

Modeliranje i optimalno upravljanje utičnim hibridnim električnim vozilom paralelne konfiguracije

Soldo, Jure

Doctoral thesis / Disertacija

2023

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:235:181129>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-13**

Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Jure Soldo

**Modeliranje i optimalno upravljanje
utičnim hibridnim električnim vozilom
paralelne konfiguracije**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2022.



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Jure Soldo

**Modeliranje i optimalno upravljanje
utičnim hibridnim električnim vozilom
paralelne konfiguracije**

DOKTORSKI RAD

Mentor: prof. dr. sc. Joško Deur

Zagreb, 2022.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL
ARCHITECTURE

Jure Soldo

**Modelling and optimal control of a
parallel plug-in hybrid electric vehicle**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor: Joško Deur, PhD, Full Professor

Zagreb, 2022.

Podaci za bibliografsku karticu

UDK: ***.***.***_**

Ključne riječi: hibridna utična električna vozila, modeliranje, optimalno upravljanje, dinamičko programiranje, adaptivna strategija upravljanja, modelsko prediktivna strategija upravljanja, referenca stanja napunjenosti baterije

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Strojarsvo

Institucija: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje

Mentor: prof. dr. sc. Joško Deur

Broj stranica: ***

Broj slika: ***

Broj tablica: ***

Broj korištenih bibliografskih jedinica: ***

Datum obrane: **.**.2023.

Povjerenstvo: prof. dr. sc. Josip Kasać red. prof., predsjednik
(Fakultet Strojarsstva i Brodogradnje, Zagreb)
doc. dr. sc. Branimir Škugor, član
(Fakultet Strojarsstva i Brodogradnje, Zagreb)
prof. dr. sc. Šandor Iles, izv. 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 14 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 nekoliko istraživačko-razvojnih projekata poduprtih od domaće industrije.

Znanstveno zanimanje prof. Deura obuhvaća područja automobilske mehatronike, električnih servopogona, električnih vozila i njihove integracije u energetske sustave, autonomnih vozila 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 pet nagrada za najbolje članke na međunarodnim konferencijama. Autor je preko 74 članaka objavljenih u međunarodnim časopisima (od toga 48 objavljena u CC/SCI-indeksiranim časopisima), preko 127 radova objavljenih na međunarodnim konferencijama, četiri patenata, šest 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 World Electric Vehicle Journal).

Zahvale

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Jošku Deuru na ukazanom povjerenju, korisnim sugestijama i diskusijama tijekom vođenja ovog istraživačkog rada te motivaciji pruženoj kroz zajednički rad na mnogim projektima od preddiplomskog studija sve do završetka doktorskog studija.

Zahvaljujem se članovima povjerenstva, prof. dr. sc. Josipu Kasaću, doc. dr. sc. Branimiru Škugoru te doc. dr. sc. Šandoru Ilešu na korisnim komentarima i sugestijama.

Posebno se zahvaljujem dr. sc. Branimiru Škugoru, dr. sc. Ivanu Cvoku, te mag. ing. Krunoslavu Haramini na podršci, korisnim sugestijama i pomoći u provođenju istraživačkog rada na predmetnom projektu. Zahvaljujem se i mag. ing. Ivani Mijić, dr. sc. Jakovu Topiću i dr. sc. Filipu Maletiću te ostalim članovima istraživačke grupe na suradnji i prijateljstvu uz koje je istraživanje bilo ugodnije.

Zahvaljujem se Hrvatskoj zakladi za znanost koja je podržala ovaj istraživački rad kroz program “Projekt razvoja karijera mladih istraživača – izobrazba novih doktora znanosti“ te istraživački projekt “Adaptivno i prediktivno upravljanje utičnim hibridnim električnim vozilima (ACHIEVE)“ (Ugovor broj IP-01-2018).

Zahvaljujem se roditeljima, sestri i bratu na podršci i bezuvjetnoj ljubavi. Također, na podršci zahvaljujem i široj obitelji i prijateljima.

Zagreb, studeni 2022.

Jure Soldo

“Vrijeme je odličan učitelj, ali nažalost ubija sve svoje
učenike.” Hector Louis Berlioz

Sažetak

Utična hibridna električna vozila (PHEV) predstavljaju ključnu prijelaznu tehnologiju prema punoj elektrifikaciji cestovnog transporta. Zbog kompleksnosti PHEV pogona i izraženih zahtjeva na kvalitetu upravljanja, tipično se koristi relativno složena, optimalna strategija upravljanja, čija se sinteza uobičajeno zasniva na kvazistatičkom (tzv. unazadnom) modelu vozila. U radu se predlaže proširenje unazadnog modela PHEV-a paralelne konfiguracije podmodelom dinamičkih gubitaka tijekom pokretanja motora s unutarnjim izgaranjem te promjena stupnja prijenosa automatizirane manualne transmisije. Proširenjem se model po točnost približava dinamičkom (tzv. unaprijednom) modelu, uz zadržavanje visoke računalne učinkovitosti svojstvene standardnom unazadnom modelu. Potom se provodi optimiranje upravljačkih varijabli proširenog unazadnog modela PHEV-a korištenjem algoritma dinamičkog programiranja (DP). Rezultati optimiranja koriste se za sintezu i provjeru optimalne strategije upravljanja tokovima snage pogona PHEV-a, koja uzima u obzir dinamičke gubitke pogona i zasniva se na minimizaciji ekvivalentne potrošnje goriva. Strategija upravljanja proširuje se algoritmom generiranja optimalne referentne trajektorije stanja napunjenosti baterije uzimajući u obzir promjenjivi nagib ceste i prisustvo zona s niskim emisijama. Dodatno su projektirane adaptivna i modelsko prediktivna strategija upravljanja tokovima snage. Adaptacija parametara upravljačke strategije temelji se na kvadratnom regresijskom modelu u funkciji značajki voznih ciklusa koje se izračunavaju na pomičnom horizontu u neposrednoj prošlosti. Regresijski model parametrira se na temelju identifikacije vrijednosti adaptiranih parametara iz rezultata DP optimiranja provedenog na karakterističnim voznim mikrociklusima. Modelsko prediktivno upravljanje zasniva se na DP optimiranju upravljačkih varijabli pogona na pomičnom horizontu u budućnosti, proširenom unazadnom predikcijskom modelu i regresijskom modelu potrošnje goriva na preostalom dijelu voznog ciklusa. U takvoj formulaciji, izbjegavaju se težinski faktor ciljne funkcije koji bi bili osjetljivi na karakteristike voznih ciklusa. Predložene strategije upravljanja sustavno su simulacijski provjerene i uspoređene s DP-optimalnim referentnim mjerilom kao i međusobno, kvantificirajući pritom poboljšanja postignuta primjenom adaptivnih i prediktivnih strategija.

Ključne riječi: hibridna utična električna vozila, modeliranje, optimalno upravljanje, minimizacija ekvivalentne potrošnje goriva, dinamičko programiranje, adaptivna upravljanje, modelsko prediktivno upravljanje, planiranje reference stanja napunjenosti baterije.

Extended summary

Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEV) represent a key transitional technology towards a fully electrified road transportation system. Due to the complexity of PHEV powertrains and strict control performance requirements, a relatively complex, optimal control strategy is typically used, whose design is usually based on quasi-static (so-called backward) vehicle model. The thesis proposes an extension of a parallel PHEV backward model with sub-models of dynamic losses occurring during the internal combustion engine start-up and automated manual transmission gear shifts. By introducing these sub-models, the accuracy of the backward model is found to approach that of the dynamic (so-called forward) model, while maintaining the high computational efficiency of the standard backward model. Next, PHEV control variables optimization is conducted by using a dynamic programming (DP) algorithm and the extended backward model. The optimization results are used to design and verify an optimal PHEV power flow control strategy, which takes into account the dynamic powertrain losses and is based on the equivalent consumption minimisation strategy (ECMS). The control strategy is extended by an algorithms that generates optimal reference trajectory of battery state of charge (SoC) for the PHEV blended operating regime, and which takes into account the effects of varying road slope and low emission zones. Furthermore, adaptive and model-predictive power flow management strategies are designed. Adaptation of key control strategies parameters is based on a quadratic regression model inputted by characteristic driving cycle features, which are calculated on the moving horizon in the immediate past. The regression model is parameterized based on input/output data extracted from the DP optimization results obtained for characteristic driving micro-cycles. The model predictive control (MPC) strategy is based on the DP control variable optimization on a receding prediction horizon, an extended backward prediction model, and a regression model of the fuel consumption on the remaining part of driving cycle. Such a formulation does not include cost function weighting factors, which would otherwise be sensitive to the driving cycle features. The proposed control strategies are systematically verified by computer simulation, and compared with each other and the DP- benchmark, while quantifying improvements achieved by applying the adaptive and predictive control strategies.

Through nine chapters of this work, which include the introduction and conclusion chapters, backward and forward PHEV simulation models are described, dynamic programming-based

control variables optimization results are presented and analysed, optimal, adaptive, and model predictive power flow control strategies are proposed, and finally a novel method of synthesis of battery state-of-charge reference trajectory is presented for the blended operating regime and the general case of varying road grade and low emission zone presence. A brief overview of each chapter is given below.

Chapter 1: *Introduction.* Outlines the motivation for the conducted research and gives a literature review of the relevant topics of the thesis, which include PHEV modelling and optimal power flow control, adaptive and model predictive control, and battery state-of-charge reference trajectory planning.

Chapter 2: *Backward-looking model of a Plug-in Hybrid Electric Vehicle.* The powertrain of a PHEV given in P2 parallel configuration is described along with basic technical parameters. PHEV power flows and operating modes are briefly analysed. A basic backward-looking (BWD) vehicle model is described, which neglects powertrain dynamics effects including dynamic power losses. The required wheel torque and speed are determined from the driving cycle data and the vehicle longitudinal dynamics equation, and are used in a backward manner to calculate the propulsion machines' and battery variables.

Chapter 3: *Forward-looking and extended backward model.* A more accurate forward-looking (FWD) PHEV model is presented, which takes into account the dominant powertrain dynamics effects, evaluated in the direction from propulsion machines to wheels. The corresponding simulation model is implemented in Simcenter's Amesim software environment, and it includes a low-level control strategy with actuator dynamics. The low-level control is aimed at achieving the operating points set by the high-level control strategy, which is done through appropriate coordination of the main clutch, propulsion machines, automated manual transmission, and mechanical brakes. Based on the energy balance analysis derived from the FWD model simulation results, an extended BWD (EXT-BWD) model is proposed, which includes the engine start-up and gear shift transient losses. These transient losses include power losses due to main clutch and synchronizers slippage, engine start-up losses, and electric machine-based dog clutch synchronization losses. The EXT-BWD model is validated by comparing its fuel consumption and battery state of charge (SoC) time responses with those obtained by the more accurate FWD model, where DP optimal control variables are used as inputs of both models.

Chapter 4: Control variable optimisation. A PHEV powertrain control variables optimization method is proposed, which is based on the dynamic programming (DP) algorithm adjusted for the additional state variables introduced by the EXT-BWD model. With the aim of improving computing efficiency, the DP algorithm is implemented in the C++ programming language, while the obtained results are processed and analysed in the Matlab/Simulink environment. The DP algorithm cost function reflects the conflicting criteria of reducing fuel consumption throughout the driving cycle while maintaining the target value of SoC at the end of driving cycle. In addition to the hard constraints on control variables, soft constraints are implemented to limit the powertrain variables within defined physical limits. Optimization is carried out for the cases of charge sustaining (CS) and blended (BLND) operating modes. The DP optimal results obtained by using the BWD and EXT-BWD models are compared with each other, in order to further highlight the differences in fuel consumption predictions predicted by the two models. In addition, the optimal SoC trajectories over travelled distance were analysed for various driving cycles, including the special cases of varying road grade and low emission zone presence.

Chapter 5: High-level control strategy. A high-level power flow control strategy of a parallel PHEV is proposed, which combines a rule-based (RB) controller with an equivalent consumption minimization strategy (ECMS). The RB controller regulates the battery SoC, calculates the transmission input power demand, and determines the engine on/off state. The ECMS performs instantaneous optimization (i.e., optimal allocation) of the control variables, which include the engine torque and the transmission gear ratio. Two versions of the control strategy are considered, depending on whether the BWD or EXT-BWD model is used within the ECMS strategy. With the aim of reducing the number of gear shifts in the case of BWD model-based strategy, a gear shift delay algorithm is introduced through expansion of the ECMS cost function. The two versions of control strategy are verified by simulation and compared by using the EXT-BWD and FWD powertrain models in the CS regime and for several driving cycles.

