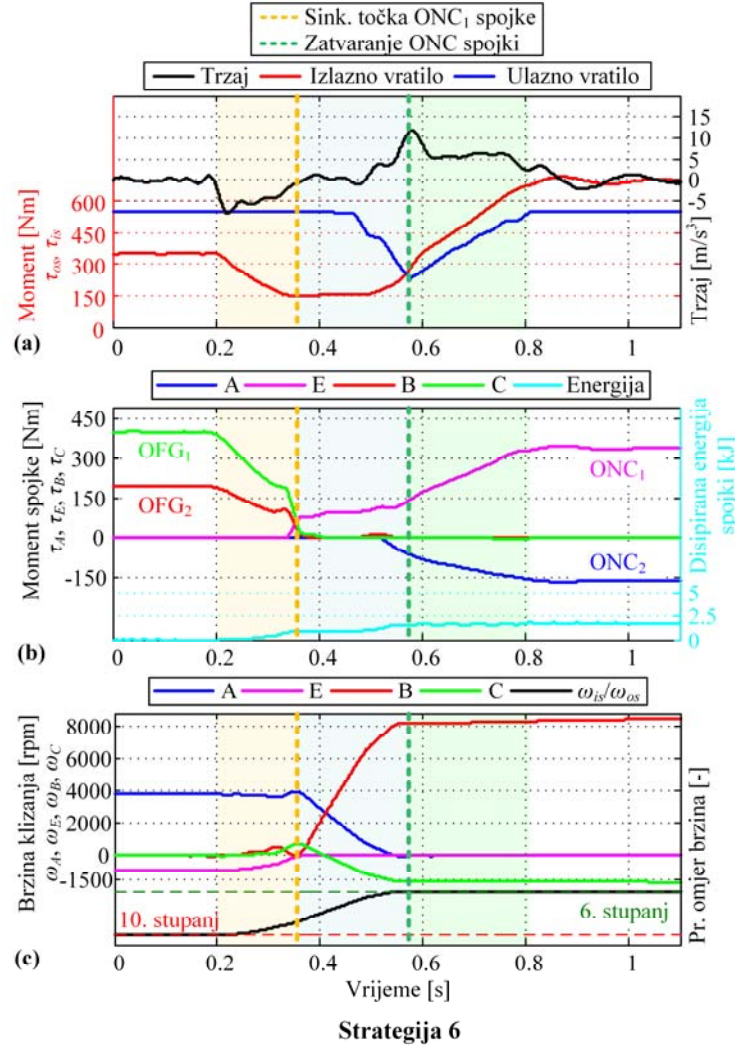
Slika 5-11. Rezultati optimiranja upravljačkih varijabli za 10-6 silaznu promjenu za Strategiju 5 ($\tau_e = 550 \text{ Nm}$, primijenjeno upravljanje momentom motora, $p_w = 0.1$)

5.5.6. Upravljačka strategija 6 – bez promjene predznaka momenta i brzine vrtnje spojki

Strategija 6 predstavlja kombinaciju Strategija 2 i 5. Optimalan odziv pogona je, s druge strane, vrlo sličan onome dobivenom korištenjem Strategije 4 (usp. slike 5-12 i 5-10). ONC₁ spojka ovdje se potpuno zatvara u prvom sinkronizacijskom prolazu (usp. slike 5-12c i 5-10c) bliskom koordinacijom isključnih spojki i ONC1 spojke. Moment motora se postepeno reducira nakon otvaranja isključnih spojki, te se podiže nakon dovršetka inercijske faze kako bi oblikovao

5. Optimiranje upravljačkih varijabli za promjene s dvostrukim prijelazom

prijenos momenta u momentnoj fazi. Odziv trzaja vozila karakteriziran je umjerenim padom neposredno nakon iniciranja promjene i izraženim šiljkom na kraju inercijske faze.



Slika 5-12. Rezultati optimiranja upravljačkih varijabli za 10-6 silaznu promjenu za Strategiju 6 ($\tau_e = 550 \text{ Nm}$, primijenjeno upravljanje momentom motora, $p_w = 0.1$)

5.5.7. Zaključne napomene analiza optimalne koordinacije aktuatora

Na temelju prethodno prikazanih analiza može se zaključiti kako Strategija 4, kod koje se isključne spojke brzo otpuštaju, može pružiti superiorne performanse u smislu udobnosti, trajanja i energetske učinkovitosti promjene stupnja prijenosa. U toj strategiji, prijenosnim omjerom brzina upravlja se reduciranjem ulaznog momenta i povećanjem momenta uključne

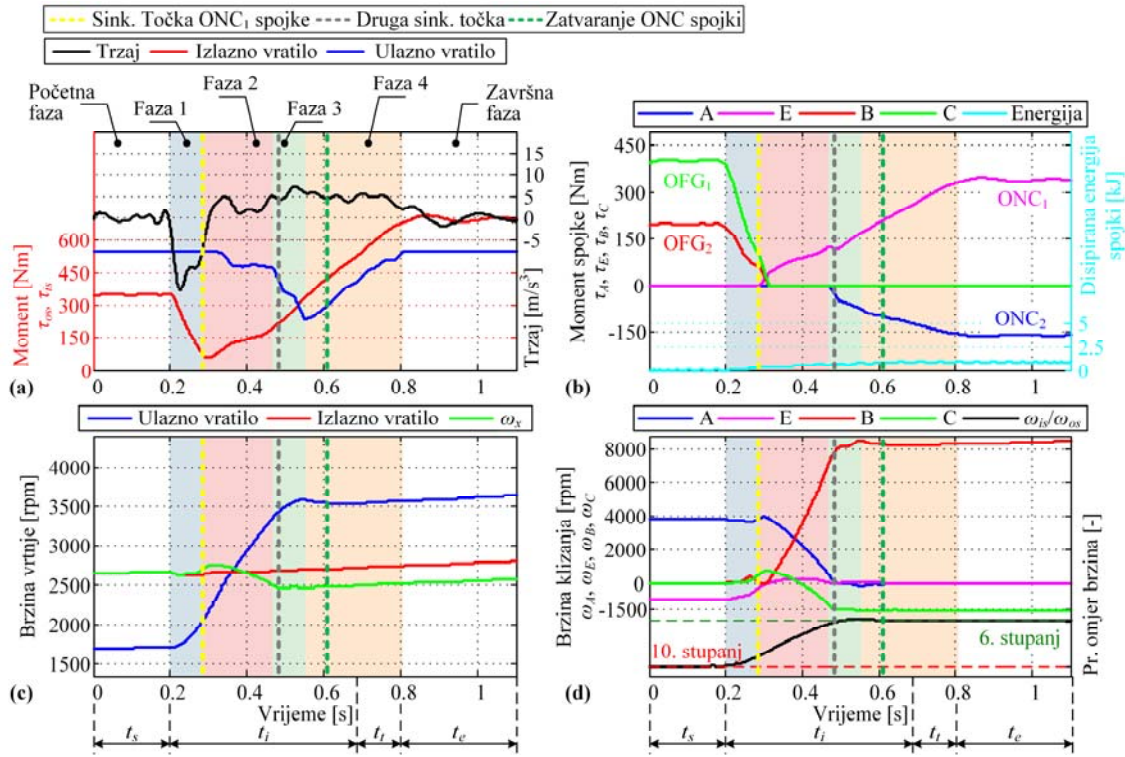
spojke na način da se obje uključne spojke sinkroniziraju u isto vrijeme. Strategija 6, kod koje nije dozvoljena promjena predznaka momenata i brzina vrtnji uključnih spojki, može pružiti performanse koje su vrlo kompetitivne onima ostvarivima primjenom Strategije 4. Međutim, obje upravljačke strategije imaju specifične izazove. U Strategiji 4, oni uključuju simultanu sinkronizaciju uključnih spojki i držanje uključnih spojki na vrlo malim brzinama klizanja na kraju promjene stupnja prijenosa uz istovremeno moduliranje momenta motora. U Strategiji 6, izazovi upravljanja odnose se na potpuno zatvaranje prve uključne spojke, što zahtjeva blisku koordinaciju isključnih spojki i uključne spojke.

5.6. Analiza dinamike promjene stupnja prijenosa temeljena na metodi veznih dijagrama

Pristup temeljen na metodi veznih dijagrama, koji je primijenjen u poglavlju 4 za analizu dinamičkog ponašanja promjene s jednostrukim prijelazom, iskoristit će se ovdje za analizu dinamičkih efekata DTS-a. Za tu svrhu koristit će se vezni dijagram modela mjenjača reduciranog reda za DTS sa slike 3-9, uz napomenu da je za potrebe pojednostavljenih analiza ponovno zanemaren utjecaj sprege inercija. Konačni cilj ove aktivnosti je produbljivanje uvida i bolje razumijevanje dobivenih rezultata optimiranja prezentiranih u prethodnom potpoglavlju.

Detaljna analiza u nastavku provodi se za Strategiju 4, za koju je u potpoglavlju 5.4 pokazano da može dati superiorne performanse u smislu indeksa udobnosti, trajanja i učinkovitosti promjene stupnja prijenosa. Za potrebe analize, odziv DTS-a podijeljen je u nekoliko karakterističnih faza (slika 5-13). Za svaku fazu u nastavku je dan odgovarajući vezni dijagram koji ilustrira tok snage u toj fazi.

5. Optimiranje upravljačkih varijabli za promjene s dvostrukim prijelazom



Slika 5-13. Rezultati optimiranja upravljačkih varijabli za 10-6 silaznu promjenu s dvostrukim prijelazom za *Strategiju 4* ($\tau_e = 550$ Nm, primijenjeno upravljanje momentom motora, $p_w = 1$) uključujući podjelu promjene stupnja na karakteristične faze

5.6.1. Početna faza – stabilan polazni stupanj prijenosa

U stabilnom polaznom stupnju prijenosa, moment motora prenosi se kroz dvije od četiri spojke (spojke OFG_1 i OFG_2 su zatvorene, dok su spojke ONC_1 i ONC_2 otvorene), kao što je ilustrirano na slikama 5-14a i 5-13. Pritom valja primijetiti kako inercijski elementi I_x (vezan uz dodatnu varijabli stanja ω_x koja se javlja kod modela DTS-a) i I_{is} poprimaju derivativnu kauzalnost (zbog zatvorenih isključnih spojki), te da se mogu pribrojiti izlaznoj inerciji I_{os} , pritom poštujući odgovarajuće prijenosne omjere.

5.6.2. Faza 1 – od inicijacije promjene stupnja do ukapčanja ONC_1 spojke

U prvom dijelu inercijske faze, obje se isključne spojke žustro otpuštaju (slika 5-13b). Na taj način, ulazna čvorišna točka **1** se rasterećuje te se veliki dio ulaznog momenta koristi za akceleriranje ulazne inercije I_{is} (slika 5-14b). Valja uočiti kako OFG_1 spojka ima ulogu kočnice

5. Optimiranje upravljačkih varijabli za promjene s dvostrukim prijelazom

u ovoj konkretnoj promjeni i kao takva nema utjecaja na ulaznu čvorišnu točku. Opadajući momenti OFG_1 i OFG_2 spojki se u isto vrijeme prenose na izlaznu čvorišnu točku **1** putem prijenosnih omjera $1/h_2$ i $1/h_3$ (slika 5-14b), gdje formiraju putanju recirkulacije snage preko čvorišne točke **1**: ω_x . Ispada da moment spojke OFG_1 efektivno opada brže nego moment OFG_2 spojke (slika 5-13b), time uzrokujući pad izlaznog momenta (efekt rupe momenta [15],[80],[81]; slika 5-13a). Momenti isključnih spojki padaju u nulu u istom vremenskom trenutku na kraju ove faze (slika 5-13b). Time se omogućuje brzi porast ulazne brzine vrtnje ω_{is} (tj. prijenosnog omjera ω_{is}/ω_{os}), koji je nužan zbog velikog koraka prijenosnog omjera između 10. i 6. stupnja prijenosa.

5.6.3. Faza 2 – od ukapčanja ONC_1 spojke do ukapčanja ONC_2 spojke

Na samome početku Faze 2, spojka ONC_1 doseže svoju točku sinkronizacije, tj. brzinu klizanja nula (slika 5-13d), nakon koje počinje prenositi pozitivni moment. Ukapčanjem ONC_1 spojke, dio ulaznog momenta koji se primarno koristio za akceleraciju ulazne inercije, sada se prenosi najdonjom granom veznog dijagrama modela (slika 5-14c), čime se usporava rast prijenosnog omjera brzina. Rastući moment ONC_1 spojke prenosi se prijenosnim omjerom $1/h_4 \gg 1$ na izlaznu čvorišnu točku **1**, što rezultira rastom izlaznog momenta (slika 5-13a). Na taj se način pogonski moment počinje razvijati već u inercijskoj fazi, što pozitivno utječe na osjećaj same promjene (vozač osjeća akceleraciju vrlo brzo nakon inicijacije promjene stupnja). Valja primijetiti kako se ulazni moment reducira tijekom ove faze (slika 5-13a), što doprinosi usporenju rasta prijenosnog omjera brzina. Do kraja ove faze, obje uključne spojke dovode se u stanje u kojem su njihove brzine klizanja blizu nule (slika 5-13d), čime se pripremaju za nadolazeću momentnu fazu.

5.6.4. Faza 3 – od ukapčanja ONC_2 spojke do rasta momenta motora

U trenutku kada $\omega_A = \omega_{ONC2}$ dosegne nulu, počinje se ukapčati ONC_2 spojka pritom prenoseći negativni moment. Kako je negativan i prijenosni omjer $1/i_1$, ova spojka oduzima moment s ulazne čvorišne točke **1** slično kao ONC_1 spojka, što dodatno usporava rast ulazne brzine vrtnje. Gladak prijelaz odziva prijenosnog omjera brzina na razinu ciljanog stupnja prijenosa realizira se bliskom koordinacijom između dvije uključne spojke i motora, čiji se moment dodatno reducira tijekom ove faze. Rastući moment ONC_2 spojke doprinosi izlaznoj čvorišnoj točki **1** s

5. Optimiranje upravljačkih varijabli za promjene s dvostrukim prijelazom

negativnim momentom (slika 5-14d). Budući da doprinos (već izgrađenog i dalje rastućeg) momenta ONC1 spojke prevladava doprinos (negativnog) momenta ONC2 spojke ($|\tau_{ONC1}/\tau_{ONC2}| > h_4/h_1$), izlazni moment nastavlja rasti.

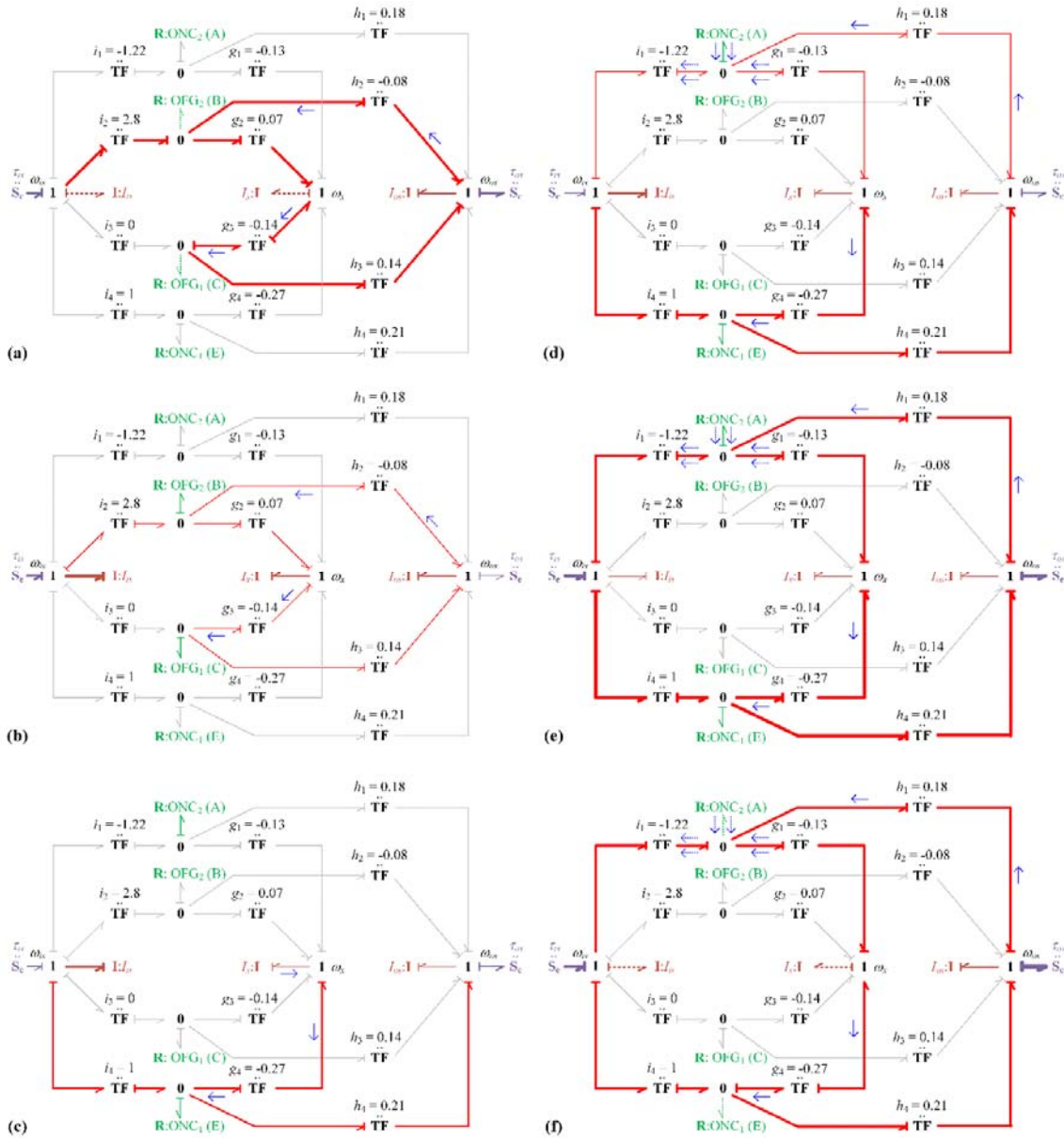
5.6.5. Faza 4 – od rasta momenta motora do završetka upravljačkih djelovanja

Budući da upravljačka djelovanja motora trebaju biti dovršena do $t = 0.8$ s (ograničenje koje je nametnuto formulacijom problema optimiranja; v. potpoglavlje 5.2), moment motora u ovoj se fazi vraća na polaznu vrijednost od 550 Nm (slika 5-13a). Rastući moment motora prenosi se kroz zatvorene uključne spojke na izlaznu čvorišnu točku **1** (slika 5-14e), što rezultira daljnjim rastom izlaznog momenta (slika 5-13a).

5.6.6. Završna faza – stabilan ciljani stupanj prijenosa

U stabilnom ciljanom stupnju prijenosa, moment motora prenosi se kroz dvije uključne spojke (slika 5-14f), pri čemu ponovno dolazi do recirkulacije snage kroz čvorišnu točku **1**: ω_x .

5. Optimiranje upravljačkih varijabli za promjene s dvostrukim prijelazom



Radi ilustrativnije grafičke reprezentacije, u veznim dijagramima se koriste linije različitih debljina i boja. Debljina svake veze ilustrira količinu snage koja se prenosi kroz pripadajući dio mjenjača. Strelice na krajevima veza označavaju referentni smjer snage (i također momenta i brzina vrtnje; v. Prilog A), dok pune plave strelice koje se dodaju na veze označavaju promjenu referentnog smjera pripadajućih varijabli momenta ili brzine vrtnje (i posljedično snage). Ovdje valja napomenuti kako se za varijablu momenta pretpostavlja da je dodijeljena lijevoj ili gornjoj strani veze. Dodjeljivanje dviju crtkanih plavih strelica vezi znači da su i moment i brzina vrtnje promijenili svoj smjer, dok smjer snage ostaje jednak referentnom.

Slika 5-14. Vezni dijagrami za analizu dinamike promjene stupnja prijenosa s dvostrukim prijelazom za: (a) inicijalnu fazu, (b) Fazu 1, (c) Fazu 2, (d) Fazu 3, (e) Fazu 4, (f) završnu fazu i za 10-6 promjenu i upravljačku strategiju 4

5.6.7. Analiza dinamičkih efekata promjene stupnja prijenosa za druge karakteristične upravljačke strategije

Nakon provedene detaljne analize za Strategiju 4, u nastavku se analiza veznim dijagramima provodi za druge upravljačke strategije (Strategije 1, 2, 3, 5 i 6), kako bi se ilustrirala raznolikost mogućih tokova snaga koji se ostvaruju primjenom različitih upravljačkih djelovanja. Pritom se analiziraju samo specifična upravljačka djelovanja, tj. samo one faze u kojima je upravljačko djelovanje bitno drugačije od onog u Strategiji 4.

Strategija 1. Glavna razlika u dinamičkom ponašanju promjene stupnja prijenosa u usporedbi sa Strategijom 4 odnosi se na drugi dio inercijske faze, u kojoj se modulira moment OFG_1 spojke umjesto da ona ostane isključena (v. sliku 5-7c i vezni dijagram na slici 5-15a). Budući da OFG_1 spojka djeluje kao kočnica u ovoj konkretnoj promjeni ($i_3 = 0$), njezin moment nema utjecaja na ulaznu čvorišnu točku. Moment OFG_1 spojke je takav da se oduzima od izlazne čvorišne točke **1** kroz prijenosni omjer $1/h_3$ (slika 5-15a). Zbog toga izlazni moment u drugom dijelu inercijske faze raste sporije u usporedbi sa Strategijom 4 (usp. slike 5-15a i 5-13a).

Strategija 2. U Strategiji 2 nije dozvoljena promjena predznaka momenta spojki u toku promjene stupnja prijenosa (v. potpoglavlje 5.2). Upravljačka djelovanja u Strategiji 2 su vrlo slična onima u Strategiji 4, uz malu razliku koja se odnosi na otpuštanje isključnih spojki. Naime, u Strategiji 2 isključne se spojke moduliraju u drugom dijelu inercijske faze, tj. njihovi se momenti drže na malim pozitivnim vrijednostima (umjesto da se potpuno otvaraju kao u Strategiji 4; usp. slike 5-8b i 5-13b; i također slike 5-15b i 5-14c). Nadalje, zbog većeg prijenosnog omjera OFG_2 spojke u odnosu na OFG_1 spojku ($1/h_2 > 1/h_3$ za otprilike iste momente isključnih spojki; $\tau_{OFG1} \cong \tau_{OFG2}$), ukupan doprinos isključnih spojki izlazu je takav da one uzimaju moment s izlazne čvorišne točke. S druge strane, mali pozitivan moment OFG_2 spojke usporava rast ulazne brzine (ona uzima moment s ulazne čvorišne točke, slika 5-15b), što komplicira upravljanje ulaznom brzinom (pojavljuje se dodatni kanal upravljanja).

Strategija 3. U Strategiji 3 nije dozvoljeno moduliranje uključnih spojki tijekom inercijske faze promjene (v. potpoglavlje 5.2). Stoga će se vezni dijagram modela korišten za analizu prvog djela inercijske faze u Strategiji 4 (slika 5-14b) ovdje koristiti za analizu cjelokupne inercijske faze. Na samom početku inercijske faze ($t \cong 0.2$ s), momenti isključnih spojki počinju se

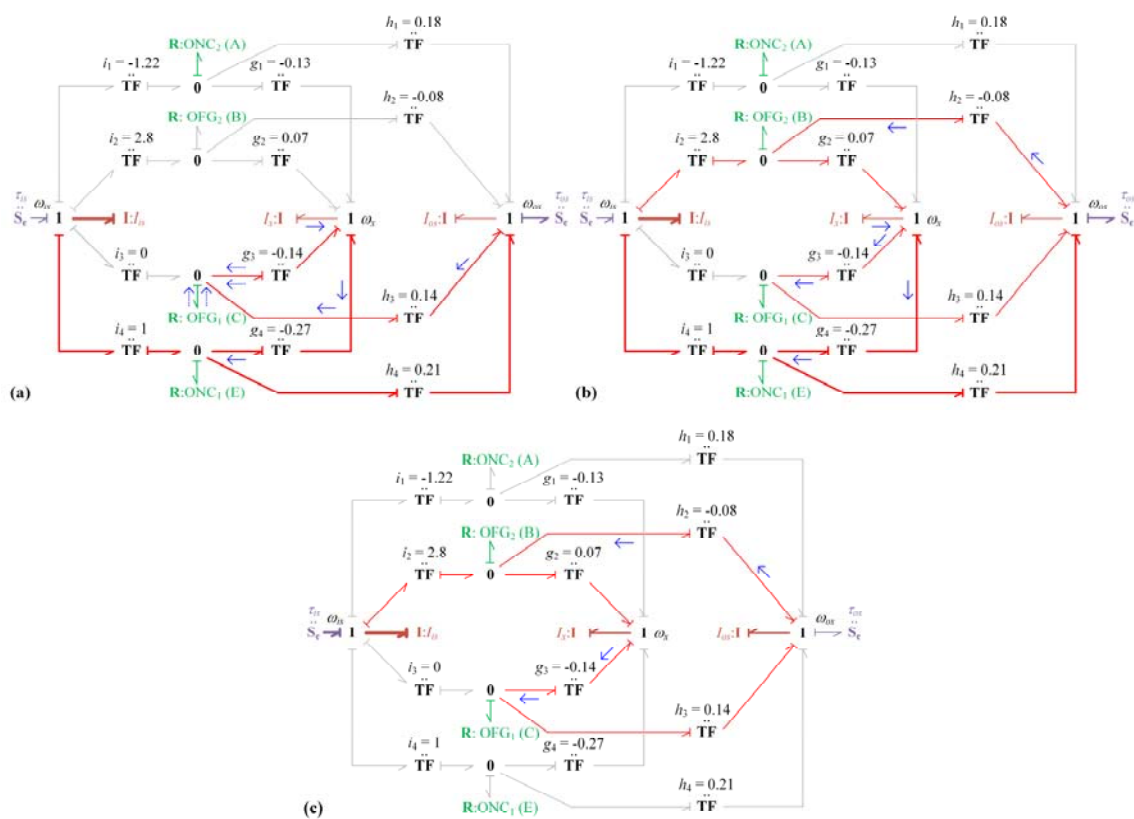
5. Optimiranje upravljačkih varijabli za promjene s dvostrukim prijelazom

smanjivati (slika 5-9b), time rasterećujući ulaznu čvorišnu točku (slika 5-15c). Međutim, u isto vrijeme se reducira i moment motora (slika 5-9a), čime se uspostavlja (zapravo održava) ravnoteža momenta na ulaznoj čvorišnoj točki (slika 5-15c) pa ne dolazi do promjene ulazne brzine vrtnje. U vremenskom trenutku $t \cong 0.4$ s obustavlja se redukcija momenta motora (slika 5-9a), što omogućava rast ulazne brzine vrtnje pod uvjetima monotono padajućih momenata isključnih spojki. U vremenskom trenutku u kojem brzine klizanja uključenih spojki padnu na nulu, obje uključne spojke se počinju agresivno uključivati (slika 5-9b), time uzrokujući rapidno prenošenje ulaznog momenta na izlaznu čvorišnu točku (slika 5-15c).

Strategije 5 i 6. U Strategiji 5 nije dozvoljena promjena predznaka brzine klizanja uključenih spojki u inercijskoj fazi, dok u Strategiji 6 nije dozvoljena ni promjena brzine klizanja uključenih spojki, niti promjena predznaka momenta aktivnih spojki (v. potpoglavlje 5.2). Upravljačka djelovanja u **Strategiji 5** slična su onima koja su pojavljuju u Strategiji 3 u prvom dijelu inercijske faze (usp. slike 5-11ab i 5-9ab i v. analizu danu u prethodnom paragrafu), dok su u drugom dijelu inercijske faze (nakon uključanja ONC_1 spojke) slične onima sadržanim u Strategiji 1 (usp. slike 5-11ab i 5-7ab i v. analizu danu u ovom odjeljku pod podnaslovom “Strategija 1”).

Upravljačka djelovanja u **Strategiji 6** slična su onima u Strategiji 4. Jedina razlika je što se ONC_1 spojka ne modulira, već se potpuno zatvara u svojoj točki sinkronizacije (usp. slike 5-12c i 5-13b). Takvo upravljačko djelovanje, međutim, nema većeg utjecaja na ukupnu dinamiku promjene stupnja prijenosa.

5. Optimiranje upravljačkih varijabli za promjene s dvostrukim prijelazom



Slika 5-15. Vezni dijagram za analizu inercijske faze 10-6 promjene uz primjenu: (a) Strategije 1, (b) Strategije 2 i (c) Strategije 3

6. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s jednostrukim prijelazom

U ovom poglavlju predstaviti će se drugi temeljeni pristup optimiranja upravljačkih djelovanja promjene stupnja prijenosa, koji se temelji na optimiranju parametara praktičnih, po odsječcima linearnih profila upravljačkih varijabli primjenom više-kriterijskog algoritma optimiranja. Pritom će se za profiliranje upravljačkih djelovanja primijeniti rezultati optimiranja upravljačkih varijabli iz poglavlja 4. Nakon što se formuliра problem optimiranja, ono će se u ovom poglavlju provesti za temeljne silazne i uzlazne promjene stupnja prijenosa s jednostrukim prijelazom (1-2 i 2-1 primjeri), te će se rezultati kvantitativno usporediti s referentnim mjerilom postavljenim općim pristupom optimiranja upravljačkih varijabli. Na kraju će se formulirati problem stohastičkog robusnog optimiranja parametara upravljačkih profila, te će se takvo optimiranje provesti za temeljnu uzlaznu promjenu stupnja prijenosa (1-2 primjer).

6.1. Formulacija problema optimiranja

Problem optimiranja je pronaći parametre koji definiraju upravljačke profile promjene stupnja prijenosa, koji istovremeno minimiziraju dva konfliktna kriterija kvalitete promjene stupnja prijenosa, koji se odnose na brzinu i udobnost izvođenja promjene. Parametri koji se optimiraju sadržani su u upravljačkom vektoru $\mathbf{p}_{ctrl} \in \mathbb{R}^{n_{ctrl}}$, gdje n_{ctrl} ovisi o vrsti promjene stupnja prijenosa koja se razmatra.

6.1.1. Kriteriji optimiranja

Prvi kriterij kvalitete promjene stupnja prijenosa koji se minimizira, J_1 , odnosi se na ukupno trajanje promjene (zbroy trajanja momentne i inercijske faze):

$$\min_{\mathbf{p}_{ctrl}} J_1 = t_{shift} . \quad (6-1)$$

Drugi kriterij kvalitete promjene stupnja prijenosa, J_2 , je već dobro poznati korijen srednjeg kvadrata (RMS) trzaja vozila (v. npr. izraz (4-14)):

$$\min_{\mathbf{p}_{ctrl}} J_2 = \sqrt{\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} \ddot{v}_v^2 dt} . \quad (6-2)$$

Problem optimiranja također uključuje razna ograničenja, koja se daju u sljedećem odjeljku.

6.1.2. Ograničenja

Upravljački vektor $\mathbf{p}_{ctrl}$ može se podijeliti u dva pod-vektora: $\mathbf{p}_{cl} \in \mathbb{R}^{n_{cl,ctrl}}$ koji opisuje profil kapaciteta momenta spojke i $\mathbf{p}_{eng} \in \mathbb{R}^{n_{eng,ctrl}}$ koji opisuje profil redukcije momenta motora

$$\mathbf{p}_{ctrl} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{cl} \\ \mathbf{p}_{eng} \end{bmatrix} . \quad (6-3)$$

Pod-vektori $\mathbf{p}_{cl}$ i $\mathbf{p}_{eng}$ sadrže sljedeće parametre za slučaj uzlazne promjene pod opterećenjem koji su na slici 6-1 označeni plavim obrubom:

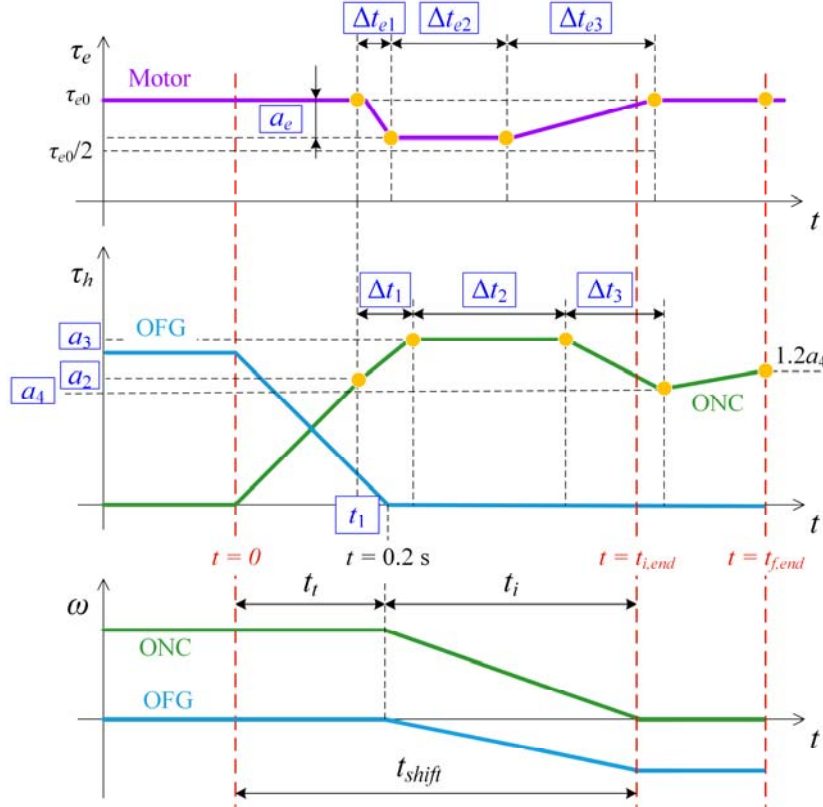
$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{cl} &= [a_2 \quad a_3 \quad a_4 \quad t_1 \quad \Delta t_1 \quad \Delta t_2 \quad \Delta t_3]^T , \\ \mathbf{p}_{eng} &= [a_e \quad \Delta t_{e1} \quad \Delta t_{e2} \quad \Delta t_{e3}]^T . \end{aligned} \quad (6-4)$$

Po segmentima linearni upravljački profili prikazani na slici 6-1 definirani su na temelju rezultata optimiranja upravljačkih trajektorija za istu vrstu promjene stupnja prijenosa (usp. npr. sliku 4-4c). Vezano uz to, valja napomenuti sljedeće: (i) izvorna trajektorija momenta uključne spojke (ONC) sa slike 4-4c sastoji se od dva linearna segmenta za dvije aktivne faze, tj. već ima po segmentima linearan oblik; svejedno, u formulaciji problema optimiranja parametara omogućeno je radi općenitosti više slobode u profiliranju kapaciteta momenta uključne spojke (slika 6-1); (ii) izvorna trajektorija momenta isključne spojke (OFG) je gotovo linearna te se takav profil i koristi na slici 6-1; te (iii) izvorni optimalan profil redukcije momenta motora je nelinearan te se na slici 6-1 koristi u pojednostavljenom ali dovoljno općenitom obliku.

Promjena uzlazne promjene inicira se u trenutku $t = 0$ podizanjem kapaciteta momenta uključne spojke (slika 6-1). Završetak momentne (i početak inercijske) faze određen je trenutkom proklizavanja isključne spojke. Kapacitet momenta isključne spojke pada u nulu u trenutku $t = 0.2$ s. Trajanje inercijske faze, t_i ovisno je o iznosu redukcije momenta motora (a_e) i amplitudi kapaciteta momenta uključne spojke u inercijskoj fazi (a_3). Inercijska faza (a time i promjena stupnja prijenosa) završava zatvaranjem uključne spojke u trenutku $t_{i,end}$. S ciljem dobivanja

6. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s jednostrukim prijelazom

cjelovitog odziva prijelaznih pojava tijekom promjene stupnja prijenosa, simulacija se izvodi i nakon zatvaranja uključne spojke, tj. do trenutka $t_{f,end}$.



Slika 6-1. Definicija po odsječcima linearnih profila kapaciteta momenata spojke i redukcije momenta motora za uzlaznu promjenu s jednostrukim prijelazom

Pod-vektori iz izraza (6-3) sadrže sljedeće parametre za slučaj silazne promjene pod opterećenjem koji su na slici 6-2 označeni plavim obrubom:

$$\mathbf{p}_{cl} = [a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4 \quad t_1 \quad \Delta t_1 \quad \Delta t_2 \quad \Delta t_3]^T, \quad (6-5)$$

$$\mathbf{p}_{eng} = [a_e \quad t_{e1} \quad \Delta t_{e1} \quad \Delta t_{e2} \quad \Delta t_{e3}]^T.$$

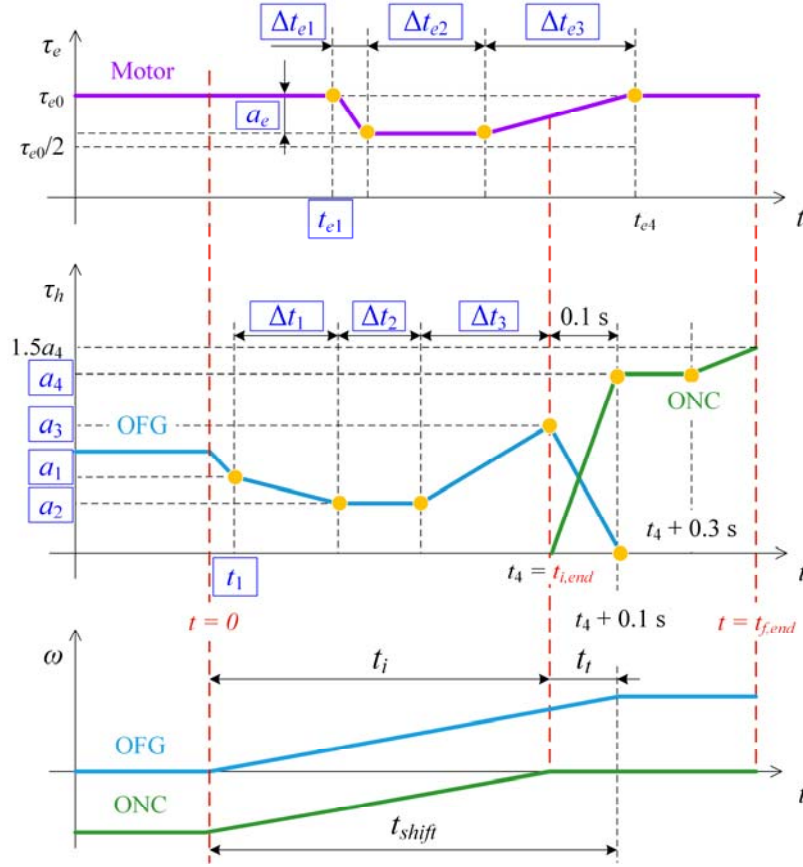
Po odsječcima linearni profili upravljanja silaznom promjenom, definirani na slici 6-2, ponovno su postavljeni na temelju analize optimalnih upravljačkih trajektorija dobivenih općom metodom optimiranja iz poglavlja 4 (v. primjerice sliku 4-5, uz napomenu da su optimiranja provedena i za mnoge druge scenarije silaznih promjena, uključujući 2-1 promjenu, te da su upravljačke trajektorije u svim slučajevima poprimile sličan oblik). Izvorno optimirana

6. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s jednostrukim prijelazom

trajektorija momenta isključne spojke sa slike 4-6 je nelinearna i ima relativno kompleksan oblik, te je na slici 6-2 profilirana s četiri linearna odsječka. Izvorni profili uključne spojke je približno linearan (slika 4-6), te se tako i opisuje na slici 6-2. Iako je kod silazne promjene značaj redukcije momenta značajno manji nego kod uzlazne promjene, ovdje se radi općenitosti ostavlja ta mogućnost (slika 6-2). Naime, u toku silazne promjene moment motora trebao bi se jačati (v. sliku 4-10 i popratnu analizu), a redukcija momenta motora može se primijeniti u završnom dijelu inercijske faze za oblikovanje odziva prijenosnog omjera brzina.

Silazna promjena inicira se u trenutku $t = 0$ reduciranjem kapaciteta momenta isključne spojke. Trajanje inercijske faze, t_i ovisno je profiliranju kapaciteta momenta isključne spojke (tj. o njegovoj 'dubini' propada) i o eventualnoj redukciji momenta motora (ako se primjenjuje). Momentna faza inicira se u vremenskom trenutku t_4 (koji je određen iznosom vremenskih intervala Δt_1 , Δt_2 i Δt_3 koji se optimiraju, slika 6-2) rastom kapaciteta momenta uključne spojke. Trajanje momentne faze, t_t određeno je trenutkom pada kapaciteta momenta isključne spojke na nulu (trenutak $t_4 + 0.1$ s, slika 6-2), odnosno prekidom upravljačkog djelovanja motora (vremenski trenutak t_{e4}), ovisno što duže traje. Valja uočiti kako je upravljačko djelovanje vezano uz podizanje kapaciteta momenta isključne spojke na kraju inercijske faze opcionalno (parametar a_3 može biti većeg ili manjeg iznosa od a_2), kao i mogućnost redukcije momenta motora (a_e može biti jednak nuli). Simulacija se izvodi i nakon završetka momentne faze, do trenutka $t_{f, end}$.

6. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s jednostrukim prijelazom



Slika 6-2. Definicija po odsječcima linearnih profila kapaciteta momenata spojki i redukcije momenta motora za silaznu promjenu s jednostrukim prijelazom

Problem optimiranja je podložan sljedećim ograničenjima na vrijednosti parametara (amplituda, vremenskih trenutaka i vremenskih intervala):

a) za uzlazne promjene (slika 6-1):

$$\begin{aligned} 0 &\leq a_2, a_3, a_4 \leq 500 \text{ Nm} , \\ 0.1 \text{ s} &\leq t_1 \leq 0.2 \text{ s} , \\ 0 &\leq \Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3 \leq 0.5 \text{ s} , \\ 0 &\leq \Delta t_{e1}, \Delta t_{e2}, \Delta t_{e3} \leq 0.5 \text{ s} , \end{aligned} \tag{6-6}$$

b) za silazne promjene (slika 6-2):

$$\begin{aligned} 0 &\leq a_1, a_2, a_3, a_4 \leq 500 \text{ Nm} , \\ 0 &\leq t_1, t_{e1} \leq 0.5 \text{ s} , \end{aligned} \tag{6-7}$$

6. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s jednostrukim prijelazom

$$0 \leq \Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3 \leq 0.5s ,$$

$$0 \leq \Delta t_{e1}, \Delta t_{e2}, \Delta t_{e3} \leq 0.5s .$$

Granice vrijednosti parametara postavljene su da budu dovoljno široke, kako bi se algoritmu optimiranja omogućila veća fleksibilnost u oblikovanju upravljačkih profila promjene stupnja prijenosa. Osim gore navedenih tvrdih ograničenja na vrijednosti parametara, dodano je još nekoliko ograničenja kako bi se: (i) spriječilo ekstremno kratko (ili dugo) trajanje promjene stupnja prijenosa time usmjeravajući pretraživanje u područje od interesa i (ii) izbjeglo razmatranje neprihvatljivih rješenja (npr. onih u kojima promjena stupnja prijenosa nikad ne završi). Da bi se osiguralo prvo, uključeno je ograničenje na trajanje promjene, koje bi trebalo biti veće od 0.5 s za uzlaznu promjenu i manje od 1 s za silaznu promjenu. Da bi se osiguralo potonje, uključeno je tvrdo ograničenje na iznos integrala brzine klizanja uključne spojke u intervalu $[t_{i,end}, t_{f,end}]$ nakon završetka inercijske faze. Kako bi se spriječilo upravljačko djelovanje motora dugo nakon iniciranja momentne faze kod silazne promjene, dodaje se ograničenje na trajanje intervala između trenutka iniciranja momentne faze i završetka upravljačkih djelovanja motora. Navedena ograničenja formuliraju se kako slijedi:

a) za uzlazne promjene:

$$t_{shift} > 0.5 s ,$$

$$\int_{t_{i,end}}^{t_{f,end}} \omega_{ONC}^2 dt < 0.1 \text{ rad/s} , \quad (6-8)$$

b) za silazne promjene:

$$t_{shift} < 1 s ,$$

$$\int_{t_{i,end}}^{t_{f,end}} \omega_{ONC}^2 dt < 0.1 \text{ rad/s} , \quad (6-9)$$

$$t_{e4} - t_4 < 0.03 s .$$

Konačno, iznos redukcije motora zasićuje se na polovicu iznosa inicijalnog momenta motora za obje razmatrane vrste promjene stupnja prijenosa (uzlaznu i silaznu):

$$0 \leq a_e \leq \tau_{e0}/2 . \quad (6-10)$$

6.2. Metoda optimiranja

Problem optimiranja formuliran u prethodnom potpoglavlju može se riješiti primjenom nekog od više-kriterijskih algoritama optimiranja. U ovom radu koristi se više-kriterijski genetski algoritam (GA) koji je poznat pod skraćenicom MOGA-II (*engl. Multi-Objective Genetic Algorithm*). MOGA-II je više-kriterijski GA dostupan unutar modeFRONTIER optimizacijskog okruženja koji koristi učinkovito višestruko pretraživanje postupkom *elitizma*³, koji omogućava očuvanje izvrsnih (Pareto ili ne-izdominiranih) rješenja bez preuranjene konvergencije k lokalnom optimumu [57]. Ova značajka čini algoritam posebno prikladnim za upotrebu u ovoj optimizacijskoj studiji, budući da je u prethodnom poglavlju pokazano da optimiranja temeljena na danom nelinearnom modelu pogona imaju sklonost završavanja u lokalnom optimumu.

Genetski algoritmi pripadaju skupini heurističkih metoda optimiranja, a oponašaju prirodni evolucijski proces, te ga primjenjuju u traženju optimalnog rješenja zadanog problema. Genetski algoritam radi na sljedećem principu [83]: na početku postoji populacija jedinki od kojih svaka jedinka predstavlja jedno moguće rješenje zadanog problema. Za svaku jedinku računa se iznos ciljne funkcije (ili ciljnih funkcija ako se radi o više-kriterijskom problemu). Što je iznos ciljne funkcije veći, pripadna jedinka je lošija. Iz postojeće populacije operatorom *selekcije* odabiru se jedinke (“roditelji”) iz kojih će se operatorom *križanja* generirati nove jedinke (“djeca”). Nad novim jedinkama (“djecom”) djeluje operator *mutacije* koji unosi dodatne slučajne varijacije u rješenja. U konačnici operatorom *zamjene* u populaciju ulaze nove jedinke. Opisani koraci evolucije ponavljaju se iterativno (u petlji) sve do ostvarenja uvjeta za zaustavljanje evolucijskog procesa (npr. maksimalni broj iteracija algoritma).

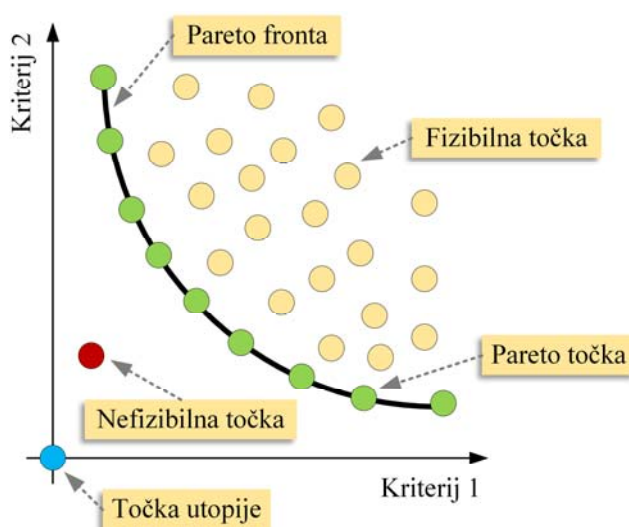
Rješenje više-kriterijskog optimiranja tipično ne rezultira jednim optimalnim rješenjem⁴, već Pareto optimalnim skupom rješenja, koji predstavljaju optimalan kompromis između dva (ili više) suprotstavljena kriterija optimiranja (v. ilustraciju na slici 6-3). Pareto optimalna rješenja definiraju se kao rješenja koja su bolja (dominantna) u najmanje jednom kriteriju od bilo kojeg

³ Elitizam je vrsta selekcijskog postupka koja se uvodi kako bi se najbolja jedinka očuvala te sudjelovala u sljedećoj iteraciji GA neizmijenjena.

⁴ Moguća je situacija u kojoj je više-kriterijsko optimiranje rezultira jednim optimalnim rješenjem. Međutim, to bi značilo da kriteriji za koja se provodi optimiranje nisu međusobno konfliktne.

6. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s jednostrukim prijelazom

drugog rješenja [84]. Skup Pareto optimalnih točaka/rješenja tvori Pareto optimalnu frontu. Sve točke na Pareto fronti jednako su vrijedne u smislu optimalnosti, tj. po definiciji, svaka točka Pareto fronte je bolja u najmanje jednom kriteriju od bilo kojeg drugog rješenja. Osim Pareto optimalnih točaka, GA tijekom brojnih iteracija generira mnoga druga rješenja, koja mogu biti fizibilna (izvediva, tj. rješenja koja ne krše nametnuta ograničenja) ili nefizibilna (u takvim rješenjima prekršeno je barem jedno ograničenje). Rješenja koja nisu Pareto optimalna, ali su istovremeno fizibilna predstavljaju pod-optimalna rješenja, što znači da postoje rješenja koja su bolja u svim razmatranim kriterijima (slika 6-3).



Slika 6-3. Ilustracija Pareto optimalnih rješenja

Središnji dio implementiranog radnog procesa (*engl. workflow*) u modeFRONTIER okruženju je MATLAB skripta (slika 6-4) koju modeFRONTIER poziva u svakoj iteraciji algoritma kako bi se simulirala promjena stupnja prijenosa (MATLAB skripta poziva Simulink model pogona iz poglavlja 2, slika 2-16) za postavljene vrijednosti parametara i izračunali bitni indeksi performansi i ograničenja. Prije pokretanja optimizacijske rutine, potrebno je generirati tzv. inicijalne populacije (tj. početne vrijednosti parametara koji se optimiraju od kojih kreće evolucijski postupak genetskog algoritma), te definirati određene konfiguracijske parametre algoritma. Za generiranje početne populacije za algoritam optimiranja, koristi se tehnika planiranja eksperimenata (*engl. Design Of Experiments* ili skraćeno DOE). U ovom radu, 30 polaznih populacija generirano je kao Sobol sekvenca, koja je vrsta kvazi-slučajne sekvence. Sobol DOE algoritam generira početne populacije na način da uniformno popunjava prostor

6. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s jednostrukim prijelazom

rješenja (*engl. design space*) [58]. Ovdje se koristi GA sa 100 populacijskih generacija, što dovodi do konačne brojke od 3000 evaluacija kriterija optimiranja, tj. to je ukupan broj projekata koje će algoritam generirati. Za ovakvo podešenje i četiri istovremene (paralelne) evaluacije projekata⁵, izvođenje cjelokupnog postupka optimiranja traje oko sat vremena. Vjerojatnost korištenja mutacijskog operatora kod generiranja novih generacija (tj. novih projekata) je postavljena na 0.1. Operator mutacije uvodi genetsku raznolikost u populaciju i olakšava “bijeg” postupka pretraživanja iz lokalnih optimuma⁶.

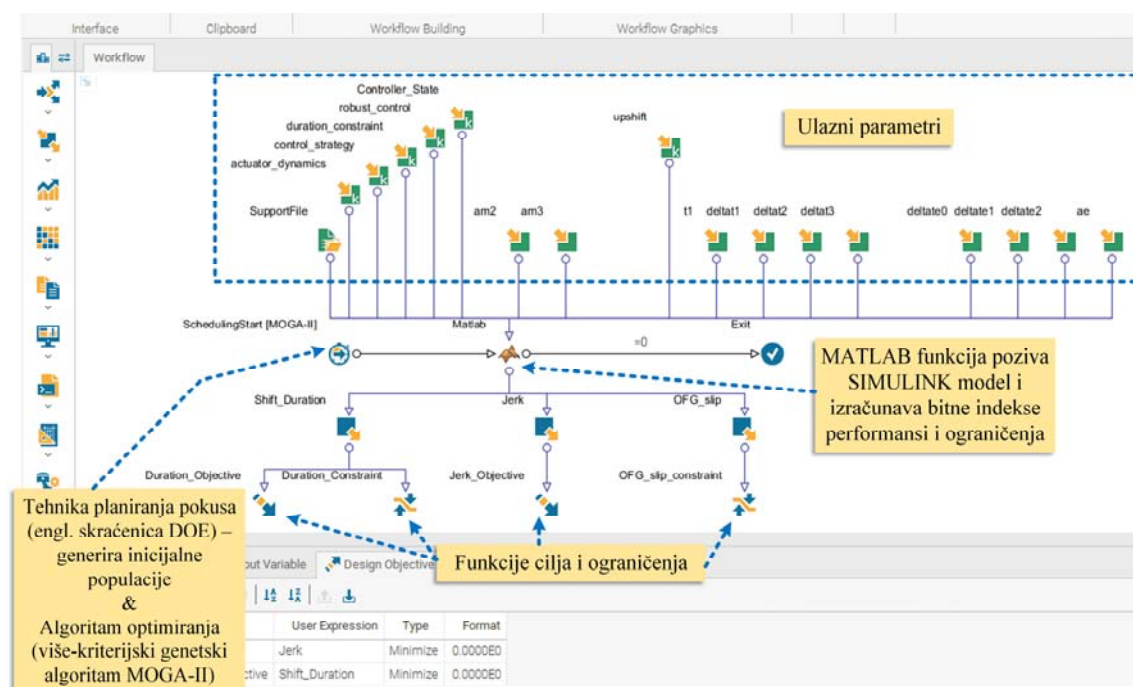
MOGA-II obrađuje tvrda ograničenja (poput onih danim izrazima (6-8) i (6-9)) primjenom penalizacije funkcije cilja. To znači da modeFRONTIER transformira problem optimiranja s ograničenjima u problem bez ograničenja dodavanjem (ili oduzimanjem, ovisno radi li se o minimiziranju ili maksimiziranju) određene vrijednost funkcijama cilja na temelju kvantitativne mjere kršenja ograničenja prisutnog u određenom rješenju. Drugim riječima, nametnuta tvrda ograničenja tretiraju se kao meka.

Ovdje valja napomenuti kako se kod ovog pristupa optimiranja koristi model pogona vozila temeljen na numerički učinkovitom Karnoppovom modelu trenja spojke i koji uključuje model dinamike aktuatora spojke (v. izraz (2-27) i popratnu diskusiju). Naime, kada se primjenjuje gore opisana metoda optimiranja, kompleksnost pozadinskog matematičkog modela ne predstavlja ograničavajući faktor jer se model eksplicitno simulira (za razliku od općeg optimiranja upravljačkih trajektorija gdje se jednadžbe modela tretiraju kao ograničenja tipa jednakosti).

⁵ Postupak evolucije populacija GA može se raspodijeliti između većeg broja jezgri središnje procesorske jedinice, čime se GA paralelizira. Paralelizam je podržan u modeFRONTIER-u, a njegovom primjenom značajno se ubrzava postupak pretraživanja.

⁶ Ako je vjerojatnost mutacije jednaka jedan, genetski algoritam zapravo postaje algoritam traženja slučajnom pretragom prostora rješenja. Što je manja vjerojatnost mutacije, to je manja vjerojatnost nalaska globalnog optimuma. Međutim, u GA se tipično primjenjuje mala vjerojatnost mutacije kako bi se zadržala dobra konvergencija rješenja.

6. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s jednostrukim prijelazom



Slika 6-4. Implementacija više-kriterijskog optimiranja parametara u modeFRONTIER okruženju

6.3. Rezultati optimiranja parametara

U ovom potpoglavlju prikazat će se rezultati optimiranja parametara za temeljne uzlazne i silazne promjene s jednostrukim prijelazom (1-2 i 2-1 primjeri).

6.3.1. Uzlazna promjena

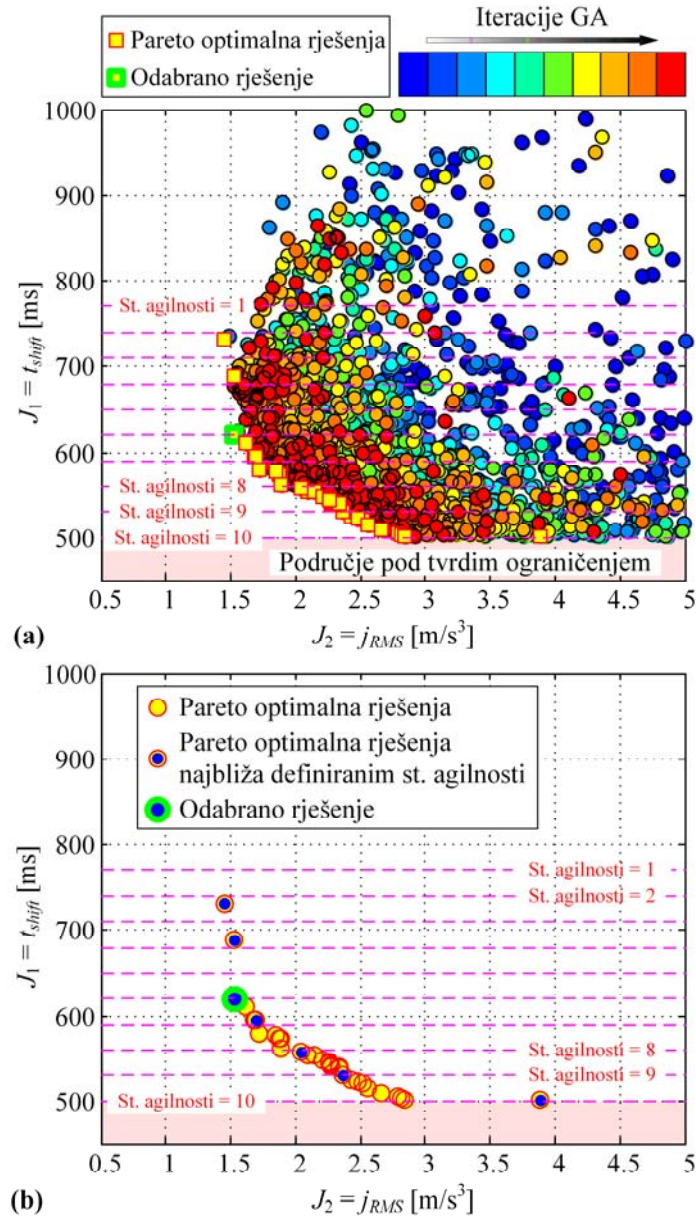
Slika 6-5 prikazuje rezultate optimiranja 1-2 uzlazne promjene među kojima je izdvojena Pareto fronta. Oblik Pareto fronte jasno ilustrira konfliktnu prirodu kriterija optimiranja – poboljšanje jednog kriterija optimiranja nužno rezultira pogoršanjem drugog.

Slika 6-5a ilustrira progresiju rezultata optimiranja kroz različite iteracije (generacije) genetskog algoritma. Kružići u plavim tonovima boje odgovaraju ranim generacijama algoritma, dok kružići u crvenim tonovima boje odgovaraju generacijama u završnim iteracijama algoritma, tj. u posljednjima fazama evolucije populacije. Ova ilustracija upućuje na to da je GA uspio iterativno potiskivati trenutačnu Pareto frontu u smjeru točke utopije (ishodišta), pritom ostavljajući iza sebe širok skup fizibilnih rješenja. Istovremeno, u

6. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s jednostrukim prijelazom

posljednjim iteracijama nije ostvaren značajan napredak (u smislu daljnjeg potiskivanja Pareto fronte), što sugerira da algoritam dobro konvergira, tj. da je broj iteracija algoritma dovoljan. Pareto točke najgušće su u području brzih i srednje-brzih promjena stupnja prijenosa, dok se u području karakteriziranom vremenima trajanja promjene većim od 650 ms pojavljuju samo dvije Pareto optimalne točke. Kako bi se je učinilo vidljivijom, Pareto fronta je prikazana zasebno na slici 6-5b. Vrijednosti trajanja promjene stupnja prijenosa na y-osi su na slici 6-5 podijeljene u 10 diskretnih razina, koje su naznačene horizontalnim isprekidanim ljubičastim linijama. Te diskretne razine odnose se na stupnjeve agilnosti (engl. *spartiness*) promjene stupnja prijenosa i cilj im je omogućiti jednostavniju usporedbu rezultata za različite scenarije promjene stupnja prijenosa te korisnički izbor pogodne točke Pareto fronte (kalibraciju upravljanja). Najviša razina (stupanj agilnosti = 1) ima najlošije performanse u smislu trajanja promjene stupnja prijenosa, dok najniža razina (stupanj agilnosti = 10) ima najbolje performanse. Konačno, masno otisnutim zelenim obrubom prikazano je subjektivno odabrano Pareto rješenje, čiji će se odziv pogona pokazati i detaljno analizirati kasnije u ovom potpoglavlju.

6. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s jednostrukim prijelazom



Slika 6-5. Rezultati optimiranja parametara za 1-2 uzlaznu promjenu ($p_{th} = 0.5$): (a) evolucija rješenja tijekom brojnih iteracija genetskog algoritma uključujući Pareto frontu i (b) Pareto optimalna rješenja povezana s definiranim stupnjevima agilnosti

Konačni indeksi performansi dani su u tablici 6-1 za različite vrijednosti stupnja agilnosti. U svrhu analize, u tablici je također sadržan indeks performansi koji se odnosi na energiju disipiranu u spojkaama definiran izrazom (4-15), a koji nije korišten u formulaciji problema optimiranja radi jednostavnosti i nešto manjeg značaja. U istoj tablici, dobiveni indeksi

6. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s jednostrukim prijelazom

performansi uspoređeni su s odgovarajućim indeksima dobivenim primjenom pristupa optimiranja upravljačkih varijabli. Rezultati pokazuju kako je indeks trzaja vozila u prosjeku dva puta veći kada se primjenjuju po odsječcima linearni upravljački profili, što se objašnjava nižim autoritetom upravljanja temeljenog na po odsječcima linearnim profilima te utjecajem dinamike aktuatora. Odstupanja postaju sve izraženija za brže promjene stupnja prijenosa. Kada je riječ o disipiranoj energiji, performanse su vrlo konzistentne za različita trajanja promjene stupnja prijenosa i tek su neznatno pogoršane za pristup temeljen na optimiranju parametara.

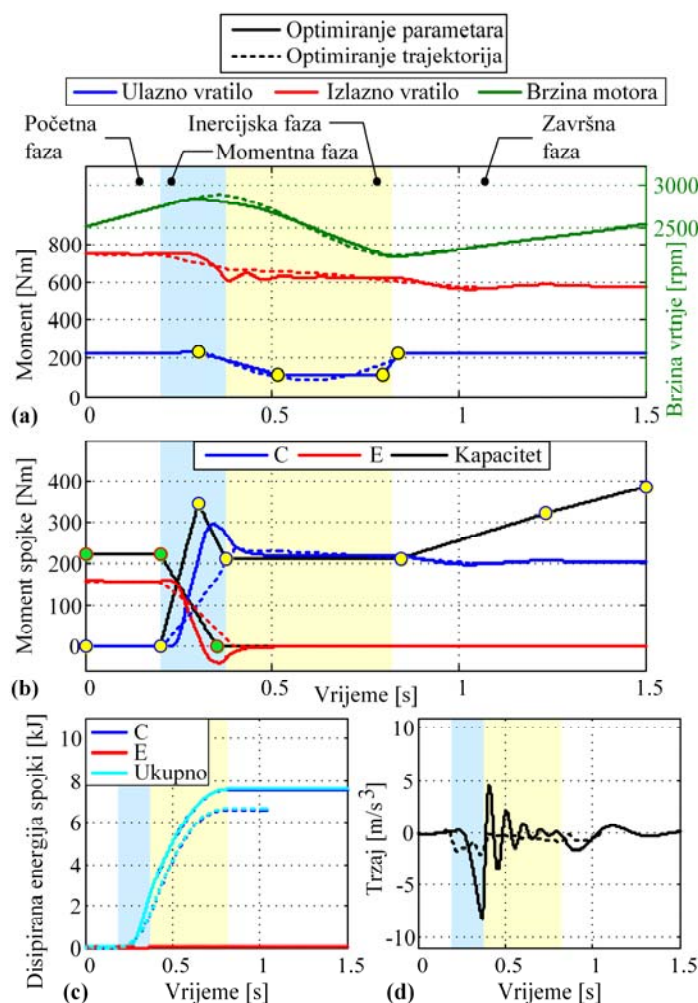
Tablica 6-1. Vrijednosti indeksa trzaja vozila i energije disipirane u spojka za parametarski optimiranu 1-2 uzlaznu promjenu i za različite stupnjeve agilnosti, uključujući relativna odstupanja u odnosu na rezultate optimiranja upravljačkih varijabli

Stupanj agilnosti	t_{shift} [ms]	j_{RMS} [m/s ³]	E_{loss} [kJ]
1	731	1.978 (+198%)	8.296 (−2.5%)
4	688	2.132 (+171%)	7.958 (−1.1%)
5	621	2.204 (+156%)	7.58 (+13.7%)
7	595	2.474 (+224%)	7.431 (+42.6%)
8	559	3.003 (+226%)	7.166 (+14.8%)
9	530	3.551 (+266%)	6.932 (+18.3%)
10	501	5.968 (+434%)	6.458 (+23%)

Slika 6-6 prikazuje optimalne vremenske odzive za 1-2 uzlaznu promjenu i korisnički-odabrano rješenje koje odgovara stupnju agilnosti 5. Položaj pedale akceleratora je postavljen na $p_{th} = 0.5$ i upravljanje momentom motora je dopušteno. Optimalni parametri po odsječcima linearnih profila sa slike 6-1 označeni su žutim točkama. Rezultati parametarskog optimiranja (puna linija) su na istoj slici uspoređeni s rezultatima optimiranja trajektorija upravljačkih varijabli (isprekidana linija). Očigledno, dva seta upravljačkih profila promjene stupnja prijenosa su međusobno vrlo slična, osim malog odstupanja u profilu (kapaciteta) momenta uključne spojke u momentnoj fazi. Naime, prva točka koja definira po odsječcima linearni profil je postavljena na donju graničnu vrijednost ($t_1 \approx 0.1$ s, v. izraz (6-6) i sliku 6-1) i ima visoku vrijednost kapaciteta momenta kako bi se kompenzirala kašnjenja aktuatora. Na slici 6-6d mogu se uočiti izražene oscilacije u odzivu trzaja vozila uslijed torzijskih vibracija, do kojih dolazi zbog poremećaja u izlaznom momentu tijekom prijelaza između momentne i inercijske faze i

6. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s jednostrukim prijelazom

kombiniranog utjecaja inercija sustava [20]. Bez obzira na takvo nerafinirano upravljačko djelovanje, dobiveni profil izlaznog momenta (a time i akceleracije vozila) je prilično gladak s potpuno potisnutim efektom inercijskog udara te vrlo sličan onome dobivenom primjenom pristupa optimiranja upravljačkih trajektorija.



Slika 6-6. Usporedba odziva pogona tijekom 1-2 uzlazne promjene ($p_{th} = 0.5$) dobivenih primjenom optimalnih upravljačkih profila (stupanj agilnosti = 5; puna linija) i optimalnih upravljačkih trajektorija ($t_{inertia} = 445$ ms; isprekidana linija)

6.3.2. Silazna promjena

Slika 6-7 prikazuje rezultate parametarskog optimiranja za 2-1 silaznu promjenu. Pareto fronta ima gotovo linearni oblik s gusto raspoređenim Pareto optimalnim točkama, posebno u

6. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s jednostrukim prijelazom

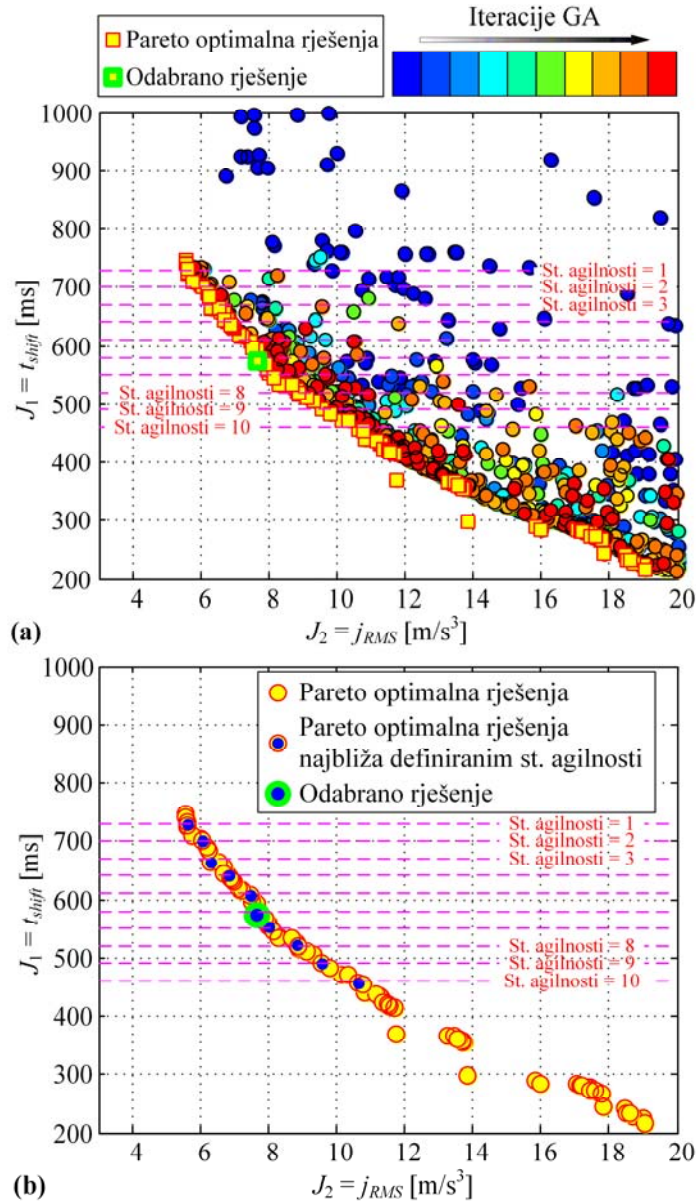
području srednje brzih promjena stupnja prijenosa. Vremena trajanja promjene stupnja prijenosa su ponovno raspoređena u 10 diskretnih razina.

Finalni indeksi performansi zbirno su prikazani u tablici 6-2 za različite vrijednosti stupnja agilnosti. RMS indeksi trzaja dobiveni pristupom temeljenim na parametarskom optimiranju su ponešto gori (najviše 53%) od onih dobivenih optimiranjem upravljačkih trajektorija. Za razliku od primjera uzlazne promjene, odstupanja između dva skupa rezultata ne pogoršavaju se za brže promjene stupnjeva prijenosa (usp. tablicu 6-1). Disipirana energija u spojkama je čak i manja kod parametarskog optimiranja, vjerojatno zbog slabije aktivnosti isključne spojke u inercijskoj fazi, što je izraženije kod bržih promjena. Valja napomenuti kako kod optimiranja upravljačkih varijabli nije primijenjena penalizacija gubitaka energije ($k_w = 0$ u (4-1)) s ciljem postizanja što udobnije promjene (time je veći značaj dan indeksu udobnosti). Ova opažanja ukazuju na to da parametrizacija predložena na slici 6-2 daje prikladan stupanj slobode za oblikovanje upravljačkih profila.

Tablica 6-2. Usporedba vrijednosti indeksa trzaja vozila i energije disipirane u spojkama za 2-1 silaznu promjenu i za različite stupnjeve agilnosti

Stupanj agilnosti	t_{shift} [ms]	j_{RMS} [m/s ³]	E_{loss} [kJ]
1	730	7.272 (+45.3%)	8.944 (−32.5%)
2	700	7.969 (+47%)	4.679 (−12.1%)
3	665	8.398 (+42.1)	3.766 (−18.9%)
4	640	9.099 (+46.8%)	3.213 (−33.9%)
5	606	10.425 (+53.3%)	2.713 (−27.2%)
6	572	10.719 (+41.8%)	1.469 (−59.9%)
7	552	11.296 (+46%)	1.271 (−66.1%)
8	521	12.617 (+49%)	0.386 (−83.5%)
9	491	14.102 (+51.7%)	0.232 (−84.5%)
10	457	15.867 (+50.2%)	0.236 (−79.8%)

6. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s jednostrukim prijelazom

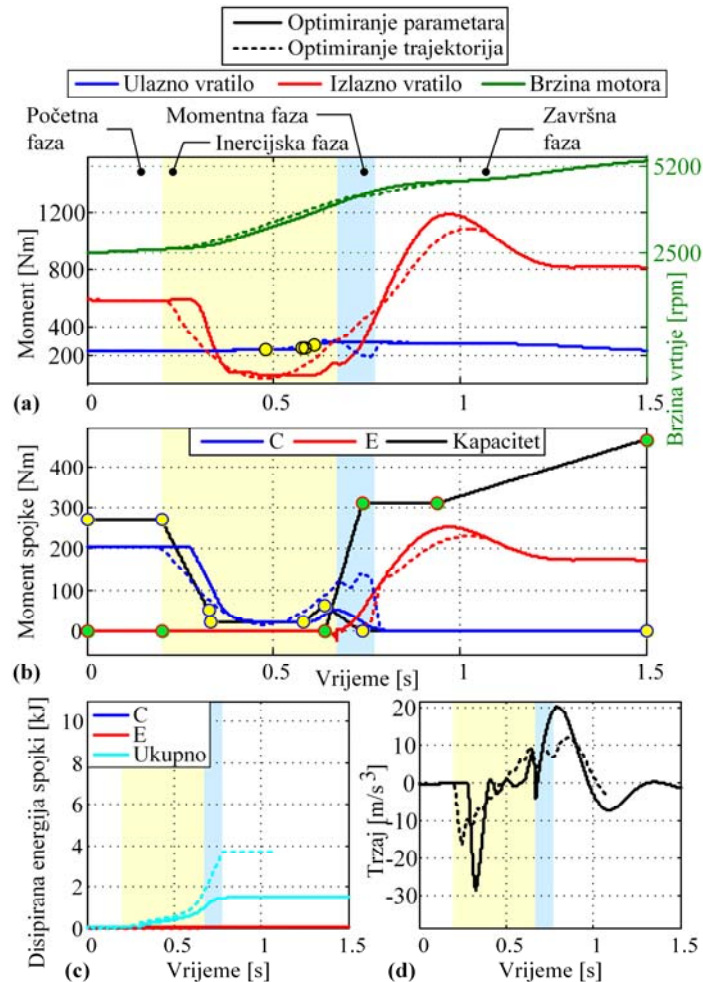


Slika 6-7. Rezultati optimiranja parametara za 2-1 silaznu promjenu ($p_{th} = 0.5$): (a) evolucija rješenja tijekom brojnih iteracija genetskog algoritma uključujući Pareto frontu i (b) Pareto optimalna rješenja povezana s definiranim stupnjevima agilnosti

Slika 6-8 prikazuje optimalne vremenske odzive za 2-1 silaznu promjenu i korisnički-odabrano rješenje koje odgovara stupnju agilnosti 6 (uz $t_{shift} = 572$ ms, v. tablicu 6-2). Izraženi negativni šiljak u odzivu trzaja vozila na početku inercijske faze (slika 6-8d) javlja se zbog naglog otpuštanja isključne spojke kao rezultat primjene po segmentima linearnog upravljačkog profila

6. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s jednostrukim prijelazom

spojke. U isto vrijeme, odziv momenta spojke je zakašnjen zbog dinamike aktuatora (slika 6-8b). Iako je upravljanje momentom motora dozvoljeno tijekom promjene stupnja prijenosa (v. sliku 6-2), ono se ne koristi (slika 6-8a). Za razliku od pristupa u kojem se optimiraju upravljačke trajektorije, a kod kojeg se ugladna promjena prijelaznog omjera brzina ostvaruje bliskom koordinacijom isključne spojke i motora, ovdje isključna spojka sama upravlja promjenom prijenosnog omjera brzina na način da se njezin moment podiže na kraju inercijske faze (slika 6-8b). Takvo upravljačko djelovanje usporava promjenu prijenosnog omjera brzina i u isto vrijeme podiže izlazni moment prije momentne faze. Time se stvaraju povoljni uvjeti za glatki prijenos momenta između spojki u momentnoj fazi.



Slika 6-8. Usporedba odziva pogona tijekom 2-1 silazne promjene ($p_{th} = 0.5$) dobivenih primjenom optimalnih upravljačkih profila (stupanj agilnosti = 5; puna linija) i optimalnih upravljačkih trajektorija ($t_{inertia} = 572$ ms; isprekidana linija)

6.4. Pristup temeljen na robusnom optimiranju parametara

Kako bi se osigurala robusnost prethodno definiranih profila upravljanja promjenom stupnja prijenosa, u ovom se potpoglavlju predlaže metoda za robusno parametarsko optimiranje. Kada se govori o robusnom optimiranju, razlikuju se dva temeljna pristupa [85],[86]. Prvi je stohastičko robusno programiranje u kojem je distribucija nesigurnosti unaprijed poznata. Za razliku od stohastičkog robusnog programiranja, u robusnom su optimiranju a-priori poznate samo granice nesigurnosti. Ovdje se razmatra stohastičko robusno programiranje uz iste postavke optimiranja kao i za bazično parametarsko optimiranje (v. formulaciju u potpoglavlju 6.1). Konačni cilj je dobivanje optimalnih po odsječcima linearnih upravljačkih profila koji smanjuju očekivanja indeksa performansi i potiskuju njihove varijacije u prisustvu statistički poznatih značajki varijacija temeljnih parametara dinamičkog odziva spojki s aktuatorom.