Chapter 6: Adaptive control strategy. The insights obtained from the control variable optimisation results given in the fourth chapter are used to establish an adaptation mechanism of the control strategy proposed in the fifth chapter. The DP optimal results are collected on micro-cycles that are obtained by segmenting the certification cycles, in order to reflect the influence of specific local statistical features of the driving cycle (e.g., city driving, cruising,

aggressive driving). The values of three high-level control parameters are identified from the DP optimal results, and quadratic, linear-in-parameters regression models are formed and fed by the micro-cycle features calculated on a moving history time horizon. The adaptive management strategy is compared with the non-adaptive strategy described in the fifth chapter by means of simulation verification using the EXT-BWD and FWD models.

Chapter 7: *Model predictive control.* A synthesis of the high-level control strategy based on the MPC approach is proposed. The cost function of the proposed MPC strategy consists of the fuel consumption on the prediction horizon and the predicted optimal remaining fuel consumption from the end of prediction horizon to the end of driving cycle. The remaining fuel consumption is described by a regression model fed by the remaining trip distance, SoC value at the end of prediction horizon, and optionally the mean value and standard deviation of the vehicle speed profile on the remaining section of driving cycle. The regression model is established and parametrised on the basis of DP-optimal results for several driving cycles. In this way, MPC does not use a multi-criteria objective function, i.e. the one that would combine fuel consumption and SoC error penalty at the end of the prediction horizon. This avoids adjusting the weighting coefficients of the objective function, which would otherwise be sensitive to the characteristics of driving cycles. At the same time, the SoC at the end of the driving cycle is implicitly accounted for, instead of explicitly (and thus generally sub-optimally) via the SoC at the end of the prediction horizon. The control variable optimization on the moving prediction horizon is performed by the DP algorithm, and the proposed strategy is implemented and verified through simulation by using the EXT-BWD PHEV model.

Chapter 8: *Battery state-of-charge reference planning for blending operating regime.* Two methods of SoC reference profile synthesis with respect to travelled distance are proposed based on the insights obtained from the DP optimal SoC responses analysis presented in the fourth chapter. Special emphasis is on the cases of varying road grade and low emission zone presence. The offline synthesis method sets the SoC reference profile before the trip based on the knowledge or a sufficiently precise estimation of the trip distance, the average vehicle speed or the trip duration, and the road grade profile along the trip. Therefore, the proposed method is suitable for vehicles operating on pre-known and repetitive routes, with the historical vehicle tracking data available (e.g., city buses and delivery vehicles). The online SoC reference synthesis method relies on the recorded driving data during the trip to determine the upcoming SoC reference profile, and it only requires knowledge or a sufficiently precise estimate of the

driving cycle total distance. Validation of the proposed synthesis methods is performed for RB+ECMS and EXT-BWD model, and the results are compared with those obtained by using the linear SoC reference profile.

Chapter 9: Conclusion. Concluding remarks are given and possible future work directions are discussed. The main contributions of the doctoral thesis are listed at the end of the chapter, and they include: (i) computationally efficient backward-looking PHEV model, which accounts for powertrain transient loss effects described by analytical models; (ii) optimal PHEV power flow control strategy, which takes into account the powertrain transient losses and, thus further reducing the fuel consumption, and improving the drivability and drive comfort; (iii) adaptive PHEV power flow control strategy, which adapts the optimal control strategy parameters with respect to driving cycle features that are identified on a moving horizon in the immediate past, (iv) model predictive PHEV power flow control strategy, which realizes the final battery SoC condition in a robust way involving a regression model of the remaining fuel consumption from the end of prediction horizon to the end of driving cycle; and (v) method for SoC reference trajectory synthesis in PHEV blended operating regime based on the available driving cycle features.

Keywords: plug-in hybrid electric vehicles, modelling, optimal control, equivalent consumption minimization strategy, dynamic programming, adaptive control, model predictive control, battery state-of-charge reference synthesis.

Sadržaj

Popis slika	V
Popis tablica	X
Popis oznaka i kratica.....	XII
Popis oznaka	XII
Popis kratica	XVI
1. Uvod	1
1.1. Motivacija	1
1.2. Dosadašnje spoznaje	3
1.2.1. Optimalne strategije upravljanja tokovima snage hibridnih vozila.....	3
1.2.2. Adaptivne i prediktivne strategije upravljanja	5
1.2.3. Upravljanju orijentirani modeli pogona	8
1.2.4. Sinteza referentnog profila stanja napunjenosti baterije	9
1.3. Hipoteza	12
1.4. Pregled strukture rada	12
2. Unazadni model utičnog hibridnog električnog vozila	16
2.1. Osnovni podatci razmatranog vozila	16
2.1.1. Pogonska konfiguracija	16
2.1.2. Pogonski strojevi	17
2.1.3. Baterijski paket.....	19
2.1.4. Automatska transmisija i spojka	20
2.1.5. Prigonski sklop.....	23
2.1.6. Uzdužna dinamika vozila	23
2.2. Analiza toka snage	25
2.2.1. Načini rada	25
2.2.2. Režimi rada	26
2.2.3. Upravljanje transmisijom	27
2.3. Matematički model	28
3. Unaprijedni i prošireni unazadni model vozila.....	32
3.1. Unaprijedni model	32
3.2. Podređena strategija upravljanja	35
3.2.1. Struktura cjelokupnog sustava upravljanja	35

3.2.2.	Podređeno upravljanje prilikom uključivanja MSUI-a	37
3.2.3.	Podređeno upravljanje prilikom uzlazne promjene stupnja prijenosa	38
3.2.4.	Podređeno upravljanje prilikom silazne promjene stupnja prijenosa i aktivacije mehaničkih kočnica	40
3.2.5.	Rezultati simulacije FWD modela	41
3.3.	Unazadni model proširen učincima dinamičkih gubitaka.....	42
3.3.1.	Modeliranje dinamičkih gubitaka.....	43
3.3.2.	Modeliranje gubitka momenta motora s unutarnjim izgaranjem	45
3.3.3.	Modeliranje gubitaka energije prilikom uključivanja motora s unutarnjim izgaranjem.....	46
3.3.4.	Modeliranje gubitaka energije uslijed klizanja glavne spojke	46
3.3.5.	Modeliranje gubitaka energije uslijed promjene stanja sinkrona.....	48
3.3.6.	Modeliranje energije sinkronizacije kandžastih spojki	48
3.4.	Validacija i analiza proširenog unazadnog modela	49
3.4.1.	Validacija modela.....	49
3.4.2.	Energetska analiza.....	50
4.	Optimiranje upravljačkih varijabli.....	53
4.1.	Općenito o dinamičkom programiranju	53
4.2.	Formulacija optimizacijskog problema.....	56
4.2.1.	Optimizacijski problem za slučaj EXT-BWD modela.....	56
4.2.2.	Redukcija optimizacijskog problema za slučaj BWD modela.....	58
4.3.	Rezultati optimiranja.....	59
4.3.1.	Rezultati optimiranja za CS režim rada.....	59
4.3.2.	Rezultati optimiranja za BLND režim rada.....	62
4.3.3.	Rezultati optimiranja za slučaj promjenjivog nagiba ceste i BLND režima	64
4.3.4.	Rezultati optimiranja za slučaj prisustva zone s niskom emisijom.....	66
4.4.	Analiza optimalnih trajektorija stanja napunjenosti baterije	68
4.4.1.	Analiza optimalne brzine promjene SoC-a	68
4.4.2.	Analiza utjecaja duljine prijeđenog puta na oblik optimalnih odziva SoC-a.....	71
5.	Nadređena strategija upravljanja	74
5.1.	Formulacija strategije upravljanja.....	74
5.1.1.	Temeljna struktura strategije upravljanja.....	74
5.1.2.	RB regulator	74

5.1.3.	Minimizacija ekvivalentne potrošnje goriva (ECMS)	76
5.1.4.	Nadogradnja nadređene strategije s algoritmom za odgađanje prebacivanja stupnja prijenosa	79
5.1.5.	Prilagodba nadređene strategije upravljanja za EXT-BWD model	80
5.2.	Simulacijski rezultati	81
5.2.1.	Rezultati simulacija uz primjenu EXT-BWD modela.....	81
5.2.2.	Rezultati simulacija uz primjenu FWD modela	85
6.	Adaptivna strategija upravljanja	89
6.1.	Sinteza adaptivne strategije upravljanja.....	89
6.1.1.	Struktura adaptivne strategije upravljanja.....	89
6.1.2.	Optimizacijski okvir za uspostavljanje adaptacijskog mehanizma	90
6.1.3.	Adaptacijski regresijski modeli	92
6.1.4.	Analiza točnosti adaptacijskih regresijskih modela	94
6.2.	Simulacijski rezultati	97
6.2.1.	Rezultati simulacija uz primjenu EXT-BWD modela.....	97
6.2.2.	Rezultati simulacija uz primjenu FWD modelu	101
7.	Modelsko prediktivna strategija upravljanja	103
7.1.	Formulacija prediktivne strategije upravljanja	103
7.2.	Parametriranje prediktivne strategije upravljanja	106
7.3.	Predviđanje brzine vozila.....	109
7.4.	Simulacijski rezultati	110
7.4.1.	Usporedni rezultati za slučaj idealiziranog predviđanje brzine vozila.....	110
7.4.2.	Analiza utjecaja predikcijskog horizonta	114
7.4.3.	Utjecaj penalizacijskog člana konačnog SoC-a na performanse MPC-a	116
7.4.4.	Utjecaj pogreške predviđanja brzine vozila	116
8.	Planiranje reference stanja napunjenosti baterije za kombinirani način rada	119
8.1.	Planiranje reference SoC-a van realnog vremena	119
8.1.1.	Linearna referenca.....	119
8.1.2.	Nelinearna referenca u prisustvu LEZ-ova	119
8.1.3.	Nelinearna referenca u slučaju promjenjivog nagiba ceste	120
8.2.	Planiranje reference SoC-a u realnom vremenu	122
8.2.1.	Procjena relevantnih značajki SoC trajektorije u realnom vremenu	122
8.2.2.	Generiranje SoC reference	124

8.3.	Rezultati simulacija.....	126
8.3.1.	Nulti nagib ceste.....	126
8.3.2.	Varijabilni nagib ceste.....	129
8.3.3.	Prisustvo zona s niskom emisijom	132
8.4.	Analiza robusnosti	134
8.4.1.	Utjecaj pogreški procjeni značajki voznog ciklusa	134
8.4.2.	Utjecaj pogreške procjene pada SoC-a kroz LEZ	136
9.	Zaključak.....	138
	Literatura.....	143
	Prilozi.....	151
	Prilog A – Parametri modela pogonskog sklopa te strategije upravljanja.....	151
	Prilog A.1. Prijenosni omjeri redukcijskih razina transmisije	151
	Prilog A.2. Parametri modela pogonskog sklopa.....	152
	Prilog A.3. Parametri strategije upravljanja.....	152
	Prilog B – Izvod vezani uz razvoj EXT-BWD modela PHEV-a.....	153
	<i>Prilog B.1. Izvod za proračun reference kapaciteta momenta glavne spojke prilikom njenog zatvaranja</i>	<i>153</i>
	<i>Prilog B.2. Izvod za proračun gubitaka energije uslijed klizanja glavne spojke</i>	<i>153</i>
	<i>Prilog B.3. Izvod za proračun gubitaka energije uslijed klizanja sinkrona</i>	<i>154</i>
	<i>Prilog B.4. Određivanje koeficijenta smanjenja momenta MSUI-a prilikom promjene stanja pogonskog sklopa</i>	<i>155</i>
	Prilog C – Vezni dijagram pogonskog sklopa i odgovarajući izrazi korišteni u analizi bilance energije.....	157
	Životopis.....	160
	Curriculum vitae	163

Popis slika

<i>Slika 2-1. Konfiguracija P2 paralelnog pogonskog sklopa PHEV-a razmatranog gradskog autobusa.</i>	17
<i>Slika 2-2. Detalji paralelnog pogonskog sklopa razmatranog PHEV-a [83].</i>	18
<i>Slika 2-3. Rekonstruirane mape učinkovitosti M/G stroja (a) i specifične potrošnje Dieselog motora (b), te pripadne karakteristike maksimalnog momenta [84, 85].</i>	19
<i>Slika 2-4. Ekvivalentni krug baterije (a), naponska karakteristika otvorenog kruga $U_{oc}(SoC)$ (b) i unutarnji otpor baterije $R(SoC)$ (c).</i>	20
<i>Slika 2-5. Shematski prikaz razmatrane automatizirane manualne transmisije (AMT) s 12 stupnjeva prijenosa te prigonskog sklopa [91].</i>	21
<i>Slika 2-6. Mape ukupnih stalnih gubitaka snage u transmisiji (a) i mehaničke učinkovitosti transmisije (b) [84], [93].</i>	22
<i>Slika 2-7. Vremenski profili brzine vozila (a), nagiba ceste (b) te mase putnika (c) voznog ciklusa snimljenog na kružnoj autobusnoj ruti Babin kuk-Pile-Babin kuk u gradu Dubrovniku [97].</i>	24
<i>Slika 2-8. Certifikacijski vozni ciklusi za teška vozila: HDUDDS (a), WHVC (b) i JE05 (c).</i> 24	
<i>Slika 2-9. Ilustracija pomicanja radne točke MSUI-a u područja veće učinkovitosti (RT1 → RT2) generatorskim radom M/G stroja te pojačanja izlaznog momenta/snage motorskim radom M/G stroja (RT3).</i>	26
<i>Slika 2-10. Ilustracije CD-CS režima rada (a) i BLND režim rada (b) pomoću odziva SoC-a po prijeđenome putu voznog ciklusa.</i>	27
<i>Slika 2-11. Mapa planiranja promjene stupnja prijenosa za PHEV-tip osobnog vozila [98].</i> 28	
<i>Slika 2-12. Principni blokovski dijagram BWD modela PHEV-a.</i>	29
<i>Slika 2-13. Mapa učinkovitosti proračunata iz modela baterije u ovisnosti o SoC-u i opterećenoj snazi P_{batt}.</i>	31
<i>Slika 3-1. FWD model pogona implementiran u Amesim programskom okruženju.</i>	33
<i>Slika 3-2. Simulacijski model prigona i uzdužne dinamike kao dio Amesim FWD modela vozila.</i>	33
<i>Slika 3-3. Karakteristika otpora isključenog Dieselog motora (a) te vremenska konstanta dinamike motora pri porastu momenta, vezana uz dinamiku turbopunjača (b).</i>	34
<i>Slika 3-4. Blokovski dijagram cjelokupne strukture sustava upravljanja PHEV-uz primjenu FWD modela vozila.</i>	36

<i>Slika 3-5. Odziv podređenog sustava upravljanja tijekom uključivanja MSUI-a.</i>	38
<i>Slika 3-6. Odziv podređenog sustava upravljanja tijekom uzlazne promjene stupnja prijenosa (8-9).</i>	39
<i>Slika 3-7. Odziv podređenog sustava upravljanja tijekom silazne promjene stupnja prijenosa (12-1) i aktivacije mehaničkih kočnica.</i>	41
<i>Slika 3-8. Simulacijski odzivi FWD modela preko cijelog (JE05) voznog ciklusa.</i>	42
<i>Slika 3-9. Blokovski dijagram EXT-BWD modela pogona.</i>	43
<i>Slika 3-10. Ilustracija identifikacije faktora gubitka momenta MSUI-a r_c iz odziva FWD modela.</i>	45
<i>Slika 3-11. Usporedni simulacijski odzivi SoC-a i kumulativne potrošnje goriva s obzirom na prijedeni put i u CS režim rada, dobiveni primjenom BWD, EXT-BWD i FWD modela s upravljačkim ulazima optimiranim DP algoritmom za BWD i EXT-BWD modele.</i>	50
<i>Slika 3-12. Rezultati usporedne energetske analize za BWD, EXT-BWD i FWD modele i četiri vozna ciklusa u CS režimu rada (odgovara rezultatima sa slike 3-11).</i>	52
<i>Slika 4-1. DP optimalni odzivi SoC-a po prijedenoj putu dobiveni primjenom BWD i EXT-BWD modela za razne vozne cikluse i CS režim rada.</i>	60
<i>Slika 4-2. DP optimalni odzivi kumulativne potrošnje goriva po prijedenoj putu dobiveni primjenom BWD i EXT-BWD modela za razne vozne cikluse i CS režim rada.</i>	61
<i>Slika 4-3. Razmještaj DP optimalnih radnih točaka MSUI-a i M/G stroja uz primjenu BWD i EXT-BWD modela, DUB ciklusa bez nagiba ceste i CS radnog režima.</i>	61
<i>Slika 4-4. DP optimalni odzivi SoC-a po prijedenoj putu dobiveni primjenom BWD i EXT-BWD modela za razne vozne cikluse i BLND režim rada.</i>	63
<i>Slika 4-5. DP optimalni odzivi kumulativne potrošnje goriva po prijedenoj putu dobiveni primjenom BWD i EXT-BWD modela za razne vozne cikluse i BLND režim rada.</i>	63
<i>Slika 4-6. Razmatrani sinusni profili nagiba ceste po prijedenoj putu (a) te pripadni profili nadmorskih visina (b).</i>	64
<i>Slika 4-7. DP optimalni odzivi SoC-a po prijedenoj putu dobiveni za 4xDUB repetitivni vozni ciklus i različite profile nagibe te BLND režim rada.</i>	65
<i>Slika 4-8. Profili (težinskih faktora) LEZ-a za 3xDUB bez nagiba (a) i 3xHDUDDS (b) repetitivne vozne cikluse.</i>	66
<i>Slika 4-9. DP optimalni odzivi SoC-a po prijedenoj putu dobiveni za 3xDUB i 3xHDUDDS repetitivne vozne cikluse s i bez prisustva LEZ-a te BLND i CS režimima rada.</i>	67

<i>Slika 4-10. Optimalne brzine promjene SoC-a, SoC, u ovisnosti o zahtijevanoj snazi na ulazu u transmisiju P_d za slučajeve raznih repetitivnih voznih ciklusa i BLND režim.</i>	69
<i>Slika 4-11. Optimalni odzivi SoC-a po prijeđenom putu nakon preuređenja po fazama električne vožnje, hibridne vožnje i regenerativnog kočenja za različite vozne cikluse i BLND režim.</i>	70
<i>Slika 4-12. Optimalni odzivi SoC-a po prijeđenom putu rekonstruirani iz DP-optimalnih rezultata iz unazadne faze i prikazani za različite duljine repetitivnih ciklusa i početne vrijednosti SoC-a.</i>	72
<i>Slika 4-13. DP-optimalne radne točke baterije za razne repetitivne vozne cikluse i BLND režim rada ($SoC_i = 90\%$).</i>	73
<i>Slika 5-1. Blokovski dijagram RB+ECMS strategije upravljanja tokovima snage PHEV-a.</i>	74
<i>Slika 5-2. Ilustracija principa minimizacije ekvivalentne potrošnje goriva (ECMS; dano za radnu točku $v_v = 30$ km/h i $P_e^* = 60$ kW).</i>	77
<i>Slika 5-3. Težinska funkcija u izrazima za širinu područja ECMS pretraživanja momenta MSUI-a.</i>	78
<i>Slika 5-4. Ovisnost diskontnog faktora r_f o vremenu proteklom od zadnje promjene stupnja prijenosa t_{sh} za različite vrijednosti podesivog praga t_{th}.</i>	80
<i>Slika 5-5. Linearano interpolirana DP optimalna rješenja za potrošnju goriva dobivena za razne vrijednosti finalnog SoC-a (DUB vozni ciklus).</i>	82
<i>Slika 5-6. Odzivi SoC-a po prijeđenome putu dobiveni simulacijom RB+ECMS i RB+ECMS-EXT sustava upravljanja (EXT-BWD model i CS režim rada).</i>	84
<i>Slika 5-7. Odzivi kumulativne potrošnje goriva po prijeđenome putu dobiveni simulacijom RB+ECMS i RB+ECMS-EXT sustava upravljanja (EXT-BWD model i CS režim rada).</i>	84
<i>Slika 5-8. Razmještaji radnih točaka MSUI-a i M/G stroja dobiveni simulacijom RB+ECMS i RB+ECMS-EXT sustava upravljanja (EXT-BWD model, CS režim rada i DUB vozni ciklus).</i>	85
<i>Slika 5-9. Simulirane potrošnje goriva za različite SoC_R (a) i iz njih izračunati inkrementi potrošnje u odnosu na onu koja odgovara slučaju $\Delta SoC_f = SoC(t_f) - SoC_f$ (b).</i>	86
<i>Slika 5-10. Odzivi SoC-a po prijeđenome putu dobiveni simulacijom RB+ECMS i RB+ECMS-EXT sustava upravljanja (FWD model i CS režim rada).</i>	87
<i>Slika 5-11. Odzivi kumulativne potrošnje goriva po prijeđenome putu dobiveni simulacijom RB+ECMS i RB+ECMS-EXT sustava upravljanja (FWD model i CS režim rada).</i>	88
<i>Slika 6-1. Blokovski dijagram adaptivne RB+ECMS-EXT strategije upravljanja PHEV-om.</i>	90

<i>Slika 6-2. Segmentacija certifikacijskih voznih ciklusa u mikro cikluse.</i>	<i>91</i>
<i>Slika 6-3. Ilustracija identifikacije vrijednosti pragova snage uključivanja i isključivanja MSUI-a za potrebe formiranja regresijskog modela.</i>	<i>92</i>
<i>Slika 6-4. Odnosi DP-identificiranih parametara strategije upravljanja i onih određenih LASSO i LS regresijskim postupcima na testnom skupu podataka.</i>	<i>95</i>
<i>Slika 6-5. Vrijednosti koeficijenata LASSO regresijskih modela za adaptaciju parametara strategije upravljanja.</i>	<i>96</i>
<i>Slika 6-6. Usporedni odzivi SoC-a po prijedenoj puti dobiveni simulacijom A-RB+ECMS-EXT i RB+ECMS-EXT sustava upravljanja (EXT-BWD model i CS režim rada)-.....</i>	<i>98</i>
<i>Slika 6-7. Usporedni odzivi kumulativne potrošnje goriva po prijedenoj puti dobiveni simulacijom A-RB+ECMS-EXT i RB+ECMS-EXT sustava upravljanja (EXT-BWD model i CS režim rada).</i>	<i>99</i>
<i>Slika 6-8. Razmještaji radnih točaka MSUI-a i M/G stroja dobiveni simulacijom A-RB+ECMS-EXT i RB+ECMS-EXT sustava upravljanja (EXT-BWD model, CS režim rada i DUB vozni ciklus).</i>	<i>100</i>
<i>Slika 6-9. Vremenski odzivi adaptiranih parametara A-RB+ECMS-EXT strategije (b,c) za HDUDDS ciklus (a).</i>	<i>100</i>
<i>Slika 6-10. Usporedni odzivi SoC-a po prijedenoj puti dobiveni simulacijom A-RB+ECMS-EXT i RB+ECMS-EXT sustava upravljanja (FWD model i CS režim rada).</i>	<i>102</i>
<i>Slika 6-11. Usporedni odzivi kumulativne potrošnje goriva po prijedenoj puti dobiveni simulacijom A-RB+ECMS-EXT i RB+ECMS-EXT sustava upravljanja (FWD model i CS režim rada).</i>	<i>102</i>
<i>Slika 7-1. Ovisnost penalizacijskog člana F_{SoC} o preostalom putu voznog ciklusa te o vrijednosti SoC-a na kraju predikcijskog horizonta.</i>	<i>105</i>
<i>Slika 7-2. Optimalna funkcija cilja $J_k, jSoC_j, sf - sk$ dobivena za 2xJE05 repetitivni ciklus (a) te odgovarajući odziv regresijskog modela (b) (2xJE05 vozni ciklus).</i>	<i>108</i>
<i>Slika 7-3. Ilustracija točnosti regresijskog modela preostale potrošnje goriva na skupu za učenje (a) i testiranje (b).</i>	<i>108</i>
<i>Slika 7-4. Struktura modela predviđanja brzine vozila temeljenog na neuronskoj mreži [109].</i>	<i>109</i>
<i>Slika 7-5. Ilustracija predviđanja brzine gradskog autobusa pomoću modela danog na slici 7-4.</i>	<i>110</i>