6.4.1. Formulacija problema optimiranja

Kod robusnog parametarskog optimiranja razmatraju se tri parametra nesigurnosti modela pogona: 1) pojačanje kapaciteta momenta uključne spojke, $g_{h,ONC}$; 2) mrtvo vrijeme modela aktuatora uključne spojke, $\tilde{T}_{Dcl}$; te 3) pojačanje momenta motora, g_{eng} . Shodno tome, mijenja se model pogona vozila tako da: 1) ulaz $\tau_{h,ONC}$ izraza (2-22) postaje $\tau_{h,ONC} \cdot g_{h,ONC}$, 2) parametar T_{Dcl} izraza (2-27) postaje $\tilde{T}_{Dcl}$, te 3) ulaz $\Delta\tau_{ec}$ izraza (2-2) postaje $\Delta\tau_{ec} \cdot g_{h,ONC}$. Pretpostavlja se normalna distribucija vrijednosti parametara nesigurnosti, uz specificiranu očekivanu tj. srednju vrijednost (simbol E) i standardno odstupanje (*engl. standard deviation*, simbol σ), pri čemu je očekivana vrijednost jednaka nominalnoj vrijednosti parametra

$$\begin{aligned} E[g_{h,ONC}] &= 1, \quad \sigma[g_{h,ONC}] = 0.03 \\ E[\tilde{T}_{Dcl}] &= T_{Dcl}, \quad \sigma[\tilde{T}_{Dcl}] = 0.01 \text{ s} \\ E[g_{eng}] &= 1, \quad \sigma[g_{eng}] = 0.03 \end{aligned} \quad (6-11)$$

Cilj je pronaći parametre upravljačkih profila spojki i motora koji istovremeno minimiziraju srednje vrijednosti indeksa performansi za najbolju prosječnu kvalitetu promjene stupnja prijenosa te također njihova standardna odstupanja za najveću robusnost na varijacije parametara sustava. Stoga se problem optimiranja formulira kao više-kriterijski problem s četiri kriterija koja se minimiziraju istovremeno:

$$\begin{aligned}
 \min_{\mathbf{p}_{ctrl}} J_1 &= E \left[t_{shift} \right] \\
 \min_{\mathbf{p}_{ctrl}} J_2 &= E \left[\sqrt{\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} \dot{v}_v^2 dt} \right] \\
 \min_{\mathbf{p}_{ctrl}} J_3 &= \sigma \left[t_{shift} \right] \\
 \min_{\mathbf{p}_{ctrl}} J_4 &= \sigma \left[\sqrt{\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} \dot{v}_v^2 dt} \right]
 \end{aligned} \tag{6-12}$$

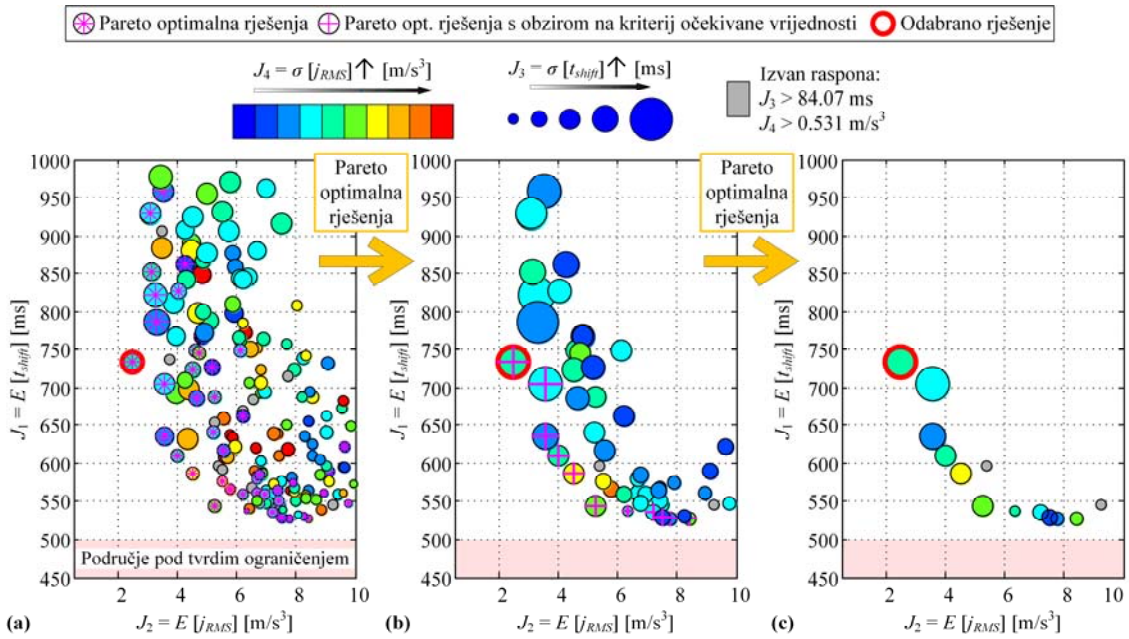
6.4.2. Metoda optimiranja

Za rješavanje problema optimiranja definiranog u prethodnom potpoglavlju, koristi se modeFRONTIER-ov MORDO modul (skraćenica od *engl. Multi-Objective Robust Design Optimization*), koji omogućava dodjeljivanje stohastičke distribucije ulaznim parametrima i provođenje optimiranja u kojima se minimiziraju varijacije matrica performansi oko nominalnih optimalnih točaka [58]. Koristi se isti MOGA II algoritam optimiranja kao i kod parametarskog optimiranja. U usporedbi s parametarskim optimiranjem, rješavanje problema robusnog parametarskog optimiranja uključuje nekoliko dodatnih koraka algoritma. Na početku se kao i kod problema optimiranja parametara koristi DOE modul za generiranje M početnih populacija (ovdje $M = 30$). Zatim se generira N uzoraka vektora koji sadrže vrijednosti parametara nesigurnosti (ovdje $N = 30$) korištenjem tzv. metode latinskog hiperkubnog uzorkovanja (*engl. Latin Hypercube Sampling*). Za svaku od M jedinki početne populacije, MORDO simulira sustav za N skupova parametara nesigurnosti i generira vrijednosti izlaznih varijabli (koje uključuju očekivanu, maksimalnu i minimalnu vrijednost svakog kriterija optimiranja, kao i njihova standardna odstupanja). Konačno, algoritam optimiranja (ovdje MOGA-II) generira novu populaciju od M jedinki, na temelju mjere kvalitete pojedine jedinke i uz korištenje genetskih operatora reprodukcije. Opisani koraci ponavljaju se u petlji, ovisno o broju jedinki početne populacije M , broju parametara nesigurnosti (tj. broju skupova koji sadrže vrijednosti parametara nesigurnosti N) i broju iteracija/generacija algoritma (taj broj ovdje je postavljen na vrijednost 100, kao i kod optimiranja parametara).

6.4.3. *Rezultati optimiranja*

Metoda robusnog parametarskog optimiranja primijenjena je na isti ispitni slučaj kao kod bazičnog parametarskog optimiranja, tj. za 1-2 uzlaznu promjenu s konstantnim položajem pedale akceleratora ($p_{th} = 0.5$). Slika 6-9a prikazuje vrijednosti kriterija optimiranja za različite iteracije algoritma, tj. za različite generacije GA. Rezultati optimiranja za problem s četiri kriterija optimiranja ne mogu se jednostavno vizualizirati u ravnini, kao što je to bio slučaj s dva kriterija. Zbog toga je na slici 6-9 upotrijebljen alternativni način vizualizacije vrijednosti kriterija. Očekivane vrijednosti RMS indeksa trzaja vozila i trajanja promjene stupnja prijenosa prikazane su redom na x i y osi. Treći kriterij, tj. standardno odstupanje RMS indeksa trzaja, vizualizirano je korištenjem različitih boja, gdje boje u plavim tonovima reprezentiraju rješenja karakterizirana nižim standardnim odstupanjem. Standardno odstupanje trajanja promjene stupnja prijenosa vizualizirano je korištenjem kružića različitih veličina, pri čemu manji kružići označavaju rješenja s nižim standardnim odstupanjem. Na slici 6-9b prikazana su samo Pareto optimalna rješenja sa slike 6-9a. Slika 6-9c prikazuje rješenja sa slike 6-9b koja su Pareto optimalna s obzirom na kriterij očekivane vrijednosti, budući da je srednja vrijednost (tj. uprosječna kvaliteta promjene stupnja prijenosa) i dalje vrlo važan kriterij kod projektiranja sustava upravljanja promjenom stupnja prijenosa. Konačno rješenje odabrano je proizvoljno iz skupa Pareto optimalnih rješenja i označeno je crvenim obrubom kružića.

6. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s jednostrukim prijelazom



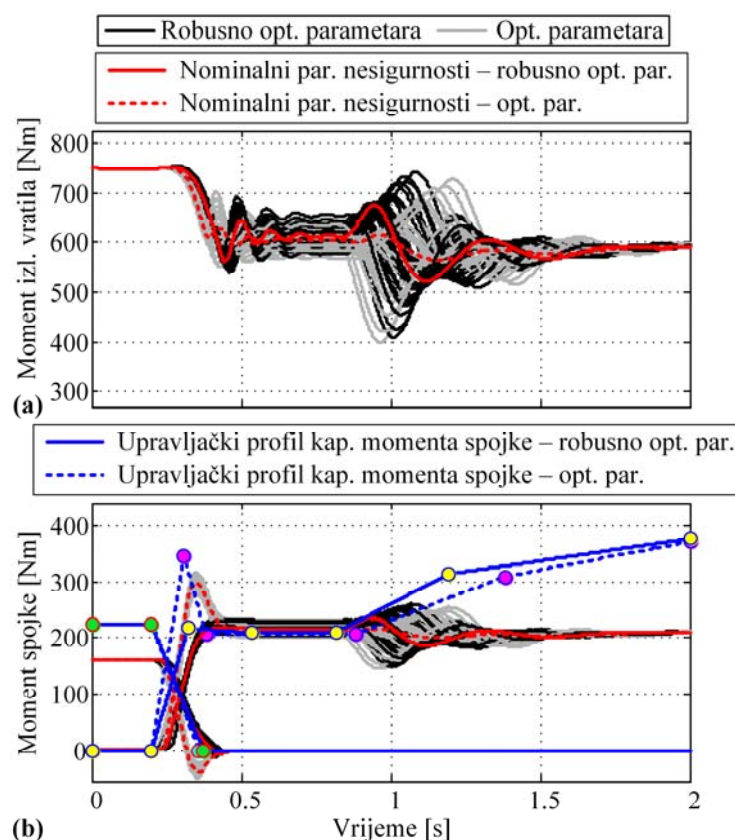
Slika 6-9. Rezultati robusnog parametarskog optimiranja za 1-2 uzlaznu promjenu ($p_{th} = 0.5$):

(a) evolucija rješenja tijekom brojnih iteracija genetskog algoritma, (b) izdvojena Pareto fronta i (c) Pareto fronta optimalnih rješenja prikazanih po kriterijima očekivanja indeksa performansi

Grafički prikaz na slici 6-10 uspoređuje rješenja parametarskog i robusnog parametarskog optimiranja za odabrano rješenje sa slike 6-9 i razmatrane nesigurnosti. Vrijednosti parametara nesigurnosti generiraju se slučajno iz normalne distribucije temeljem prethodno uvedenih vrijednosti očekivanja i standardnih odstupanja (izraz (6-11)). Sive i crne linije odnose se na profile momenata dobivene redom parametarskim i robusnim parametarskim optimiranjem. Iz prikazanih odziva čini se da oba rješenja pružaju sličnu robusnost u smislu trzaja vozila povezanog s prikazanim odzivom izlaznog momenta. Odzivi dobiveni za nominalne vrijednosti parametara nesigurnosti označeni su crvenom bojom. Očekivano, profil dobiven parametarskim optimiranjem rezultira glatim i manje oscilatornim odzivom izlaznog momenta, jer je optimiran upravo za slučaj nominalnih vrijednosti parametara nesigurnosti. Slika 6-10b uspoređuje optimirane upravljačke profile spojki dobivene korištenjem robusnog parametarskog (puna plava linija) i parametarskog optimiranja (isprekidana plava linija). Očigledno, rješenje robusnog parametarskog optimiranja ne primjenjuje oštru kompenzaciju kašnjenja odziva u momentnoj fazi, jer ona može biti netočna u prisustvu varijacija parametara

6. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s jednostrukim prijelazom

spojki (može primjerice rezultirati prekompenzacijom). Istovremeno, kapacitet momenta uključne spojke podiže se brže na samom kraju promjene stupnja prijenosa, čime se osigurava pravovremeno zatvaranje uključne spojke neovisno o nesigurnosti modela pogona.

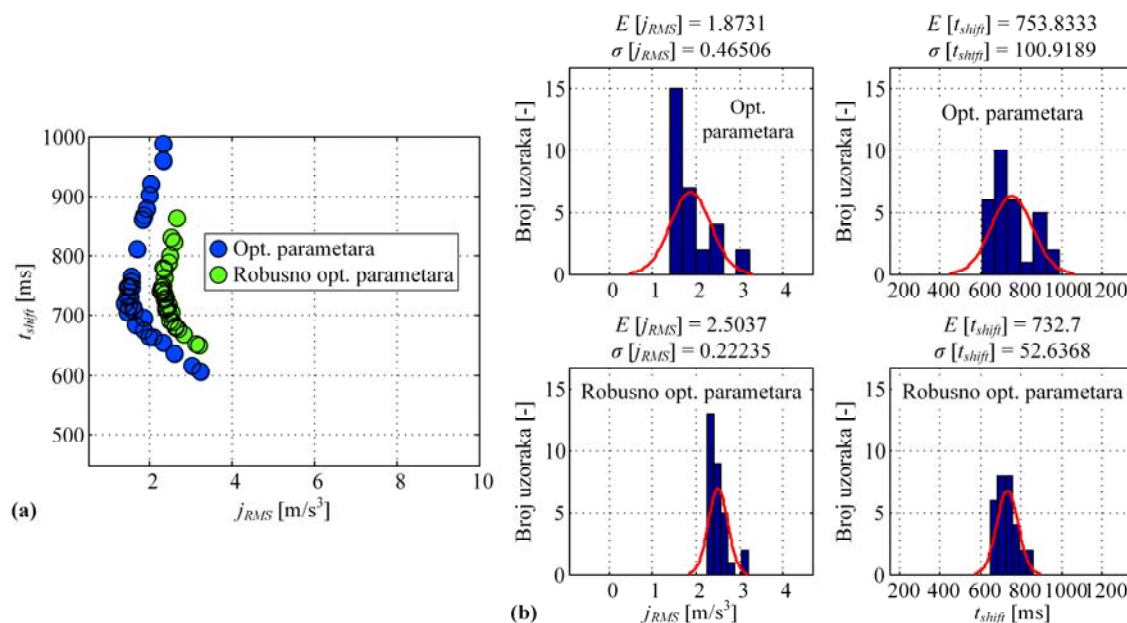


Slika 6-10. Usporedba odziva pogona tijekom 1-2 uzlazne promjene ($p_{th} = 0.5$) dobivenih primjenom upravljačkih profila generiranih korištenjem robusnog parametarskog (puna linija, crna boja) i parametarskog optimiranja (isprekidana linija, siva boja) za različite vrijednosti razmatranih parametara nesigurnosti

Slika 6-11a prikazuje indekse performansi promjene stupnja prijenosa dobivene primjenom optimalnih upravljačkih profila generiranih robusnim parametarskim (zeleni kružići) i parametarskim optimiranjem (plavi kružići) u $j_{RMS}-t_{shift}$ ravnini za različite kombinacije vrijednosti parametara nesigurnosti. Slika 6-11b ilustrira distribucije indeksa performansi sa slike 6-11a, koje su dobivene parametarskim optimiranjem (gornji grafovi) te robusnim parametarskim optimiranjem (donji grafovi). Kao što je naznačeno brojevima danima u naslovu svakog grafa, standardna odstupanja RMS indeksa trzaja i vremena trajanja promjene smanjena

6. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s jednostrukim prijelazom

su redom za 52% odnosno 48% primjenom robusnog parametarskog optimiranja u usporedbi s rješenjem dobivenim parametarskim optimiranjem, dok je očekivana vrijednost istih indeksa povećana za 34% odnosno smanjena za 3%. Zaključno, može se reći kako rješenje dobiveno robusnim parametarskim optimiranjem pruža manju osjetljivost na promjene parametara nesigurnosti pogona, što je s druge strane plaćeno lošijim prosječnim performansama.



Slika 6-11. Analiza dobivenih rezultata robusnog i standardnog parametarskog optimiranja: (a) indeksi performansi promjene stupnja prijenosa i (b) distribucije indeksa performansi

7. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom

Temeljem uvida dobivenih optimiranjem upravljačkih trajektorija promjene stupnja prijenosa s dvostrukim prijelazom iz poglavlja 5, u ovom se poglavlju predlažu različite definicije po odsječcima linearnih profila za izvođenje takvih promjena (tj. različite strategije upravljanja). Potom se određuju optimalne vrijednosti parametara upravljačkih profila korištenjem metode više-kriterijskog optimiranja predstavljene u poglavlju 6. Konačno, optimiranja parametara profila se provode za različite scenarije promjene stupnja prijenosa, s ciljem provođenja kvantitativnog vrednovanja predloženih strategija upravljanja.

7.1. Formulacija problema optimiranja

Različite strategije upravljanja promjenom stupnja prijenosa s dvostrukim prijelazom (*engl.* skraćeno DTS) definiraju se kroz odgovarajuću parametrizaciju profila kapaciteta momenta spojki i redukcije momenta motora.

7.1.1. Kriteriji optimiranja i zajednička ograničenja

Problem optimiranja je pronaći optimalan skup parametara koji definiraju po odsječcima linearne upravljačke profile promjene stupnja prijenosa, koji istovremeno minimiziraju dva konfliktna indeksa kvalitete promjene stupnja prijenosa: trajanje inercijske faze (J_1 ; v. izraz (6-1), uz napomenu da se t_{shift} zamjenjuje s $t_{inertia}$) i RMS indeks trzaja vozila (J_2 ; v. izraz (6-2)). Vektor parametara upravljanja koji se optimiraju, $\mathbf{p}_{ctrl} \in \mathbb{R}^{n_{ctrl}}$, razlikuje se za različite definicije profila upravljanja promjenom stupnja prijenosa (tj. za različite upravljačke strategije), te će biti definiran u narednim odjeljcima.

Isti skup ograničenja se primjenjuje u svim upravljačkim strategijama kako bi se: (i) spriječila ekstremno kratka (ili duga) trajanja inercijske faze, (ii) izbjeglo razmatranje neprihvatljivih rješenja (npr. onih u kojima uključne spojke kližu u završnoj fazi promjene) i (iii) izbjegla rješenja koja primjenjuju neprihvatljiva upravljačka djelovanja (npr. predugo trajanje momentne faze). Ta ograničenja su sljedeća:

$$\begin{aligned}
 0.35 \text{ s} < t_{inertia} < 1 \text{ s} , \\
 \int_{t_{ONC1,2}}^{t_{f,end}} \omega_{ONC1,2}^2 dt < 0.3 \text{ rad/s} , \\
 t_{e3} - t_{i,end} < 0.2 \text{ s} , \\
 \tau_{is} = \tau_e - \Delta\tau_{ec} > 0 ,
 \end{aligned} \tag{7-1}$$

gdje $t_{1ONC1,2}$ označava točke sinkronizacije spojki $ONC_{1,2}$, t_{e3} označava vremenski trenutak u kojem završava upravljačko djelovanje motora i $t_{i,end}$ označava kraj inercijske faze (odgovara trenutku u kojem su brzine klizanja obje uključne spojke jednake nuli). Posljednja dva ograničenja primjenjuju se kako bi se spriječilo upravljačko djelovanje motora dugo nakon završetka inercijske faze, odnosno kočenje motorom, pri čemu se oba odnose na izbjegavanje momentne faze dugog trajanja.

7.1.2. Upravljačka strategija A – inicijalna formulacija

Strategija A postavljena je kao inicijalna upravljačka strategija na temelju općih uvida dobivenih temeljem rezultata i preporuka optimiranja iz poglavlja 5. Upravljački vektor $\mathbf{p}_{ctrl} \in \mathbb{R}^{n_{ctrl}}$ ($n_{ctrl} = 13$ za Strategiju A) podijeljen je u dva pod-vektora: $\mathbf{p}_{cl} \in \mathbb{R}^{n_{cl,ctrl}}$, koji definira profile kapaciteta momenta spojki i $\mathbf{p}_{eng} \in \mathbb{R}^{n_{eng,ctrl}}$, koji definira profil redukcije momenta motora. Pod-vektori $\mathbf{p}_{cl}$ i $\mathbf{p}_{eng}$ sadrže sljedeće parametre, koji su na slikama 7-1a i 7-1g označeni plavim obrubom:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{p}_{cl} &= [a_{1OF1} \ a_{1OF2} \ t_{1OF} \ \Delta t_{1OF} \ t_{1ON1} \ t_{1ON2} \ \Delta t_{1ON1} \ \Delta t_{1ON2}]^T , \\
 \mathbf{p}_{eng} &= [a_{e1} \ a_{e2} \ t_{e1} \ \Delta t_{e1} \ \Delta t_{e2}]^T .
 \end{aligned} \tag{7-2}$$

Problem optimiranja podložen je sljedećim ograničenjima na parametre (tj. na vrijednosti amplituda, vremenskih trenutaka i vremenskih intervala):

$$\begin{aligned}
 0 &\leq a_{1OF1,2} \leq \tau_{h0,OF1,2} , \\
 0 &\leq t_{1OF}, t_{1ON1}, t_{1ON2} \leq 0.5 \text{ s} , \\
 0 &\leq \Delta t_{1OF}, \Delta t_{1ON1}, \Delta t_{1ON2} \leq 0.5 \text{ s} , \\
 0 &\leq a_{e1}, a_{e2} \leq 0.55\tau_{e0} ,
 \end{aligned} \tag{7-3}$$

$$0 \leq t_{e1} \leq 0.5 \text{ s} ,$$

$$0 \leq \Delta t_{e1}, \Delta t_{e2} \leq 0.3 \text{ s} ,$$

gdje su $\tau_{h0, OFG1,2}$ početne vrijednosti kapaciteta momenta isključnih spojki, koje su preuzete iz odgovarajućih rezultata optimiranja upravljačkih trajektorija (v. poglavlje 5). Iz istih rezultata preuzete su i vrijednosti krajnjih vrijednosti kapaciteta momenta uključnih spojki, koji se koriste za postavljanje parametara $a_{2ON1,2}$ (uoči da se oni ne optimiraju). Prve četiri nejednadžbe izraza (7-3) predstavljaju ograničenja koja se odnose na profile kapaciteta momenta spojki, dok se zadnje tri nejednadžbe odnose na profil redukcije momenta motora. Limiti vrijednosti parametara postavljeni su dovoljno široko, kako bi se algoritmu optimiranja omogućila velika fleksibilnost u oblikovanju upravljačkih profila. Iz tog razloga, moguća su upravljačka djelovanja koja nisu ilustrirana na slici 7-1a. Primjerice, isključne spojke mogle bi se modulirati dugo nakon završetka inercijske faze. Takvo upravljačko djelovanje je, međutim, nepoželjno jer rezultira značajnim disipiranjem energije i produljuje momentnu fazu promjene. Ova strategija upravljanja stoga je podložna dodatnom ograničenju, koje za cilj ima spriječiti upravljačko djelovanje isključne spojke dugo nakon završetka inercijske faze (slike 7-1a i 7-2a):

$$t_{2OF} - t_{i,end} < 0.2 \text{ s} . \quad (7-4)$$

7.1.3. Upravljačka strategija B – značajne mogućnosti oblikovanja profila isključnih spojki

Glavna značajka Strategije B očituje se u tome da ona pruža značajnu slobodu u oblikovanju profila kapaciteta momenta isključnih spojki. Kao posljedica toga, upravljački vektor $\mathbf{p}_{ctrl}$ sadrži osam parametara više ($n_{ctrl} = 21$) u odnosu na one definirane izrazom (7-2), što problem optimiranja čini složenijim (područje pretraživanja se povećava). Upravljački vektor sada je podijeljen u tri pod-vektora: $\mathbf{p}_{cl1}$ i $\mathbf{p}_{cl2}$ koji opisuju profile kapaciteta momenta isključnih spojki OFG₁ i OFG₂, te $\mathbf{p}_{eng}$ koji opisuje profil redukcije momenta motora:

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{cl1} &= [a_{1OF1} \quad a_{2OF1} \quad a_{3OF1} \quad t_{1OF1} \quad \Delta t_{1OF1} \quad \Delta t_{2OF1} \quad \Delta t_{3OF1} \quad \Delta t_{4OF1}]^T , \\ \mathbf{p}_{cl2} &= [a_{1OF2} \quad a_{2OF2} \quad a_{3OF2} \quad t_{1OF2} \quad \Delta t_{1OF2} \quad \Delta t_{2OF2} \quad \Delta t_{3OF2} \quad \Delta t_{4OF2}]^T , \\ \mathbf{p}_{eng} &= [a_{e1} \quad a_{e2} \quad t_{e1} \quad \Delta t_{e1} \quad \Delta t_{e2}]^T . \end{aligned} \quad (7-5)$$

7. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom

Valja uočiti kako su parametrizacije OFG₁ i OFG₂ spojki istovjetne jedna drugoj (slika 7-1b). Na vrijednosti amplituda, vremenskih trenutaka i vremenskih intervala iz izraza (7-5) nametnuta su sljedeća ograničenja:

$$\begin{aligned} 0 &\leq a_{1OF1,2}, a_{2OF1,2}, a_{3OF1,2} \leq \tau_{h0, OFG1,2} , \\ 0 &\leq t_{1OF1}, t_{1OF2} \leq 0.5 \text{ s} , \\ 0 &\leq \Delta t_{1OF1,2}, \Delta t_{2OF1,2}, \Delta t_{3OF1,2}, \Delta t_{4OF1,2} \leq 0.5 \text{ s} , \\ 0 &\leq a_{e1}, a_{e2} \leq 0.55 \tau_{e0} , \\ 0 &\leq t_{e1} \leq 0.5 \text{ s} , \\ 0 &\leq \Delta t_{e1}, \Delta t_{e2} \leq 0.3 \text{ s} . \end{aligned} \tag{7-6}$$

Slično kao u odjeljku 7.1.2, u formulaciju problema su uključena dva dodatna ograničenja kako bi se spriječilo upravljačko djelovanje isključnih spojki dugo nakon završetka inercijske faze:

$$\begin{aligned} t_{5OF1} - t_{i,end} &< 0.2 \text{ s} , \\ t_{5OF2} - t_{i,end} &< 0.2 \text{ s} . \end{aligned} \tag{7-7}$$

Valja uočiti kako su vremenski trenuci $t_{5OF1,2}$ određeni vremenskim intervalima $\Delta t_{1OF1,2}$, $\Delta t_{2OF1,2}$, $\Delta t_{3OF1,2}$ i $\Delta t_{4OF1,2}$ sadržanim u izrazu (7-5).

7.1.4. Upravljačka strategija C – jednostavni linearni upravljački profili isključnih spojki

Upravljačka strategija C karakterizirana je jednostavnim, linearnim profilima kapaciteta momenta OFG₁ i OFG₂ spojki definiranih sa samo jednim parametrom koji se optimira (vremenski trenutak t_{1OF} u kojem kapacitet momenta obje isključne spojke pada na nulu, slika 7-1c). Preostala četiri parametra vektora $\mathbf{p}_{cl}$ odnose se na profile kapaciteta momenta uključnih spojki, koji su (zajedno s profilom redukcije momenta motora) jednaki kao u prethodne dvije upravljačke strategije. Strategija C inspirirana je DTS upravljačkom strategijom 4 predloženom u poglavlju 5, u kojoj se isključne spojke brzo otpuštaju. Konačna parametrizacija upravljačkih profila sastoji se od 10 parametara koji se optimiraju ($n_{ctrl} = 10$; slika 7-1c):

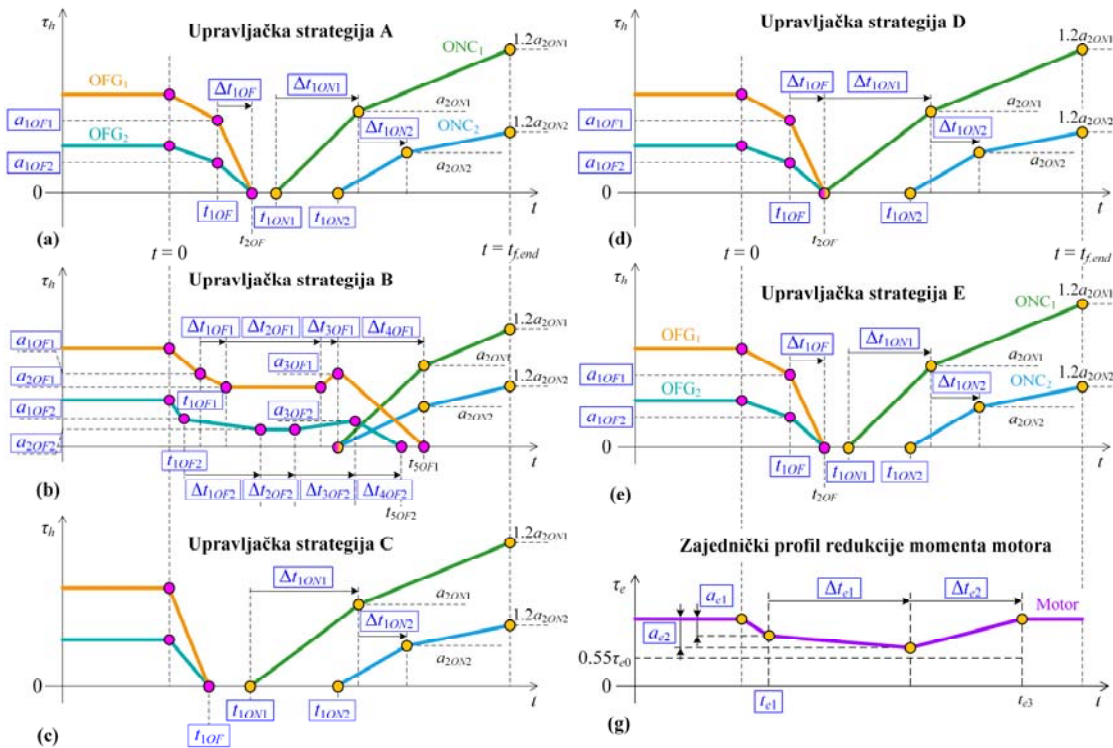
$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{cl} &= [t_{1OF} \quad t_{1ON1} \quad t_{1ON2} \quad \Delta t_{1ON1} \quad \Delta t_{1ON2}]^T , \\ \mathbf{p}_{eng} &= [a_{e1} \quad a_{e2} \quad t_{e1} \quad \Delta t_{e1} \quad \Delta t_{e2}]^T . \end{aligned} \tag{7-8}$$

7. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom

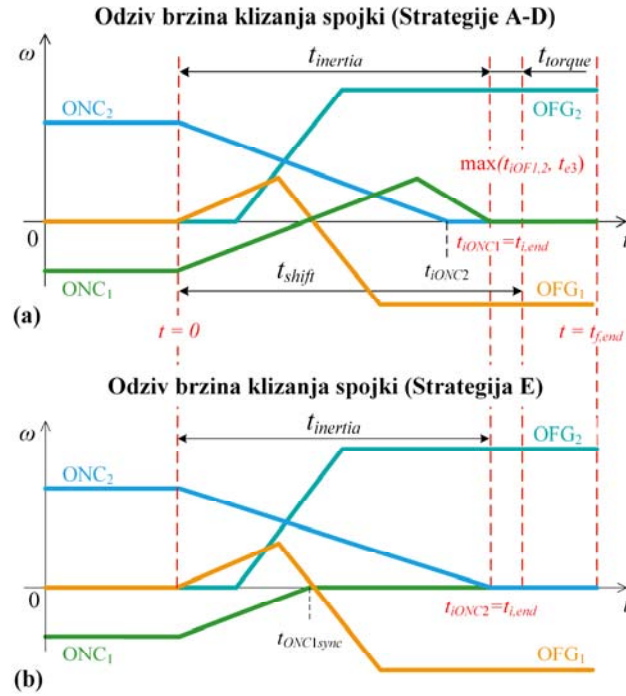
Brzo otpuštanje isključnih spojki osigurano je nametanjem ograničenja na vrijednost parametra t_{1OF} , tj. kapacitet momenta isključnih spojki treba pasti na nulu tijekom prvih 300 ms nakon iniciranja promjene stupnja prijenosa. Druga ograničenja ostaju ista kao za Strategiju A:

$$\begin{aligned}
 0 &\leq t_{1OF} \leq 0.3 \text{ s} , \\
 0 &\leq t_{1ON1,2} \leq 0.5 \text{ s} , \\
 0 &\leq \Delta t_{1ON1,2} \leq 0.5 \text{ s} , \\
 0 &\leq a_{e1}, a_{e2} \leq 0.55\tau_{e0} , \\
 0 &\leq t_{e1} \leq 0.5 \text{ s} , \\
 0 &\leq \Delta t_{e1}, \Delta t_{e2} \leq 0.3 \text{ s} .
 \end{aligned} \tag{7-9}$$

Valja primijetiti kako formulacija omogućuje aktiviranje uključnih spojki prije nego se isključe isključne spojke ($t_{1ON1,2}$ može biti manji od t_{1OF}).



Slika 7-1. Po odsječcima linearna aproksimacija upravljačkih profila aktuatora promjene stupnja prijenosa s dvostrukim prijelazom: definicije profila kapaciteta momenta spojki za (a) Strategiju A, (b) Strategiju B, (c) Strategiju C, (d) Strategiju D, (e) Strategiju E i (g) profil redukcije momenta motora (za sve strategije)



Slika 7-2. Ilustracija odziva brzina klizanja spojki za 10-6 silaznu promjenu (a) te ograničenja na predznak brzine klizanja ONC1 spojke za Strategiju E (b)

7.1.5. Upravljačka strategija D – poseban slučaj upravljačke strategije A

Ova upravljačka strategija definirana je temeljem uvida dobivenih iz rezultata optimiranja trajektorija za Strategiju 4 (v. poglavlje 5). Upravljačka strategija D je vrlo slična Strategiji A (usp. slike 7-1d i 7-1a), uz ključnu razliku da ONC1 spojka započinje izgradnju momenta u vremenskom trenutku u kojem kapacitet momenta isključnih spojki padne na nulu ($t = t_{2OF}$ na slici 7-1d). Posljedično, upravljački vektor sadrži jedan parametar manje ($n_{ctrl} = 12$) u usporedbi sa Strategijom A:

$$\mathbf{p}_d = [a_{1OF1} \ a_{1OF2} \ t_{1OF} \ t_{1ON2} \ \Delta t_{1ON1} \ \Delta t_{1ON2} \ \Delta t_{1OF}]^T, \quad (7-10)$$

$$\mathbf{p}_{eng} = [a_{e1} \ a_{e2} \ t_{e1} \ \Delta t_{e1} \ \Delta t_{e2}]^T.$$

Ograničenja na vrijednosti amplituda, vremenskih trenutaka i vremenskih intervala parametara jednaka su onima definiranih izrazom (7-3), s jedinom razlikom u vrijednosti parametra t_{1OF} , koja mora biti između 0 i 0.3 s (kao u upravljačkoj strategiji C, usp. izraz (7-9)):

$$0 \leq t_{1OF} \leq 0.3 \text{ s} . \quad (7-11)$$

7.1.6. Upravljačka strategija E – bez promjene predznaka brzine vrtnje prve uključne spojke

Upravljačka strategija E inspirirana je DTS upravljačkom strategijom 5 predstavljenom u poglavlju 5, koja se pokazala kompetitivnom u smislu ostvarivih performansi promjene stupnja prijenosa. U toj strategiji nije dopuštena promjena predznaka brzine klizanja ONC_1 spojke u toku inercijske faze, tj. prva uključna spojka treba se u potpunosti ukopčati (učiniti zatvorenom) u svojoj točki sinkronizacije (v. sliku 7-2b koja ilustrira odzive brzina klizanja spojki za 10-6 promjenu i usp. sliku 7-2a gdje to ograničenje nije primijenjeno). U formulaciji problema optimiranja, to je ostvareno nametanjem sljedećeg ograničenja na integral brzine klizanja uključne spojke:

$$\int_{t_{ONC1sync}}^{t_f} \omega_{ONC_1}^2 dt < 0.3 \text{ rad/s} . \quad (7-12)$$

Parametrizacija upravljačkih profila jednaka je kao za Strategiju A (usp. slike 7-1e i 7-1a), tj. i za ovu upravljačku strategiju vrijede izrazi (7-2), (7-3) i (7-4). Vrijedi napomenuti da slično ograničenje nije primijenjeno na spojku ONC_2 jer ona ne prolazi kroz točku sinkronizacije.

7.2. Metoda optimiranja

Za rješavanje problema optimiranja formuliranog u prethodnom potpoglavlju ponovno se koristi više-kriterijski MOGA-II genetski algoritam koji je implementiran unutar modeFRONTIER okruženja (za detalje v. poglavlje 6). U ovom slučaju generira se 60 polaznih jedinki kako bi se što bolje pokrio više-dimenzionalni prostor pretraživanja. Početne populacije generiraju se kao Sobol sekvenca, kao i u poglavlju 6. Koristi se GA s 200 generacija populacije, što dovodi do ukupne brojke od 12,000 evaluacija kriterija optimiranja, tj. broja jedinki koje algoritam generira u toku jednog postupka optimiranja. Broj generacija algoritma i broj početnih jedinki je dvostruko je povećan u odnosu na slučaj optimiranja parametara za promjenu s jednostrukim prijelazom, zbog složenije prirode problema optimiranja (promjena s dvostrukim prijelazom kod koje su aktivne četiri spojke). Vjerojatnost korištenja operatora *mutacije* je povećana na 0.7 (sa zadane vrijednosti od 0.1) s ciljem povećanja raznolikosti

generiranih rješenja i uspješnijeg izbjegavanja lokalnih optimuma. Za ovakvo podešenje i četiri istovremene (paralelne) evaluacije, vrijeme trajanja jednog optimiranja je oko četiri sata.

7.3. Rezultati optimiranja parametara

Sljedeći odjeljci analiziraju optimalne performanse promjene stupnja prijenosa za svaku strategiju upravljanja definiranu u potpoglavlju 7.1. Svaki odjeljak također sadrži vremenske odziva pogona vozila za odabrano Pareto optimalno rješenje. Rezultati optimiranja prikazani u ovom potpoglavlju odnose se na 10-6 silaznu promjenu i konstantan i visok moment motora ($\tau_e = 550 \text{ Nm}$).