<i>Slika 7-6. Odzivi SoC-a po prijedenoj puti uz primjenu MPC-1 strategije u usporedbi s DP-optimalnim rezultatima (EXT-BWD model i CS režim rada).....</i>	<i>113</i>
<i>Slika 7-7. Odzivi kumulativne potrošnje goriva po prijedenoj puti uz primjenu MPC-1 strategije u usporedbi s DP-optimalnim rezultatima (EXT-BWD model i CS režim rada). ..</i>	<i>113</i>
<i>Slika 7-8. Razmještaji radnih točaka MSUI-a i M/G stroja dobiveni simulacijom MPC-1 sustava upravljanja (EXT-BWD model, CS režim rada i DUB vozni ciklus).</i>	<i>114</i>
<i>Slika 7-9. Trajektorije SoC-a (a) i kumulativne potrošnje goriva (b) po prijedenoj puti dobivene uz primjenu MPC-1 strategije za različite duljine predikcijskog horizonta N_p i DUB vozni ciklus.</i>	<i>115</i>
<i>Slika 8-1. SoC trajektorije po prijedenoj puti dobivene različitim metodama planiranja SoC referenci za 6xDUB bez nagiba (a) 10xHDUDDS (b) 6xWHVC (c) te 6xJE05 (d) repetitivne cikluse u BLND te CD-CS režimima.</i>	<i>127</i>
<i>Slika 8-2. Stvarne i referentne SoC trajektorije po prijedenoj puti dobivene različitim metodama planiranja SoC referenci za BLND režim (kao i one za CD/CS režim) i nulti nagib ceste.</i>	<i>130</i>
<i>Slika 8-3. SoC trajektorije po prijedenoj puti dobivene različitim metodama planiranja SoC referenci za slučaj prisustva LEZ-a u BLND te CD-CS režimima.</i>	<i>133</i>
<i>Slika B-1. Koeficijent smanjenja momenta MSUI-a za pet karakterističnih kategorija promjene stanja pogona.</i>	<i>156</i>
<i>Slika C-2. Vezni dijagram FWD modela PHEV-a.</i>	<i>157</i>

Popis tablica

<i>Tablica 2-1. Opći parametri razmatranog Volvo 7900 Electric Hybrid gradskog autobusa [83, 84].</i>	17
<i>Tablica 2-2. Parametri Dieselog motora i električnog (M/G) stroja razmatranog PHEV autobusa [83].</i>	18
<i>Tablica 2-3. Shema ukapčanja stupnjeva prijenosa AMT-a i odgovarajući prijenosi omjeri [90], [91].</i>	22
<i>Tablica 2-4. Parametri uzdužne dinamike razmatranog PHEV-tipa gradskog autobusa.</i>	25
<i>Tablica 4-1. Usporedni rezultati DP optimiranja upravljačkih varijabli BWD i EXT-BWD modela PHEV-a za razne vozne cikluse i CS režim rada.</i>	60
<i>Tablica 4-2. Usporedni rezultati DP optimiranja upravljačkih varijabli BWD i EXT-BWD modela PHEV-a za razne repetitivne vozne cikluse i BLND režim rada.</i>	62
<i>Tablica 4-3. Rezultati DP optimiranja upravljačkih varijabli EXT-BWD modela PHEV-a za 4xDUB repetitivni vozni ciklus i različite profile nagiba ceste u BLND režimu rada.</i>	65
<i>Tablica 4-4. Rezultati DP optimiranja upravljačkih varijabli EXT-BWD modela PHEV-a za 3xDUB i 3xHDUDDS repetitivne vozne cikluse s i bez prisustva LEZ-a u BLND i CS režimima rada.</i>	67
<i>Tablica 5-1. Usporedni rezultati simulacije RB+ECMS i RB+ECMS-EXT sustava upravljanja na EXT-BWD modelu u CS režimu rada.</i>	83
<i>Tablica 5-2. Usporedni rezultati simulacije RB+ECMS i RB+ECMS-EXT sustava upravljanja na FWD modelu u CS režimu rada.</i>	87
<i>Tablica 6-1. Pokazatelji točnosti i dimenzija regresijskih modela temeljenih na LS i LASSO postupcima.</i>	96
<i>Tablica 6-2. Usporedni rezultati simulacija RB+ECMS-EXT i A-RB+ECMS-EXT sustava upravljanja (EXT-BWD model, CS režim).</i>	98
<i>Tablica 6-3. Usporedni rezultati simulacija RB+ECMS-EXT i A-RB+ECMS-EXT sustava upravljanja (FWD model, CS režim).</i>	101
<i>Tablica 7-1. Pokazatelji točnosti regresijskog modela preostale potrošnje goriva.</i>	108
<i>Tablica 7-2. Koeficijenti determinacije (R^2) unakrsne provjere modela preostale potrošnje goriva.</i>	109
<i>Tablica 7-3. Usporedni pokazatelji kvalitete upravljanja PHEV-om uz primjenu raznih razvijenih strategija upravljanja uključujući dvije inačice MPC strategije.</i>	112

<i>Tablica 7-4. Usporedni pokazatelji kvalitete upravljanja uz primjenu MPC-1 strategije za razne duljine predikcijskog horizonta i DUB vozni ciklus.</i>	115
<i>Tablica 7-5. Usporedni pokazatelji kvalitete upravljanja uz primjenu MPC-1 strategije za slučajeve s i bez penalizacije SoC-a na kraju predikcijskog horizonta.</i>	116
<i>Tablica 7-6. Usporedni pokazatelji kvalitete upravljanja uz primjenu adaptivne i regularne RB+ECMS-EXT strategije te MPC strategija s idealiziranim i realističnim predviđanjem brzine vozila.</i>	117
<i>Tablica 8-1. Rezultati simulacija RB+ECMS-EXT strategije upravljanja u CD-CS i BLND režimima za različite metode planiranja SoC reference i nulti nagib ceste.</i>	128
<i>Tablica 8-2. Rezultati simulacija RB+ECMS-EXT strategije upravljanja u CD-CS i BLND režimima za različite metode planiranja SoC referenci i promjenjivi nagib ceste.</i>	131
<i>Tablica 8-3. Rezultati simulacija RB+ECMS-EXT strategije upravljanja u CS i BLND režimima za slučaj prisustva LEZ-a te uz primjenu različitih metoda planiranja SoC referenci.</i>	132
<i>Tablica 8-4. Rezultati analize robusnosti sustava upravljanja s obzirom na pogreške određivanja profila nagiba ceste.</i>	134
<i>Tablica 8-5. Rezultati analize robusnosti sustava upravljanja s obzirom na pogreške procjeni značajki voznog ciklusa.</i>	135
<i>Tablica 8-6. Rezultati analize robusnosti sustava upravljanja s obzirom na pogreške procjene ukupne promjene SoC-a unutar LEZ-ova.</i>	137
<i>Tablica A-1. Odnos normiranih pozicija sinkrona i aktivnih zupčaničkih parova [91].</i>	151
<i>Tablica A-2. Brojevi zubi pojedinih zupčanika [91].</i>	152
<i>Tablica A-3. Prijenosni omjeri zupčaničkih parova [91].</i>	152

Popis oznaka i kratica

Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
A_{ek}	g/kWh	Specifična potrošnja goriva MSUI-a
A_f	m ²	Napadna površina šasije vozila
C_d	-	Koeficijent aerodinamičkog otpora vozila
c_{mcl}	-	Normirani kapacitet glavne spojke
EN_{st}	-	Stanje uključenosti MSUI-a
e_{SoC}	-	Pogreška slijeđenja reference SoC-a
F_{SoCf}	g	Funkcija penalizacije odstupanja SoC-a od zadane vrijednosti na horizontu predikcije
g	m/s ²	Konstanta gravitacijskog ubrzanja
h	-	Prijenosni omjer transmisije
h_{idx}	-	Indeksi stupnjeva prijenosa transmisije
I_{batt}	A	Struja baterije
I_{cs}	mkg ²	Moment inercije međuvratila transmisije
I_e	mkg ²	Moment inercije MSUI-a
I_{MG}	mkg ²	Moment inercije M/G stroja
I_{ms}	mkg ²	Moment inercije glavnog vratila transmisije sa zupčanicima
i_o	-	Ukupni prijenosni omjer prigonskog sklopa
I_{os}	mkg ²	Moment inercije izlaznog vratila transmisije
I_w	mkg ²	Moment inercije kotača
J	g	Ciljna funkcija
J_p	g	Ciljna funkcija za predikcijski horizont

Popis oznaka i kratica

k	-	Korak uzorkovanja
K_{LEZ}	-	Težinski koeficijent penalizacije potrošnje goriva unutar LEZ-a
K_{SoC}	W	Proporcionalno pojačanje SoC regulatora
m_{add}	kg	Ekvivalentna masa rotirajućih komponenti pogonskog sklopa
\dot{m}_{eq}	kg	Ekvivalentni maseni protok goriva
\dot{m}_f	kg	Maseni protok goriva
m_p	kg	Masa putnika
M_v	kg	Masa praznog autobusa
N	-	Ukupan broj vremenskih koraka
N_e	-	Ukupan broj uključivanja MSUI-a
N_g	-	Ukupan broj prebacivanja stupnjeva prijenosa
N_h	-	Duljina horizonta u neposrednoj prošlosti
N_p	-	Duljina predikcijskog horizonta
P_0	W	Konstantni gubitci snage transmisije
P_{batt}	W	Snaga pražnjenja baterije
P_d	W	Zahtijevana snaga na ulazom vratilu transmisije
$P_{d,th}$	W	Prag zahtijevane snage između električnog i hibridnog načina rada
$P_{dyn,loss}$	W	Snaga dinamičkih gubitaka pogonskog sklopa
P_e	W	Snaga MSUI-a
P_{hyst}	W	Histereza snaga uključivanja i isključivanja MSUI-a
$P_{mcl,loss}$	W	Snaga gubitaka uslijed proklizavanja glavne spojke
P_{off}	W	Prag snage isključivanja MSUI-a
P_{on}	W	Prag snage uključivanja MSUI-a
Q_{max}	As	Nabojski kapacitet baterije

Popis oznaka i kratica

R	Ω	Unutarnji otpor baterije
R_0	-	Koeficijent otpora kotrljanja
R^2	-	Koeficijent determinacije
r_c	-	Koeficijenti smanjenja momenta MSUI-a prilikom prijelaznih pojava
r_w	m	Efektivni polumjer autogume (pneumatika)
s	m	Prijeđeni put voznog ciklusa
s_f	m	Ukupni put voznog ciklusa
s_{LEZ}	m	Ukupni put ciklusa unutar LEZ-ova
SoC	-	Stanje napunjenosti baterije
SoC_R	-	Referenca stanja napunjenosti baterije
s_{pm}	-	Normirana pozicija sinkrona m
s_{pr}	-	Normirana pozicija sinkrona r
s_{ps}	-	Normirana pozicija sinkrona s
t	s	Vrijeme
T_e	s	Vremenska konstanta dinamike momenta MSUI-a
T_d	s	Vrijeme uzorkovanja
t_f	s	Ukupno vrijeme voznog ciklusa
T_{mcl}	s	Vremenska konstanta dinamike aktuatora glavne spojke
T_{MG}	s	Vremenska konstanta dinamike razvoja momenta M/G stroja
U_{oc}	V	Napon otvorenog kruga baterije
V_f	L	Ukupna volumna potrošnja goriva
$V_{f,corr}$	L	Korigirana potrošnja goriva s obzirom na konačno stanje SoC-a
$V_{f,m}$	L	Potrošnja goriva nakon predikcijskog horizonta
v_v	m/s	Brzina vozila

Popis oznaka i kratica

W	-	Težinska funkcija kombiniranja RB i ECMS strategija upravljanja
α_w	rad/s ²	Ubrzanje kotača
δ_r	rad	Nagib ceste
Δ_{SoC}	-	Širina mrtve zone SoC regulatora
Δt_{mcl}	s	Vrijeme zatvaranja glavne spojke
ζ	-	Faktor prigušenja
η_{batt}	-	Učinkovitost baterije
η_{MG}	-	Učinkovitost M/G stroja
η_{tr}	-	Učinkovitost transmisije
λ	-	Koeficijent operacije najmanjeg apsolutnog skupljanja i odabira
ρ_{fuel}	g/m ³	Gustoća dizel goriva
τ_{brk}	Nm	Kočni okretni moment mehaničkih kočnica
τ_e	Nm	Okretni moment MSUI-a
τ_{mcl}	Nm	Okretni moment glavne spojke prilikom proklizavanja
τ_{MG}	Nm	Okretni moment M/G stroja
τ_w	Nm	Okretni moment kotača
τ_{wd}	Nm	Zahtijevani okretni moment kotača
ϕ_{os}	rad	Torzijski kut uvijanja izlaznog vratila uslijed elastičnosti
ω_e	rad/s	Brzina vrtnje MSUI-a
ω_{mcl}	rad/s	Brzina proklizavanja glavne spojke
ω_{MG}	rad/s	Brzina vrtnje M/G stroja
ω_w	rad/s	Brzina vrtnje kotača