7.3.1. Upravljačka strategija A

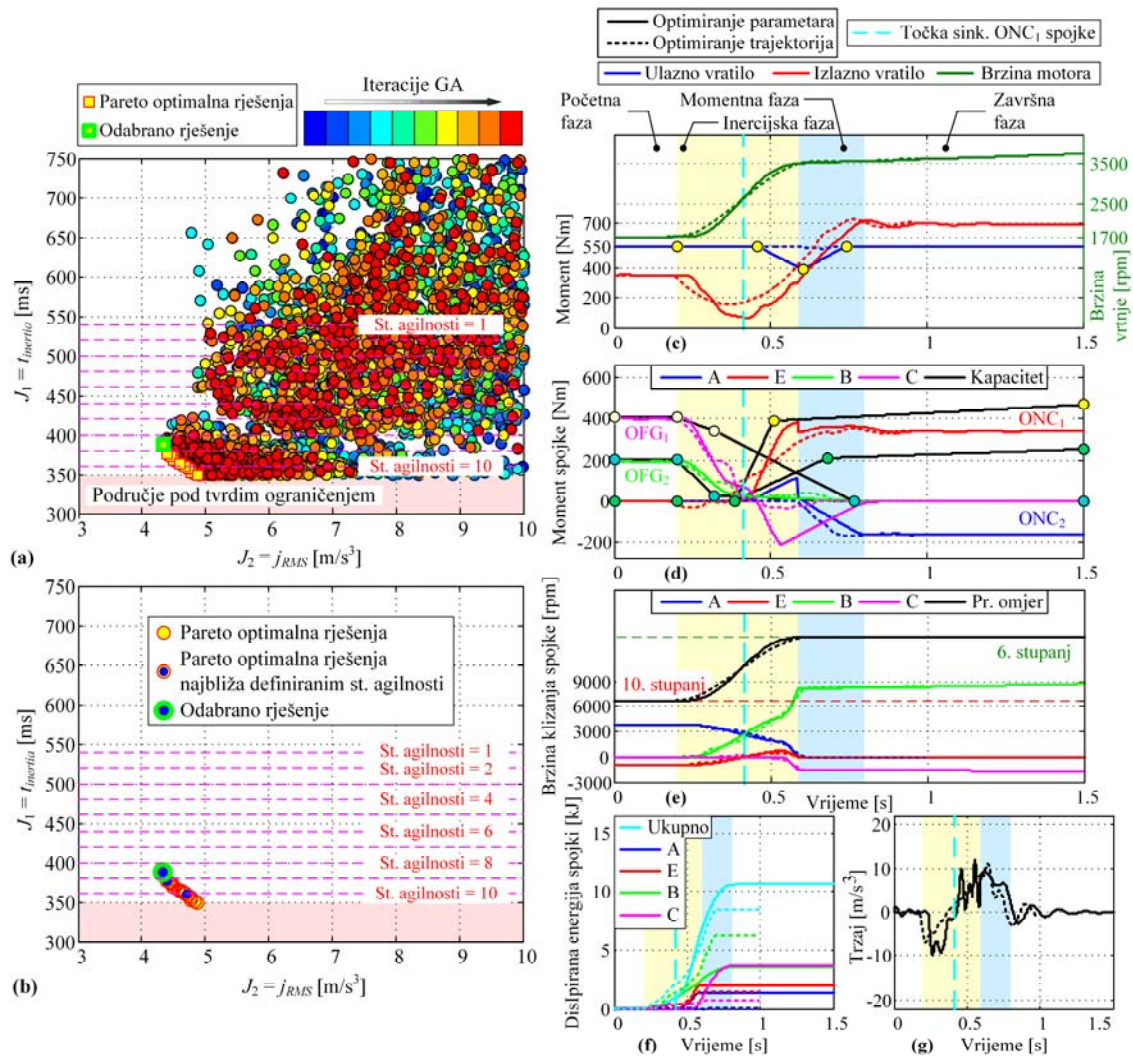
Slika 7-3a prikazuje indekse performansi dane u J_1 - J_2 ravnini, gdje oni formiraju Pareto frontu. Za prezentaciju rezultata koristi se prikaz koji je prethodno uveden u poglavlju 6. Optimalni odziv za odabranu točku s Pareto fronte (točka sa zelenim obrubom na slici 7-3b), prikazan na slici 7-3d upućuje na to da bi se kapacitet momenta OFG₂ spojke trebao spustiti na vrijednost bliskoj nuli u kratkom vremenskom intervalu (u prvih 100 ms) nakon iniciranja promjene stupnja prijenosa. Nakon toga, njezin kapacitet momenta se linearno smanjuje i naposljetku doseže nulu na kraju promjene stupnja prijenosa (u $t \cong 0.77 \text{ s}$). Kapacitet momenta OFG₁ spojke je veći od njenog stvarnog momenta u prvom dijelu inercijske faze (ona je zatvorena, a njen moment pada zbog pada momenta OFG₂ spojke, slika 7-3d). Jednom kada ONC₁ spojka dosegne svoju točku sinkronizacije (označeno vertikalnom isprekidanom svijetlo plavom linijom; slika 7-3e), ona počinje prenositi negativni moment u drugom dijelu inercijske faze (slika 7-3d). Karakteristike OFG₁ spojke su takve da se njen moment ne prenosi na ulazno vratilo transmisije, tj. ona ne utječe na promjenu ulazne brzine vrtnje (v. sliku 5-14). S druge strane, prenošenjem negativnog momenta na izlazno vratilo, ona usporava rast izlaznog momenta do kojeg dolazi zbog naglog povećanja (kapaciteta) momenta ONC₁ spojke. Kapacitet momenta obje uključne spojke počinje rasti približno u istom vremenskom trenutku (uočiti kako to nije nametnuto parametrizacijom upravljačkih profila, usp. slike 7-1a i 7-3d), koji odgovara točki sinkronizacije ONC₁ spojke. Stvarni momenti uključenih spojki prate rast njihovih kapaciteta momenata te se one konačno zatvaraju u vremenskom trenutku $t \cong 0.6 \text{ s}$ (slika 7-3e). Moment motora reducira se uskoro nakon što ONC₁ spojka dosegne svoju točku sinkronizacije

7. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom

(slika 7-3c) kako bi se ne taj način oblikovao odziv prijenosnog omjera brzine u završnom dijelu inercijske faze (slika 7-3e). U vremenskom trenutku u kojem se uključne spojke zatvaraju, moment motora započinje rast prema početnoj vrijednosti od 550 Nm (slika 7-3c). U isto vrijeme, kapacitet momenta OFG₂ spojke reducira se na nulu, čime se dovršava promjena zadanog stupnja prijenosa (slika 7-3d). Valja napomenuti kako momentna faza (a time i promjena stupnja prijenosa) završava u trenutku u kojem su dovršena upravljačka djelovanja isključnih spojki i motora.

Temeljem usporednih optimalnih odziva pogona prikazanih na desnoj strani slike 7-3, može se zaključiti kako su rezultati dobiveni parametarskim optimiranjem bliski rezultatima dobivenim primjenom općenitijeg pristupa optimiranja upravljačkih trajektorija i Strategije 1. To posebno vrijedi za odzive brzine vrtnje ulaznog vratila, prijenosnog omjera brzina i brzina klizanja spojki. Određena razlika može se uočiti u odzivu izlaznog momenta, gdje je pad momenta na samom početku promjene stupnja prijenosa zakašnjen u odzivu dobivenom parametarskim optimiranjem zbog dinamike aktuatora (koja nije uključena kod optimiranja trajektorija). Osim toga, rupa momenta je dublja i odziv izlaznog momenta je ponešto grublji u slučaju parametarskog optimiranja (v. također odziv trzaja vozila), zbog korištenja jednostavnijih (po odsječcima linearnih) upravljačkih profila. Unatoč tome, ostvarive performanse su vrlo blizu onima dobivenim optimiranjem upravljačkih trajektorija, uz povećanje RMS indeksa trzaja od samo 15%. U isto vrijeme, gubitak energije u spojkama povećan je za 25%.

7. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom



Slika 7-3. Rezultati optimiranja parametara za 10-6 silaznu promjenu ($\tau_e = 550$ Nm, *Strategija A*): (a) evolucija rješenja tijekom brojnih iteracija genetskog algoritma uključujući Pareto frontu, (b) Pareto optimalna rješenja povezana s definiranim stupnjevima agilnosti, (c)-(g) odziv pogona vozila za odabrano rješenje ($t_{inertia} = 388$ ms; pune linije), uključujući usporedbu s odzivom dobivenim primjenom optimiranja upravljačkih trajektorija (isprekidane linije)

7.3.2. Upravljačka strategija B

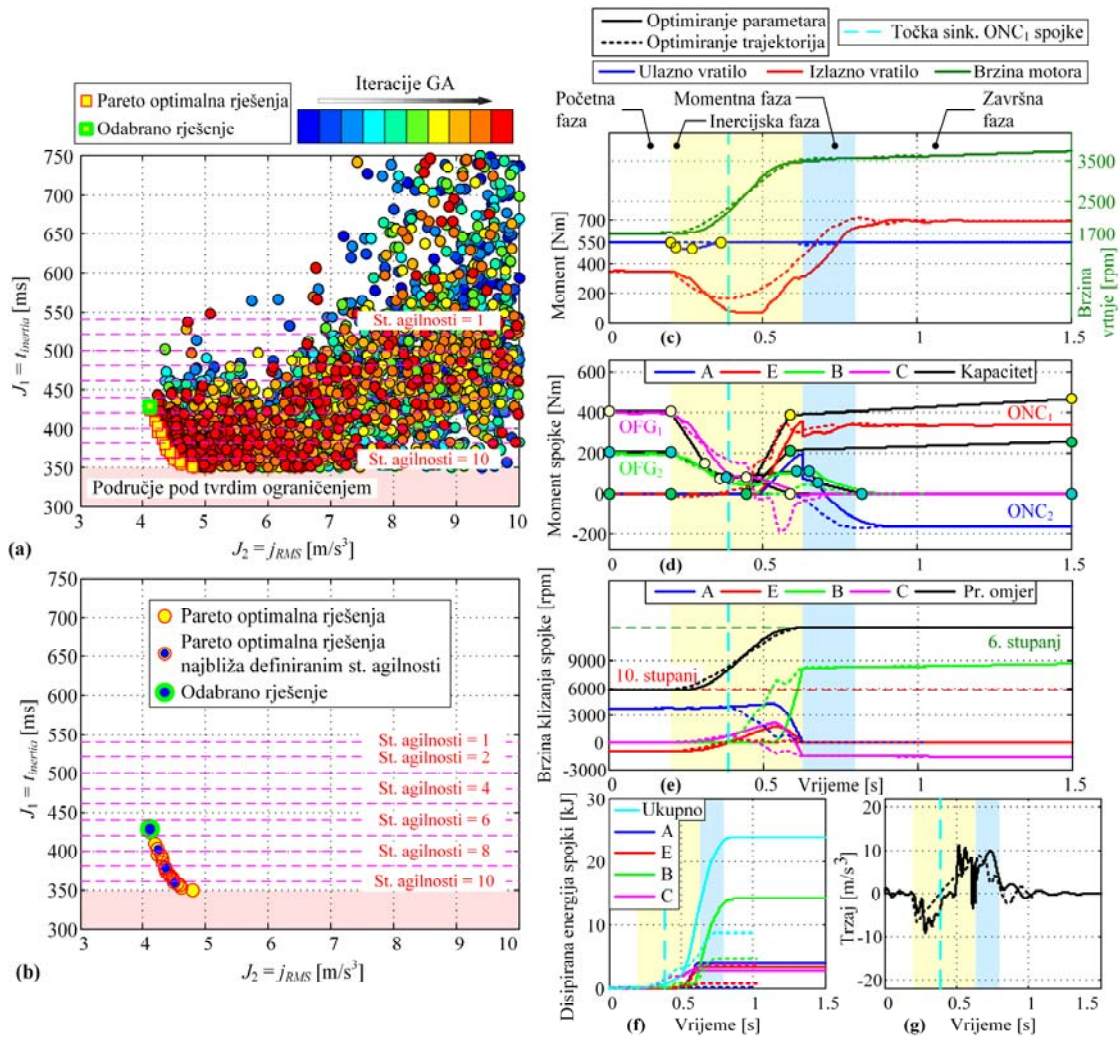
U usporedbi sa Strategijom A, ova općenitija strategija upravljanja generira Pareto optimalna rješenja u širem rasponu trajanja inercijske faze (usp. slike 7-4a i 7-3a). Tako je ovdje Pareto fronta rastegnuta u smjeru y-osi sve do vremena trajanja inercijske faze od 450 ms (slika 7-4a).

7. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom

Pareto fronta je pomaknuta blago u lijevo u usporedbi s onom sa slike 7-3a, što upućuje na to da se ista 10-6 promjena (tj. s jednakim trajanjem inercijske faze) može izvesti korištenjem Strategije B uz viši stupanj udobnosti (uz manji RMS indeks trzaja).

Budući da isključne spojke imaju više fleksibilnosti u oblikovanju upravljačkih profila, njihovi kapaciteti momenta reduciraju se manje agresivno nego u Strategiji A (usp. slike 7-4d i 7-3d). Odziv prijenosnog omjera brzina oblikuje se korištenjem OFG₁ i OFG₂ spojki, čiji se momenti moduliraju kroz čitavu inercijsku fazu (slika 7-4d). Uključne spojke ukapčaju se u vremenskom trenutku u kojem kapacitet momenta OFG₁ spojke počinje padati prema nuli. Budući da je oblikovanje prijenosnog omjera brzina ostvareno korištenjem OFG₂ spojke, mogućnost reduciranja momenta motora gotovo se i ne koristi u ovoj upravljačkoj strategiji (slika 7-4a). Valja napomenuti kako je moduliranje OFG₂ spojke na kraju promjene stupnja prijenosa plaćeno znatno većim ukupnim gubicima spojki (sve zajedno, za vrijeme trajanja promjene stupnja prijenosa u spojkama se disipira 24 kJ energije, u odnosu na 9 kJ u slučaju optimiranja upravljačkih trajektorija; usp. odzive na slici 7-4f). U usporedbi s rezultatima optimiranja upravljačkih trajektorija (dobiveni uz primjenu Strategije 1), RMS indeks trzaja vozila povećan je za 22% (za promjenu s istim trajanjem inercijske faze).

7. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom



Slika 7-4. Rezultati optimiranja parametara za 10-6 silaznu promjenu ($\tau_e = 550 \text{ Nm}$, *Strategija B*): (a) evolucija rješenja tijekom brojnih iteracija genetskog algoritma uključujući Pareto frontu, (b) Pareto optimalna rješenja povezana s definiranim stupnjevima agilnosti, (c)-(g) odziv pogona vozila za odabrano rješenje ($t_{inertia} = 429 \text{ ms}$; pune linije), uključujući usporedbu s odzivom dobivenim primjenom optimiranja upravljačkih trajektorija (isprekidane linije)

7.3.3. Upravljačka strategija C

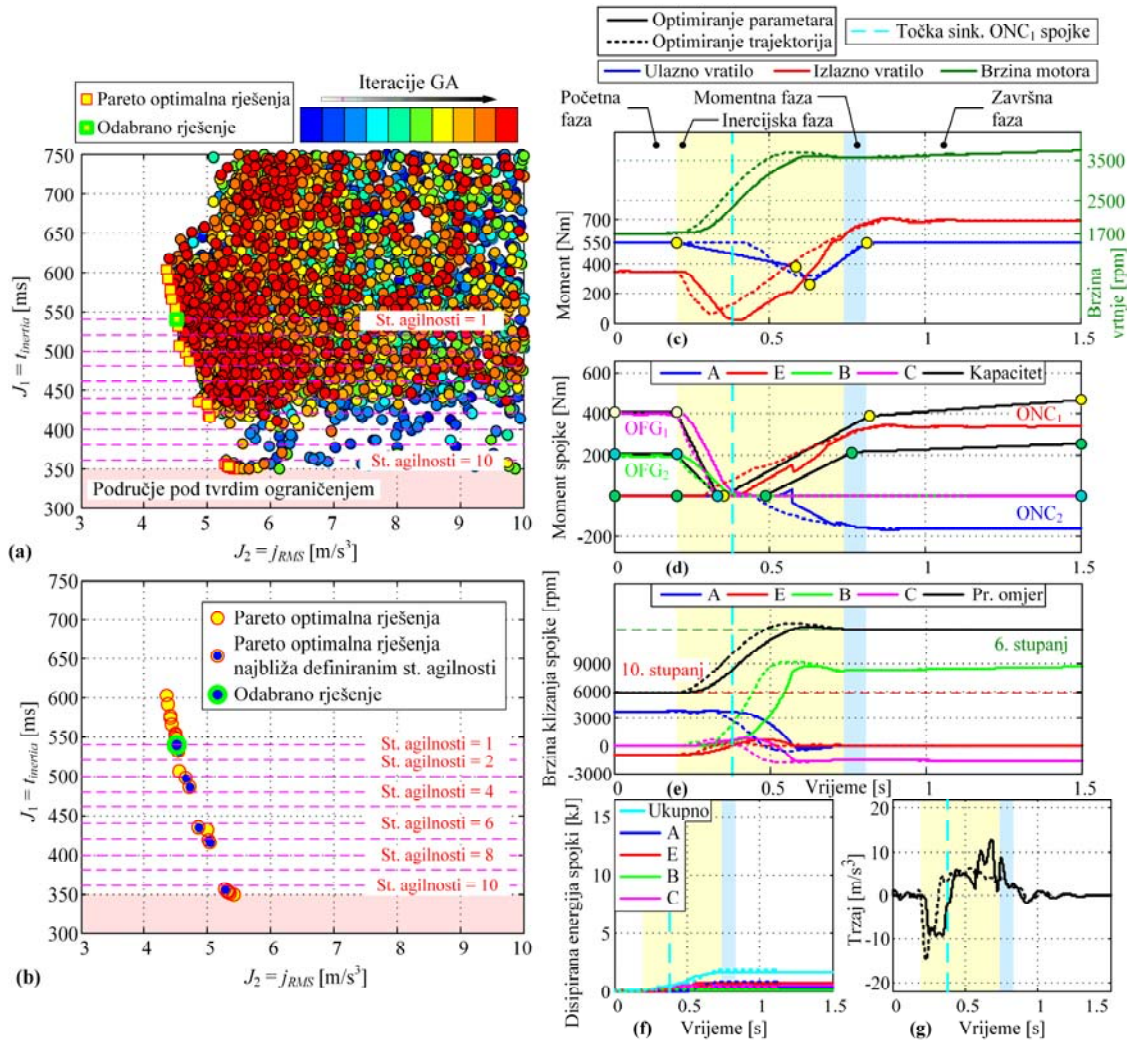
Korištenjem ove upravljačke strategije s najnižim stupnjem općenitosti (za koju su upravljački profili definirani s najmanjim brojem parametara), Pareto optimalna rješenja generiraju se duž cijelog ciljanog područja trajanja inercijske faze (slike 7-5a i 7-5b). Ostvarive performanse za

7. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom

brze promjene, karakterizirane trajanjem inercijske faze ispod 450 ms, su gore od onih za strategije A i B (Pareto fronta je ponešto pomaknuta u desno, tj. u područje karakterizirano većim RMS indeksima trzaja, usp. slike 7-5b, 7-4b i 7-3b).

Vremenski odzivi na slici 7-5 ilustriraju jednostavnost i djelotvornost Strategije C. Kapacitet momenta obiju isključnih spojki žustro se i linearno spušta na nulu neposredno prije točke sinkronizacije ONC_1 spojke (slika 7-5d). Kapacitet momenta ONC_1 spojke počinje rasti kratko prije dostizanja svoje točke sinkronizacije, kako bi se kompenziralo kašnjenje u razvoju momenta (zbog dinamike aktuatora). Još uvijek proklizavajuća spojka ONC_2 počinje se ukapčati u $t \cong 0.5$ s, te se njen kapacitet momenta drži nešto ispod njenog momenta držanja sve do kraja inercijske faze ($t \cong 0.74$ s, v. slike 7-5d i 7-5e). Moment motora postupno se reducira s ukapčanjem uključenih spojki. Neposredno prije kraja inercijske faze, moment motora počinje rasti s većim gradijentom te se vraća na početnu vrijednost od 550 Nm (slika 7-5c). Oblik trajektorije izlaznog momenta sličan je onome dobivenom optimiranjem upravljačkih trajektorija i Strategije 4, ali je pomaknut u vremenu zbog kašnjenja aktuatora. Također, RMS indeks trzaja vozila povećan je za 51% u usporedbi s rezultatima optimiranja upravljačkih trajektorija. U isto vrijeme, energija disipirana u spojkama smanjena je za 9% i iznosi tek dio vrijednosti gubitaka energije dobivenih za strategije A i B (samo 1.61 kJ), što se objašnjava kratkom aktivnošću isključnih spojki (one se ne moduliraju u drugom dijelu inercijske faze).

7. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom



Slika 7-5. Rezultati optimiranja parametara za 10-6 silaznu promjenu ($\tau_e = 550$ Nm, Strategija C): (a) evolucija rješenja tijekom brojnih iteracija genetskog algoritma uključujući Pareto frontu, (b) Pareto optimalna rješenja povezana s definiranim stupnjevima agilnosti, (c)-(g) odziv pogona vozila za odabrano rješenje ($t_{inertia} = 540$ ms; pune linije), uključujući usporedbu s odzivom dobivenim primjenom optimiranja upravljačkih trajektorija (isprekidane linije)

7.3.4. Upravljačka strategija D

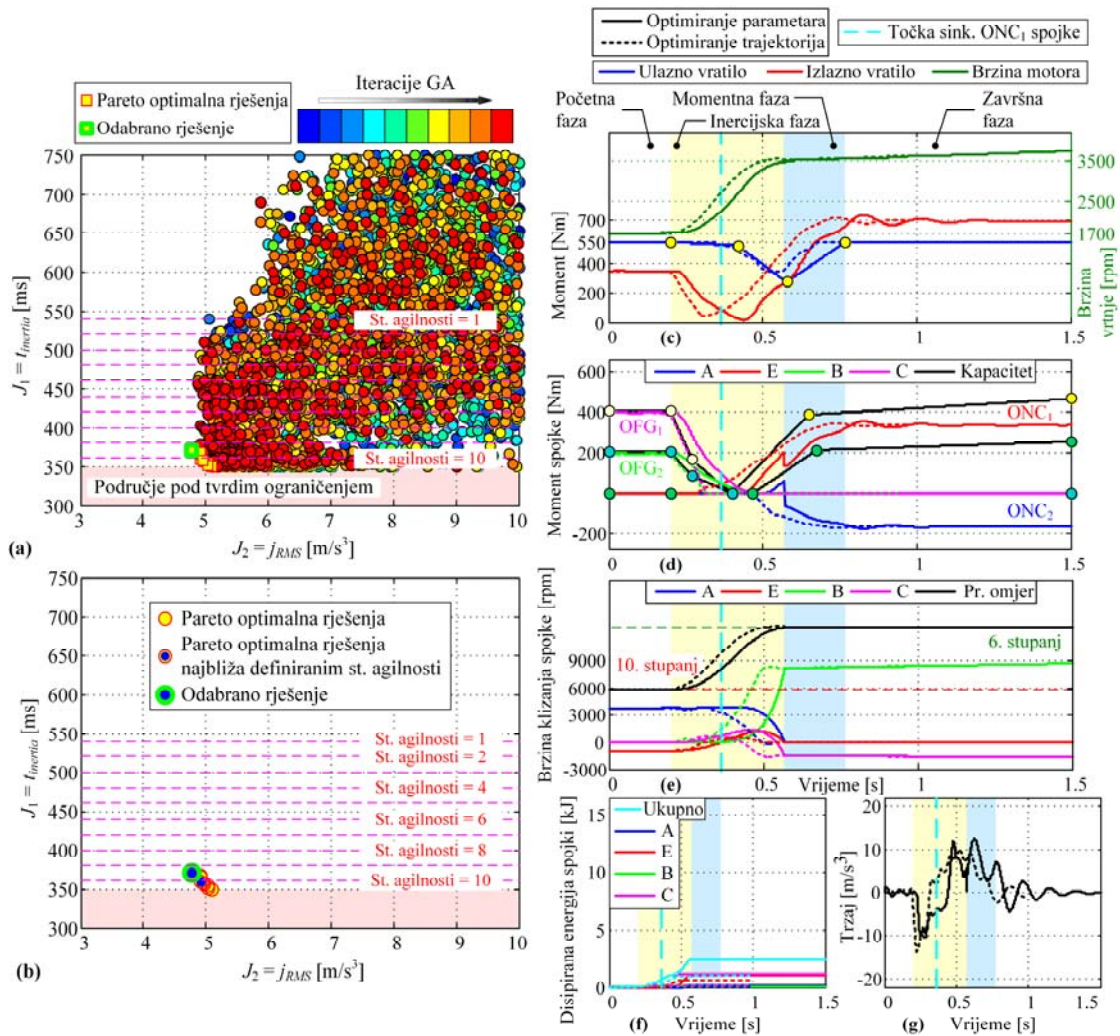
Pareto optimalna rješenja dobivena korištenjem ove upravljačke strategije grupirana su u uskom području karakteriziranom trajanjem inercijske faze od oko 360 ms (slika 7-6a). To je zbog toga što se vremenski trenutak ukapčanja ONC₁ spojke ne može izabrati neovisno, već je vezan uz

7. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom

vremenski trenutak u kojem kapacitet momenta isključnih spojki pada na nulu (slika 7-1d). Ostvarive performanse za brze promjene slične su onima dobivenim za složeniju Strategiju B (u smislu udobnosti promjene; usp. slike 7-6 i 7-4).

U usporedbi sa Strategijom C, isključne spojke otpuštaju se manje agresivno, što rezultira umjerenijim padom izlaznog momenta u prvom dijelu inercijske faze (usp. slike 7-6c i 7-5c). To se omogućilo dodavanjem još jedne točke loma u upravljački profil isključnih spojki (usp. slike 7-1d i 7-1c). Spojka ONC_1 počinje se ukapčati prije spojke ONC_2 tako da se obje spojke sinkroniziraju istovremeno na kraju inercijske faze ($t = 0.57$ s, slika 7-6e). Dobiveni profil redukcije momenta motora vrlo je sličan onome dobivenom primjenom optimiranja upravljačkih trajektorija i Strategije 4 (slika 7-6c). Nakon što je ONC_1 spojka dosegla svoju točku sinkronizacije, moment motora spušta se sve do kraja inercijske faze, time oblikujući promjenu prijenosnog omjera brzina u završnoj fazi promjene. U momentnoj fazi, moment motora počinje rasti prema polaznoj vrijednosti od 550 Nm (slika 7-6c). Performanse promjene ostvarene parametarskim optimiranjem vrlo su bliske onima dobivenima primjenom optimiranja upravljačkih trajektorija, s povećanjem RMS indeksa trzaja od samo 3%. Energija disipirana u spojkama povećana je za 145% u usporedbi s rezultatima optimiranja upravljačkih trajektorija. Ipak, apsolutna vrijednost gubitaka energije u spojkama je i dalje vrlo mala ($E_{loss} = 2.4$ kJ).

7. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom



Slika 7-6. Rezultati optimiranja parametara za 10-6 silaznu promjenu ($\tau_e = 550 \text{ Nm}$, Strategija D): (a) evolucija rješenja tijekom brojnih iteracija genetskog algoritma uključujući Pareto frontu, (b) Pareto optimalna rješenja povezana s definiranim stupnjevima agilnosti, (c)-(g) odziv pogona vozila za odabrano rješenje ($t_{inertia} = 370 \text{ ms}$; pune linije), uključujući usporedbu s odzivom dobivenim primjenom optimiranja upravljačkih trajektorija (isprekidane linije)

7.3.5. Upravljačka strategija E

Performanse ostvarene primjenom Strategije E značajno su gore u odnosu na one dobivene dosad predstavljenim upravljačkim strategijama. RMS indeks trzaja je veći od 7 m/s^3 za sve Pareto optimalne točke, dok je ta vrijednost tipično bila ispod 5 m/s^3 za ostale upravljačke

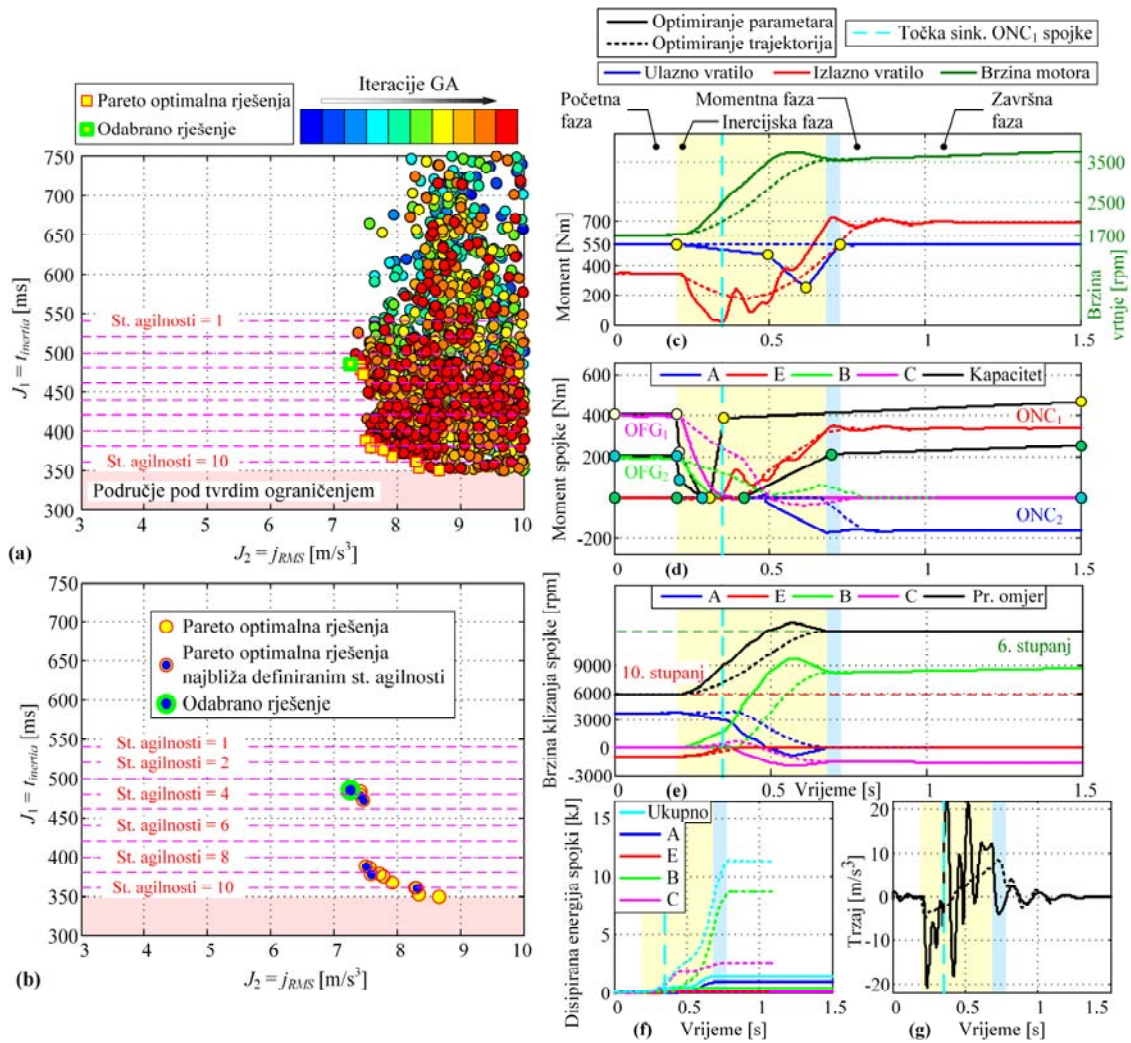
7. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom

strategije. Osim toga, Pareto optimalne točke su diskontinuirano raspoređene duž Pareto fronte (slika 7-7b), vjerojatno zbog prirode dinamičkog procesa.

Vremenski odzivi prikazani na desnoj strani slike 7-7 ukazuju na to da se obje isključne spojke brzo otpuštaju u prvom dijelu inercijske faze (prije točke sinkronizacije ONC_1 spojke), što predstavlja upravljačko djelovanje koje je kvalitativno slično onome već viđenom kod Strategije C (usp. slike 7-7d i 7-5d). Kapacitet momenta ONC_1 spojke naglo se povećava u točki sinkronizacije te spojke na visoku vrijednost od 400 Nm, čime se osigurava njeno zatvaranje (slika 7-7d). Takvo upravljačko djelovanje, međutim, pobuđuje oscilacije uslijed torzijskih vibracija, koje se mogu uočiti u odzivu izlaznog momenta (slika 7-7c). Posljedično, dobiva se visoko oscilatoran odziv trzaja vozila (slika 7-7f), koji negativno utječe na udobnost vožnje. Druga uključna spojka počinje prenositi moment kada dosegne svoju točku sinkronizacije. Momentom motora upravlja se na način koji je već viđen u prethodnim upravljačkim strategijama: on se smanjuje prema kraju inercijske faze te se podiže natrag na polaznu vrijednost tijekom faze prijenosa momenta (slika 7-7c).

Iako se upravljačka strategija za koju se ONC_1 spojka mora u potpunosti ukopčati u prvom sinkronizacijskoj točki pokazala konkurentnom u pristupu u kojem se optimiraju upravljačke trajektorije, rezultati parametarskog optimiranja prikazani u ovom odjeljku sugeriraju drugačije. Naime, vrijednost RMS indeksa trzaja vozila povećana je za 130% u usporedbi s rezultatima optimiranja trajektorija. To se objašnjava činjenicom da “meko” ukapčanje ONC_1 spojke zahtijeva blisku koordinaciju većeg broja aktuatora koja se ne može ostvariti relativno grubim po dijelovima linearnim upravljačkim profilima.

7. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom



Slika 7-7. Rezultati optimiranja parametara za 10-6 silaznu promjenu ($\tau_e = 550$ Nm, Strategija E): (a) evolucija rješenja tijekom brojnih iteracija genetskog algoritma uključujući Pareto frontu, (b) Pareto optimalna rješenja povezana s definiranim stupnjevima agilnosti, (c)-(g) odziv pogona vozila za odabrano rješenje ($t_{inertia} = 484$ ms; pune linije), uključujući usporedbu s odzivom dobivenim primjenom optimiranja upravljačkih trajektorija (isprekidane linije)

7.4. Vrednovanje predloženih upravljačkih strategija

Ovo potpoglavlje vrednuje predložene strategije upravljanja primjenjujući ih u različitim scenarijima promjene stupnja prijenosa (za različite DTS silazne promjene uz profile ulaznog momenta različitih oblika i magnituda). Rezultati parametarskog optimiranja dobiveni za

upravljačke strategije A do E nadalje se kvantitativno uspoređuju s konačnim ciljem predlaganja najprikladnije strategije upravljanja DTS-om.

7.4.1. 10-6 silazna promjena, konstantan i visok ulazni moment

Slika 7-8 prikazuje indekse performansi 10-6 promjene za različite strategije upravljanja i za konstantan i visok ulazni moment od 550 Nm. Rezultati optimiranja prokazuju kako Strategija B pruža najbolje performanse u smislu definiranih kriterija optimiranja (trajanje promjene i udobnost promjene). Ovdje se valja prisjetiti kako je Strategija B ujedno i najsloženija, tj. definirana je s najvećim brojem parametara te kao takva pruža najviše fleksibilnosti u oblikovanju upravljačkih profila promjene stupnja prijenosa. S druge strane, Strategija D karakterizirana je značajno manjim brojem parametara (12 u odnosu na 21 kod Strategije B), a i dalje pruža vrlo kompetitivne performanse za brze promjene. Performanse Strategije A (13 upravljačkih parametara) približavaju se onima postignutima primjenom najopćenitije strategije upravljanja B (v. uvećani prikaz na slici 7-8b). Strategija C pruža nešto lošije performanse u usporedbi sa strategijama A, B i D, ali je, s druge strane, definirana s najmanjim brojem parametara ($n_{ctrl} = 10$). Strategija E, u kojoj se ONC_1 spojka treba zatvoriti u svojoj točki sinkronizacije, pruža inferiorne performanse u vidu udobnosti promjene stupnja prijenosa.

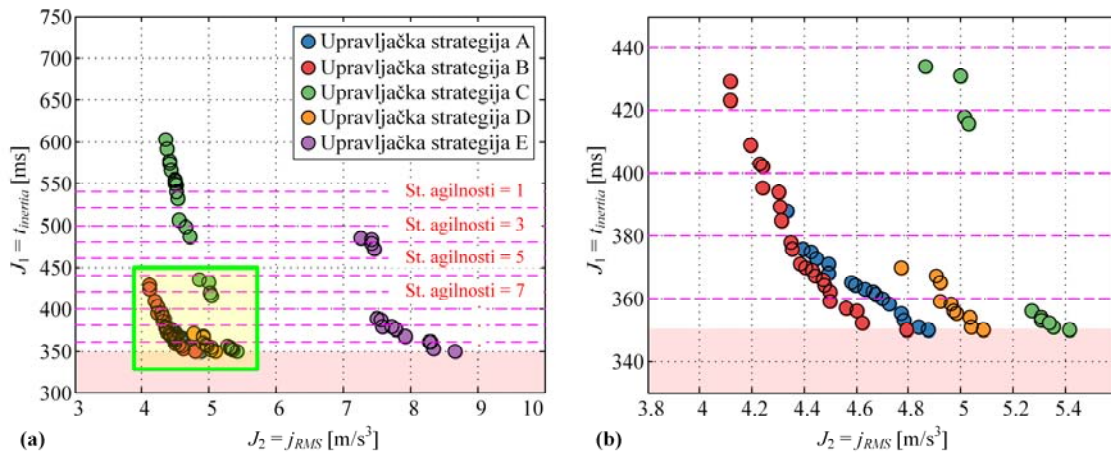
Tablica 7-1 prikazuje usporedne indekse performansi za dvije krajnje točke Pareto fronte (unutar područja od interesa naznačenog horizontalnim ljubičastim linijama na slici 7-8). Tablica također uključuje indeks performansi koji se odnosi na energiju disipiranu u spojkama. Relativne vrijednosti dane u zagradama pokazuju koliko su vrijednosti RMS trzaja i gubitaka spojki povećane u usporedbi s odgovarajućim rezultatima optimiranja upravljačkih trajektorija. Na temelju rezultata prikazanih u tablici 7-1 mogu se izvesti sljedeća opažanja:

- Indeksi performansi dobiveni primjenom Strategije A blizu su onima dobivenima primjenom optimiranja upravljačkih trajektorija. RMS indeks trzaja povećava se za ne više od 18%, dok se energija disipirana u spojkama povećava za najviše 25%.
- Strategija B može pružiti superiorne performanse u smislu udobnosti vožnje (RMS indeks trzaja povećava se za 9.7% za najbržu promjenu u usporedbi s rezultatima optimiranja upravljačkih trajektorija). To je, međutim, plaćeno znatno većim gubicima

7. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom

u spojkama u toku promjene, koji mogu biti povećani za više od 200% u usporedbi s rezultatima optimiranja upravljačkih trajektorija.

- Strategija C može približiti performanse brzih promjena onima dobivenima primjenom pristupa optimiranja upravljačkih trajektorija (razlika u indeksu trzaja vozila je 27.6%), uz smanjenje gubitaka energije u spojkama od oko 80%.
- Slični trendovi mogu se uočiti kod strategije upravljanja D, s indeksom udobnosti promjene koji se još više približava referentnom mjerilu postavljenom općim optimiranjem trajektorija. Gubici energije u spojkama reducirani su za oko 65% u usporedbi s rezultatima optimiranja trajektorija.
- Konačno, Strategija E pruža najgore performanse, s dvostrukim povećanjem indeksa trzaja vozila.



Slika 7-8. Usporedba Pareto fronti dobivenih primjenom različitih parametarski optimiranih DTS upravljačkih strategija (10-6 silazna promjena, $\tau_e = 550$ Nm): (a) cjeloviti graf i (b) uvećani prikaz odsječka istaknutog na (a)

Tablica 7-1. Usporedba vrijednosti indeksa trzaja vozila i energije disipirane u spojkama za 10-6 silaznu promjenu za različita trajanja inercijske faze i za različite upravljačke strategije (vrijednosti u zagradama daju postotne promjene u odnosu na rezultate optimiranja upravljačkih varijabli)

Strategija upravljanja	Stupanj agilnosti	$t_{inertia}$ [ms]	j_{RMS} [m/s ³] (tijekom vremenskog intervala [0 t_f])	E_{loss} [kJ]
A	8	388	5.2057 (+15.1%)	10.627 (+25.4%)
	10	360	5.6475 (+18%)	8.7151 (+11.4%)
B	6	429	4.9469 (+21.7%)	24.0364 (+169.4%)
	10	359	5.4105 (+9.7%)	20.38 (+235%)
C	1	540	5.4199 (+70.4%)	1.6136 (-85.8%)
	10	356	6.3307 (+27.6%)	1.223 (-79.4%)
D	9	370	5.7277 (+18.6%)	2.4317 (-68.5%)
	10	359	5.9119 (+19.9%)	2.146 (-64.7%)
E	3	484	8.7609 (+137.3%)	1.3425 (-88.6%)
	10	360	9.9882 (+108.8%)	0.53447 (-93.2%)

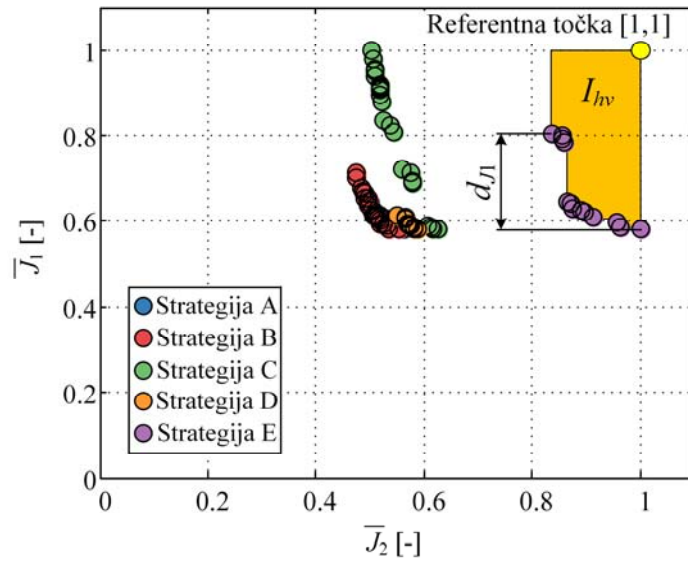
7.4.2. Ostale promjene s dvostrukim prijelazom i drugi profili ulaznog momenta

Kako bi se provelo završno vrednovanje predloženih DTS upravljačkih strategija, parametarsko optimiranje provedeno je za: (i) četiri DTS silazne promjene (10-6, 8-5, 9-4 i 5-2); (ii) tri profila momenta motora (konstantan i umjeren moment, konstantan i visok moment, te linearno rastući moment s niske na visoku vrijednost); i (iii) sve prethodno uvedene upravljačke strategije (Strategija A, B, C, D i E). Postupak optimiranja za svaki scenarij (od ukupno $4 \times 3 \times 5 = 60$ scenarija) rezultira jednom Pareto frontom.

7. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom

S ciljem vrednovanja Pareto fronti dobivenih za različite scenarije promjene stupnja prijenosa, tj. vrednovanja predloženih upravljačkih strategija, razmatrat će se četiri pokazatelja performansi. Kako bi se konzistentno izračunali pokazatelji performansi, sve Pareto fronte prikazane na jednom grafu (pet fronti za pet upravljačkih strategija, v. npr. sliku 7-8) su normirane s obzirom na najveću vrijednost svakog kriterija optimiranja za razmatrani scenarij (za sliku 7-8 to su vrijednosti 603 ms i 8.68 m/s³). Na taj način, sve normirane Pareto optimalne točke smještaju se u područje kvadrata razapetog točkama (0, 0) i (1, 1) (slika 7-9). Prvi pokazatelj performansi je **hipervolumni pokazatelj** (engl. *hypervolume indicator*), I_{hv} , predložen u radu [87]. Pokazatelj I_{hv} mjeri volumen kriterijskog prostora koji je izdominiran točkama Pareto fronte. U konkretnom slučaju 2D Pareto fronte, hipervolumen se reducira na hiperpovršinu omeđenu Pareto frontom i korisnički-definiranom referentnom točkom (ovdje, [1,1] je uzeta kao referentna točka; v. sliku 7-9 i usp. sliku 7-8). Što je veća vrijednost pokazatelja I_{hv} , to je set rješenja bolji, tj. bolja je pripadajuća upravljačka strategija.

Drugi pokazatelj performansi je **učinkovitost promjene**, η_{sh} , koja je definirana kao inverzna srednja vrijednost energije disipirane u spojkaama za sve točke Pareto fronte. Treći pokazatelj performansi je **udaljenost između dvije krajnje točke na Pareto fronti** po J_1 kriteriju (udaljenost duž y-osi, slika 7-9). Što je veća vrijednost ovog pokazatelja označenog kao d_{J1} , veća je razapetost Pareto fronte u smislu trajanja promjene stupnja prijenosa, tj. korisnik ima više fleksibilnosti u odabiru stupnja agilnosti promjene stupnja prijenosa. Konačno, četvrti pokazatelj rangira upravljačke strategije uzimajući u obzir **jednostavnost pripadajućih upravljačkih profila i srodnih značajki** koje ih čine više ili manje prikladnima za implementaciju. Nakon dobivanja pokazatelja performansi za sve razmatrane scenarije promjene stupnja prijenosa, njihove se vrijednosti normiraju s obzirom na najveću vrijednost pojedinog pokazatelja unutar pojedinog scenarija (tako je normirana vrijednost pokazatelja za najbolju strategiju u tom pokazatelju jednaka 1). Normirani pokazatelj gubitaka energije naposljetku se invertira kako bi dao normirani indikator učinkovitosti promjene (najbolja strategija ima normiranu učinkovitost 1).



Slika 7-9. Ilustracija hipervolumnnog pokazatelja i pokazatelja razapetosti Pareto fronte na normiranim Pareto frontama (10-6 silazna promjena, $\tau_e = 550 \text{ Nm}$; usp. sliku 7-8)

Slika 7-10 prikazuje normirane vrijednosti prva tri pokazatelja performansi ($\bar{I}_{hv}$, $\bar{\eta}_{sh}$, $\bar{d}_{J1}$) za različite strategije upravljanja, promjene stupnja prijenosa i profile momenta motora. Tablica 7-2 uključuje prosječne vrijednosti tih pokazatelja za svaku upravljačku strategiju. Predzadnji stupac tablice prikazuje finalni faktor vrednovanja koji je izračunat zbrajanjem vrijednosti triju pokazatelja, dok zadnji stupac prikazuje finalni faktor vrednovanja izračunat uzimajući u obzir sva četiri pokazatelja performansi (tj. u zbroj uključuje i pretežito subjektivni pokazatelj jednostavnosti strategije). Vrijednosti navedene u zagradama odnose se na vrijednosti finalnog faktora vrednovanja izračunate uzimajući u obzir težinske faktore pojedinih pokazatelja, koji su dani u zagradama u drugom retku tablice.

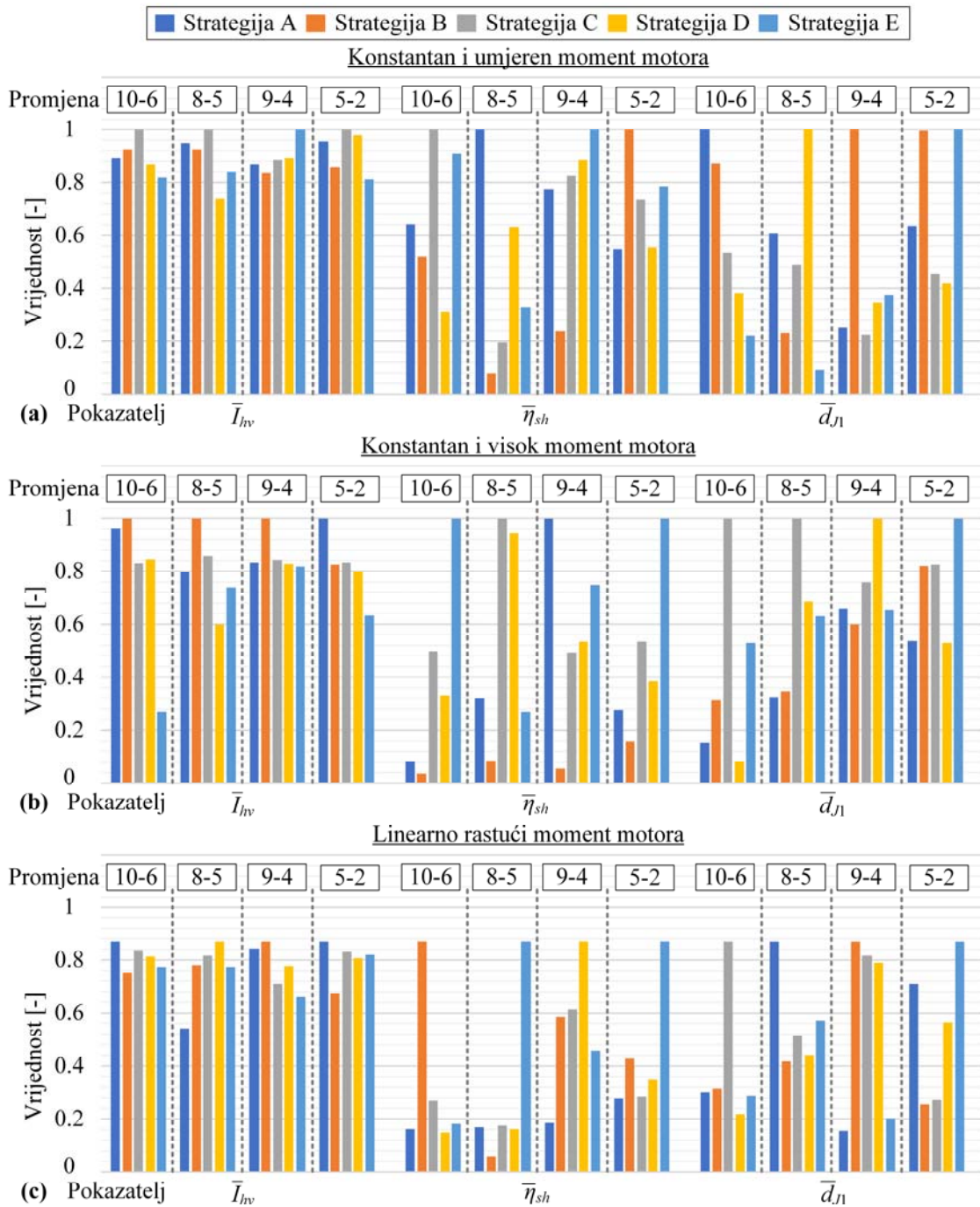
Temeljem rezultata prikazanih na slici 7-10 i tablici 7-2, mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Performanse su općenito prilično ujednačene. Naime, za različite scenarije promjene stupnja prijenosa, različite upravljačke strategije daju najbolje performanse (npr. Strategija C pruža najbolje performanse za 10-6 promjenu i konstantan i umjeren moment motora, dok se ista strategija nije pokazala jednako učinkovitom u izvođenju iste promjene uz linearno rastući moment motora).

7. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom

- Najviše vrijednosti hipervolumnog pokazatelja najčešće se dobivaju za Strategije B i C. S druge strane, Strategija A daje najvišu prosječnu vrijednost tog pokazatelja.
- Analizom pokazatelja učinkovitosti promjene, može se zaključiti da različite upravljačke strategije pružaju najbolje rezultate u različitim scenarijima, s tim da je Strategija C vrlo kompetitivna (slika 7-10), tj. najbolja u prosječnom smislu (tablica 7-2).
- Udaljenost između dvije krajnje točke na Pareto fronti mijenja se ovisno o razmatranom scenariju promjene stupnja prijenosa, no općenito je najveća za Strategije C i B.
- Strategija C karakterizirana je jednostavnim upravljačkim profilima, tj. definirana je s najmanjim brojem parametara ($n_{ctrl} = 10$, slika 7-1). To posebno vrijedi za profile kapaciteta momenta isključnih (OFG) spojki, koji su potpuno linearni (slika 7-1), dok oni imaju kompleksniji (po odsječcima linearan) oblik u drugim strategijama (uključujući povezane poteškoće s promjenom predznaka momenta spojke, npr. u Strategiji B).
- Na temelju finalnih faktora vrednovanja danih u zadnja dva stupca tablice 7-2, može se zaključiti da Strategija C pruža najbolje ukupne performanse, neovisno o tome uzima li se u obzir uglavnom subjektivni pokazatelj jednostavnosti upravljačke strategije ili ne.

7. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom



Slika 7-10. Indeksi performansi promjene stupnja prijenosa i pokazatelj razapetosti Pareto fronte za različite DTS silazne promjene, različite DTS strategije upravljanja i za: (a) konstantan i visok ulazni moment ($\tau_e = 550 \text{ Nm}$), (b) konstantan i umjeren ulazni moment ($\tau_e = 250 \text{ Nm}$) i (c) linearno rastući ulazni moment ($\tau_e = 100 - 550 \text{ Nm}$)

7. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom

Tablica 7-2. Rezultati konačnog vrednovanja DTS upravljačkih strategija dobiveni usrednjavanjem vrijednosti pokazatelja performansi sa slike 7-10 (vrijednosti dane u zagradama odnose se na slučaj postavljanja nejediničnih težinskih faktora na različite pokazatelje performansi)

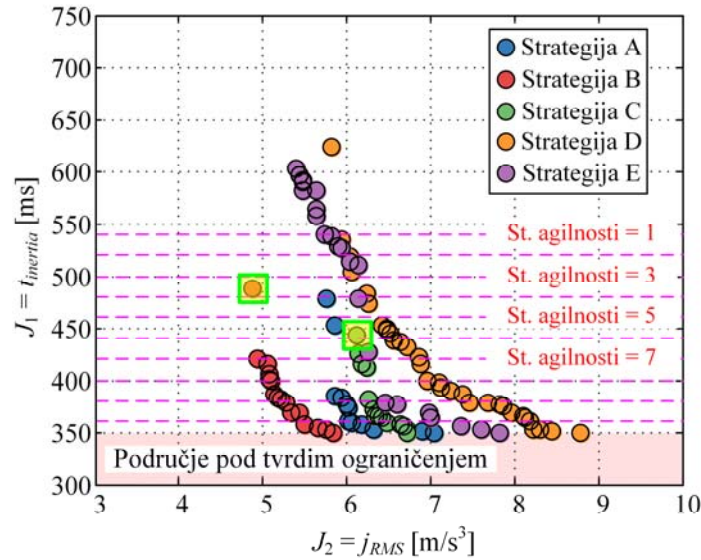
	$\bar{I}_{hv}$	$\bar{\eta}_{sh}$	$\bar{d}_{J1}$	Jednostavnost		Ukupno bez kriterija jednostavnosti	Ukupno s kriterijem jednostavnosti
Težinski faktor	1 (1)	1 (0.4)	1 (0.25)	1 (0.2)			
Strategija A	0.95	0.3	0.5	0.8		1.75 (1.20)	2.55 (1.36)
Strategija B	0.93	0.52	0.51	0.4		1.96 (1.26)	2.36 (1.34)
Strategija C	0.93	0.6	0.85	1		2.38 (1.38)	3.38 (1.58)
Strategija D	0.88	0.27	0.24	0.9		1.39 (1.05)	2.29 (1.23)
Strategija E	0.66	0.71	0.36	0.7		1.73 (1.03)	2.43 (1.17)

7.5. Analiza optimalnog odziva pogona vozila za različite promjene stupnjeva prijenosa i karakteristične scenarije

Odjeljci u nastavku analiziraju karakteristične vremenske odzive za neke od scenarija promjene stupnja prijenosa razmatranih u prethodnom potpoglavlju.

7.5.1. 8-5 silazna promjena, konstantan i visok ulazni moment

Slika 7-11 uspoređuje Pareto fronte dobivene korištenjem različitih upravljačkih strategija za upravljanje 8-5 silaznom promjenom uz konstantan i visok ulazni moment. Najbolje performanse u smislu smanjenog trzaja vozila dobivene su za Strategiju B (usp. sliku 7-10b). Strategija D, koja je dala dobre rezultate u 10-6 DTS-u, u 8-5 DTS-u pruža najlošije performanse promjene stupnja prijenosa (pripadajuća Pareto fronta pomaknuta je u područje karakterizirano visokom neudobnošću promjene).



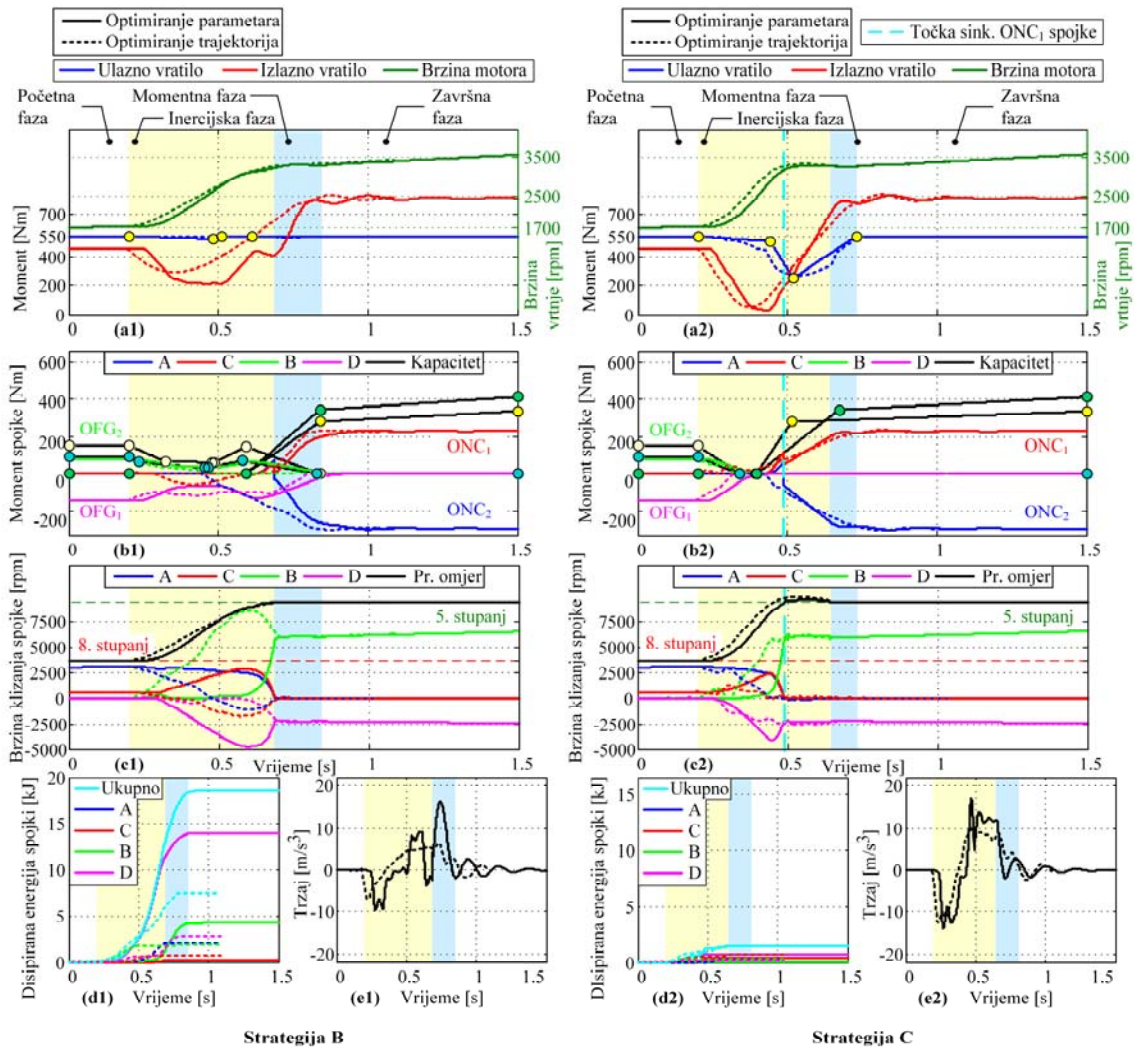
Slika 7-11. Usporedba Pareto fronti dobivenih primjenom različitih DTS upravljačkih strategija (8-5 silazna promjena, $\tau_e = 550 \text{ Nm}$)

Slika 7-12 prikazuje optimalni odziv pogona vozila za dva rješenja koju su na slici 7-11 istaknuta zelenim obrubom. Lijeva strana slike 7-12 prikazuje rezultate parametarskog optimiranja za 8-5 promjenu i upravljačku strategiju B. Upravljački profili isključnih spojki slični su onima koji se koriste u konvencionalnoj silaznoj promjeni s jednostrukim prijelazom (usp. sliku 6-8 i v. [15]), gdje se podizanje ulazne brzine vrtnje na razinu ciljanog stupnja prijenosa ostvaruje kontroliranom modulacijom isključne spojke. Kako se prijenosni omjer brzina vrtnji približava ciljanoj razini (pri kraju inercijske faze), kapacitet momenta isključnih spojki se povećava kako bi se usporila promjena prijenosnog omjera i time oblikovao završni dio trajektorije odziva prijenosnog omjera (slika 7-12c1). Uključne spojke počinju se ukapčati u vremenskom trenutku u kojem se kapacitet momenta isključnih spojki počinje spuštati prema nuli (slika 7-12b1). Mogućnost redukcije momenta motora uopće se ne koristi (slika 7-12a1). Na samom kraju inercijske promjene, može se uočiti propad izlaznog momenta (slika 7-12a1). Iako takvo upravljačko djelovanje uvodi poremećaj u odziv izlaznog moment (i trzaja vozila), ono predstavlja optimalan način (u smislu udobnosti promjene stupnja) izvođenja razmatrane promjene. Konačno, moduliranjem isključnih spojki kroz čitavu inercijsku fazu, u njima se disipira značajna količina energije (E_{loss} je gotovo 20 kJ, slika 7-12d1).

7. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom

Desna strana slike 7-12 prikazuje optimirani odziv pogona za istu 8-5 promjenu i Strategiju C, koja je karakterizirana jednostavnim profilima isključnih spojki. Ova promjena je brža od one prikazane na lijevoj strani slike 7-12 (v. također sliku 7-11), ali i s izraženijom rupom momenta. Nadalje, izlazni moment počinje rapidno rasti u završnom dijelu inercijske faze (slika 7-12a2) zbog žustrog ukapčanja uključenih spojki (slika 7-12b2). Oblikovanje prijenosnog omjera brzina ostvareno je reduciranjem momenta motora u završnom dijelu inercijske faze. Jednom kada se uključne spojke zatvore, moment motora se postupno vraća na polaznu vrijednost u toku momentne faze (slika 7-12a2). Odziv izlaznog momenta je gladak, a energija disipirana u spojkama je malog iznosa (ispod 2 kJ).

7. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom



Slika 7-12. Odziv pogona za 8-5 silaznu promjenu ($\tau_e = 550 \text{ Nm}$) dobiven uz primjenu optimalnih upravljačkih profila za upravljačku Strategiju B (a1)-(e1) i Strategiju C (a2)-(e2) (pune linije), uključujući usporedbu s odzivom pogona dobivenog optimiranjem upravljačkih trajektorija (upravljačka Strategija 1, odnosno 4; isprekidane linije)

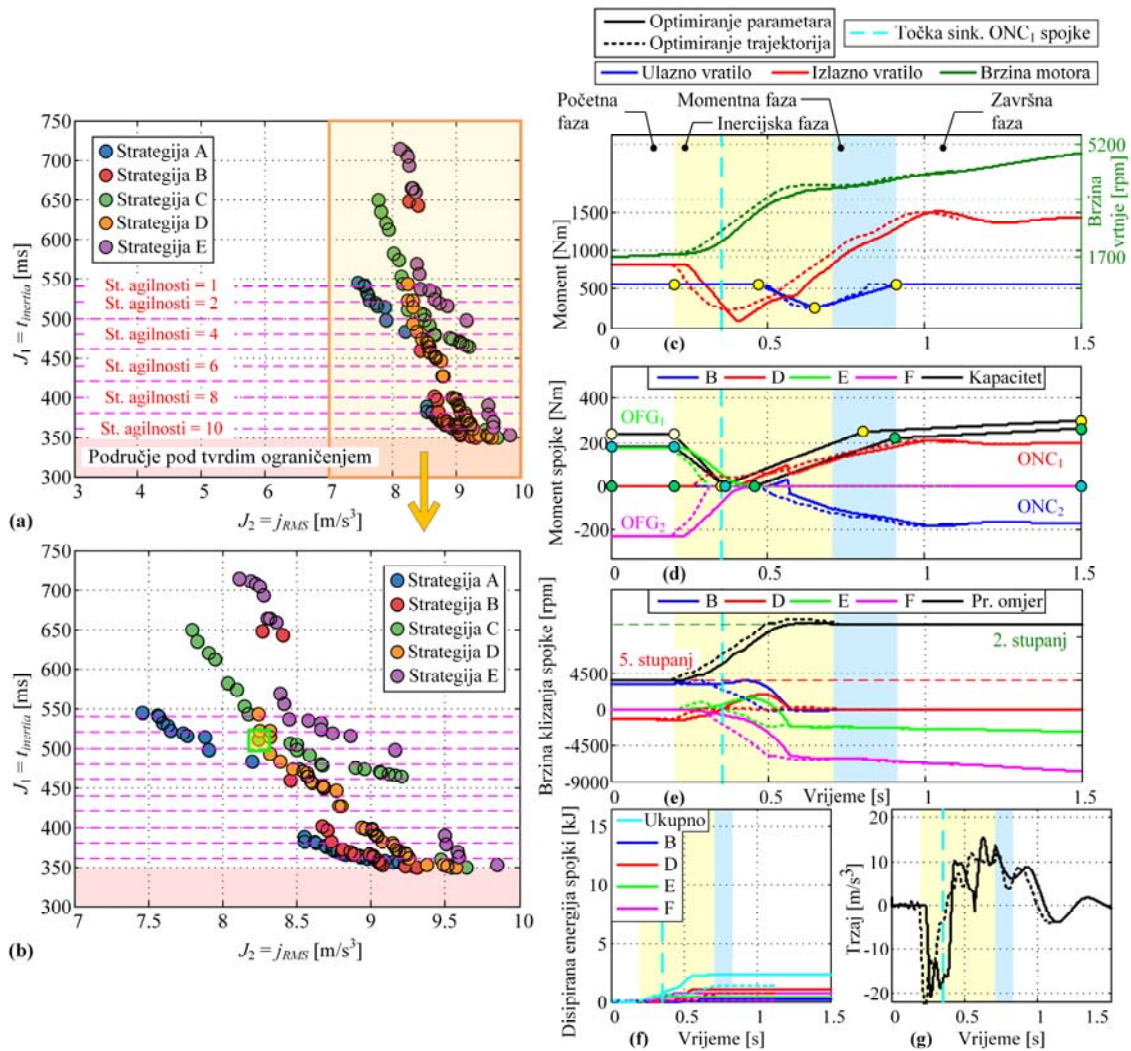
7.5.2. 5-2 silazna promjena, konstantan i visok ulazni moment

Slika 7-13 prikazuje rezultate optimiranja za 5-2 DTS i konstantan i visok moment motora ($\tau_e = 550 \text{ Nm}$). Rezultati optimiranja pokazuju kako sve razmatrane upravljačke strategije daju slične performanse (v. također sliku 7-10b), uz određenu iznimku Strategije A koja omogućuje ostvarivanje nešto boljih performansi za spore promjene stupnja.

7. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom

Desna strana slike 7-13 prikazuje optimalni odziv pogona za korisnički-izabrano rješenje koji se odnosi na Pareto frontu Strategije C i stupanj agilnosti promjene stupnja prijenosa 2. Snažan negativni šiljak u odzivu trzaja vozila na samom početku inercijske faze (slika 7-13g) javlja se zbog brzog otpuštanja isključnih spojki. Kada ONC_1 spojka dosegne svoju točku sinkronizacije, ona se počinje ukapčati i prenositi pozitivni moment. Promjena prijenosnog omjera brzina oblikuje se na kraju inercijske faze uobičajenim upravljačkim obrascem redukcije momenta motora (slika 7-13c). Rezultati parametarskog optimiranja slični su onima dobivenim uporabom pristupa kod kojeg se optimiraju upravljačke trajektorije, sa sljedećim ključnim razlikama: (i) isključne spojke otpuštaju se sporije u pristupu parametarskog optimiranja zbog uključene dinamike aktuatora spojki (slika 7-13d) i (ii) profil izlaznog momenta je manje gladak u slučaju parametarskog optimiranja zbog korištenja grubljih, po odsječcima linearnih profila koji su karakterizirani višestrukim točkama loma (slika 7-13c).

7. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom



Slika 7-13. Rezultati parametarskog optimiranja za 5-2 silaznu promjenu ($\tau_e = 550 \text{ Nm}$): (a) usporedba Pareto fronta dobivenih primjenom različitih DTS strategija upravljanja, (b) uvećani prikaz odsječka istaknutog na (a), (c)-(g) odziv pogona za Strategiju C i odabrano rješenje ($t_{inertia} = 511 \text{ ms}$; pune linije), uključujući usporedbu s odzivom dobivenog optimiranja upravljačkih trajektorija (Strategija 4; isprekidane linije)

7.5.3. 10-6 silazna promjena, linearno rastući ulazni moment

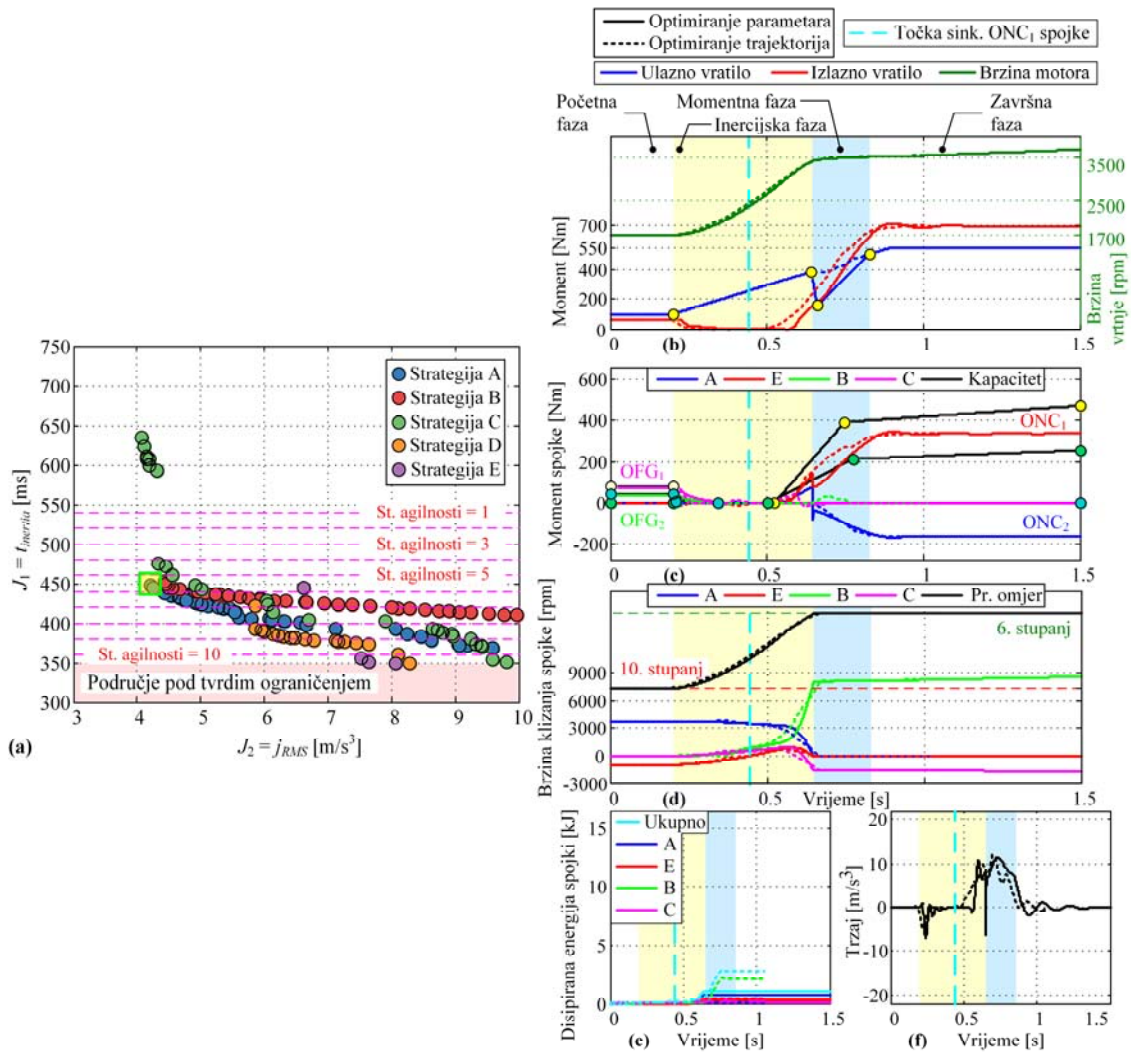
Slika 7-14 prikazuje rezultate optimiranja dobivene za 10-6 promjenu i linearno rastući ulazni moment od 100 Nm do 550 Nm. Optimalni odziv pogona prikazan je za Strategiju A i inercijsku fazu trajanja 448 ms (stupanj agilnosti 5). Usporedba rezultata parametarskog optimiranja i optimiranja trajektorija na slici 7-14 potvrđuje primjenjivost predložene parametrizacije

7. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom

upravljačkih profila u drugačijem scenariju promjene stupnja prijenosa. Ključna razlika između dva skupa optimiranih odziva očituje se u upravljačkom djelovanju redukcije momenta motora. Dok se redukcija momenta motora gotovo i ne koristi u pristupu optimiranja upravljačkih trajektorija, rezultati parametarskog optimiranja sugeriraju naglo rezanje momenta motora na samom kraju inercijske faze i njegovo postupno podizanje tijekom momentne faze (slika 7-14b).

Dobivene Pareto fronte položnije su u usporedbi s onima dobivenim za istu promjenu i konstantan i visok ulazni moment (usp. slike 7-14a i 7-8), što znači da se skraćivanjem trajanja inercijske faze ovdje bitno narušava indeks trzaja vozila. Vrijednost indeksa trzaja općenito je viša za isto trajanje inercijske faze uz linearno rastući ulazni moment. Za Strategije A, B, D i donekle C, Pareto optimalna rješenja grupiraju se u vrlo uskom području trajanja stupnja prijenosa u slučaju linearno rastućeg ulaznog momenta, dok su performanse općenito ujednačenije za različite upravljačke strategije.

7. Optimiranje parametara upravljačkih profila promjene s dvostrukim prijelazom



Slika 7-14. Rezultati parametarskog optimiranja za 10-6 silaznu promjenu (linearno rastući τ_e od 100 Nm do 550 Nm): (a) usporedba Pareto fronti dobivenih primjenom različitih DTS strategija upravljanja, (b) uvećani prikaz odsječka istaknutog na (a), (c)-(g) odziv pogona za Strategiju A i odabrano rješenje ($t_{inertia} = 448$ ms; pune linije), uključujući usporedbu s odzivom dobivenog optimiranjem upravljačkih trajektorija (Strategija 1; isprekidane linije)

8. Skalabilni zakon optimalnog upravljanja promjenom stupnja prijenosa

U prethodnim poglavljima, naglasak je bio na razvoju upravljačkih strategija promjene stupnja prijenosa i analizi optimalnih upravljačkih djelovanja. Postupci optimiranja pritom su provedeni za jedan skup radnih uvjeta promjene stupnja prijenosa (fiksni položaj pedale akceleratora ili moment motora i početna brzina vrtnje motora). Međutim, u realnoj primjeni, promjena stupnja prijenosa općenito se može inicirati u raznim radnim uvjetima, ovisno o definiciji mape planiranja promjene stupnja prijenosa. S ciljem postizanja dobrih performansi promjene stupnja prijenosa u širokom rasponu uvjeta pod kojima se ta promjena izvodi, nužno je uvođenje skalabilnog zakona upravljanja koji prilagođava profile upravljačkih varijabli vozačevim komandama. S ciljem postizanja optimalnih karakteristika promjene stupnja prijenosa, u ovom se poglavlju predlažu dva pristupa sintezi skalabilnog zakona upravljanja koji su bazirani na primjeni prethodno predstavljenih optimizacijskih alata.

8.1. Promjena s jednostrukim prijelazom

Sinteza skalabilnog zakona upravljanja prvo se provodi za jednostavniju promjenu s jednostrukim prijelazom (1-2 primjer). Prilagođavanje upravljačkih profila vozačevim komandama ostvarit će se skaliranjem upravljačkih profila po amplitudi (kapaciteta momenta uključne spojke i redukcije momenta motora), pri čemu je faktor skaliranja funkcija položaja pedale akceleratora i brzine vrtnje kod koje se inicira promjena stupnja prijenosa.

8.1.1. *Određivanje faktora skaliranja*

S ciljem određivanja optimalnih vrijednosti faktora skaliranja provodi se optimiranje upravljačkih varijabli (poglavlje 4) za širok raspon radnih uvjeta motora. Faktori skaliranja određuju se metodom opotimiranja upravljačkih varijabli, budući da je ona karakterizirana bržim izvođenjem optimiranja u usporedbi s metodom optimiranja parametara. Optimiranje se provodi za sve kombinacije parova položaja pedale akceleratora p_{th} i početne brzine vrtnje motora ω_{e0} iz skupa $p_{th} \in \{0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1\}$ i $\omega_{e0} \in \{1500, 2000, 2500,$

8. Skalabilni zakon optimalnog upravljanja promjenom stupnja prijenosa

3000, 3500, 3500, 4000, 4500, 5000} okr/min. Optimiranje upravljačkih varijabli provodi se uz sljedeće postavke:

- Za modeliranje spojki koristi se pristup temeljen na svojstvu pasivnosti spojke.
- Vrijednost glavnog težinskog faktora jednaka je nuli ($k_w = 0$ u izrazu (4-1); minimizira se samo trzaj vozila).
- Koristi se realistična upravljačka strategija koja sprječava korištenje isključne spojke u inercijskoj fazi promjene (pripadajuće ograničenje u tablici 4-1 je aktivno).
- Upravljačko djelovanje kojim se omogućuje redukcija momenta motora je dozvoljeno u obje glavne faze (momentnoj i inercijskoj).
- Nije dozvoljeno upravljanje dodatnom (normalno otvorenom) spojkom.
- Trajanje momentne i inercijske faze je fiksno i iznosi redom 0.2 s i 0.5 s.

Nakon što su provedena sva optimiranja, određuju se faktori skaliranja momenta spojki i redukcije momenta motora. Slika 8-1a prikazuje optimalne trajektorije momenta uključne spojke za položaj pedale akceleratora 50% (plava linija) i 100% (crvena linija). Faktor pojačanja momenta određuje se u svakom vremenskom uzorku kao (vremenski korak je 0.001s pa za vrijeme simulacije od $t_f = 1.1$ s ukupno ima $n_{uz} = 1100$ uzoraka)

$$f_{sONC,i} = \frac{\tau_{ONC,i}}{\tau_{ONCref,i}}, \quad i \in \{1, 2, \dots, n_{uz}\} . \quad (8-1)$$

pri čemu τ_{ONCref} odgovara trajektoriji momenta uključne spojke koja se uzima kao referentna (ovdje za $p_{th} = 0.5$ koji je u sredini raspona mogućih vrijednosti položaja pedale akceleratora). Kako bi se odredio konačan faktor skaliranja, izračunava se srednja vrijednost vektora $\mathbf{f}_{sONC}$ kao

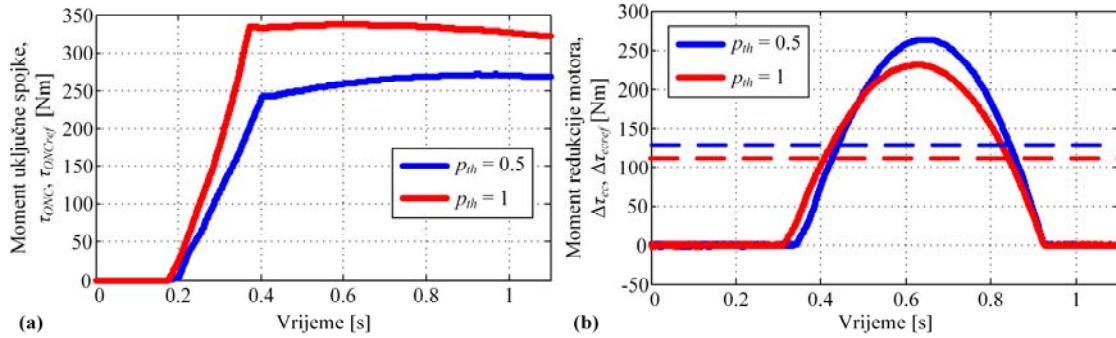
$$\bar{f}_{sONC,i} = \frac{1}{n_{uz}} \sum_{i=1}^{n_{uz}} f_{sONC,i} . \quad (8-2)$$

Očito je, međutim, kako za neke i faktor skaliranja nije definiran (npr. početno razdoblje u kojem je moment uključne spojke jednak nuli za oba položaja pedale akceleratora). Iz tog razloga, u izračun srednjih vrijednosti ulaze samo vrijednosti za koje vrijedi $-10 < f_{sONC,i} < 10$, $i \in \{1, 2, \dots, n_{uz}\}$.