Popis kratica

AMT	Automatska manualna transmisija
A-RB+ECMS- EXT	Adaptivna inačica RB+ECMS-EXT strategije upravljanja.
BLND	Kombinirani (režim rada) (engl. Blended)
BWD	Unazadni (model vozila) (engl. Backward)
CD	(Režim) pražnjenja baterije (engl. Charge Depleting)
CD-CS	Kombinacija (režima) pražnjenja baterije i održavanja stanja napunjenosti baterije
CS	(Režim) održavanja stanja napunjenosti baterije (engl. Charge Sustaining)
DP	Algoritam dinamičkog programiranja
DUB	Vozni ciklus gradskog autobusa snimljen u Dubrovniku
EXT-BWD	Prošireni unazadni (model vozila) (engl. Extended Backward)
ECMS	Strategija minimizacije ekvivalentne potrošnje goriva (engl. Equivalent consumption minimisation strategy)
FWD	Unaprijedni (model vozila) (engl. Forward)
GSD	(Algoritam) odgađanja prebacivanja stupnja prijenosa (engl. <i>Gear Shift Delay</i>)
HEV	Hibridno električno vozilo (engl. <i>Hybrid Electric Vehicle</i>)
LASSO	Regresijska metoda najmanjeg apsolutnog skupljanja i odabira (engl. Least Absolute Shrinkage and Selection Operator)
LEZ	Zona niske emisije (engl. Low Emission Zone)
LFP	Litij-željezo-fosfat-oksidi kemijski sastav baterije
LS	Regresijska metoda najmanjih kvadrata (engl. <i>Least squares</i>)
MPC	Modelsko prediktivno upravljanje (engl. <i>Model Predictive Control</i>)
MSUI	Motor s unutarnjim izgaranjem
M/G	Motor/generator (stroj)
PHEV	Utično hibridno električno vozilo (engl. <i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i>)
PMP	Pontryaginov princip minimuma (engl. <i>Pontryagin's Minimum Principle</i>)
PT1	Dinamički član prvog reda s kašnjenjem
RB	(Strategija upravljanja) zasnovana na pravilima (engl. <i>Rule-based</i>)
RB+ECMS	Strategija upravljanja koja kombinira RB i ECMS pristupe

RB+ECMS- EXT	Inačica RB+ECMS strategije upravljanja koja se zasniva na EXT-BWD modelu-
SDP	Algoritam stohastičkog dinamičkog programiranja
SMPC	Stohastičko modelsko prediktivno upravljanje (engl. <i>Stochastic Model Predictive Control</i>)

1. Uvod

1.1. Motivacija

Automobilskoj su industriji kroz zadnjih nekoliko desetljeća nametnute zakonske norme koje ograničavaju emisije štetnih ispušnih plinova novoprodučenih vozila. Cilj tih normi je poboljšanja kvalitete zraka, posebno u urbanim sredinama, kroz smanjenje emisija za okoliš štetnih plinova i čestica kao što su CO, HC, NO_x i čađe [1]. Nakon Euro VI norme, nove zakonske mjere orijentirane su i na smanjenje emisije CO₂ i drugih stakleničkih plinova. Europska komisija je 2015. godine proizvođačima motornih vozila postavila gornju granicu od maksimalnih 130 g emisije CO₂ po prijeđenom km za cjelokupnu flotu novoprodučenih vozila. Ta gornja granica spuštena je na 95 g/km 2021. godine [1], a slične zakonske mjere uvode se i u Sjedinjenim Američkim Državama, Kini i Japanu. Da bi ispoštovali zakonske norme, proizvođači podižu udio elektrificiranih vozila u flotama novoprodučenih vozila, te hibridna električna vozila (HEV) i baterijska električna vozila (BEV) postaju sve zastupljenija na tržištima. Iako BEV predstavljaju krajnje sredstvo k ostvarenju čistog i tihog transportnog sustava budućnosti, trenutni nedostaci kao što su visoka cijena, dugo vrijeme punjenja te ograničen domet vožnje sprječavaju njihovu široku primjenu. HEV-ovi premošćuju neke od problema baterijskih električnih vozila te su široko prihvaćena kao dobro prijelazno rješenje.

HEV-ovi su pogonjeni motorom s unutarnjim izgaranjem (MSUI) i jednim ili više električnih strojeva koji mogu raditi kao motori ili generatori (M/G strojevi) [2]. M/G strojevi napajaju se iz elektrokemijskih baterija i/ili ultrakondenzatora. Za razliku od standardnih HEV-ova, utična hibridna električna vozila (engl. Plug-in Hybrid Electric Vehicles, PHEV) koriste bateriju povećanog kapaciteta koja se može puniti iz električne mreže. U kombinaciji s M/G strojevima veće snage, ovo im daje mogućnost rada u čisto električnoj vožnji u širem rasponu opterećenja i dulje vrijeme, čim se značajno smanjuju potrošnja goriva i emisije ispušnih plinova [3]. U odnosu na konvencionalna vozila pogonjena isključivo s MSUI, HEV i PHEV tipovi vozila pružaju više stupnjeva sloboda u upravljanju tokovima snage a time i sveukupno bolje performanse. Cilj strategije upravljanja tokovima snage jest podići cjelokupnu učinkovitost pogonskog sklopa i time minimizirati ukupnu potrošnju goriva, poštujući pritom vozačev zahtjev za snagom odnosno okretnim momentom na pogonskim kotačima [2].

1. Uvod

Studija provedena u [4] ispitala je utjecaj različitih strategija upravljanja HEV/PHEV-ovima te njihovog stupnja elektrifikacije na potrošnju goriva i ukupni investicijski i eksploatacijski trošak kroz radni vijek vozila. Uočeno je da smanjenje potrošnje goriva hibridnih vozila korelira s količinom utrošene električne energije. No ipak, pražnjenje baterije prije završetka voznog ciklusa rezultira korištenjem MSUI na sveukupno manje učinkovit način s ciljem održavanja minimalnog dozvoljenog stanja napunjenosti baterije. Stoga je za smanjenje ukupne potrošnje goriva hibridnih vozila neophodna maksimizacija učinkovitosti pogonskog sklopa kroz cijeli vozni ciklus. U realnoj primjeni to podrazumijeva poznavanje ključnih informacija o nadolazećem putovanju tj. voznom ciklusu, kako bi se moglo učinkovito upravljati tokovima snage tijekom putovanja. Ove informacije primarno uključuju očekivanu prijeđenu udaljenost, ali i profil nagiba ceste, značajke zagušenja prometa poput srednje brzine vozila i njene standardne devijacije te ambijentalne uvijete koji utječu na potrošnju energije za grijanje i hlađenja putničkog prostora vozila, a koji se mogu prikupiti iz sustava za globalno pozicioniranje (engl. skrać. GPS), geografskih baza podataka, inteligentnih sustava za nadzor cestovnog prometa te prikupljenih povijesnih podataka tj. odgovarajućih modela protočnosti prometa [5], [6]. Ovakav pristup posebno je prigodan za vozila koja operiraju na konstantnim rutama, poput autobusa i dostavnih vozila koji su ujedno i značajni potrošači fosilnih goriva u cestovnom prometu.

S obzirom na konfiguraciju pogonskog sklopa, hibridna vozila dijele se na paralelna, serijska i serijsko-paralelna [2], [7]. Za razliku od najneučinkovitije serijske konfiguracije pogona, kod koje M/G stroj sam pogoni vozilo a MSUI pogoni drugi električni stroj/generator, kod paralelne konfiguracije i MSUI i M/G stroj izravno sudjeluju u pogonu vozila. Paralelne konfiguracije zahtijevaju automatsku ili automatiziranu manualnu transmisiju za redukciju brzine MSUI, što ujedno omogućava i korištenje kompaktnijeg M/G [2]. Time se paralelne konfiguracije mogu, uz minimalne preinake, zasnovati na već postojećim rješenjima pogonskih sklopova konvencionalnih vozila, što smanjuje njihovu cijenu. Serijsko-paralelne konfiguracije objedinjuju prednosti serijskih i paralelnih konfiguracija koristeći hibridnu transmisiju zasnovanu na jednom ili više planetarnih prijenosnika, te rezultiraju visokom učinkovitošću uz nižu cijenu u odnosu na serijsku konfiguraciju. Ovaj rad odnosi se na paralelnu konfiguraciju PHEV-a, no predložene metode modeliranja pogona i sinteze strategije upravljanja mogu se uz umjerene preinake primijeniti i na ostale konfiguracije hibridnih vozila.

1.2. Dosadašnje spoznaje

1.2.1. *Optimalne strategije upravljanja tokovima snage hibridnih vozila*

Kako bi se iskoristio puni potencijal smanjenja potrošnje goriva potrebno je na optimalan način koordinirati rad pogonskih strojeva PHEV-a. Optimalne strategije upravljanja tokovima snage PHEV pogona, stoga, za cilj imaju minimizaciju potrošnje goriva te održavanja stanja napunjenosti baterije (engl. State of Charge, SoC) u hibridnom načinu rada [2].

Strategije upravljanja koje se izvode u realnom vremenu mogu se podijeliti na strategije zasnovane na pravilima (engl. Rule-based, RB strategije) te na strategije koje se temelje na optimiranju upravljačkih varijabli [8]. RB strategije mogu se dalje podijeliti na strategije temeljene na determinističkim pravilima te neizrazitoj logici. Ove strategije koriste bazu pravila pri određivanju načina rada i iznosa upravljačkih varijabli PHEV-a, pri čemu se zadaje niz okidnih pragova ključnih varijabli pogona [9], [10]. Pravila i pripadni pragovi određuju se heuristički, često na temelju analize rezultata optimiranja upravljačkih varijabli van realnog vremena [11], [12]. Zbog dobre interpretabilnosti i visoke računalne učinkovitosti, RB strategije široko su rasprostranjene i korištene u hibridnim vozilima [13], [14]. Međutim, one su općenito podoptimalne, posebno za širok spektar voznih ciklusa [15], [16]. RB strategije koje se temelje na neizrazitoj logici formaliziraju bazu pravila kroz jasno utemeljenu metodologiju. Pristup neizrazite logike može se kombinirati s optimiranjem upravljačkih varijabli radi postizanja sveukupno bolje kvalitete upravljanja [17], [18].

Strategije upravljanja koje se temelje na optimiranju upravljačkih varijabli rezultiraju općenito boljim performansama u smislu minimizacije potrošnje goriva u odnosu na RB strategije. Najčešće izvedbe ovakvih strategija zasnivaju se na Pontryaginovom principu minimuma (engl. Pontryagin's minimum principle, PMP) [19], [20], minimizaciji ekvivalentne potrošnje goriva (engl. equivalent consumption minimisation strategy, ECMS) [21] te modelskom prediktivnom upravljanju (engl. model predictive control, MPC). Rjeđe zastupljene strategije upravljanja hibridnim vozilima zasnovane su na teoriji igara ([22]), neuronskim mrežama ([23], [24]), genetskim algoritmima [25], regulatorima u kliznom režimu ([26]) ili konveksnom programiranju ([27], [28]).

PMP pristup rezultira računalno učinkovitim optimizacijskim algoritmom što ga čini primjenjivom u realnom vremenu [29], [30]. Pritom se koristi Hamiltonianova funkcija kao ciljna funkcija optimizacijskog problema, kod koje se maseni protok goriva zbraja s umnoškom

1. Uvod

Lagrangeovog multiplikatora i varijable stanja SoC-a [31]. Vremenski odziv SoC-a osjetljiv je na početnu vrijednost Lagrangeovog multiplikatora, što može ugroziti održavanje SoC-a u dozvoljenim granicama [31]. Kako se početna vrijednost Lagrangeovog multiplikatora za željenu vrijednost SoC-a na kraju ciklusa ne može izračunati u eksplicitnoj analitičkoj formi, rješavanje PMP-a za dani vozni ciklus svodi se na ponavljanje simulacije na punom vremenskom horizontu s različitim početnim vrijednostima multiplikatora, sve dok proces ne rezultira zadovoljavajućom konačnom vrijednošću SoC-a.

Kako bi se osigurala održivost tj. praćenje reference SoC-a, u [19] i [30] predlažu se adaptivne strategije upravljanja temeljene na PMP strategiji, gdje se na osnovu pogreške slijeđenja reference SoC-a adaptira vrijednost Lagrangeovog multiplikatora. Na ovaj se način može garantirati dobro praćenje reference SoC, no adaptacijom Lagrangeovog multiplikatora potencijalno se gubi na performansama u smislu potrošnje goriva. S druge strane, u [19] te [28] predlaže se mapiranje optimalnih početnih vrijednosti Lagrangeovog multiplikatora van realnog vremena s obzirom na karakteristike voznog ciklusa, čime se poboljšava kvaliteta praćenja reference SoC-a, eliminira potreba za iterativnim traženjem odgovarajuće početne vrijednosti koja će rezultirati željenom vrijednošću SoC-a na kraju ciklusa te poboljšava računalna učinkovitost.

ECMS je prvotno uveden s ciljem smanjenje potrošnje goriva paralelnog HEV-a [21], [24]. ECMS počiva na ideji da akumulirana ili utrošena električna energija baterije ima ekvivalentnu masenu vrijednost goriva. Funkcija cilja ECMS-a formira se, tada, kao zbroj stvarne i ekvivalentne potrošnje goriva [28], [20]. Uz primjenu faktora ekvivalencije, ekvivalentna potrošnja kod ECMS-a odražava ciljnu funkciju Hamiltoniana koja se koristi u PMP strategiji, no uz zanemarenje dinamike razvoja Lagrange-ovog operatora. No, na osnovu opsežnih simulacija PMP strategije, danih u [19] i [21], uočeno je da se vrijednost Lagrangeovog multiplikatora ionako neznatno mijenja kroz ciklus [21], [24], [14].

Optimalna vrijednost faktora ekvivalencije također je osjetljiva na karakteristike voznog ciklusa i ima snažan utjecaj na vremenski odziv SoC-a. Stoga se ECMS često proširuje regulatorom SoC-a, koji ovisno o pogreški slijeđenja reference SoC-a prilagođuje vrijednost faktora ekvivalencije [14], [13], [32]. Adaptiranje faktora ekvivalencije na osnovu procijenjenih karakteristika voznog ciklusa i unaprijed određenih statičkih mapa predloženo je u [33]. Sličan pristup ali uz primjenu neuronske mreže predložen je u [5]. ECMS je originalno namijenjen za hibridni način rada kako bi se SoC držao na minimalno dopuštenoj donjoj razini te izbjeglo

1. Uvod

nekontrolirano pražnjenje baterije, no primjenjiv je i za kombinirani način rada kod kojeg se referenca SoC-a kontrolirano spušta [31], [32].

U [19] i [33] pokazano je da optimalne upravljačke strategije temeljene na PMP i ECMS pristupima rezultiraju manjom potrošnjom goriva od RB strategija. No, one su u izvornom obliku osjetljive na inicijaliziranu vrijednost Lagrangeovog multiplikatora odnosno faktora ekvivalencije. Strategija upravljanja predložena u [34], na kojoj se temelje napredniji pristupi predloženi u ovom radu, kombinira RB i ECMS upravljačke strategije kako bi objedinila prednosti oba pristupa. RB strategija jamči održavanje i praćenje reference SoC-a putem eksplicitnog SoC regulatora te uključuje logiku uključenja i isključenja MSUI-a, dok ECMS osigurava značajke optimalnog upravljanja. U prisustvu SoC regulatora, faktor ekvivalencije postaje suvišan te se postavlja na iznos 1.

Projektiranje upravljačke strategije često je temeljeno na uvidima dobivenima kroz optimiranje upravljačkih varijabli van realnog vremena, koje se najčešće provodi korištenjem algoritma dinamičkog programiranja (DP) kako bi se dobilo globalno optimalno rješenje za dani, složeni tj. nekonveksni problem [2], [35]. No, DP rezultira značajnim računalnim opterećenjem, koje eksponencijalno raste s brojem varijabli stanja i upravljačkih varijabli [36]. Stoga je neophodno pojednostavniti model PHEV-a, što s druge strane rezultira nesigurnošću u preciznost optimalnog rješenja ako se primjeni na realističnijim i preciznijim simulacijskim modelima. Bez obzira na ovaj nedostatak, DP optimiranje ostaje vrijedan alat za razvoj strategije i postavljanje referentnog mjerila za njenu inicijalnu provjeru [37], [38], [39].

1.2.2. Adaptivne i prediktivne strategije upravljanja

Kako značajke voznog ciklusa imaju primjetan utjecaj na kvalitetu upravljanja PHEV-om, prije svega u vidu potrošnje goriva, postoje radovi koji razmatraju adaptaciju strategije upravljanja s obzirom na estimaciju značajki voznih ciklusa [40]. U [41] je predložen adaptacijski mehanizam upravljačkih parametara, koji se zasniva na rezultatima optimiranja upravljačkih varijabli te kategorizaciji voznog ciklusa u realnom vremenu. Vozni ciklus kategorizira se temeljem neizrazite logike u tri skupine, za koje je optimalni skup upravljačkih parametara određen iz unaprijed pripremljenih oglednih mapa na temelju rezultata DP optimiranja. Kategorizacija voznog ciklusa također može biti temeljena na Bayesovoj vjerojatnosnoj metodi [40]. U referenci [42] primjenjuje se algoritam stohastičkog dinamičkog programiranja (engl. stochastic dynamic programming, SDP) nad hibridom paralelne konfiguracije, koji se koristi

1. Uvod

kako bi se za razmatranu grupu voznih ciklusa unaprijed dobile upravljačke mape optimalne u prosječnom smislu. Pritom se koriste dvije SDP upravljačke mape, jedna namijenjena minimiziranju potrošnje goriva, a druga maksimiziranju udobnosti vožnje kroz smanjenje broja promjena stupnja prijenosa. Iznosi končanih upravljačkih varijabli izračunati su kombiniranjem izlaza dviju upravljačkih mapa temeljem adaptacijskog faktora koji predstavlja trenutnu promjenu akceleracije vozila. Pritom, potrošnja goriva dobiva prioritet pri stacionarnijim voznim uvjetima, dok je udobnost od većeg prioriteta prilikom naglijih ubrzanja. Prema [43], strategija upravljanja adaptira se s obzirom na poznavanja ograničenja maksimalne brzine na nadolazećoj cesti te predviđanja značajki zagušenja prometa. Predlaže se korištenje strojnog učenja van realnog vremena za određivanje upravljačkih varijabli koje će minimizirati potrošnju goriva za široki spektar maksimalnih ograničenja brzine i značajki zagušenja prometa. Potom se u realnom vremenu koristi neuronska mreža za predviđanje karakteristika nadolazećih segmenata voznog ciklusa i adaptaciju upravljačkih varijabli.

Ultimativan pristup upravljanju PHEV-om je modelsko prediktivno upravljanje (MPC), koje je u posljednje vrijeme široko istraživano za razne primjene u vozilima [44]. MPC algoritam provodi optimiranje upravljačkih varijabli na pomičnom predikcijskom horizontu u realnom vremenu, te kao takav zahtijeva poznavanje ili relativno točno predviđanje vremenskog profila brzine vozila na istom horizontu [45], [46]. Od optimiranog profila upravljačkih varijabli, dobivenog u danom koraku uzorkovanja, primjenjuje se samo prvi (tekući) element [45]. U nultom koraku horizonta koriste se mjereni ulazi (npr. brzina vozila i SoC), a naredni uzorci se predviđaju. Kao takav, MPC predstavlja optimalni prediktivni regulator s mogućnošću ograničavanja optimiranih ulaznih varijabli i stanja vozila na predikcijskom horizontu [45].

U literaturi se predlažu različite izvedbe MPC strategije s obzirom na korišteni algoritam optimiranja i način predviđanja brzine vozila. Optimizacijski problemi modelskog prediktivnog upravljanja pogonskog sklopa većinom su ne konveksni zbog kompleksnosti modela pogonskog sklopa (v. poglavlje 2 i 3) te se za njegovo rješavanje često koristi DP algoritam jer, kako je već spomenuto, može garantirati globalno optimalno rješenje za opći optimizacijski problem [47], [48]. No, zbog računalne složenosti DP algoritma, njegovo korištenje u okviru MPC strategije zasad je ograničeno na simulacijsko okruženje i laboratorijske postavbe [49]. Jedna od mogućnosti je korištenje eksplicitnog MPC-a, koji je temeljen na unaprijed pripremljenim upravljačkim mapama, kako bi se izbjeglo računalno zahtjevno optimiranje upravljačkih varijabli u realnom vremenu [50]. Zanimljiva alternativa DP-u je korištenje

1. Uvod

računalno učinkovitijeg PMP algoritma za optimiranje upravljačkih varijabli na horizontu predikcije [54]. Učestalo se primjenjuje duljina predikcijskog horizonta do oko 10 sekundi [45]. U svrhu predviđanja vremenskog profila brzine vozila najčešće se koriste jednostavni eksponencijalni varirajući modeli, Markovljevi lanci ili posebno dizajnirane neuronske mreže [45], [47].

Optimizacijski problem MPC-a obično se zasniva na višekriterijskoj funkciji cilja, koja kombinira potrošnju goriva s pogreškom slijeđenja reference SoC-a, kao što je predloženo u [47], [51], [52]. Takve MPC strategije zahtijevaju pažljivo podešavanje težinskih faktora u funkciji cilja kako bi uravnotežili kriterije minimizacije potrošnje goriva i održivosti SoC-a. Zadovoljavajući iznosi težinskih faktora također u pravilu su ovisni o voznim ciklusima, što narušava robusnost sustava upravljanja. Kako bi se minimizirao utjecaj nepreciznosti eksplicitne predikcije brzine vozila, moguće je primijeniti stohastički MPC (engl. stochastic model predictive control, SMPC), koji uključuje stohastički model vozača unutar ciljane funkcije [49], [53]. SMPC okvir otvara mogućnost za adaptaciju stohastičkog modela vozača u realnom vremenu temeljem raspoloživih mjerenja i estimata [53].

Prethodno opisane MPC strategije oslanjaju se na unaprijed definirane profile SoC-a po prijedenoj udaljenosti ili stanje SoC-a na kraju horizonta kako bi se implicitno osigurala optimalnost upravljanja na dugoročnom horizontu (onom nakon horizonta predviđanja pa sve do kraja putovanja). Međutim, fiksni, npr. linearni SoC profil može biti značajno podoptimalan u uvjetima značajnije promjenjivog nagiba ceste, prisutnosti zona niske emisije ili izraženo promjenjivih uvjeta vožnje (npr. gradske vožnje i vožnje na autocesti). Kako bi se eksplicitnije osigurala optimalnost izvan horizonta predviđanja, hijerarhijska MPC strategija predložena u [54] uključuje nadređenu razinu planiranja SoC-a, na kojoj se određuje optimalna referenca SoC-a tijekom cijelog putovanja, dok se na podređenoj razini optimiraju upravljačke varijable. Praćenje reference SoC-a ponovno se osigurava uključanjem odgovarajućeg penalizacijskog člana kroz višekriterijsku funkciju cilja. Na sličan način, hijerarhijska MPC strategija predložena u [55] za gradski autobus određuje optimalne vrijednosti SoC-a na svakoj stanici autobusne rute. Podređena strategija upravljanja potom minimizira funkciju cilja koja kombinira potrošnju goriva na predikcijskom horizontu s izrazom koji penalizira odstupanje od prethodno određene, optimalne SoC vrijednosti na autobusnoj stanici. Međutim, ako se u višekriterijskoj funkciji cilja pridoda prevelika težina na pogrešku slijeđenja reference SoC-a ili odstupanje od finalne SoC vrijednosti, kvaliteta MPC upravljanja može se značajno pogoršati

1. Uvod

u smislu potrošnje goriva. S druge strane, ako se referentnoj pogreški slijedenja ne pridruži dovoljna težina, MPC strategija će preferirati korištenje čistog električnog načina rada dok se baterija ne isprazni do najniže dopuštene razine SoC-a, nakon čega će se pogon morati koristiti na manje učinkoviti način za održavanje SoC-a na dostignutoj razini. Pristupi adaptivnih strategija upravljanja mogu se ugraditi i u MPC strategiju. Tako duljina predikcijskog horizonta ili težinski faktori unutar funkcije cilja mogu biti adaptirani temeljem voznih značajki koje se prikupljaju u realnom vremenu [45].