8. Skalabilni zakon optimalnog upravljanja promjenom stupnja prijenosa

Slika 8-1b prikazuje optimalne trajektorije redukcije momenta motora za položaj pedale akceleratora 50% (plava linija) i 100% (crvena linija). Određivanje faktora skaliranja za redukciju momenta motora na prethodno opisan način može biti neprecizno jer je vrijednost redukcije momenta često vrlo blizu nuli (u početnoj, završnoj i većem dijelu momentne faze redukcija momenta motora se ne primjenjuje). Zbog toga se faktor skaliranja određuje kao kvocijent srednje vrijednosti redukcije momenta razmatrane optimalne trajektorije i referentne trajektorije (na slici 8-1b one su prikazane crtkanom linijom) kao:

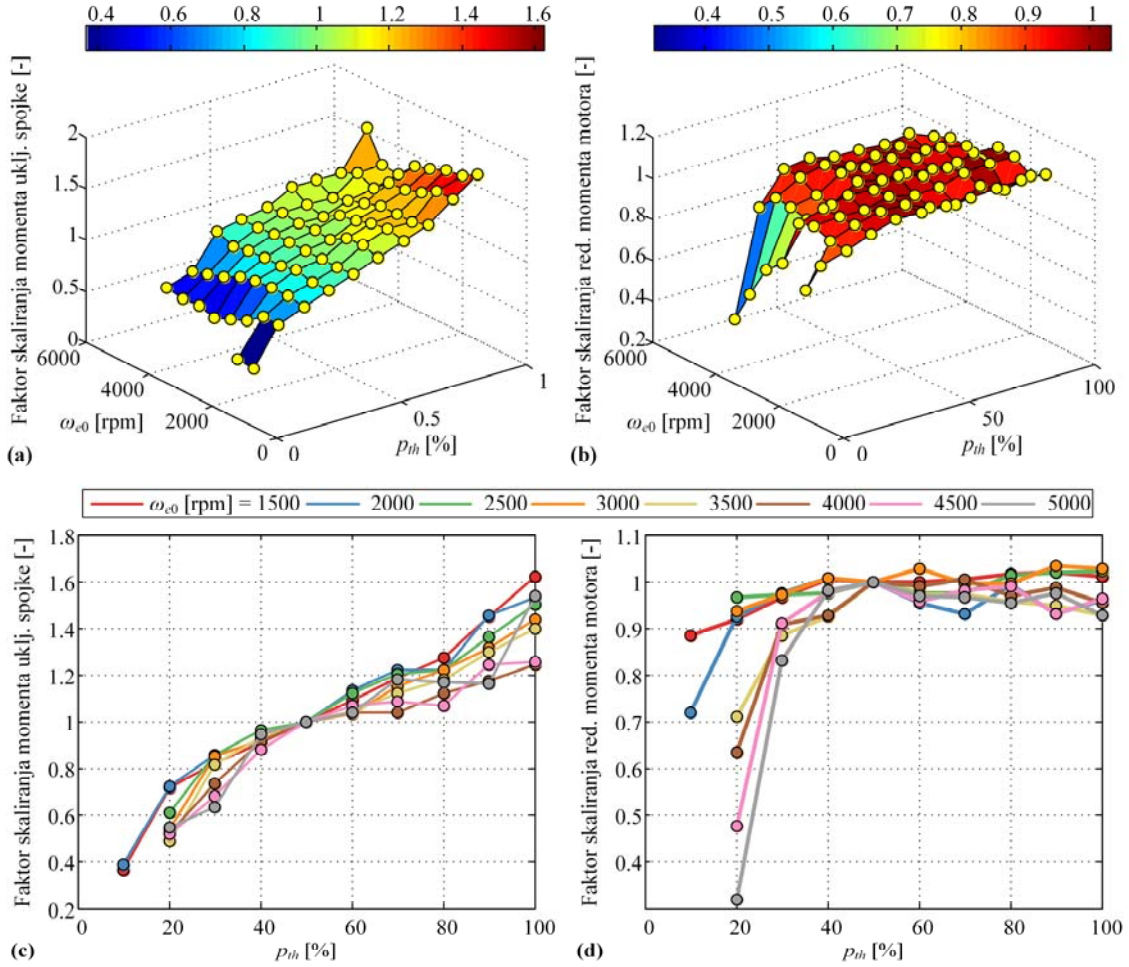
$$\bar{f}_{sENG} = \frac{\frac{1}{n_{uz}} \sum_{i=1}^{n_{uz}} \Delta \tau_{ec,i}}{\frac{1}{n_{uz}} \sum_{i=1}^{n_{uz}} \Delta \tau_{ecref,i}}, \quad i \in \{1, 2, \dots, n_{uz}\}. \quad (8-3)$$



Slika 8-1. Optimalne trajektorije momenta uključne spojke (a) i momenta redukcije motora (b) za dva položaja pedale akceleratora ($\omega_{e0} = 2500$ okr/min)

Slika 8-2 prikazuje faktore skaliranja momenta uključne spojke i redukcije momenta motora za 1-2 promjenu kao funkcije položaja pedale akceleratora i početne brzine vrtnje motora u 3D i 2D prikazu. Valja uočiti kako je trend pojačanja momenta uključne spojke općenito isti za različite početne brzine vrtnje motora (približno linearno rastući za rastući p_{th} , slika 8-2c). Za razliku od pojačanja momenta spojke, pojačanje redukcije momenta motora nema jasno izražen trend i za najveći broj točaka kreće se između 0.9 i 1 (slika 8-2d). Pritom se može primijetiti određeni broj točaka koje značajno odstupaju od trenda definiranog preostalim točkama (npr. za $p_{th} = 0.2$ i n_{e0} između 3500 i 5000 okr/min). Valja napomenuti kako se te točke mogu zanemariti jer je malo vjerojatno da će se promjena stupnja prijenosa inicirati u takvim uvjetima rada motora.

8. Skalabilni zakon optimalnog upravljanja promjenom stupnja prijenosa



Slika 8-2. Ovisnost faktora skaliranja momenta uključne spojke i redukcije momenta motora o položaju pedale akceleratora i brzini vrtnje motora za 1-2 promjenu: (a), (b) 3D prikaz i (c), (d) 2D prikaz

Kako bi se smanjio broj parametara kojima je definiran skalabilni zakon upravljanja, predlaže se aproksimiranje faktora skaliranja sa slika 8-2c i 8-2d polinomom trećeg reda općeg oblika

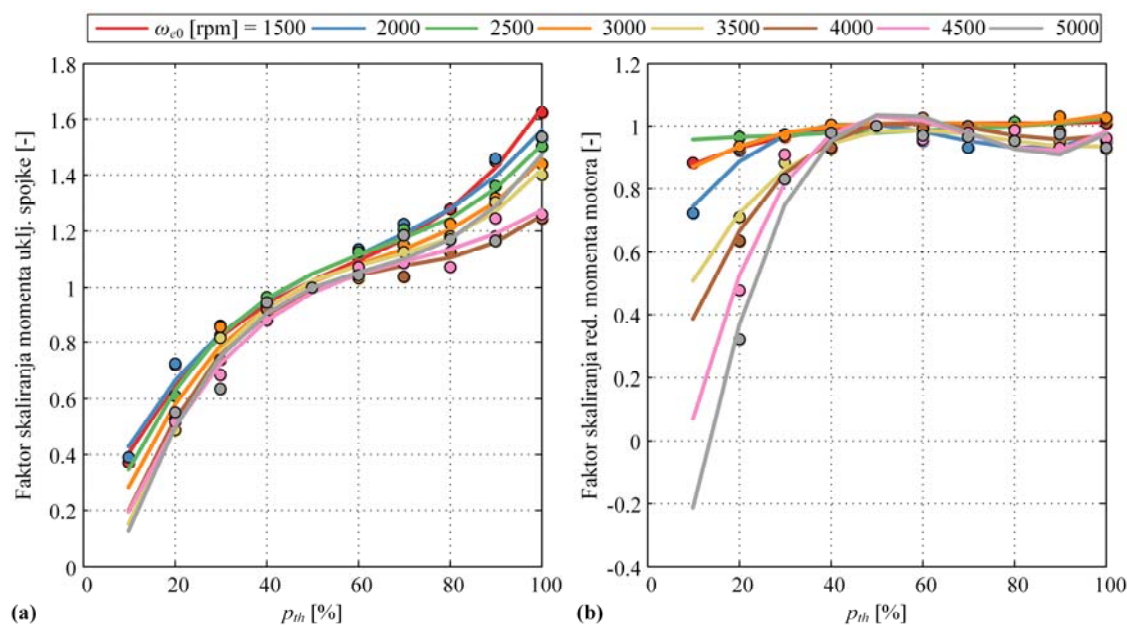
$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (8-4)$$

Optimalne vrijednosti parametara a , b , c i d tako definiranog modela pritom se određuju korištenjem MATLAB-ove funkcije *polyfit*, tj. metodom minimalnih kvadrata. Za svaku početnu brzinu vrtnje motora određuje se po jedan polinom trećeg reda.

Dobiveni polinomi trećeg reda kojima se aproksimiraju faktori skaliranja momenta uključne spojke i redukcije momenta motora prikazani su na slici 8-3 za različite početne brzine vrtnje

8. Skalabilni zakon optimalnog upravljanja promjenom stupnja prijenosa

motora. Kao mjera kvalitete prilagođenosti polinoma danim točkama (*engl. goodness of fit*) koristi se tzv. koeficijent determinacije R^2 . Koeficijent determinacije može poprimiti vrijednost između 0 i 1, pri čemu vrijednost bliža jedinici označava bolju prilagođenost polinoma danim točkama. Tablica 8-1 prikazuje vrijednosti koeficijenta determinacije za različite početne vrijednosti brzine vrtnje motora, te za modele skaliranja momenta uključne spojke i redukcije momenta motora. Rezultati iz tablice 8-1 sugeriraju da se polinomom trećeg reda može postići odlična prilagođenost polinoma faktorima skaliranja momenta uključne spojke (R^2 je veći od 0.95 za gotovo sve početne brzine vrtnje motora). Koeficijent determinacije nešto je manjih iznosa za model redukcije momenta motora, ponajprije zbog značajnog rasipanja točaka koje odgovaraju malim položajima pedale akceleratora i visokim brzinama vrtnji motora.



Slika 8-3. Aproksimacija faktora skaliranja (a) momenta uključne spojke i (b) redukcije momenta motora sa slike 8-2 polinomima trećeg reda za 1-2 promjenu

8. Skalabilni zakon optimalnog upravljanja promjenom stupnja prijenosa

Tablica 8-1. Pokazatelji kvalitete prilagođenosti modela skaliranja momenta uključne spojke i redukcije momenta motora za različite početne brzine vrtnji motora

n_{e0} [okr/min]	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
R^2 pokazatelj modela skaliranja momenta uključne spojke	0.993	0.983	0.99	0.984	0.984	0.994	0.979	0.942
R^2 pokazatelj modela skaliranja redukcije momenta motora	0.968	0.89	0.767	0.847	0.969	0.936	0.909	0.94

8.1.2. Provjera skalabilnog zakona upravljanja STS promjenom

S ciljem provjere skalabilnog zakona upravljanja definiranog u prethodnom odjeljku, on će se primijeniti u raznim scenarijima promjene stupnja prijenosa, tj. za razne radne točke motora, u sprezi s nominalnim optimalnim upravljačkim profilima promjene stupnja prijenosa (onima za $p_{th} = 0.5$). Pritom će se koristiti praktični, po odsječcima linearni upravljački profili dobiveni pristupom optimiranja njihovih parametara loma iz poglavlja 6. K tome, provodi se optimiranje parametara upravljačkih profila za različite početne brzine vrtnje motora i za različite položaje pedale akceleratora, kako bi se dobila referentna mjerila performansi za potrebe provjere skalabilnog zakona upravljanja.

Konačni rezultati provjere sadržani su u tablici 8-2, u kojoj su uspoređene vrijednosti indeksa trzaja vozila (v. izraz (6-2)) dobivene primjenom upravljačkih profila generiranih na dva načina: 1. optimiranjem parametara za razmatranu radnu točku motora (za različite položaje pedale akceleratora i za $n_{e0} = 2500$ okr/min; to je ujedno i referentno mjerilo) i 2. skaliranjem nominalnih upravljačkih profila (za $p_{th} = 0.5$). Valja napomenuti kako je za isključnu spojku primijenjeno isto skaliranje kao i za uključnu spojku. U zagradama je dano relativno povećanje indeksa trzaja u odnosu na referentno mjerilo (rezultate dane u drugom stupcu). U posljednja dva stupnja tablice dani su isti rezultati za $n_{e0} = 3000$ okr/min. Svi rezultate odnose se na stupanj agilnosti 4 (v. poglavlje 6) s trajanjem promjene stupnja prijenosa od oko $t_{shift} = 0.68$ s. Na temelju prikazanih rezultata, može se zaključiti kako skalabilni zakon upravljanja većinom daje dobre rezultate u smislu postizivih performansi. Povećanje indeksa trzaja vozila tumači se jednostavnošću zakona skaliranja (isti faktor se primijenjuje po cijelom odzivu upravljačkih

8. Skalabilni zakon optimalnog upravljanja promjenom stupnja prijenosa

profila) i pogreškama interpolacije kod formiranja funkcija skaliranja. Iako su relativna povećanja RMS indeksa trzaja vozila za pojedine točke relativno velika (i do 100%), analiziranjem odziva upravljačkih profila uočava se kako su ona zapravo vrlo bliska referentnima [88].

Tablica 8-2. Vrijednosti indeksa trzaja vozila dobivene primjenom optimalnih upravljačkih profila i skaliranih upravljačkih profila za razne radne točke motora kod kojih se inicira promjena s jednostrukim prijelazom (1-2 primjer)

n_{e0} [okr/min]	2500		3000	
p_{th} [-]	Optimalni profili za dani slučaj (st. agil. = 4)	Skal. zakon upravljanja (st. agil. = 4)	Optimalni profili za dani slučaj (st. agil. = 4)	Skal. zakon upravljanja (st. agil. = 4)
0.2	1.1911	2.059 (+73%)	1.1193	1.746 (+56%)
0.3	1.2094	1.226 (+1%)	1.1255	1.532 (+36%)
0.4	1.3201	1.932 (+46%)	1.2597	2.108 (+67%)
0.5	1.3783	2.533 (+84%)	2.227	2.889 (+30%)
0.6	2.1263	2.306 (+8%)	1.4417	2.881 (+100%)
0.7	1.9363	1.971 (+2%)	1.4798	2.517 (+70%)
0.8	1.5495	2.087 (+35%)	1.4737	2.506 (+70%)
0.9	1.6557	1.824 (+10%)	1.7313	2.101 (+21%)
1	1.9188	2.193 (+14%)	1.8108	2.592 (+43%)

8.1.3. Proširenje skalabilnog zakona upravljanja STS promjenom sustavom regulacije

U ovom će se odjeljku prethodno postavljeni skalabilni zakon upravljanja proširiti sustavom regulacije, s ciljem postizanja robusnosti na varijacije parametara aktuatorskog sustava spojke i vanjskih parametara poput nagiba ceste i mase vozila. Iako je uz manje izmjene primjenjiva i za silaznu promjenu s jednostrukim prijelazom, sinteza regulatora ovdje će se ilustrirati na primjeru uzlazne promjene s jednostrukim prijelazom. U postojećoj literaturi, zatvaranje regulacijskog kruga često se izvodi po petlji brzine klizanja uključne spojke [35],[60],[89],[90]. Naime, u toku uzlazne promjene s jednostrukim prijelazom, brzina klizanja uključne spojke u inercijskoj fazi monotono pada prema nuli (ili raste prema nuli ako kreće iz negativnih vrijednosti). Izborom odgovarajuće trajektorije referentne brzine klizanja može se izravno

8. Skalabilni zakon optimalnog upravljanja promjenom stupnja prijenosa

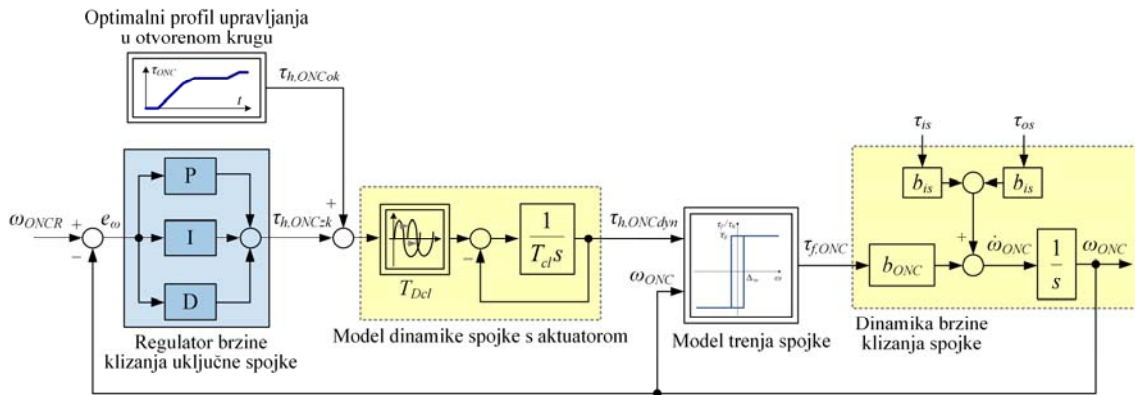
utjecati na trajanje i udobnost promjene stupnja prijenosa [35],[60],[90]. U ovom radu kao regulator brzine klizanja uključne spojke koristi se konvencionalni PID regulator. Regulator je aktivan samo u inercijskoj fazi promjene. Blokovski dijagram regulacijskog kruga brzine klizanja uključne spojke prikazan je na slici 8-4. Dinamika brzine klizanja uključne spojke u inercijskoj fazi opisana je reduciranim oblikom izraza (2-18):

$$\dot{\omega}_{ONC} = m_1 \tau_{f,ONC} + m_2 \tau_{is} + m_3 \tau_{os} , \quad (8-5)$$

pri čemu su m_i , $i = 1, 2, 3$ odgovarajući elementi matrice $\mathbf{M}_{red}$. Regulacijsko djelovanje $\tau_{h,ONCzk}$ pribraja se nominalnom upravljačkom profilu uključne spojke za upravljanje u otvorenom krugu, a definirano je sljedećim izrazom:

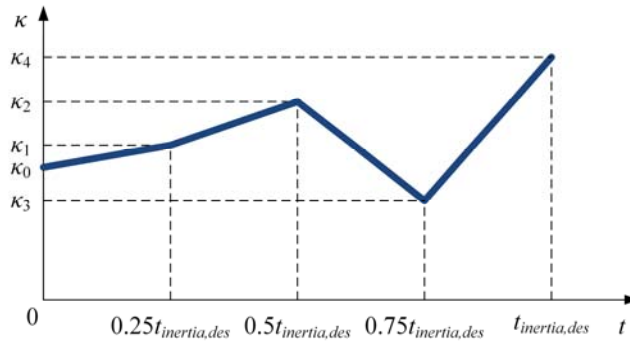
$$\tau_{h,ONCzk} = \kappa \left(K_P e_\omega + K_I \int e_\omega dt + K_D \frac{de_\omega}{dt} \right) , \quad (8-6)$$

pri čemu su K_P , K_I i K_D parametri regulatora. U radu [91], koji razmatra primjenu linearnog kvadratičnog regulatora (LQR) za upravljanje zatvaranjem spojke automatskog mjenjača pokazano je kako pojačanja regulatora u pravilu rastu u vremenu (tj. s padom brzine klizanja spojke koja se zatvara). S ciljem ostvarenja slične funkcionalnosti, u zakonu upravljanja (8-6) sadržan je parametar κ koji je promjenjiv u vremenu i koji je dan u obliku ogledne tablice (v. ilustraciju na slici 8-5). Valja napomenuti kako će se parametri ogledne tablice kasnije optimirati zajedno s parametrima regulatora. Oznaka $t_{inertia,des}$ označava željeno trajanje inercijske faze u toku koje je regulator aktivan.



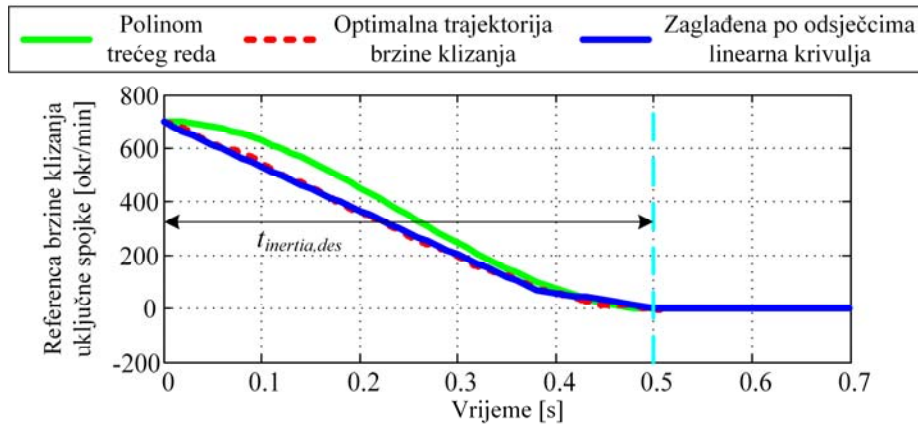
Slika 8-4. Blokovski dijagram strukture regulacijskog kruga brzine klizanja uključne spojke

8. Skalabilni zakon optimalnog upravljanja promjenom stupnja prijenosa



Slika 8-5. Definicija pojačanja parametara regulatora u ovisnosti o tijeku inercijske faze

U literaturi se za referentnu trajektoriju brzine klizanja često odabire polinom trećeg reda koji osigurava meko zatvaranje uključne spojke [35],[60],[90]. Ovdje će se kao referenca brzine klizanja spojke koristiti trajektorija sastavljena od tri linearna odsječka, koja je zaglađena nisko-propusnim filtrom prvog reda vremenske konstante 0.02 s. Po odsječcima linearna referenca je uvedena s ciljem približavanja optimalnoj trajektoriji brzine klizanja dobivene općim optimiranjem upravljačkih trajektorija. Slika 8-6 uspoređuje optimalnu trajektoriju brzine klizanja uključne spojke za 1-2 promjenu stupnja prijenosa, te referentne brzine klizanja u obliku polinoma trećeg reda i zaglađene, po odsječcima linearne krivulje.



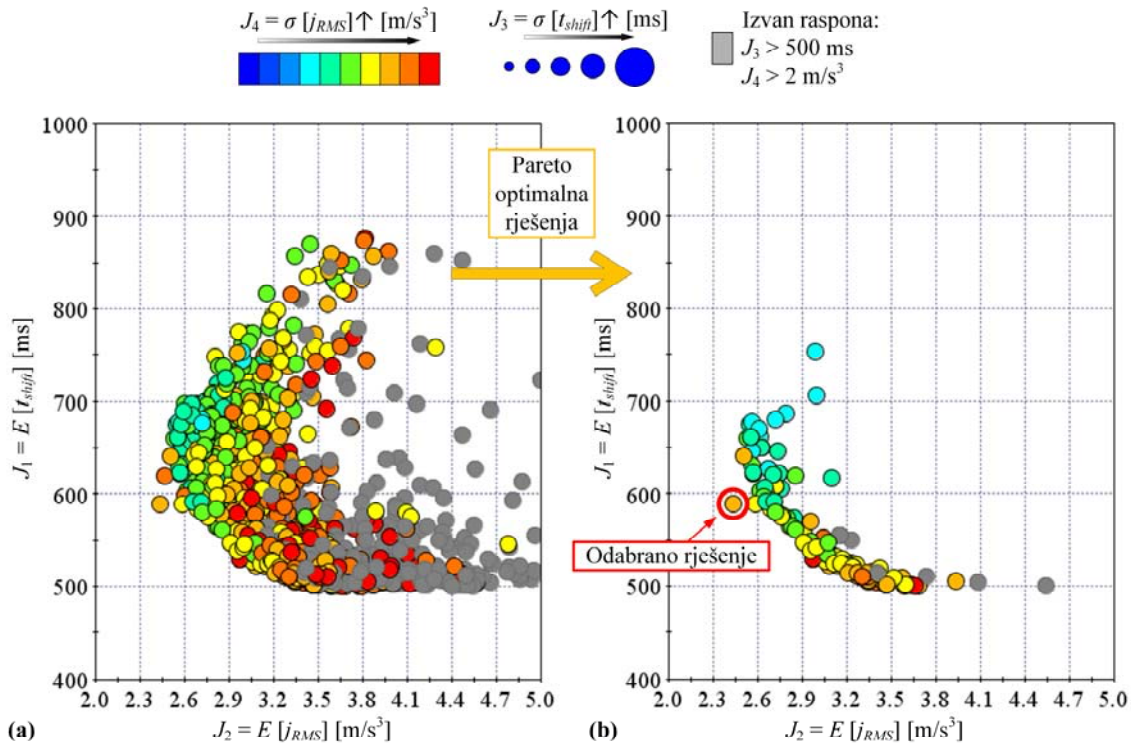
Slika 8-6. Referenca brzine klizanja uključne spojke u inercijskoj fazi uzlazne promjene s jednostrukim prijelazom

Optimalne vrijednosti parametara regulatora K_P , K_D i K_I , kao i vrijednosti parametara vremenske funkcije skaliranja pojačanja regulatora (κ_0 , κ_1 , κ_2 , κ_3 i κ_4 , slika 8-5) odredit će se postupkom stohastičkog robusnog optimiranja parametara. Cilj je pronaći vrijednosti navedenih

8. Skalabilni zakon optimalnog upravljanja promjenom stupnja prijenosa

parametara koji istovremeno minimiziraju srednje vrijednosti indeksa performansi te njihova standardna odstupanja. Četiri kriterija koja se minimiziraju stoga su jednaki onima definiranim izrazom (6-12). Za rješavanje problema optimiranja ponovno se koristi modeFRONTIEROV MORDO modul koji omogućava dodjeljivanje stohastičke distribucije ulaznim parametrima. Pritom se razmatraju varijacije tri parametra nesigurnosti pogona (usp. formulaciju u potpoglavlju 6.4): 1) pojačanje kapaciteta momenta uključne spojke, $g_{h,ONC}$; 2) mrtvo vrijeme modela aktuatora uključne spojke $\tilde{T}_{Dcl}$; 3) pojačanje momenta motora g_{eng} ; te dva vanjska parametra: 4) nagib ceste, $\theta\%$; i 5) dodatna masa vozila, $m_{v,add}$. Kut θ u izrazu (2-10) pritom se izračunava kao $\tan^{-1}(\theta\%/100)$. Dodatna masa vozila $m_{v,add}$ pribraja se nominalnoj masi vozila m_v u izrazima (2-9) i (2-10). Za parametre $g_{h,ONC}$, g_{eng} i $\theta\%$ pretpostavlja se normalna distribucija uz specificiranu očekivanu vrijednost i standardno odstupanje, dok se za parametre $\tilde{T}_{Dcl}$ i $m_{v,add}$ pretpostavlja uniformna distribucija, uz specificiranu srednju vrijednost i širinu intervala. Konačni rezultati optimiranja prikazani su na slici 8-7. Rezultati se odnose na 1-2 promjenu stupnja prijenosa, položaj pedale akceleratora $p_{th} = 0.5$ i početnu brzinu vrtnje motora $\omega_{e0} = 2500$ okr/min. Dublje analize ponašanja regulatora u različitim promjenama stupnjeva prijenosa i radnim uvjetima mogu biti predmet budućeg rada. Na slici 8-7b prikazana su Pareto optimalna rješenja sa slike 8-7a. Konačno rješenje odabrano je po kriteriju najmanjeg očekivanja indeksa trzaja vozila i označeno je kružićem s crvenim obrubom.

8. Skalabilni zakon optimalnog upravljanja promjenom stupnja prijenosa



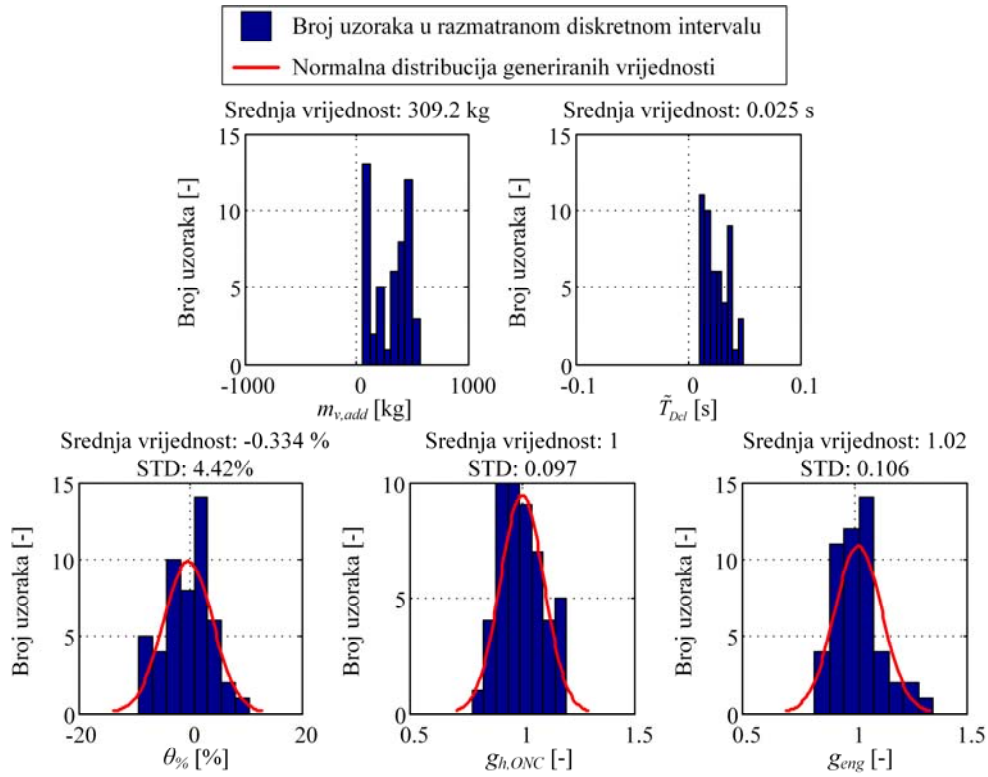
Slika 8-7. Rezultati optimiranja parametara regulatora brzine klizanja uključne spojke za 1-2 promjenu stupnja prijenosa

8.1.4. Simulacijska provjera cjelokupnog zakona upravljanja STS promjenom uključujući analizu robusnosti

Kako bi se ispitao sveukupni sustav upravljanja promjenom stupnja prijenosa, u ovom se odjeljku provode simulacije 1-2 promjene za razne varijacije parametara nesigurnosti i vanjskih parametara. Kao i u prethodnom odjeljku, rezultati se odnose na upravljanje promjenom koja se izvodi pri $\omega_{e0} = 2500$ okr/min i uz položaj pedale akceleratora $p_{th} = 0.5$. Pritom se uspoređuju performanse dobivene primjenom dviju strategija upravljanja. U prvoj strategiji upravljanja koriste se optimalni upravljački profili (dobiveni postupkom optimiranja parametara opisanim u poglavlju 6) za razmatrane uvjete promjene stupnja prijenosa. U drugoj strategiji primijenjuje se skalabilni zakon upravljanja za 1-2 promjenu proširen sustavom regulacije (uočiti da isti nije uključen u prvoj strategiji). Ukupno se provodi 50 simulacija, pri čemu se nagib ceste, pojačanje momenta uključne spojke i pojačanje redukcije momenta motora generiraju kao nasumične vrijednosti uz pretpostavljenu normalnu razdiobu, dok se dodatna masa vozila i mrtvo vrijeme

8. Skalabilni zakon optimalnog upravljanja promjenom stupnja prijenosa

modela aktuatora sa spojkom generiraju kao uniformno distribuirane nasumične vrijednosti. Slika 8-8 prikazuje histrograme razdioba nasumično generiranih vrijednosti parametara nesigurnosti aktuatorskog sustava i vanjskih poremećajnih parametara. Visine plavih pravokutnika pritom označavaju broj uzoraka čije vrijednosti upadaju u definirane diskretne intervale (uočiti kako je zbroj svih visina pravokutnika jednak 50, tj. broju generiranih vrijednosti). Za parametre za koje je pretpostavljena normalna razdioba, dodatno je crvenom bojom označena normalna distribucija generiranih vrijednosti.

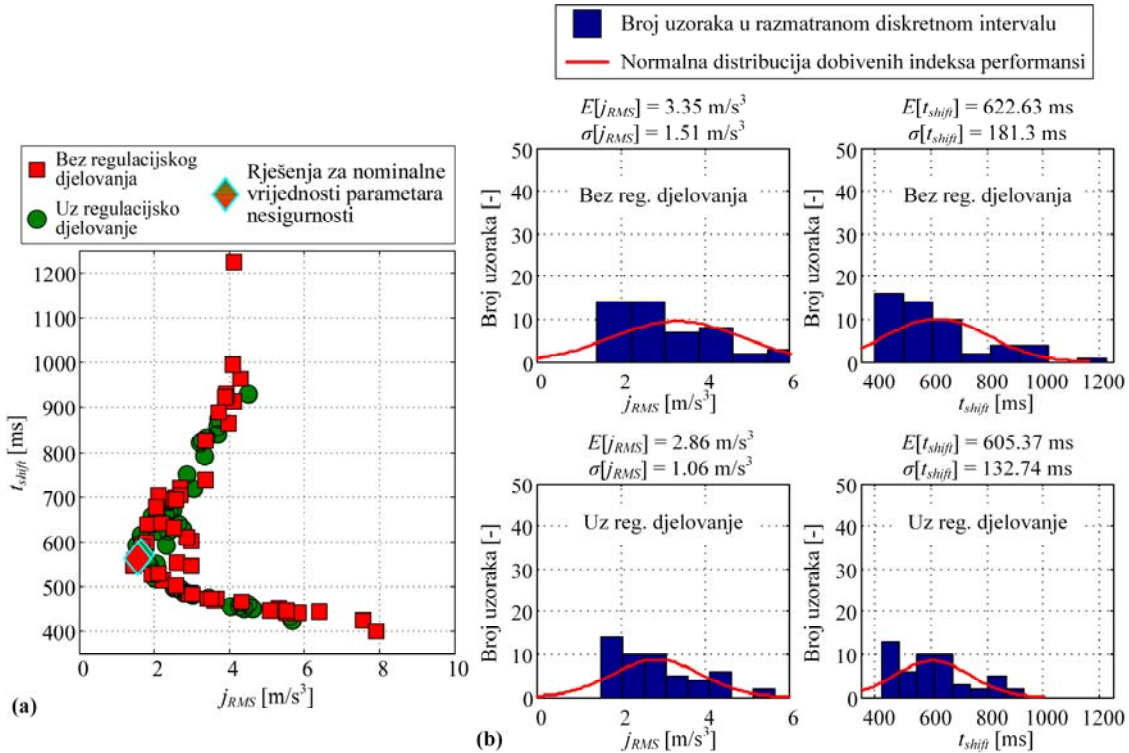


Slika 8-8. Distribucije parametara nesigurnosti aktuatorskog sustava i vanjskih poremećajnih parametara za ispitivanje sustava regulacije 1-2 promjene

Konačni rezultati simulacijskih ispitivanja cjelokupnog sustava upravljanja prikazani su na slici 8-9. Slika 8-9a prikazuje indekse performansi koji su dobiveni simulacijom promjene stupnja prijenosa za razne kombinacije vrijednosti parametara nesigurnosti i vanjskih poremećajnih parametara i uz primjenu dvije strategije upravljanja (uz primjenu optimalnih upravljačkih profila i uz primjenu skalabilnog zakona upravljanja u sprezi sa sustavom regulacije). Na slici 8-9b prikazane su distribucije indeksa performansi sa slike 8-9a. Iz naslova pojedinih grafova

8. Skalabilni zakon optimalnog upravljanja promjenom stupnja prijenosa

na slici 8-9b vidljivo je kako se očekivanje indeksa trzaja vozila smanjuje za 15% uz primjenu regulacijskog djelovanja. Istovremeno, standardna devijacija istog indeksa smanjena je za 30%. Uvođenje regulacijskog djelovanja pozitivno utječe i na indeks trajanja promjene stupnja prijenosa. Uz regulacijsko djelovanje očekivanje trajanja promjene stupnja prijenosa smanjeno je za 3%, dok je standardna devijacija trajanja promjene smanjena za 27%.



Slika 8-9. Rezultati analize simulacijskih ispitivanja sustava upravljanja s i bez uključenog regulatora za 1-2 promjenu: (a) indeksi performansi za razne vrijednosti parametara nesigurnosti i vanjskih parametara i (b) distribucije indeksa performansi

8.2. Promjena s dvostrukim prijelazom

Analizom je utvrđeno kako primjena postupka definiranja skalabilnog zakona prikazanog u prethodnom poglavlju ne daje dobre rezultate kod promjene s dvostrukim prijelazom (DTS), zbog kompleksne koordinacije većeg broja aktuatora čije upravljačke profile nije dovoljno prilagoditi samo po amplitudi. Stoga se za potrebe definiranja skalabilnog zakona upravljanja za DTS uvodi tzv. postotak dovršenosti promjene stupnja prijenosa, na kojeg se vežu točke loma praktičnih, po odsječcima linearnih upravljačkih profila. Na taj način, upravljačka

8. Skalabilni zakon optimalnog upravljanja promjenom stupnja prijenosa

djelovanja strategije upravljanja odvijaju se ovisno o trenutnoj fazi napredovanja DTS-a, čime se implicitno u sustav upravljanja uvodi povratna veza i ostvaruje robustifikacija strategije upravljanja. Postotak dovršenosti promjene stupnja prijenosa, PDP , definiran je kao

$$PDP(s_{ratio}) = 100 \frac{s_{ratio} - H_p}{H_c - H_p}, \quad (8-7)$$

pri čemu je s_{ratio} trenutna vrijednost prijenosnog omjera brzina vrtnji definiranog kao $s_{ratio} = \omega_{is}/\omega_{os}$, H_p je prijenosni omjer polaznog stupnja prijenosa, a H_c je prijenosni omjer ciljanog stupnja prijenosa. Na početku promjene, kada je aktivan polazni stupanj prijenosa, PDP je nula. Kada se postigne prijenosni omjer koji odgovara ciljanom stupnju prijenosa, PDP iznosi 100%.

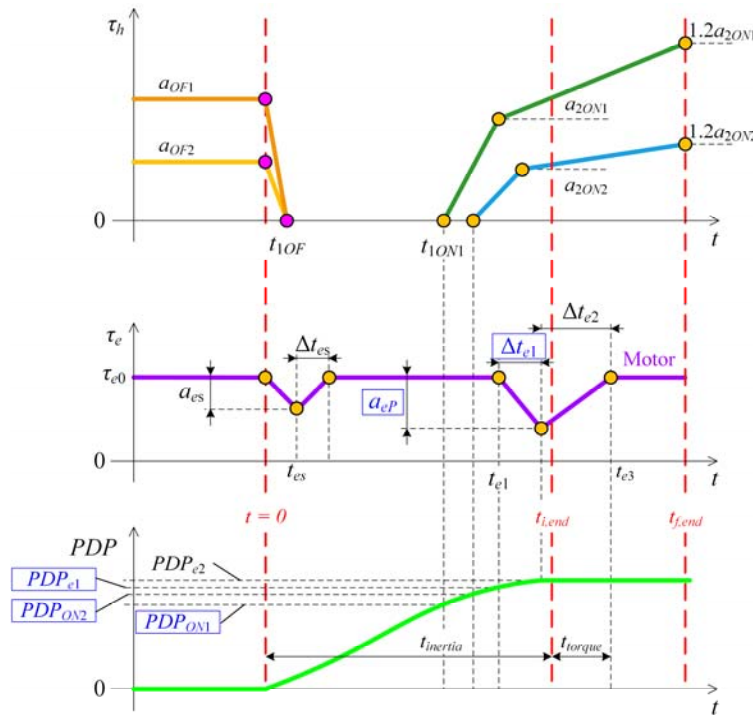
S ciljem dobivanja referentnog mjerila za tako definirani skalabilni zakon upravljanja, na početku se provodi optimiranje parametara za razne radne točke motora kod kojih se inicira DTS. Promjena koja će se razmatrati ponovno je 10-6, a pritom će se primjenjivati Strategija C za koju je u poglavlju 6 pokazano da daje najbolje performanse u širokom spektru uvjeta i scenarija promjene. U postupcima optimiranja, u simulacijskom modelu pogona vozila uključena je dinamika hidrauličkih aktuatora spojki. DTS se tipično inicira kod niskih brzina vrtnji motora i visokih pedala akceleratora. Optimiranje parametara stoga se provodi za $n_{e0} = 1750$ okr/min i $p_{th} \in \{0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1\}$. Dodatno, optimiranje parametara provodi se za $n_{e0} = 2250$ okr/min i $p_{th} \in \{0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1\}$, s ciljem dobivanja drugog skupa rezultata za provjeru skalabilnog zakona upravljanja.