1.2.3. Upravljanju orijentirani modeli pogona

Za potrebe sinteze strategije upravljanja hibridnim vozilima često se koriste računalno učinkoviti kvazistatički ili unazadni (engl. backward, BWD) tip modela pogona, koji zanemaruje dinamiku pogona te razmatra samo dinamiku SoC-a baterije [2]. Također, ovi modeli uobičajeno ne razmatraju učinak dodatnih gubitaka uslijed promjena stanja pogona, kao što su uključivanje MSUI-a i promjena stupnja prijenosa ili načina rada pogona. Ako se strategije upravljanja parametrirane na takvom BWD modelu primjene na realističnijem i preciznijem unaprijednom (engl. forward, FWD) modelu pogona, one mogu značajno podbaciti u smislu povećane potrošnje goriva, kao i narušene udobnosti zbog čestih zahtjeva za prebacivanjem stupnja prijenosa ili načina rada [56], [57]. K tome, referentna mjerila dobivena optimiranjem upravljačkih varijabli BWD modela ne mogu biti vjerodostojna u širem smislu.

Strategije upravljanja predložene u literaturi obično uzimaju u obzir utjecaje prijelaznih pojava korištenjem heurističkih pristupa, gdje se broj uključivanja/isključivanja motora i promjena stupnjeva prijenosa nastoji minimizirati koristeći eksplicitnu penalizaciju broja tranzijenata pogona dobivenih na BWD modelu pogona [57]. Sličan pristup je da se nepovoljni utjecaji prečestih promjena radne točke pogona, ili promjena načina rada ili stupnja prijenosa, modelira kao dodatna potrošnja energije kroz ogledne mape, koja onda u sklopu strategije upravljanja može biti minimizirana [49]. U [58] i [59], rad pogona je izgladen dodavanjem penalizacijskog faktora vezanog uz fluktuacije radne točke motora. U [60] učestalost prijelaznih pojava pogona minimizirana je korekcijom zahtjeva vozača za snagom prije prosljeđivanja upravljačkoj strategiji. Slično, referenca koju zadaje nadređena strategija upravljanja tokovima snage može biti korigirana na razini podređenog sustava upravljanja putem djelovanja brzih električnih strojeva, a kako bi se smanjili gubici snage i poboljšala udobnost prilikom promjene načina rada (ili stupnja prijenosa) [61]. Izravnim potiskivanjem, tj. minimizacijom broja prijelaznih pojava može se unaprijediti udobnost vožnje, no ne može se garantirati optimalnost rješenja s

1. Uvod

obzirom na potrošnju goriva. Podešavanje takvih strategija svodi se na proces heurističkog nalaženja kompromisa između dva naizgled oprečna kriterija.

Alternativni pristupi odnose se na proširenje BWD modela kako bi se u obzir uzeli učinci gubitaka u prijelaznim stanjima pogona. Time se na fizikalan način, dakle preko odgovarajućeg modela, uzimaju u obzir dinamički gubici pogona, koji se odražavaju na potrošnju goriva te se samom minimizacijom potrošnje goriva (bez penalizacijskih članova vezanih uz dinamičke gubitke) automatski smanjuje i broj prijelaznih stanja na mjeru koja osigurava optimalnu (minimalnu) potrošnju goriva. Upravljačke strategije za PHEV-ove paralelne strukture predložene u [62] i [63] koriste modele proširene izrazom za dodatnu potrošnju goriva usijed dinamičkih gubitaka prilikom uključivanja MSUI-a. U [64] i [65] predloženi su BWD modeli prošireni dinamikom momenta MSUI-a i pumpanja goriva te koji u sklopu MPC strategije sprječavaju čestu promjenu izlaznog momenta i stanja MSUI-a. Strategija upravljanja dana u [66] koristi BWD model zasnovan na neuronskoj mreži s ciljem aproksimacije potrošnje goriva i električne energije preciznijeg FWD modela pogona te na taj način implicitno uzima u obzir utjecaj prijelaznih pojava. ECMS predložen u [67] koristi BWD model paralelnog PHEV-a, koji na fizikalan način uzima u obzir učinke prijelaznih pojava vezanih za promjenu stanja glavne spojke i stanja MSUI-a. No, predloženi model ne uzima u obzir utjecaje zamašnih masa, gubitke zbog sinkronizacije prilikom promjene stupnja prijenosa te utjecaje podređenog sustava upravljanja na dinamičke gubitke. Računanje dodatnih gubitaka snage uslijed promjene stupnja prijenosa ili uključivanja MSUI-a zahtjeva uvođenje novih varijabli stanja kao što su prethodno stanje uključivanja MSUI i prethodni stupanj prijenosa, s obzirom na koje se proširuje DP algoritam za optimiranje upravljačkih varijabli.

1.2.4. Sinteza referentnog profila stanja napunjenosti baterije

S obzirom na način korištenja električne energije kroz vozni ciklus, PHEV može općenito raditi u dva vozna režima: i) kombiniranje električne vožnje u režimu pražnjenja baterije (eng. Charge Depleting, CD) i hibridne vožnje u režimu održavanja naboja baterije (eng. Charge Sustaining, CS), te ii) kombinirani režim rada (engl. blended, BLND) gdje se, kombinacijom rada MSUI-a i M/G stroja, baterija postupno prazni kroz putovanje tako da SoC dosegne donju dopuštenu razinu na kraju putovanja. U potonjem slučaju potrebno je unaprijed znati duljinu putovanja i postaviti prikladan profil reference SoC-a. Autori u [68] i [37] navode da BLND režim uvodi uštedu goriva od oko 10% naspram CD-CS režima za PHEV-ove sa serijsko-paralelnom strukturom pogona.

1. Uvod

Iako se CD-CS režim odlikuje svojom jednostavnošću implementacije, njime se ograničava puni potencijal upravljanja PHEV pogonom u smislu uštede goriva [70]. Kako se tijekom CD režima ne koristi MSUI (osim kad je apsolutno nužno u odgovoru na visoke zahtjeve za momentom), električna staza može biti visoko opterećena što povećava električne gubitke, a k tome je baterija manje učinkovita pri niskom SoC-u u CS režimu [68]. U [71] je simulacijom pokazano da optimalno rješenje dobiveno DP algoritmom za BLND režim može smanjiti potrošnju goriva za čak 22% u odnosu na DP optimum u CD-CS režima. Manje uštede (do 5%) uočene su u [68] i maksimalne su kada je udio CD i CS režima u voznom ciklusu podjednak.

Dok je CS režim vožnje (ujedno i jedini kod HEV pogona) relativno dobro istražen, naglasak tekućih istraživačkih napora na području PHEV upravljanja je na projektiranju sustava upravljanja tokovima snage kod PHEV-a i generiranje optimalnog profila reference SoC-a u BLND režimu rada. Profil SoC reference potrebno je optimalno podesiti pretpostavljajući unaprijed poznatu vožnju rutu, koja može uključiti i eko-zone (engl. low-emission zone, LEZ) gdje MSUI treba biti isključen kad god je to moguće [72], [73]. Ako je duljina puta podcijenjena, BLND režim može rezultirati pretjeranim pražnjenjem baterije te preuranjenim ulaskom u CS režim. S druge strane, ako se duljina puta precijeni, BLND režim neće iskoristi puni potencijal pohranjene električne energije do stvarnog kraja puta, te će potrošnja goriva biti prekomjerna. U nedostatku pouzdanih podataka o duljini puta, primjena CD-CS režima može rezultirati nižom potrošnjom od BLND režima [37], [74], [75]. S tog stanovišta, BLND režim rada posebno je pogodan za vozila koja operiraju na unaprijed poznatim rutama kao što su gradski autobusi ili dostavna vozila [76], [77].

Planiranje profila referenci SoC-a za BLND režim obično se zasniva na heurističkim algoritmima, koji zahtijevaju poznavanje samo udaljenosti koja se planira prijeći. U literaturi je dobro dokumentirano i poznato da DP-optimalni odzivi SoC-a u funkciji prijeđene udaljenosti za BLND režim blisko prate linearni trend za mnoge certifikacijske vožnje cikluse [68], [19], [78]. Stoga se za BLND režim najčešće primjenjuje linearni profil reference SoC-a, koji se proteže od početnog stanja SoC-a na početku putovanja do ciljane razine SoC-a na kraju putovanja [8], [68], [51]. Osim što zahtijevaju minimalno znanje o nadolazećem voznom ciklusu, linearne SoC reference karakterizira jednostavnost implementacije i skalabilnost s obzirom na duljinu puta što ih čini prikladnim za primjenu.

Međutim, optimalni odzivi SoC-a mogu značajno odstupati od linearnog trenda po prijeđenome putu u slučaju realističnijih vožnjih uvjeta kao što je prisustvo značajnog nagiba ceste [19], [79],

1. Uvod

prisustvo LEZ-a [79] ili vozni ciklus s naizmjenično mijenjanim uvjetima vožnje (npr. gradska vožnja nakon koje slijedi vožnja na autocesti) [69]. Naprednije metode generiranja profila reference SoC-a, koje uzimaju u obzir utjecaj realističnih voznih uvjeta, temelje se na rezultatima optimiranja upravljačkih varijabli pogona van realnog vremena (npr. neposredno prije početka voznog ciklusa) ili u realnom vremenu (npr. MPC pristup). No, oba pristupa zahtijevaju predznanje ili kvalitetno predviđanje cjelokupnog voznog ciklusa [8], [45].

U [54] se predlaže hijerarhijska MPC strategija koja se oslanja na unaprijedno znanje cjelokupnog voznog ciklusa za određivanje profila SoC reference van realnog vremena prije početka puta. Proračun reference SoC-a određuje se na nadređenoj razini strategije za cijeli vozni ciklus te se prosljeđuje podređenoj strategiji koja je zadužena za MPC optimiranje upravljačkih varijabli. Na taj način postignuta je ušteda goriva od 2% naspram slučaja gdje se koristi linearna SoC referenca. Na sličan način, referenca [46] predlaže MPC strategiju koja se za određivanje profila reference SoC-a oslanja na pojednostavljeni energetske orijentirani model PHEV-a te na potpuno znanje o voznom ciklusu. Upravljačke varijable pojednostavljenog modela pogona optimiraju se neposredno prije početka ciklusa, a dobiveni odziv SoC-a koristi se kao referentni profil za MPC strategiju koja se izvodi u realnom vremenu. Drugačiji pristup predlaže se u [80], gdje se veliki broj optimalnih profila SoC-a, dobivenih na širokom spektru voznih ciklusa van realnog vremena, mapira s obzirom na pripadne profile brzina koristeći Monte Carlo pristup. Referentni profili SoC-a se u realnom vremenu generiraju na pomičnom predikcijskom horizontu temeljem tako dobivene mape i predikcije profila brzine, što u konačnici rezultira i do 10% uštede potrošnje goriva u usporedbi s CD-CS režimom. Na osnovu rezultata optimiranja upravljačkih varijabli te znanja o budućem profilu nagiba ceste, u [81] se predlaže postupak za prilagođavanje unaprijed proračunatog profila reference SoC-a. Iako je postignuto samo malo poboljšanje u potrošnji goriva, značajno je poboljšana mogućnost slijeđenja SoC-a u dopuštenim granicama. Metoda generiranja referentnog profila SoC-a temeljena na konveksnom optimiranju predložena je u [82]. Ova metoda koristi unaprijedno znanje o voznom ciklusu i grubu estimaciju promjene SoC-a prilikom regenerativnih kočenja. Cilj ove metode je minimizirati promjene referentnog profila SoC-a u trenutcima kad vozač zahtjeva vučnu snagu pogona što će se odraziti i na manje izlazne snage baterije a time i manje gubitke u bateriji. Pritom se navodi ušteda goriva od 8% u odnosu na primjenu linearne SoC reference.

1.3. Hipoteza

Cilj predloženog istraživanja je razraditi postupke za tvorbu BWD modela PHEV pogona proširenog učincima prijelaznih pojava pogona (engl. extended backward model, EXT-BWD) i projektiranje optimalne, adaptivne i prediktivne upravljačke strategije PHEV pogona, koje će uzimati u obzir prijelazne učinke te oblikovati optimalnu referentnu trajektoriju SoC-a u prisustvu LEZ-a i promjenjivog nagiba ceste.

Temeljna hipoteza istraživanja je da će EXT-BWD model zadržati visoku računalnu učinkovitost izvornog BWD modela i da će se po točnosti približiti kompleksnijem FWD modelu, te da će se korištenjem EXT-BWD modela pri projektiranju upravljačke strategije PHEV pogona postići dodatne uštede goriva, poboljšanje voznosti i udobnosti vožnje u prisustvu realističnih dinamičkih uvjeta rada pogona.