8.2.1. Definicija zakona upravljanja

Točke loma upravljačkih profila za razmatranu Strategiju C vežu se uz PDP (v. sliku 8-10 i usp. sliku 7-1 gdje su točke loma upravljačkih profila bile određene vremenskim trenucima). Parametrima a_{OF1} , a_{OF2} , a_{2ON1} i a_{2ON2} definirani su početni kapaciteti momenata za isključne spojke te krajnji kapaciteti momenta za uključne spojke (slika 8-10). Momenti koji aktivne spojke prenose u stabilnom stupnju prijenosa ovise o radnoj točki motora, pa bi se pripadajući parametri trebali skalirati po amplitudi. Skaliranje se jednostavno može provesti korištenjem mape motora i alata za automatsku redukciju reda modela, te nije predmet daljnjeg razmatranja. S ciljem pojednostavljenja skalabilnog zakona upravljanja, parametar t_{1OF} postavljen je na konstantnu vrijednost $t_{1OF} = 0.01$ s, čime se osigurava brzo otvaranje isključnih spojki. Valja

8. Skalabilni zakon optimalnog upravljanja promjenom stupnja prijenosa

uočiti kako je u skalabilnom zakonu upravljanja uvedena redukcija momenta motora na samom početku inercijske faze, temeljem uvida iz rezultata optimiranja za razne radne uvjete motora kod kojih se inicira promjena. Pritom su parametri a_{es} , t_{es} i Δt_{es} empirijski postavljeni na konstantne vrijednosti, tj. neovisni su o radnoj točki motora (a_{es} je postavljen na polovicu trenutne vrijednosti momenta motora, dok je $t_{es} = \Delta t_{es} = 0.02$ s). Kod završavanja promjene stupnja prijenosa, tj. inercijske faze, najvažniju ulogu imaju parametri t_{1ON1} (odnosno PDP_{ON1} ; postotak dovršenosti promjene kod kojeg se uključuje ONC_1 spojka), t_{e1} (odnosno PDP_{e1} ; postotak dovršenosti promjene kod koje započinje redukcija momenta motora), te a_{eP} (redukcija trenutnog momenta motora, tj. momenta motora u trenutku PDP_{e1}). Parametri PDP_{ON1} , PDP_{e1} , a_{eP} , Δt_{e1} i PDP_{ON2} su radi jednostavnosti konstantni (tj. ne skaliraju se s obzirom na položaj pedale akceleratora i početnu brzinu vrtnje motora), a njihove se optimalne vrijednosti određuju postupkom optimiranja parametara, kako je prikazano u narednim odjeljcima⁷.



Slika 8-10. Definicija profila kapaciteta spojki i redukcije momenta motora za skalabilni zakon promjene stupnja prijenosa s dvostrukim prijelazom

⁷ Valja napomenuti kako se DTS zakon upravljanja za primjenu u širokom rasponu uvjeta promjena i dalje naziva skalabilnim jer ispunjava tu funkciju. To se, međutim, ne postiže se skaliranjem parametara (kao kod STS-a), već vezanjem parametara upravljačkih profila na PDP .

8.2.2. Formulacija problema optimiranja

Nakon što su definirani upravljački profili skalabilnog zakona upravljanja, formulira se problem optimiranja čiji je cilj dobivanje optimalnih parametara kojima je definiran skalabilni zakon upravljanja (plavo zaokruženi parametri na slici 8-10). Za tu se svrhu koristi metodološki okvir robusnog optimiranja parametara koji omogućuje sustavno variranje radne točke motora kod koje se provodi promjena stupnja prijenosa. Naime, položaj pedale akceleratora i početna brzina vrtnje motora mogu se uzeti kao parametri nesigurnosti problema optimiranja. Algoritam optimiranja tada nalazi optimalne vrijednosti parametara skalabilnog zakona upravljanja koji minimiziraju srednje vrijednosti indeksa performansi za najbolju prosječnu kvalitetu promjene stupnja prijenosa u širokom spektru radnih uvjeta (tj. u prisustvu varijacija radnih uvjeta). Problem optimiranja formulira se kao više-kriterijski problem s dva kriterija koja se istovremeno minimiziraju:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{p}_{\text{skal}}} J_1 &= E[t_{\text{inertia}}] , \\ \min_{\mathbf{p}_{\text{skal}}} J_2 &= E \left[\sqrt{\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} \dot{v}_v^2 dt} \right] . \end{aligned} \quad (8-8)$$

Simbol E označava očekivanu, tj. srednju vrijednost razmatranih kriterija. Ovdje se radi ilustracije uzima samo jedan parametar nesigurnosti (položaj pedale akceleratora, za koji se pokazuje da ima dominantan utjecaj). Pretpostavlja se uniformna distribucija položaja pedale akceleratora sa srednjom vrijednošću 0.8 i širinom intervala od 0.25 (vrijednosti veće od 1 pritom se zasićuju na 1).

Parametri koji se optimiraju sadržani su u vektoru $\mathbf{p}_{\text{skal}}$ koji je definiran kao

$$\mathbf{p}_{\text{skal}} = [PDP_{e1} \quad PDP_{ON1} \quad PDP_{ON2} \quad a_{eP} \quad \Delta_{t1}]^T . \quad (8-9)$$

Problem optimiranja je podložan sljedećim ograničenjima na vrijednosti parametara:

$$\begin{aligned} 60 &\leq PDP_{e1} \leq 100 , \\ 40 &\leq PDP_{ON1} \leq 100 , \\ 60 &\leq PDP_{ON2} \leq 100 , \\ 0.2 &\leq a_{eP} \leq 0.8 , \end{aligned} \quad (8-10)$$

8. Skalabilni zakon optimalnog upravljanja promjenom stupnja prijenosa

$$0.02 \text{ s} \leq \Delta_{t1} \leq 0.2 \text{ s} .$$

Kao i u poglavljima 6 i 7, uključena su dodatna dva ograničenja kako bi se spriječilo ekstremno kratko trajanje inercijske faze i izbjeglo razmatranje neprihvatljivih rješenja:

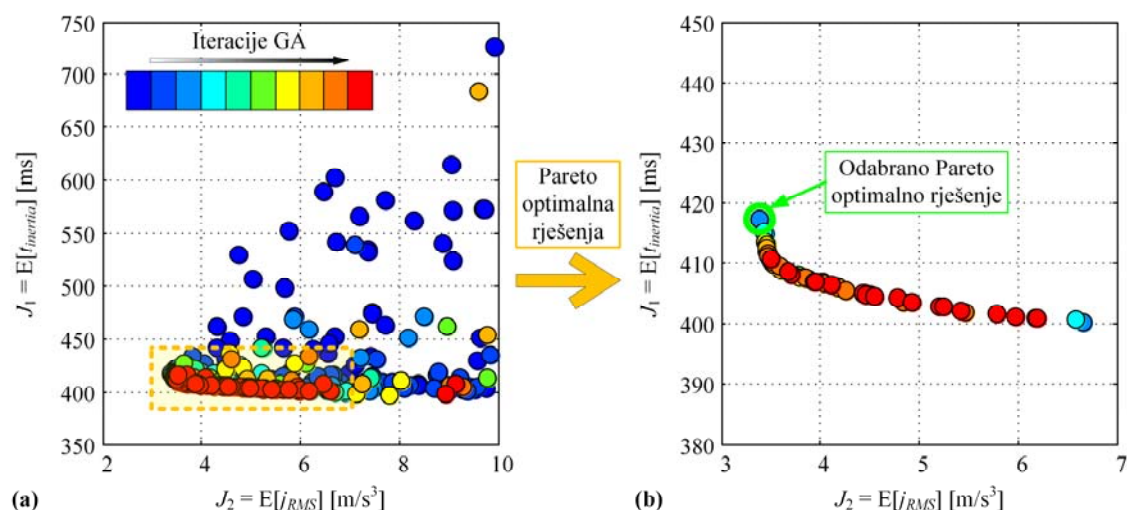
$$\begin{aligned} E[t_{inertia}] &> 400 \text{ ms} , \\ \int_{t_{i,end}}^{t_{f,end}} \omega_{ONC1,2}^2 dt &< 0.1 \text{ rad/s} . \end{aligned} \tag{8-11}$$

Za rješavanje definiranog problema optimiranja ponovno će se koristiti modeFRONTIER-ov MORDO modul (v. poglavlje 6 za više detalja), sada s 10 početnih populacija i 20 uzoraka vektora koji sadrže vrijednosti parametara nesigurnosti. Koristi se MOGA-II genetski algoritam sa 100 populacijskih generacija, što dovodi do konačne brojke od 20000 evaluacija kriterija optimiranja.

8.2.3. Rezultati optimiranja

Slika 8-11 prikazuje rezultate optimiranja parametara skalabilnog zakona upravljanja. Na slici 8-11b izdvojena su Pareto optimalna rješenja. Vidljivo je kako se ona grupiraju u vrlo usko područje trajanja inercijske faze promjene stupnja prijenosa. Odabrano Pareto optimalno rješenje za koje će se u narednom odjeljku provesti provjera označeno je zelenim obrubom. Kriterij odabira ovog rješenja bio je najmanji indeks trzaja vozila (čak i za ovu krajnju točku Pareto fronte, trajanje inercijske faze je vrlo kratko i u prosjeku iznosi 417 ms). Optimalne vrijednosti parametara za odabrano Pareto rješenje prikazane su u tablici 8-3 (usp. sliku 8-10). Optimalno rješenje je takvo da redukcija momenta motora započinje na samom kraju inercijske faze (kada je postotak dovršenosti promjene visokih 96.2%). Ukapčanje uključnih spojki započinje bitno ranije, s tim da se ONC₂ spojka ukapča prije ONC₁ spojke (redom u trenucima koji odgovaraju $PDP = 63.2\%$ i $PDP = 70.1\%$). Algoritam optimiranja također predlaže značajnu redukciju momenta motora na samom kraju inercijske faze (koja iznosi 73% trenutnog iznosa momenta motora) u trajanju od 0.04 s (tablica 8-3).

8. Skalabilni zakon optimalnog upravljanja promjenom stupnja prijenosa



Slika 8-11. Rezultati optimiranja parametara skalabilnog zakona upravljanja za 10-6 promjenu s dvostrukim prijelazom (10-6 primjer): (a) evolucija rješenja tijekom brojnih iteracija genetskog algoritma, (b) izdvojena Pareto optimalna rješenja

Tablica 8-3. Optimalne vrijednosti parametara za izabrano Pareto optimalno rješenje

Parametar	Optimalna vrijednost za izabrano rješenje
PDP_{e1}	96.2%
PDP_{ON1}	70.1%
PDP_{ON2}	63.2%
a_{eP}	73%
Δt_{e1}	0.04 s

8.2.4. Provjera skalabilnog zakona upravljanja DTS promjenom

Predloženi skalabilni zakona upravljanja DTS-om primijenit će se u raznim uvjetima promjene stupnja prijenosa kako bi se na taj način provjerio. Dobiveni rezultati pritom će se usporediti s Pareto optimalnim rješenjima dobivenim optimiranjem parametara za dane uvjete promjene stupnja prijenosa. Pritom će se za usporedbu odabrati rješenje na Pareto fronti koje je po trajanju inercijske faze najbliže onome dobivenom uz primjenu skalabilnog zakona upravljanja. Vrijedi napomenuti kako nije uvijek moguće usporediti rješenja koja su identičnih trajanja inercijskih faza, jer Pareto optimalna rješenja nisu uvijek gusto raspoređena po kriteriju trajanja inercijske faze. Također, valja napomenuti kako kod optimiranja parametara nije uključeno ograničenje

8. Skalabilni zakon optimalnog upravljanja promjenom stupnja prijenosa

na iznos redukcije momenta motora (v. izraz (7-3)), kako bi rezultati bili usporedivi s onima dobivenim uz primjenu skalabilnog zakona upravljanja.

Konačni rezultati provjere skalabilnog zakona upravljanja sadržani su u tablici 8-4. Za svaki razmatrani slučaj (tj. za svaki položaj pedale akceleratora) u tablici se uspoređuju vrijednosti indeksa trzaja vozila dobivene primjenom optimalnih upravljačkih profila za dani slučaj i skalabilnog zakona upravljanja. Rezultati provjere pokazuju kako skalabilni zakon pruža odlične performanse promjene stupnja prijenosa u širokom rasponu radnih uvjeta pri kojima se inicira promjena stupnja prijenosa. U većini slučajeva skalabilni zakon upravljanja zapravo daje manje indekse performansi od onih koji su dobiveni primjenom optimalnih profila za dani slučaj. To se objašnjava dodatnim upravljačkim djelovanjem motora na samom početku inercijske faze, koje nije bilo uključeno kod pristupa optimiranja parametara (usp. slike 8-10 i 7-1).

S ciljem dodatne provjere skalabilnog zakona upravljanja DTS-om, on se primjenjuje u promjeni stupnja koja se inicira na drugačijoj početnoj brzini vrtnje motora ($n_{e0} = 2250$ okr/min). Iako parametri skalabilnog zakona upravljanja nisu optimirani za taj slučaj (oni su optimirani za $n_{e0} = 1750$ okr/min), i dalje se dobivaju izvrsni rezultati. Naime, indeks trzaja vozila za sve je položaje pedale akceleratora smanjen u odnosu na referentno mjerilo (dobiveno optimiranjem parametara za dani slučaj) za približno isto trajanje inercijske faze.

Tablica 8-4. Vrijednosti indeksa trzaja vozila dobivene primjenom optimalnih upravljačkih profila i skalabilnog zakona upravljanja za razne položaje pedale akceleratora i početnu brzinu vrtnje motora od 1750 okr/min

n_{e0} [okr/min]	1750			
p_{th} [-]	Optimalni profili za dani slučaj		Skalabilni zakon upravljanja	
	j_{RMS} [m/s ³]	$t_{inertia}$ [ms]	j_{RMS} [m/s ³]	$t_{inertia}$ [ms]
0.6	3.741	456	3.362 (-10.1%)	459
0.7	3.508	435	3.092 (-11.9%)	439
0.8	3.95	421	3.141 (-20%)	422
0.9	3.819	396	3.141 (-9.2%)	395
1	3.731	371	4.046 (+8.5%)	371

8. Skalabilni zakon optimalnog upravljanja promjenom stupnja prijenosa

Tablica 8-5. Vrijednosti indeksa trzaja vozila dobivene primjenom optimalnih upravljačkih profila i skalabilnog zakona upravljanja za razne položaje pedale akceleratora i početnu brzinu vrtnje motora od 2250 okr/min

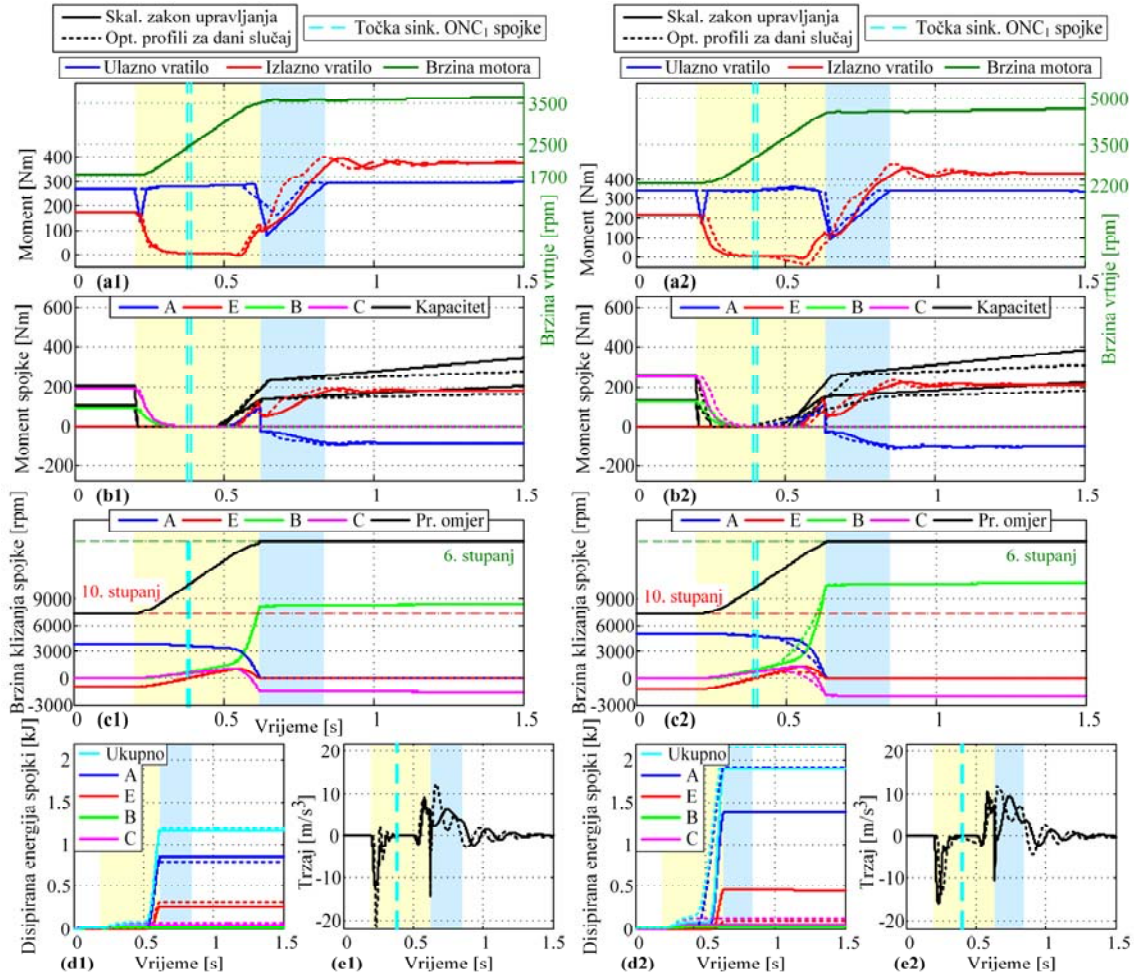
n_{e0} [okr/min]	2250			
p_{th} [-]	Optimalni profili za dani slučaj		Skalabilni zakon upravljanja	
	j_{RMS} [m/s ³]	$t_{inertia}$ [ms]	j_{RMS} [m/s ³]	$t_{inertia}$ [ms]
0.6	5.211	505	4.836 (-7.2%)	530
0.7	4.565	507	4.144 (-9.2%)	511
0.8	4.428	500	3.806 (-14%)	495
0.9	6.144	460	3.687 (-40%)	461
1	4.166	436	3.964 (-4.8%)	435

Slika 8-12 daje usporedbu odziva pogona vozila za 10-6 promjenu koja je izvedena korištenjem skalabilnog zakona upravljanja te usporedno i korištenjem optimalnih upravljačkih profila za iste uvjete. Analizom upravljačkih profila za radne uvjete $p_{th} = 0.8$ i $\omega_{e0} = 1750$ okr/min (slike 8-12a1-e1) može se zaključiti kako su oni vrlo slični za dva razmatrana pristupa. Glavna razlika odnosi se na upravljačko djelovanje motora na samom početku inercijske faze, koje uključuje kratkotrajnu redukciju momenta motora kod skalabilnog zakona upravljanja (slika 8-12a1). Takvim upravljačkim djelovanjem izbjegava se snažan negativni šiljak u odzivu trzaja vozila, koji je prisutan kada se primjenjuju optimalni upravljački profili koji u formulaciji problema nisu dopuštali ovo inicijalno djelovanje motora (slika 8-12e1). Druga razlika odnosi se na redukciju momenta motora na samom kraju inercijske faze, koja je nešto dublja i dužeg trajanja kod skalabilnog zakona upravljanja. Takva upravljačka djelovanja omogućila su smanjenje ukupnog RMS indeksa trzaja vozila za 20% u usporedbi s rezultatima dobivenim primjenom pristupa optimiranja parametara upravljačkih profila (v. tablicu 8-4).

Slike 8-12a2-e2 uspoređuju odzive za slučaj u kojem se promjena stupnja prijenosa inicira kod $p_{th} = 1$ i $\omega_{e0} = 1750$ okr/min. Primjena optimalnih upravljačkih profila sada ne rezultira snažnim negativnim trzajem na početku inercijske faze, jer se isključne spojke otpuštaju sporije (slika 8-12b2). Profil redukcije momenta motora na samom kraju inercijske faze vrlo je sličan za oba pristupa upravljanja. Upravljačka djelovanja su na kraju takva da rezultiraju vrlo sličnim odzivom trzaja vozila (v. sliku 8-12e2 i usp. tablicu 8-5), što ukazuje na izvrsnu robusnost

8. Skalabilni zakon optimalnog upravljanja promjenom stupnja prijenosa

predloženog skalabilnog zakona upravljanja na promjenu radnih uvjeta pri kojima se izvodi promjena stupnja prijenosa.



Slika 8-12. Odziv pogona vozila za 10-6 promjenu izvedenu korištenjem skalabilnog zakona upravljanja (pune linije), uključujući usporedbu s odzivom dobivenim primjenom optimalnih upravljačkih profila za razmatrani slučaj (isprekidane linije): (a1)-(e1) $p_{th} = 0.8$, $\omega_{e0} = 1750$ okr/min; i (a2)-(e2) $p_{th} = 1$, $\omega_{e0} = 2250$ okr/min

8.2.5. Proširenje skalabilnog zakona upravljanja DTS promjenom sustavom regulacije

Uz istu motivaciju kod STS-a (odjeljak 8.1.3), prethodno definiran skalabilni zakon upravljanja DTS promjenom stupnja prijenosa proširuje se sustavom regulacije. Budući da kod DTS-a završetak promjene stupnja prijenosa nije jednoznačno definiran zatvaranjem jedne uključne

spojke, ovdje se regulacijski krug zatvara po prijenosnom omjeru brzina vrtnji s_{ratio} . Regulator je aktivan u toku inercijske faze promjene (u kojoj se i odvija promjena prijenosnog omjera brzina). Kao referenca prijenosnog omjera brzina koristi se polinom trećeg reda koji je dan kao funkcija početnog omjera prijenosnog omjera brzina (definiran polaznim stupnjem prijenosa) i željenog trajanja inercijske faze. Takvim izborom reference osigurava se “meka” sinkronizacija brzina vrtnji, budući da referenca ulazi u konačno (stacionarno) stanje pod malim nagibom. Izlaz regulatora pribraja se nominalnom upravljačkom profilu prve uključne spojke (ONC₁).

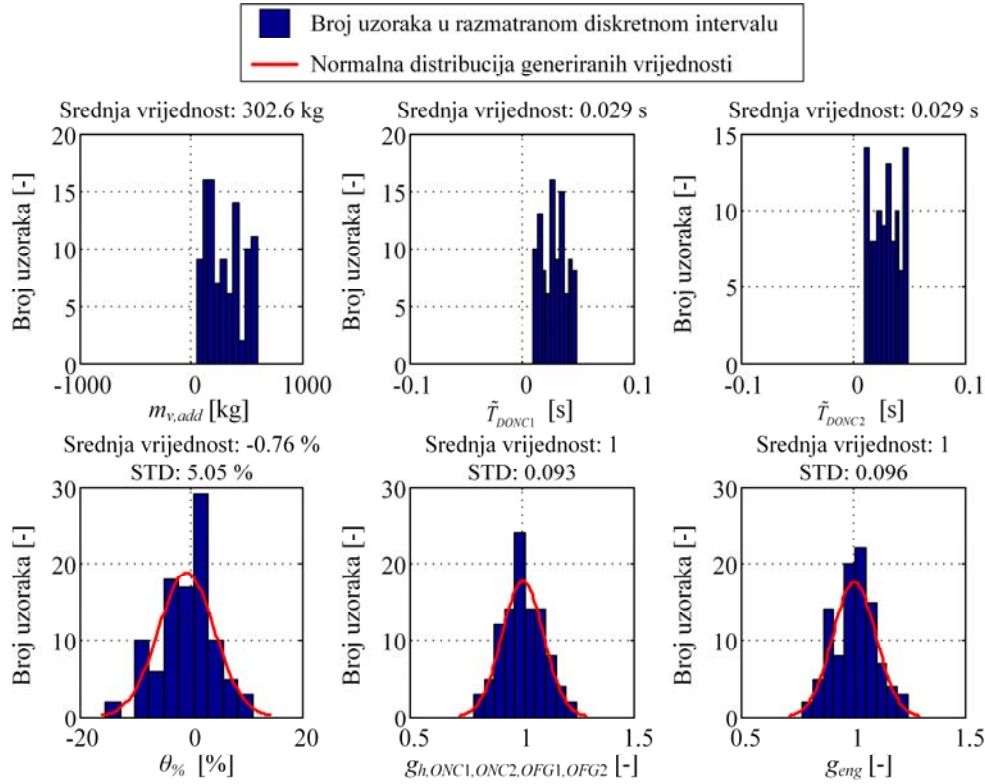
Kao regulator ponovno se koristi konvencionalni PID regulator s vremenski promjenjivim pojačanjima (ponovno se uvodi parametar κ koji je dan u obliku ogledne tablice kao funkcija vremena proteklog u inercijskoj fazi, v. odjeljak 8.1.3 i izraz (8-6)). Optimalne vrijednosti pojačanja regulatora određuju se zajedno s parametrima ogledne tablice kojom je definiran κ postupkom optimiranja parametara. U narednom odjeljku, simulacijski se ispituje cjelokupni zakon upravljanja DTS promjenom (skalabilni zakon proširen sustavom regulacije) na primjeru 10-6 promjene, uz položaj pedale akceleratora $p_{th} = 0.8$ i početnu brzinu vrtnje motora $\omega_{e0} = 1750$ okr/min (upravo za taj scenarij je i provedeno optimiranje parametara regulatora). Analize podešenja regulatora i njegovog ponašanja kod drugih promjena s dvostrukim prijelazom i radnih uvjeta pri kojima se one izvode mogu biti predmet budućeg istraživanja.

8.2.6. Simulacijska ispitivanja cjelokupnog zakona upravljanja DTS promjenom uključujući analizu robusnosti

U ovom će se odjeljku, na sličan način kao i za STS (v. odjeljak 8.1.4), ispitati robusnost predloženog optimalnog zakona upravljanja promjenom s dvostrukim prijelazom na varijacije parametara nesigurnosti aktuatorskog sustava i vanjskih poremećajnih parametara. Za tu svrhu nasumično se generiraju vrijednosti nagiba ceste, pojačanja aktivnih spojki, pojačanja redukcije momenta motora, dodatne mase vozila i mrtvog vremena modela ONC₁ i ONC₂ spojki. Pritom se za prva tri parametra pretpostavlja normalna distribucija, dok se za potonja tri pretpostavlja uniformna distribucija. Distribucije navedenih parametara prikazane su na slici 8-13, uz napomenu da se slučajno generirana vrijednost pojačanja spojke primijenjuje na sve aktivne spojke u DTS promjeni. Mrtvo vrijeme spojki s aktuatorima, s druge strane, može biti različito za dvije uključne spojke. Valja također napomenuti kako je, u usporedbi s postupkom

8. Skalabilni zakon optimalnog upravljanja promjenom stupnja prijenosa

ispitivanja STS-a, za ispitivanje DTS zakona upravljanja uzet drugačiji set slučajnih brojeva (ali uz iste srednje vrijednosti, odnosno standardne devijacije usporedivih parametara).

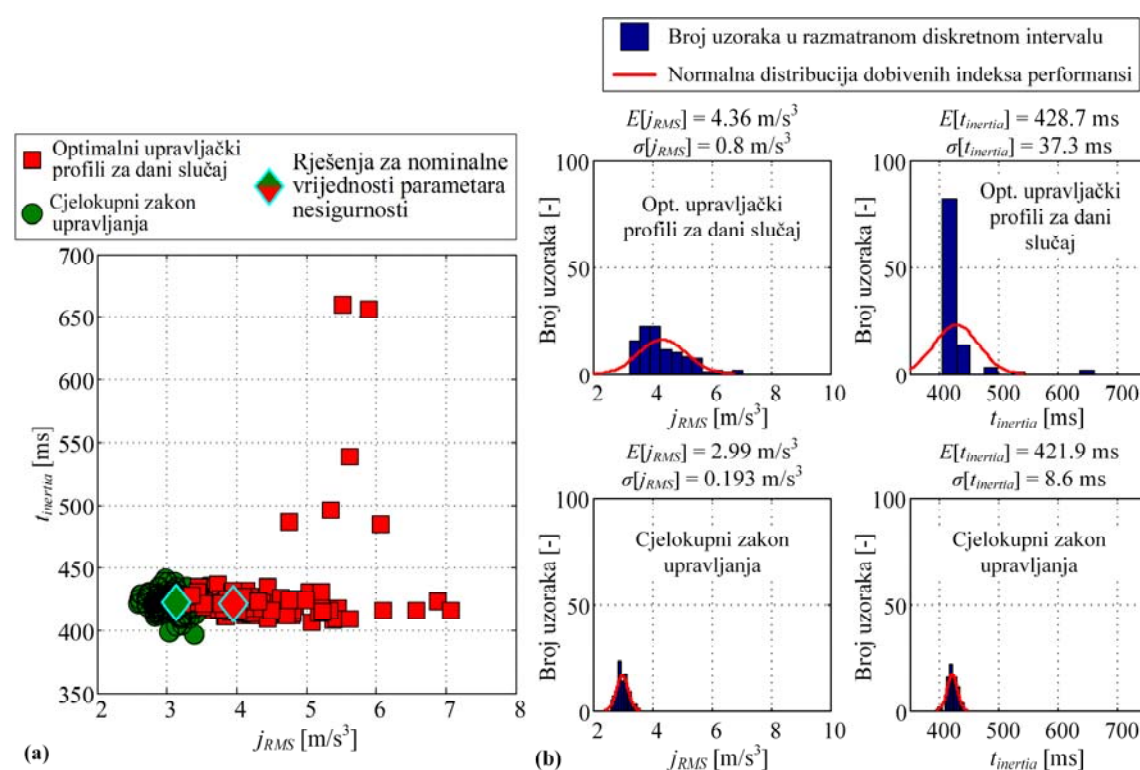


Slika 8-13. Distribucije parametara nesigurnosti aktuatorskog sustava spojke i vanjskih poremećajnih parametara za ispitivanje sustava upravljanja 10-6 promjene

Konačni simulacijski rezultati za 10-6 promjenu i za $p_{th} = 0.8$, $\omega_{e0} = 1750$ okr/min prikazani su na slici 8-14. Slika 8-14a prikazuje indekse performansi dobivene za razne vrijednosti parametara nesigurnosti i vanjskih poremećajnih parametara. Pritom su crvenom bojom označene točke dobivene uz primjenu optimalnih upravljačkih profila za dane radne uvjete (bez sustava regulacije). Valja napomenuti kako su primijenjeni upravljački profili jednaki za sve simulirane kombinacije varijacija parametara. Zelenom bojom označene su točke dobivene uz primjenu cjelokupnog optimalnog zakona upravljanja (skalabilni zakon upravljanja iz odjeljka 8.2.1 uz regulaciju). Vidljivo je kako se točke dobivene cjelokupnim optimalnim zakonom upravljanja grupiraju u vrlo usko područje po oba kriterija, što ukazuje na izrazito potiskivanje rasipanja indeksa performansi. Prednosti cjelokupnog zakona upravljanja dodatno su ilustrirane na slici 8-14b, koja prikazuje distribucije indeksa performansi. Iz naslova pojedinih grafova sa

8. Skalabilni zakon optimalnog upravljanja promjenom stupnja prijenosa

slike 8-14b vidljivo je kako cjelokupni zakon upravljanja omogućava smanjenje očekivanja indeksa trzaja vozila za 31%. Istovremeno, standardna devijacija indeksa trzaja vozila smanjuje se za 76%. Očekivanje trajanja promjene stupnja prijenosa neznatno se smanjuje uz primjenu cjelokupnog zakona upravljanja (za 1.6%), dok se standardna devijacija značajno smanjuje (za 77%). Pretpostavlja se da su tako značajna potiskivanja varijacija indeksa performansi dominantno ostvarena primjenom strategije upravljanja kod koje se određena upravljačka djelovanja odvijaju u ovisnosti o napredovanju promjene stupnja prijenosa (tj. u ovisnosti o postotku dovršenosti promjene, *PDP*).



Slika 8-14. Analiza simulacijskih ispitivanja za 10-6 promjenu: (a) indeksi performansi za razne vrijednosti parametara nesigurnosti i vanjskih parametara i (b) distribucije indeksa performansi

9. Zaključak

Na početku rada predstavljen je dinamički model pogona vozila na kojem se temelje simulacije i postupci optimiranja predstavljeni u ostatku rada. Središnji dio modela čini model 10-brzinskog mjenjača, koji je uzet kao generički primjer naprednog automatskog mjenjača. Matematički model mjenjača punog reda prvo je izveden analitički, polazeći od modela danog u formi veznog dijagrama kojim se na zoran način opisuje dinamika mjenjača. Nadalje, predložene su dvije metode za automatsko generiranje numeričkog modela mjenjača punog reda izravno iz veznog dijagrama mjenjača implementiranog u 20-sim okruženju. Općenito, preporučuje se korištenje metode temeljene na izvozu 20-sim modela u MATLAB, jer ona generira matematički model u simboličkoj formi pogodnoj za numeričku identifikaciju karakterističnih matrica modela punog reda putem MATLAB skripte.

Uz metodu za automatsko generiranje modela punog reda, predložen je i postupak za automatsko reduciranje reda modela za proizvoljno stanje spojki (tj. za bilo koji stupanj prijenosa ili promjenu stupnja prijenosa), koji se može izravno koristiti u raznim simulacijskim i optimizacijskim studijama. Metoda za automatsko reduciranje reda modela implementirana je kao MATLAB skripta te je uspješno provjerena za razne karakteristične uzlazne i silazne promjene s jednostrukim prijelazom. Pritom je pokazano da se model reduciranog reda izvodi oko 10 puta brže od modela punog reda koristi li se klasični model trenja spojki, odnosno u prosjeku dva puta brže ako se koristi Karnoppov model trenja spojki. Ultimativni cilj potpuno automatskog pristupa modeliranju bio bi automatsko generiranje modela izravno iz sheme automatskog mjenjača proizvoljne strukture. To bi zahtijevalo razvoj funkcionalnosti automatskog modeliranja koja bi pretvorila shemu mjenjača u odgovarajući vezni dijagram. Slične funkcionalnosti već su u nekoj mjeri implementirane u 20-sim te njihova šira primjena na automatske mjenjače i slične sustave pogona može biti predmet budućeg rada.

S ciljem boljeg razumijevanja optimalnog dinamičkog ponašanja promjene stupnja prijenosa i razvoja s tim povezanih strategija upravljanja, u ovom su radu korištena dva temeljna postupka optimiranja. Kod prvog postupka, optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa automatskog mjenjača provodi se korištenjem pseudospektralne kolokacijske metode. U drugom postupku optimiraju se parametri praktičnih, po odsječcima linearnih profila

9. Zaključak

upravljanja primjenom više-kriterijskog algoritma optimiranja. Postupak optimiranja upravljačkih varijabli na početku je ispitan na različitim scenarijima upravljanja promjenom s jednostrukim prijelazom. Ta ispitivanja ukazala su na dobru računalnu učinkovitost, numeričku stabilnost i robusnost predloženog postupka optimiranja. U isto vrijeme, ona su se pokazala korisnim sa stanovišta kvantifikacije značajki dinamičkog ponašanja automatskog mjenjača u toku promjene stupnja prijenosa, poput primjerice: (i) prednosti uvođenja upravljanja momentom motora, (ii) kompromisa između suzbijanja uzdužnog trzaja vozila i redukcije gubitaka energije u spojkama, te (iii) poboljšanja koja se postižu korištenjem nekonvencionalnih pristupa upravljanja (npr. korištenjem isključne ili dodatne spojke u inercijskoj fazi). Između četiri razmatrana pristupa modeliranja trenja spojke, pristup temeljen na propisivanju odnosa po fazama pokazao se superiornim u smislu numeričke učinkovitosti i robusnosti. Međutim, taj je pristup primjenjiv samo kod konvencionalnog upravljanja za promjenu s jednostrukim prijelazom. Pristup temeljen na ograničenju tipa pasivnosti spojke preporučuje se za širok raspon zadataka, uključujući promjene s dvostrukim prijelazom. Kada postoji potreba za optimiranjem kapaciteta momenta spojke (umjesto izravnog optimiranja momenta spojke), preporučuje se korištenje klasičnog modela trenja spojke. Prikazana metodologija optimiranja upravljačkih varijabli može se primijeniti i na druge vrste automatskih mjenjača (npr. transmisije s dvostrukom spojkom i hibridizirane/elektrificirane transmisije), kao i na mehatroničke sustave s trenjem općenito.

Metoda za optimiranje upravljačkih varijabli promjene stupnja prijenosa potom je primijenjena za optimiranje kompleksnije promjene s dvostrukim prijelazom (u kojoj se istovremeno upravlja s četiri spojke). Sa svrhom dobivanja uvida u optimalnu koordinaciju između različitih aktuatora (četiri aktivne spojke i motor s unutarnjim izgaranjem), u radu je predloženo šest različitih strategija upravljanja koje su ukomponirane u problem optimiranja kroz dodatna ograničenja vezana uz faze promjene stupnja prijenosa. Rezultati analize pokazali su kako primjena različitih strategija upravljanja rezultira raznovrsnim skupom optimalnih upravljačkih djelovanja, s različitim perspektivama primjene u stvarnom upravljačkom sustavu automatskog mjenjača. Analiza temeljena na rezultatima optimiranja za razne scenarije upravljanja pokazala je kako Strategija 4, kod koje se isključne spojke brzo otpuštaju, može pružiti superiorne performanse u smislu udobnosti, brzine i energetske učinkovitosti promjene stupnja prijenosa. Strategija 6, kod koje nije dozvoljena promjena predznaka momenata i brzina vrtnji uključenih

9. Zaključak

spojki, može pružiti performanse koje su vrlo konkurentne onima ostvarivima primjenom Strategije 4. Međutim, ta strategija zahtijeva zatvaranje jedne od ključnih spojki u toku inercijske faze, što može biti vrlo zahtjevno sa stanovišta praktične implementacije.

Rezultati dobiveni optimiranjem upravljačkih varijabli nisu izravno primjenjivi u realnim sustavima u kojima se tipično koriste pojednostavljeni profili koji se lakše interpretiraju, ostvaruju i parametriraju (kalibriraju). Osim toga, u odsustvu regulacije momenta spojki, održavanje momenta spojki na proizvoljnim referentnim profilima može biti vrlo izazovan zadatak, posebice kada se uzme u obzir izrazito nelinearna karakteristika spojki oko brzine klizanja jednake nuli te varijabilnost parametara modela spojke s pridruženim hidrauličkim aktuatorom. Rezultati optimiranja upravljačkih varijabli stoga su se u radu primijenili za profiliranje praktičnih i približno optimalnih trajektorija upravljačkih varijabli danih u obliku po odsječcima linearnih krivulja. Optimalne vrijednosti karakterističnih parametara loma tako formuliranih upravljačkih varijabli određene su rješavanjem više-kriterijskog problema optimiranja. Tako formulirani problem optimiranja riješen je primjenom genetskog algoritma MOGA-II implementiranog unutar modeFRONTIER programskog okruženja. Parametarsko optimiranje započeto je s temeljnim uzlaznim i silaznim promjenama stupnjeva prijenosa s jednostrukim prijelazom. Analiza je pokazala da primjena predložene metodologije rezultira širokim skupom Pareto optimalnih rješenja. Time se korisniku omogućava odabir željenog (i optimalnog) kompromisa između vremena trajanja promjene stupnja prijenosa i trzaja vozila. Optimirani po odsječcima linearni profili uspoređeni su s onim dobivenim općenitijem pristupom optimiranja upravljačkih trajektorija, te je pokazano kako su oni međusobno slični.

Uz konvencionalan pristup više-kriterijskog optimiranja parametara profila upravljačkih varijabli, predložena je metoda za stohastičko robusno optimiranje parametara, koja simultano minimizira četiri kriterija – očekivane vrijednosti trajanja promjene stupnja prijenosa i indeksa trzaja vozila te njihova standardna odstupanja. Rezultati robusnog optimiranja parametara pokazali su da je moguće definirati upravljačke profile na način da se očekivana vrijednost i standardno odstupanje trajanja promjene stupnja prijenosa reduciraju. Postizanje robusnosti s obzirom na trajanje promjene je, međutim, postignuto smanjenom udobnošću promjene (očekivana vrijednost indeksa trzaja vozila raste). Može se zaključiti kako upravljački profili dobiveni bazičnim (ne robusnim) pristupom optimiranja parametara pružaju dobru sveukupno

9. Zaključak

robusnost i kako su daljnja poboljšanja dobivena primjenom robusnog optimiranja parametara prilično ograničena. Također valja naglasiti kako vrijeme izvođenja postupka optimiranja raste i do nekoliko puta u slučaju primjene robusnog optimiranja parametara (ovisno o broju uzoraka parametara nesigurnosti).

Postupak više-kriterijskog optimiranja parametara upravljačkih profila proveden je zatim za promjene stupnja prijenosa s dvostrukim prijelazom. Slično kao i kod pristupa kod kojeg se optimiraju upravljačke varijable, predložene su različite upravljačke strategije koje se razlikuju po stupnju kompleksnosti, tj. po broju parametara koji definiraju oblik po odsječcima linearnih upravljačkih profila. Analize su ponovno pokazale da upotreba različitih strategija može rezultirati vrlo širokim spektrom optimalnih upravljačkih djelovanja. Optimiranja su nadalje provedena za razne promjene s dvostrukim prijelazom i za tri različita profila momenta motora s konačnim ciljem vrednovanja predloženih upravljačkih strategija temeljem pažljivo odabranih indeksa performansi. Rezultati vrednovanja pokazali su kako su predložene strategije učinkovite u različitim zadacima upravljanja promjenom s dvostrukim prijelazom i da su općenito međusobno konkurentne. Najviša finalna (kombinirana) ocjena pripada Strategiji C koja se odnosi na brzo otpuštanje isključnih spojki, što se objašnjava sljedećim značajkama ove strategije: (i) pogodna je sa stanovišta energetske učinkovitosti pogona, budući da je energija disipirana u spojkama obično najmanja za ovu strategiju; (ii) karakterizirana je najmanjim brojem upravljačkih parametara i jednostavnim, potpuno linearnim upravljačkim profilima isključnih spojki.

U završnom dijelu rada provedeno je prilagođavanje optimiranih nominalnih profila upravljačkih varijabli vozačevim komandama, što je ostvareno uvođenjem skalabilnog zakona upravljanja. Kod promjena s jednostrukim prijelazom, skalabilni zakon upravljanja određen je temeljem kvantitativne analize rezultata optimiranja dobivenih općim pristupom optimiranja upravljačkih trajektoriji. Određeni faktori skaliranja momenta ključne spojke i redukcije momenta motora aproksimirani su 2D polinomskim krivuljama s ciljem smanjenja broja parametara kojima je definiran skalabilni zakon upravljanja. Analize su pokazale kako takav pristup daje vrlo dobre rezultate u smislu približavanja referentnom mjerilu dobivenom optimiranjem. S druge strane, za potrebe definiranja skalabilnog zakona upravljanja za promjene s dvostrukim prijelazom, uveden je tzv. postotak dovršenosti promjene stupnja

9. Zaključak

prijenosa, na kojeg su vezane točke loma po odsječcima linearnih profila. Nakon što su definirani nominalni upravljački profili skalabilnog zakona upravljanja za promjene s dvostrukim prijelazom (u osnovni vrlo slični onima za Strategiju C, za koju je prethodno pokazano da daje najbolje rezultate), formuliran je problem optimiranja čiji je cilj dobivanje optimalnih vrijednosti parametara kojima je definiran skalabilni zakon upravljanja. Pritom je korištena metodologija robusnog parametarskog optimiranja koja daje okvir za sustavno variranje položaja pedale akceleratora, koji se uzima kao parametar nesigurnosti kod skalabilnog zakona upravljanja. Usporedbom ostvarenih performansi u raznim radnim uvjetima motora s referentnim mjerilom, pokazano je kako skalabilni zakon omogućuje postizanje performansi koje su bliske optimalnim.

Konačno, upravljanje momentom aktivnih spojki prošireno je regulacijskim djelovanjima, čime je ostvarena korekcija upravljačkih djelovanja u prisustvu poremećajnih varijabli. Cjelokupni sustav upravljanja ispitan je putem računalnih simulacija te je pokazano da primjena skalabilnog zakona upravljanja u sprezi sa sustavom regulacije omogućuje postizanje robusnosti cjelokupnog sustava upravljanja na promjenu radnih uvjeta, koji uključuju varijacije vanjskih parametara poput nagiba ceste i mase vozila. Predmet budućeg rada u ovom području mogao bi se odnositi na projektiranje naprednijih sustava upravljanja, poput modelskog prediktivnog upravljanja.

Na temelju izloženog, mogu se izdvojiti sljedeći znanstveni doprinosi doktorskog rada:

- Postupak automatskog modeliranja i automatskog reduciranja reda modela naprednog automatskog mjenjača s velikim brojem stupnjeva prijenosa za proizvoljno stanje spojki.
- Optimiranje upravljačkih varijabli momenata spojki mjenjača i momenta motora s unutarnjim izgaranjem za promjene stupnja prijenosa s dvostrukim prijelazom, te analiza rezultata sa svrhom definiranja optimalnih karakteristika promjene stupnja prijenosa.
- Profiliranje po dijelu linearnih trajektorija upravljačkih varijabli za promjene s dvostrukim prijelazom, formuliranje skalabilnog zakona upravljanja u koordinaciji s

9. Zaključak

komandama vozača, te optimiranje parametara profila uz postizanje robusnosti na varijacije temeljnih parametara odziva aktuatora.

Literatura

- [1] Vadjon (ur.) V. Tehnika motornih vozila: 30. prerađeno i nadopunjeno izdanje. Hrvatska: Pučko otvoreno učilište Zagreb; 2017.
- [2] Greiner J, Grumbach M. Automatic Transmission Systems Beyond 2020 - Challenges and Competition. SAE Technical Paper, no. 2013-01-1273, 2013. doi:10.4271/2013-01-1273.
- [3] Krishnaswami R, Norris K. All-New Ford 10-Speed RWD Planetary Transmission Design & Development: A Discussion of Efficient Powerflow and Related Technologies. 10th International CTI Symposium, Novi, Michigan, USA: 2016.
- [4] Masunaga S, Miyazaki T, Habata Y, Yamada K, Hasegawa Y, Kondo T, et al. Development of Innovative Toyota 10-Speed Longitudinal Automatic Transmission. SAE International Journal of Engines 2017;10. doi:10.4271/2017-01-1099.
- [5] Kondo M, Hasegawa Y, Takanami Y, Arai K, Tanaka M, Kinoshita M, et al. Toyota AA80E 8-Speed Automatic Transmission with Novel Powertrain Control System. SAE Technical Paper no. 2007-01-1311, 2007. doi:10.4271/2007-01-1311.
- [6] Marano J, Moorman S, Czoykowski J, Ghike C. Automatic Transmission Rotational Inertia Effect on Shift Quality. SAE Technical Paper no. 2011-01-0393, 2011. doi:10.4271/2011-01-0393.
- [7] Seong-Wook J, Jae-Chang K, Won-Min C, Myeong-Hoon N, Kang-Soo S, Seong-Wook H. Multi-stages automatic transmission for vehicle. US Patent No. 2016/0123432 A1, 2015.
- [8] Beck S, Sibla C. Multi-speed automatic transmission. US Patent No. 9,759,291 B2, 2016.
- [9] Phillips AW. Eleven speed dual clutch transmission. US Patent No. 9,003,906 B2, 2014.
- [10] Goleski GD, Baldwin RA. Multi-Speed Transmission. US Patent No. 8,545,362, 2013.
- [11] Fu YX, Cui LY, Xu XY, Dong P. Analysis of Dynamic Characteristics of Automatic Transmission Shifting Control. Applied Mechanics and Materials 2014;643:42–7. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.643.42.
- [12] Jo HS, Park YI, Lee JM, Jang WJ, Park JH, Lim WS. Study on the improvement of the shift characteristics for the passenger car automatic transmission. International Journal of Vehicle Design 2000;23:307–28.
- [13] Kouroussis G, Dehombreux P, Verlinden O. Vehicle and powertrain dynamics analysis with an automatic gearbox. Mechanism and Machine Theory 2015;83:109–24. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2014.09.009.
- [14] Zhang N, Liu DK, Jeyakumaran JM, Villanueva L. Modelling of dynamic characteristics of an automatic transmission during shift changes. Proceedings of the

- Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering, vol. 216, 2002, p. 331–41.
- [15] Bai S, Maguire JM, Peng H. Dynamic Analysis and Control System Design of Automatic Transmissions. Warrendale, PA: SAE International; 2013. doi:10.4271/R-413.
 - [16] Deur J, Asgari J, Hrovat D, Kovač P. Modeling and Analysis of Automatic Transmission Engagement Dynamics-Linear Case. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 2006;128:263–77. doi:10.1115/1.2192827.
 - [17] Hrovat D, Tobler WE. Bond graph modeling of automotive power trains. Journal of the Franklin Institute 1991;328:623–62. doi:10.1016/0016-0032(91)90046-6.
 - [18] Cho D, Hedrick JK. Automotive Powertrain Modeling for Control. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 1989;111:568–76. doi:10.1115/1.3153093.
 - [19] Deur J, Asgari J, Hrovat D. Modeling and Analysis of Automatic Transmission Engagement Dynamics-Nonlinear Case Including Validation. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 2006;128:251. doi:10.1115/1.2192826.
 - [20] Ivanovic V, Tseng HE. Bond Graph Based Approach for Modeling of Automatic Transmission Dynamics. SAE International Journal of Engines 2017;10. doi:10.4271/2017-01-1143.
 - [21] Ersal T, Fathy HK, Rideout DG, Louca LS, Stein JL. A Review of Proper Modeling Techniques. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 2008;130:061008. doi:10.1115/1.2977484.
 - [22] Seo J, Yi S-J. Design of an automatic transmission system having an arbitrary power flow using the automatic power flow generation algorithm. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering 2005;219:1085–97. doi:10.1243/095440705X34766.
 - [23] Ranogajec V, Deur J. A Bond Graph-based Method of Automated Generation of Automatic Transmission Mathematical Model. SAE International Journal of Engines 2017;10:1367–74. doi:10.4271/2017-01-1142.
 - [24] Kleijn C, Groothuis MA, Differ HG. 20-sim 4.5 Reference Manual. Enschede: Controllab Products B.V.; 2015.
 - [25] Haj-Fraj A, Pfeiffer F. Optimal control of gear shift operations in automatic transmissions. Journal of the Franklin Institute 2001;338:371–90. doi:10.1016/S0016-0032(00)00091-0.
 - [26] Nezhadali V, Eriksson L. A framework for modeling and optimal control of automatic transmission systems. IFAC-PapersOnLine 2015;48:285–91. doi:10.1016/j.ifacol.2015.10.041.
 - [27] Čorić M, Ranogajec V, Deur J, Ivanović V, Tseng HE. Optimization of Shift Control Trajectories for Step Gear Automatic Transmissions. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 2017;139:61005–13. doi:10.1115/1.4035403.
 - [28] Liu Y, Wang SH, Lu X, Song T Bin, Wei WS, Xu XY. Research of Gear Shift Control

- Technology for a New 8-Step Speed Automatic Transmission 2013;455:376–82. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.455.376.
- [29] Lee S, Zhang Y, Jung D, Lee B. A Systematic Approach for Dynamic Analysis of Vehicles With Eight or More Speed Automatic Transmission. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 2014;136. doi:10.1115/1.4027169.
- [30] Ranogajec V, Deur J. An Automated Model-order Reduction Method for Advanced Automatic Transmissions. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 2017;139:071004. doi:10.1115/1.4035607.
- [31] Guo W, Liu Y, Zhang J, Xu X. Dynamic Analysis and Control of the Clutch Filling Process in Clutch-to-Clutch Transmissions. *Mathematical Problems in Engineering* 2014;2014:1–14. doi:10.1155/2014/293637.
- [32] Song X, Sun Z. Pressure-Based Clutch Control for Automotive Transmissions Using a Sliding-Mode Controller. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 2012;17:534–46. doi:10.1109/TMECH.2011.2106507.
- [33] Marano JE, Moorman SP, Whitton MD, Williams RL. Clutch-to-clutch transmission control strategy. *SAE Technical Paper no. 2007-01-1313*, 2007. doi:10.4271/2007-01-1313.
- [34] Sanada K, Gao B, Kado N, Takamatsu H, Toriya K. Design of a robust controller for shift control of an automatic transmission. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 2012;226:1577–84. doi:10.1177/0954407012450822.
- [35] Gao BZ, Chen H, Sanada K, Hu Y. Design of clutch-slip controller for automatic transmission using backstepping. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 2011;16:498–508. doi:10.1109/TMECH.2010.2045391.
- [36] Li G, Huang Y, Ge Y, Wan G. Engine coordinated control for automatic transmission downshift process. *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, IEEE; 2013*, p. 137–41. doi:10.1109/ICVES.2013.6619618.
- [37] Zhu S, Hu JH. Driving Intention Based Optimal Shift Control for Automatic Transmission. *Applied Mechanics and Materials* 2014;472:36–43. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.472.36.
- [38] Ranogajec V, Ivanović V, Deur J, Tseng HE. Optimization-based assessment of automatic transmission double-transition shift controls. *Control Engineering Practice* 2018;76:155–66. doi:10.1016/j.conengprac.2018.04.016.
- [39] Hebbale K. Dynamic analysis and simulation of driveability and control of a double transition shifting system. *5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference VPPc '09, Dearborn, MI: IEEE; 2009*, p. 348–53. doi:10.1109/VPPC.2009.5289829.
- [40] Kahlbau S, Bestle D. Optimal Shift Control for Automatic Transmission. *Mechanics Based Design of Structures and Machines* 2013;41:259–73. doi:10.1080/15397734.2012.756719.
- [41] Zhao ZG, Yang YY, Chen HJ, Li XY. Torque coordinating optimal control in shifting

- process for hybrid car equipped with dry dual clutch transmission. *Zhongguo Gonglu Xuebao/China Journal of Highway and Transport* 2015;28.
- [42] Ranogajec V, Čorić M, Deur J, Ivanović V. Multi-objective Parameter Optimization of Automatic Transmission Shift Control Profiles. SAE Technical Paper no. 2018-01-1164, 2018. doi:10.4271/2018-01-1164.
- [43] Ranogajec V, Deur J, Ivanović V, Tseng HE. Multi-objective Parameter Optimization of Control Profiles for Automatic Transmission Double-transition Shifts. *Control Engineering Practice* 2018;u recenzij.
- [44] von Stryk O, Bulirsch R. Direct and indirect methods for trajectory optimization. *Annals of Operations Research* 1992;37:357–73. doi:10.1007/BF02071065.
- [45] Rao A. Trajectory Optimization: A Survey. In: Waschl H, Kolmanovsky I, Steinbuch M, del Re L, editors. *Optimization and Optimal Control in Automotive Systems SE - 1*, vol. 455, Springer International Publishing; 2014, p. 3–21. doi:10.1007/978-3-319-05371-4_1.
- [46] Graham KF, Rao A V. Minimum-Time Trajectory Optimization of Multiple Revolution Low-Thrust Earth-Orbit Transfers. *Journal of Spacecraft and Rockets* 2015;52:711–27. doi:10.2514/1.A33187.
- [47] Limebeer DJN, Perantoni G, Rao AV. Optimal control of Formula One car energy recovery systems. *International Journal of Control* 2014;87:2065–80. doi:10.1080/00207179.2014.900705.
- [48] Xu S, Li SE, Deng K, Li S, Cheng B. A Unified Pseudospectral Computational Framework for Optimal Control of Road Vehicles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 2015;20:1499–510. doi:10.1109/TMECH.2014.2360613.
- [49] Deur J, Čorić M, Kasać J, Assadian F, Hrovat D. Applications of Computational Optimal Control to Vehicle Dynamics. In: Waschl H, Kolmanovsky I, Steinbuch M, del Re L, editors. *Optimization and Optimal Control in Automotive Systems SE - 8*, vol. 455, Springer International Publishing; 2014, p. 131–46. doi:10.1007/978-3-319-05371-4_8.
- [50] Armstrong-Hélouvry B, Dupont P, De Wit CC. A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction. *Automatica* 1994;30:1083–138. doi:10.1016/0005-1098(94)90209-7.
- [51] Astrom KJ, Canudas-de-Wit C. Revisiting the LuGre friction model. *IEEE Control Systems* 2008;28:101–14. doi:10.1109/MCS.2008.929425.
- [52] Rutquist PE, Edvall MM. PROPT - Matlab Optimal Control Software. Tomlab Optimization Inc, Seattle, WA: 2010.
- [53] Čorić M, Deur J, Xu L, Tseng HE, Hrovat D. Optimisation of active suspension control inputs for improved vehicle ride performance. *Vehicle System Dynamics* 2016;54:1004–30. doi:10.1080/00423114.2016.1177655.
- [54] Čorić M, Deur J, Kasać J, Tseng HE, Hrovat D. Optimization of active suspension control inputs for improved vehicle handling performance. *Vehicle System Dynamics*
-

- 2016;54:1574–600. doi:10.1080/00423114.2016.1222075.
- [55] Ranogajec V, Deur J. Bond graph analysis and optimal control of the hybrid dual clutch transmission shift process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-Body Dynamics* 2017;231:480–92. doi:10.1177/1464419317705989.
 - [56] Wurm MSA, Bestle D. New Approach for Transmission Calibration - Model-based Multi-objective Optimization via SIL. 7th International Symposium and Exhibition, 2013.
 - [57] Poles S. MOGA-II An improved Multi-Objective Genetic Algorithm. 2003.
 - [58] Anonymus. modeFRONTIER User Guide. Trieste: ESTECO SpA; 2017.
 - [59] Mishra KD, Srinivasan K. Robust control and estimation of clutch-to-clutch shifts. *Control Engineering Practice* 2017;65:100–14. doi:10.1016/j.conengprac.2017.05.007.
 - [60] Liu Z-Y, Gao J-W, Zheng Q. Robust clutch slip controller design for automatic transmission. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 2011;225:989–1005. doi:10.1177/0954407011403661.
 - [61] Mishra KD, Srinivasan K. Robust Nonlinear Control of Inertia Phase in Clutch-to-Clutch Shifts. *IFAC-PapersOnLine* 2015;48:277–84. doi:10.1016/j.ifacol.2015.10.040.
 - [62] Karnopp DC, Margolis DL, Rosenberg RC. *System Dynamics: A Unified Approach*. New York: Wiley; 1990.
 - [63] Hrovat D, Tobler WE. Bond graph modeling and computer simulation of automotive torque converters. *Journal of the Franklin Institute* 1985;319:93–114. doi:10.1016/0016-0032(85)90067-5.
 - [64] Suzuki T, Sugiura H, Niinomi A, Maezuka S. New RWD 10 Speed Automatic Transmission for Passenger Vehicles Terufumi Miyazaki and Yohei Habata. *SAE International Journal of Engines* 2017;10. doi:10.4271/2017-01-1097.
 - [65] Deur J, Ivanović V, Hancock M, Assadian F. Modeling and Analysis of Active Differential Dynamics. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 2010;132:061501. doi:10.1115/1.4002482.
 - [66] Karnopp D. Computer Simulation of Stick-Slip Friction in Mechanical Dynamic Systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME* 1985;107:100–3.
 - [67] Dahl PR. *A solid friction model*. El Segundo, California: The Aerospace Corporation; 1968.
 - [68] Meyer CD. *Matrix Analysis and Applied Linear Algebra*. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics; 2000.
 - [69] Jacobson B. Outline of a new control concept for power shifting of fixed step ratio automotive transmissions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 2001;215:613–24. doi:10.1243/0954407011528202.

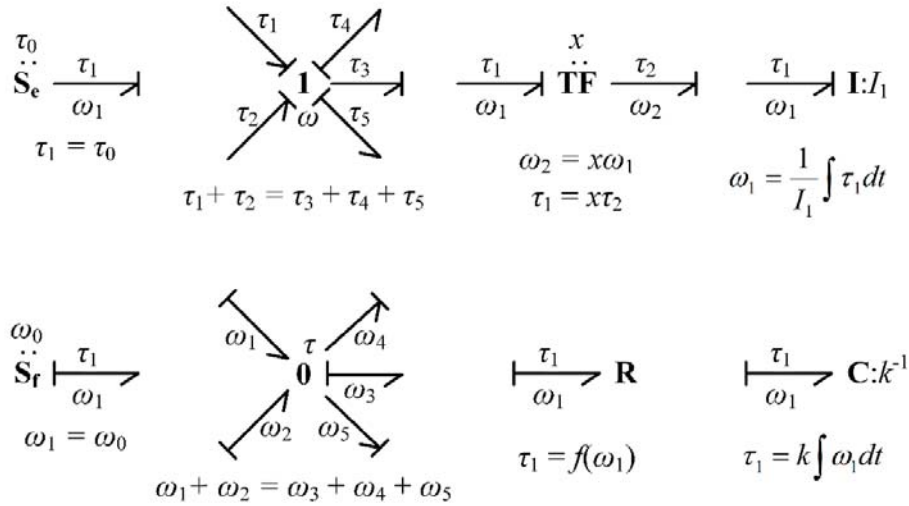
-
- [70] Ranogajec V, Deur J, Čorić M. Bond Graph Analysis of Automatic Transmission Shifts including Potential of Extra Clutch Control. *SAE International Journal of Engines* 2016;9:1929–45. doi:10.4271/2016-01-1146.
- [71] Carpinteri A. *Structural Mechanics: A unified approach*. Abingdon, UK: Taylor & Francis; 2002.
- [72] Hrovat D, Asgari J, Fodor M. Automotive Mechatronic Systems. In: Leondes CT, editor. *Mechatronic Systems Techniques and Applications*, Newark, NJ, USA: Gordon and Breach Science Publishers, Inc.; 2000, p. 1–98.
- [73] Ranogajec V, Deur J. Analysis of Influence of Inertia Coupling on Automatic Transmission Shift Dynamics. *Powertrain Modelling and Control Conference (PMC 2018)*, Loughborough, UK: 2018.
- [74] Betts JT. *Practical Methods for Optimal Control Using Nonlinear Programming*. Society for Industrial and Applied Mathematics; 2001.
- [75] Goh CJ, Teo KL. Control parametrization: A unified approach to optimal control problems with general constraints. *Automatica* 1988;24:3–18. doi:10.1016/0005-1098(88)90003-9.
- [76] Logsdon JS, Biegler LT. Accurate Solution of Differential-Algebraic Optimization Problems. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 1989. doi:10.1021/ie00095a010.
- [77] Čorić M. Optimiranje upravljačkih trajektorija aktivnog ovjesa u svrhu analize unaprjeđenja karakteristika dinamike vozila. University of Zagreb, Croatia, 20117.
- [78] Garg D. *Advances in global pseudospectral methods for optimal control*. University of Florida, USA, 2011.
- [79] Gill PE, Murray W, Saunders MA. SNOPT: An SQP Algorithm for Large-Scale Constrained Optimization. *SIAM Journal on Optimization* 2002;12:979–1006. doi:10.1137/S1052623499350013.
- [80] Hrovat D, Powers WF. Computer Control Systems for Automotive Power Trains. *IEEE Control Systems Magazine* 1988;8:3–10. doi:10.1109/37.7724.
- [81] Fujii Y, Asgari J, Hrovat D, Jiang H, Pietron GM, Riedle B, et al. Ratio shift control system and method for a multiple-ratio automatic transmission. US Patent No. 8,328,688*, 2012.
- [82] Zhao Z-G, Chen H-J, Yang Y-Y, He L. Torque coordinating robust control of shifting process for dry dual clutch transmission equipped in a hybrid car. *Vehicle System Dynamics* 2015;53:1269–95. doi:10.1080/00423114.2015.1043921.
- [83] Škugor B. Modeliranje i optimalno punjenje flote električnih dostavnih vozila. University of Zagreb, Croatia, 2016.
- [84] Marler RT, Arora JS. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 2004;26. doi:10.1007/s00158-003-0368-6.
- [85] Gal T, Greenberg HJ, editors. *Advances in Sensitivity Analysis and Parametric*
-

- Programming. 1st ed. Springer US; 2012. doi:10.1007/978-1-4615-6103-3.
- [86] Floudas CA, Pardalos P m., editors. Encyclopedia of optimization. 2nd ed. New York: Springer US; 2009.
- [87] Zitzler E, Thiele L. Multiobjective optimization using evolutionary algorithms - A comparative case study. 5th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, PPSN 1998 1998;1498 LNCS:292–301.
- [88] Ranogajec V, Deur J. Postupak definiranja skalabilnog zakona upravljanja promjenom stupnja prijenosa automatske transmisije za jednostruki prijelaz. Znanstveno-istraživački izvještaj, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2018.
- [89] Hu Y, Tian L, Gao B, Chen H. Nonlinear gearshifts control of dual-clutch transmissions during inertia phase. ISA Transactions 2014;53:1320–31. doi:10.1016/j.isatra.2014.03.017.
- [90] Lu X, Dai Z, Li Q, Fan W. Closed Loop Slip Control Strategy for Shifting Clutches in Hydraulic Automatic Transmission. Proceedings of the 2015 27th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2015, 2015, p. 1741–6. doi:10.1109/CCDC.2015.7162201.
- [91] Tepes B, Kasac J, Deur J. Optimal control of automated transmission engagement process. 2012 IEEE International Conference on Control Applications, IEEE; 2012, p. 329–35. doi:10.1109/CCA.2012.6402737.

Prilozi

Prilog A – Elementi veznog dijagrama

Vezni dijagram sastoji se od elemenata međusobno povezanih vezama toka snage (*engl. Bonds*; slika A-1, [62]). Smjer toka snage označava se polustrelicom na vezi. Svakoj vezi odgovara varijabla poriva e (kod mehaničkih rotacijskih sustava to je okretni moment τ) i varijabla toka f (kod mehaničkih sustava brzina vrtnje ω), pri čemu polustrelica označava istovremeni i (referentni) smjer poriva i toka. Važna informacija na pojedinom elementu je kauzalnost koja se označava okomitom crticom na jednom od krajeva veze. Kauzalnost definira uzročno-posljedičnu tj. ulazno-izlaznu vezu momenta i brzine vrtnje na danom elementu: crtica postavljena uz polustrelicu definira da je moment ulazna varijabla a da se brzina vrtnje računa, dok obratno vrijedi za slučaj crtice postavljene na suprotnoj strani od polustrelice. Za **I** i **C** elemente preferira se postavljanje integralne kauzalnosti, a ako se pojavi derivativna, to znači da se radi o energetske zavisnoj varijabli stanja, tj. manjem redu modela od broja **I** i **C** elemenata (vidi npr. sliku 2-9b)



Slika A-1. Korišteni elementi veznog dijagrama i pripadajuće jednačbe [62]

Prilog B – Matrice modela automatskog mjenjača punog reda

Analitička rješenja za matrice **A**, **B** i **U** modela mjenjača punog reda, danog jednadžbama (2-11) i (2-14) mogu se izvesti temeljem veznog dijagrama modela prikazanog na slici 2-9b (v. [16] za više detalja o postupku izvođa analitičkog modela za drugi tip mjenjač, te potpoglavlje 2.2 i sliku 2-9b za značenje simbola parametara modela). Konačni rezultati za matricu inercija **A** su

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & a_{35} \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & 0 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & 0 & a_{55} \end{bmatrix}, \quad (\text{A-1})$$

uz:

$$\begin{aligned} a_{11} &= I_{C2,t} + (1+h_2)^{-2} h_2^{-2} I_{R2S3} + h_2^{-2} (1+h_2)^2 (1+h_3)^{-2} I_{C3} \\ a_{22} &= I_{R1} + h_2^2 I_{S1S2} + h_1^2 h_2^{-2} I_{R2S3} + h_1^2 h_2^{-2} (1+h_3)^{-2} I_{C3} \\ a_{33} &= I_{C1R4} + (1+h_1)^{-2} I_{S1S2} + (1+h_1)^2 h_2^{-2} I_{R2S3} + (h_2 h_3 h_4 + h_1 + 1) h_1 h_2^{-2} (1+h_3)^{-2} I_{C3} \\ a_{44} &= I_{J0} \\ a_{55} &= I_{C4,os} + (1+h_4)^2 h_3^2 (1+h_3)^{-2} I_{C3} + (1+h_4)^2 I_{R3S4} \\ a_{12} &= a_{21} = (1+h_2) h_1 h_2^{-2} I_{R2S3} + h_1 (1+h_2) h_2^{-2} (1+h_3)^{-2} I_{C3} \\ a_{13} &= a_{31} = -(1+h_1) (1+h_2) h_2^{-2} I_{R2S3} - (h_2 h_3 h_4 + h_1 + 1) h_2^{-2} (1+h_3)^{-2} I_{C3} \\ a_{15} &= a_{51} = (1+h_4) h_3 (1+h_2) h_2^{-2} (1+h_3)^{-2} I_{C3} \\ a_{23} &= a_{32} = -h_1 (1+h_1) I_{S1S2} - h_1 (1+h_1) h_2^{-2} I_{R2S3} - (h_2 h_3 h_4 + h_1 + 1) h_1 h_2^{-2} (1+h_3)^{-2} I_{C3} \\ a_{25} &= a_{52} = h_1 h_3 h_2^{-2} (1+h_4) (1+h_3)^{-2} I_{C3} \\ a_{35} &= a_{53} = -(1+h_4) h_3 (h_2 h_3 h_4 + h_1 + 1) h_2^{-2} (1+h_3)^{-2} I_{C3} - h_4 (1+h_4) I_{R3S4} \end{aligned} \quad (\text{A-2})$$

te za matrice **B** i **U**:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1+h_2}{h_2^2} & \frac{1+h_2}{h_2^2(1+h_3)^2} & -1 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & h_1 & -\frac{h_1}{h_2^2} & -\frac{h_1}{h_2^2(1+h_3)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(1+h_1) & \frac{1+h_1}{h_2^2} & \frac{h_2 h_3 h_4 + h_1 + 1}{h_2(1+h_3)} & -h_4 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{h_3(1+h_4)}{1+h_3} & 1+h_4 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (\text{A-3})$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -h_1 & 1+h_1 & 0 & 0 \\ \frac{1+h_2}{h_2^2} & \frac{h_1}{h_2^2} & -\frac{1+h_1}{h_2^2} & -1 & 0 \\ -\frac{1+h_2}{h_2^2(1+h_3)^2} & \frac{h_1}{h_2^2(1+h_3)} & -\frac{h_2 h_3 h_4 + h_1 + 1}{h_2(1+h_3)} & -1 & \frac{h_3(1+h_4)}{1+h_3} \\ 1 & 0 & h_4 & 0 & -(1+h_4) \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{A-4})$$

Prilog C – Dokaz specifične relacije između ulazne matrice **B** i izlazne matrice **U**

Na početku se uvodi modificirani ulazni vektor $\hat{\tau}$ i modificirana ulazna matrica $\hat{\mathbf{B}}$ (usp. jednadžbu (2-11), uz $\mathbf{B}_{oi} = [\mathbf{b}_o \ \mathbf{b}_i]$)

$$\hat{\tau} = [-\tau_A \quad -\tau_B \quad -\tau_C \quad -\tau_D \quad -\tau_E \quad -\tau_F \quad -\tau_{os} \quad \tau_{is}]^T, \quad (\text{C-1})$$

$$\hat{\mathbf{B}} = [-\mathbf{B}_{el} \quad -\mathbf{b}_o \quad \mathbf{b}_i]. \quad (\text{C-2})$$

Uvođenjem vektora momenata τ_s temeljem jednadžbe (2-11) i izraza (C-1) i (C-2)

$$\tau_s = \mathbf{A}\dot{\omega} = \hat{\mathbf{B}}\hat{\tau}, \quad (\text{C-3})$$

te korištenjem izlaznog vektora ω definiranog jednadžbom (2-14) i primjenjujući zakon očuvanja snage (za konkretan model sa zanemarenim gubicima u zupčanicima i ležajevima), dobiva se sljedeća jednakost:

$$\hat{\tau}\omega = \tau_s^T \omega_s. \quad (\text{C-4})$$

Korištenjem jednadžbi (2-14) i (C-3) i uočavanjem da je $\tau_s^T \omega_s$ skalar, jednadžba (C-4) može se transformirati u

$$(\hat{\mathbf{B}}^{-1})^T \mathbf{U} \tau_s^T \omega_s = \tau_s^T \omega_s, \quad (\text{C-5})$$

što daje

$$(\hat{\mathbf{B}}^{-1})^T \mathbf{U} = \mathbf{I}, \quad (\text{C-6})$$

i konačno

$$\mathbf{U} = \hat{\mathbf{B}}^T. \quad (\text{C-7})$$

Uvrštavanje jednadžbe (C-2) u jednadžbu (C-7) daje jednadžbu (2-15), čime je dokaz kompletiran.

Životopis

Vanja Ranogajec, rođen 1. studenog 1990., stekao je titulu prvostupnika inženjera strojarstva, odnosno magistra inženjera strojarstva redom 2013. i 2014. godine na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Za izvrsnost u studiranju u akademskoj godini 2011./2012. dodijeljena mu je nagrada “Davorin Bazjanac“, a za izniman uspjeh tijekom studija Medalja Fakulteta. Po završetku studija zapošljava se na radnom mjestu asistenta na projektu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu u okviru projekta razvoja karijere mladih istraživača Hrvatske zaklade za znanost. Istovremeno upisuje poslijediplomski doktorski studij na istom Fakultetu. U svojstvu suradnika sudjelovao je na bilateralnom istraživačkom projektu poduprtom od strane Ford Motor Company kroz prestižni University Research Program u okviru kojeg je u više navrata boravio u istraživačkom centru tvrtke Ford Motor Company u SAD-u.

Njegovi istraživački interesi uključuju modeliranje i optimalno upravljanje automatskim transmisijama te konvencionalnim i elektrificiranim pogonskim sustavima vozila općenito. Autor je ili koautor četiriju radova u časopisima indeksiranim u CC/SCI bazama, dva rada u ostalim međunarodnim časopisima referenciranim u SCOPUS bazi, osam radova publiciranih na međunarodnim kongresima i konferencijama, te niza studija i tehničkih izvještaja.

Popis javno objavljenih radova:

1. Ranogajec V, Ivanović V, Deur J, Tseng HE. Optimization-based assessment of automatic transmission double-transition shift controls. *Control Engineering Practice* 2018;76:155–66. doi:10.1016/j.conengprac.2018.04.016.
2. Ranogajec V, Deur J. Bond graph analysis and optimal control of the hybrid dual clutch transmission shift process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-Body Dynamics* 2017;231:480–92. doi:10.1177/1464419317705989.

3. Čorić M, Ranogajec V, Deur J, Ivanović V, Tseng HE. Optimization of Shift Control Trajectories for Step Gear Automatic Transmissions. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 2017;139:61005–13. doi:10.1115/1.4035403
4. Ranogajec V, Deur J. An Automated Model-order Reduction Method for Advanced Automatic Transmissions. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 2017;139:071004. doi:10.1115/1.4035607.
5. Ranogajec V, Deur J. A Bond Graph-based Method of Automated Generation of Automatic Transmission Mathematical Model. *SAE International Journal of Engines* 2017;10. doi:10.1367-74.4271/2017-01-1142.
6. Ranogajec V, Deur J, Čorić M. Bond Graph Analysis of Automatic Transmission Shifts including Potential of Extra Clutch Control. *SAE International Journal of Engines* 2016;9:1929–45. doi:10.4271/2016-01-1146.
7. Ranogajec V, Deur J. Analysis of Influence of Inertia Coupling on Automatic Transmission Shift Dynamics. *Powertrain Modelling and Control Conference (PMC 2018)*, Loughborough, UK: 2018.
8. Ranogajec V, Deur J. Bond Graph Analysis of Automatic Transmission Double-Transition Shift Dynamics. *13th International Conference on Bond Graph Modeling (ICBGM), Summer Simulation Multi-Conference 2018*, Bordeaux, France: 2018.
9. Ranogajec V, Čorić M, Deur J, Ivanović V. Multi-objective Parameter Optimization of Automatic Transmission Shift Control Profiles. *SAE Technical Paper no. 2018-01-1164*, 2018. doi:10.4271/2018-01-1164.
10. Soldo J, Ranogajec V, Škugor B, Deur J. AVL CRUISE Model-based Optimisation of Shift Scheduling Maps for a Parallel Hybrid Electric Vehicle. *AVL International Simulation Conference 2017*, Graz, Austria: 2017.
11. Ranogajec V, Deur J. A Bond Graph-based Method of Automated Generation of Automatic Transmission Mathematical Model. *SAE Technical Paper no. 2017-01-1142*, 2017. doi:10.4271/2017-01-1142.

12. Ranogajec V, Deur J. Bond Graph Analysis and Optimal Control of Hybrid Dual Clutch Transmission Shift Process. Powertrain Modelling and Control Conference (PMC 2016), Loughborough, UK: 2016.
13. Ranogajec V, Deur J, Čorić M. Bond Graph Analysis of Automatic Transmission Shifts including Potential of Extra Clutch Control. SAE Technical Paper no. 2016-01-1146, 2016. doi:10.4271/2016-01-1146.
14. Škugor B, Ranogajec V, Deur J. On smoothing HEV/EREV supervisory control action using an extended ECMS approach. 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), IEEE; 2013, p. 1–10. doi:10.1109/EVS.2013.6914990.

Curriculum vitae

Vanja Ranogajec, born on November 1, 1990, received his B.Sc. and M.Sc. degrees in Mechanical Engineering from the University of Zagreb, Croatia, in 2013 and 2014, respectively. He was a recipient of “Davorin Bazjanac” award for excellence in studying in the academic year 2011/2012, and the Faculty Medal award in recognition of academic excellence. Since 2015, he has been employed as a Research Assistant at the University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, through the Young Researchers’ career development project supported by the Croatian Science Foundation. In the same year he enrolled in the Postgraduate Doctoral study at the same Faculty. He has participated on a bilateral research project supported through the Ford Motor Company’s University Research Program, within which he took part at short study stays at the Ford Research Centre in Dearborn, MI.

His research interest includes modelling and optimal control of automatic transmissions, and conventional and electrified powertrain systems in general. He is author or co-author of four journal papers indexed in CC/SCI databases, two papers in other international journals referenced in SCOPUS database, eight papers presented at international congresses and conferences, and a number of technical reports and studies.