1.4. Pregled strukture rada

Kroz devet poglavlja ovog rada, koja uključuju uvod i zaključak, prikazuje se modeliranje dviju inačica unazadnog te također preciznijeg unaprijednog modela PHEV-a, numeričko optimiranje upravljačkih varijabli i sinteza više strategija upravljanja tokovima snage pogona (optimalne, adaptivne i modelsko prediktivne strategije). U nastavku potpoglavlja opisuje se sadržaj rada po poglavljima

Drugo poglavlje: *Unazadni model utičnog hibridnog električnog vozila.* Opisuje se pogonski sklop utičnog hibridnog električnog vozila P2 paralelne konfiguracije te se daju osnovni tehnički parametri. Analiziraju se tokovi snage razmatranog pogona te opisuju karakteristični načini i režimi rada. Prikazuje se temeljni BWD model vozila, koji zanemaruje dinamiku pogonskog sklopa kao i dinamičke gubitke pri upakčanju MSUI-a i promjene stupnja prijenosa. Zahtijevani moment i brzina na kotaču određuju se pomoću jednadžbe uzdužnog gibanja vozila i zadanog voznog ciklusa, te se koriste u unazadnom smislu za izračun varijabli pogonskih strojeva i baterije.

Treće poglavlje: *Unaprijedni i prošireni unazadni model vozila.* Prikazuje se precizniji FWD model koji uzima u obzir dominantnu dinamiku pogonskog sklopa te dinamičke gubitke, uz izračun varijabli u smjeru od pogonskih strojeva prema kotačima. FWD model implementiran je u Simcenter Amesim programskom okruženju te uključuje podređenu strategiju upravljanja

1. Uvod

s aktuatorskom dinamikom. Podređeni sustav upravljanja zadužen je za ostvarivanje radnih točaka zadanih od strane nadređene strategije upravljanja, putem prikladne koordinacije rada glavne spojke, pogonskih strojeva, automatizirane manualne transmisije te mehaničkih kočnica. Na osnovi analize bilance energije, proizašle iz rezultata simulacije FWD modela, predlaže se BWD model proširen učincima gubitka tijekom prijelaznih pojava uključivanja MSUI-a te promjene stupnja prijenosa (EXT-BWD model). Ovi gubici uključuju gubitke snage uslijed proklizavanja glavne spojke i sinkrona, gubitke snage prilikom pokretanja MSUI-a, te energije utrošene na sinkronizaciju kandžastih spojki putem M/G stroja. EXT-BWD model validiran je usporedbom vremenskih odziva kumulativne potrošnje goriva i SoC-a s onima dobivenima na vjernijem FWD modelu, uz upravljačke varijable generirane DP optimiranjem.

Četvrto poglavlje: *Optimiranje upravljačkih varijabli.* Predlaže se metoda za optimiranje upravljačkih varijabli PHEV pogona, koja se temelji na DP algoritmu prilagođenom dodatnim stanjima koje unosi EXT-BWD model pogona. S ciljem poboljšanja računalne učinkovitosti, DP algoritam implementiran je u C++ programskom jeziku, dok su dobiveni rezultati obrađeni i analizirani u Matlab/Simulink programskom okruženju. Ciljna funkcija odražava oprečne kriterije na smanjenje potrošnje goriva kroz vozni ciklus te održavanje SoC-a na zadanoj razini na kraju ciklusa. Uz tvrda ograničenja upravljačkih varijabli implementirana su i meka ograničenja koja limitiraju varijable pogona unutar definiranih granica. Optimiranje se provodi za CS i BLND režimu rada pogona. Uspoređeni su optimalni rezultati dobiveni DP algoritmom na BWD te EXT-BWD modelu kako bi se istaknule razlike u predikcijama potrošnje goriva. Također, analizirani su optimalni odzivi SoC-a po prijedenoj puti za razne vozne cikluse, uključujući i slučajeve promjenjivog nagiba ceste i prisutnosti zona niske emisije-

Peto poglavlje: *Nadređena strategija upravljanja.* Predlaže se nadređena strategija upravljanja tokovima snage paralelnog PHEV pogona, koja kombinira strategiju minimizacije ekvivalentne potrošnje (ECMS) te upravljanje zasnovano na bazi pravila (RB). RB dio strategije regulira SoC, proračunava zahtijevanu snagu na ulazu u transmisiju te određuje stanje MSUI-a (uključeno/isključeno). ECMS provodi trenutačno optimiranje upravljačkih varijabli (optimalna alokacija), koje uključuju moment MSUI-a i stupanj prijenosa. Razmatraju se su dvije inačice upravljačke strategije, ovisno o tome koristi li se BWD ili EXT-BWD modele u ECMS-u. S ciljem smanjenja broja promjena stupnja prijenosa za slučaj primjene BWD modela, u ciljnu funkciju uvodi se član koji kažnjava čestu promjenu stupnja prijenosa. Dvije

1. Uvod

inačice upravljačkih strategija simulacijski su provjerene te uspoređene na EXT-BWD te FWD modelima pogona u CS režimu rada i na više voznih ciklusa.

Šesto poglavlje: *Adaptivna strategija upravljanja.* Saznanja dobivena analizom rezultata DP optimiranja upravljačkih varijabli EXT-BWD modela, prikazanih u četvrtom poglavlju, koriste se za uspostavljanje adaptacijskog mehanizma parametara nadređene strategije upravljanja iz petog poglavlja. Optimalni rezultati prikupljeni su na karakterističnim mikro-ciklusima dobivenim segmentiranjem certifikacijskih voznih ciklusa, kako bi se naglasio utjecaj specifičnih lokalnih statističkih značajki voznih ciklusa (npr. gradska vožnja, krstarenje, agresivna vožnja). Iz DP optimalnih rezultata identificiraju se iznosi triju parametara nadređene strategije upravljanja te putem linearnog regresijskog modela povezuju s nizom značajki voznog ciklusa izračunatih na pomičnom vremenskom prozoru neposredno pred trenutak identifikacije. Adaptivna strategija provjerena je u odnosu na RB+ECMS iz petog poglavlja putem simulacijske provjere na EXT-BWD i FWD modelu.

Sedmo poglavlje: *Modelsko prediktivno upravljanje.* Provodi se sinteza nadređene strategije upravljanja koja se zasniva na MPC pristupu. Ciljna funkcija predložene MPC strategije sastoji se od potrošnje goriva na predikcijskom horizontu te predviđanja ukupne potrošnje goriva od kraja predikcijskog horizonta do kraja voznog ciklusa. Predviđanje potrošnje goriva implementira se pomoću regresijskog modela koji ovisi o preostalom putu voznog ciklusa, SoC-u na kraju predikcijskog horizonta te opcijski o srednjoj vrijednosti i standardnoj devijaciji profila brzine vozila do kraja ciklusa. Regresijski model uspostavlja se na osnovu DP-optimalnih rezultata dobivenih za nekoliko voznih ciklusa. Na ovaj način MPC ne koristi višekriterijsku ciljnu funkciju, tj. onu koja bi kombinirala potrošnju goriva i kažnjavanje pogreške SoC-a na kraju predikcijskog horizonta. Time se izbjegava podešavanje težinskih faktora ciljne funkcije, koje bi bilo osjetljivo na značajke voznih ciklusa. Istovremeno, SoC na kraju voznog ciklusa zadaje se eksplicitno, umjesto implicitno (a time i općenito podoptimalno) preko SoC-a na kraju predikcijskog horizonta. Optimiranje upravljačkih varijabli na pomičnom horizontu obavlja se pomoću DP algoritma. Predložena strategija implementirana je i simulacijski provjerena na računalno učinkovitijem EXT-BWD PHEV modelu.

Osmo poglavlje: *Planiranje reference stanja napunjenosti baterije za kombinirani način rada.* Predlažu se dvije metode za generiranje profila reference SoC-a po prijednomome putu na osnovu saznanja dobivenih analizom DP-optimalnih odziva SoC-a prikazanih u četvrtom poglavlju. Poseban naglasak dan je na slučajevima nagiba ceste i prisustvo zona niske emisije. Metoda

1. Uvod

planiranja van realnog vremena postavlja profil reference SoC-a prije početka voznog ciklusa, koristeći pri tome znanje ili dovoljno preciznu procjenu duljine očekivane rute, srednje brzine vozila odnosno trajanje putovanja te profil nagiba ceste po prijedrenom putu. Stoga je predložena metoda pogodna za vozila koja operiraju na unaprijed poznatim i ponavljajućim rutama (npr. gradski autobusi i dostavna vozila) uz arhiviranje povijesnih podataka praćenja vozila. Metoda planiranja profila reference SoC-a u realnom vremenu koristi snimljene vozne podatke kako bi odredila profil reference SoC-a, a zahtjeva samo znanje ili dovoljno preciznu procjenu duljinu očekivane rute. Simulacijsko ispitivanje provodi se za neadaptivni RB+ECMS, uz usporedbu rezultata s onima koji se dobivaju za linearni profil reference SoC-a po prijedrenom putu.

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

2. Unazadni model utičnog hibridnog električnog vozila

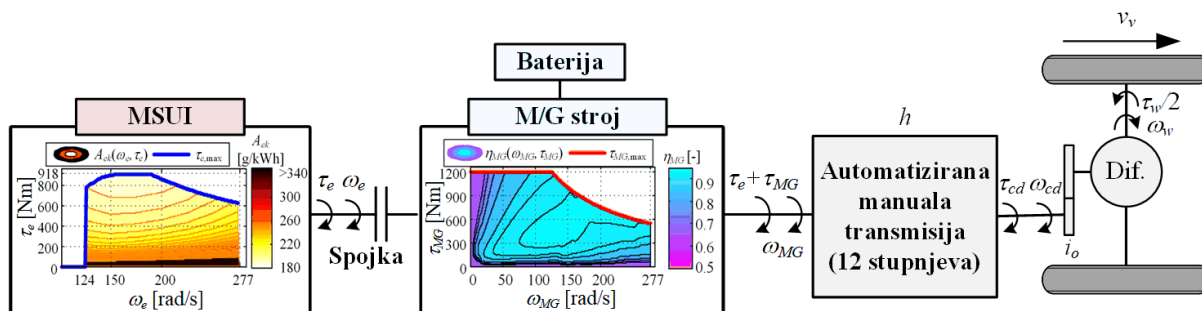
U ovom se poglavlju opisuje unazadni (BWD) model pogona utičnog hibridnog električnog vozila (PHEV) kao temelj za razvoj nadređene strategije upravljanja, kao i proširenog unazadnog (EXT-BWD) modela. U prvom potpoglavlju daju su osnovne tehničke informacije o razmatranom PHEV te opisuje njegova pogonska konfiguracija. U drugom potpoglavlju predstavljaju se karakteristični načini i režimi rada pogona kao i osnove planiranja i upravljanja promjenom stupnja prijenosa. U trećem potpoglavlju daju se matematički izrazi BWD modela.

2.1. Osnovni podatci razmatranog vozila

2.1.1. Pogonska konfiguracija

Na slici 2-1 ilustrirana je struktura pogona razmatranog paralelnog PHEV-a, koji se odnosi na gradski autobus tipa Volvo 7900 Electric Hybrid [83]. Pogon odabranog vozila paralelne je strukture i P2 konfiguracije, a sastoji se od motora s unutarnjim izgaranjem (MSUI), električnog (M/G) stroja s pripadnom Li-Ion baterijom, automatizirane manualne transmisije (AMT) s 12 stupnjeva prijenosa, spojke smještene između M/G stroja i MSUI-a te prigranskog sklopa (diferencijala s poluvratilima i kotačima; vidi također sliku 2-2). Spojka omogućuje odvajanje MSUI-a od ostatka pogonskog sklopa kako bi se mogao isključiti tokom (električne) vožnje. M/G stroj smješten je između spojke i AMT-a te ovisno o načinu rada može puniti ili prazniti bateriju. M/G stroj osigurava potpuno električnu vožnju (za isključeno stanje MSUI-a), ekonomiziranje rada MSUI-a pomicanjem njegovih radnih točaka u područje više korisnosti te pojačanje ukupne snage pogona. Opći parametri Volvo 7900 Electric Hybrid gradskog autobusa dani su u tablici 1.1 [83].

2. Unazadni model utičnog hibridnog električnog vozila



Slika 2-1. Konfiguracija P2 paralelnog pogonskog sklopa PHEV-a razmatranog gradskog autobusa.

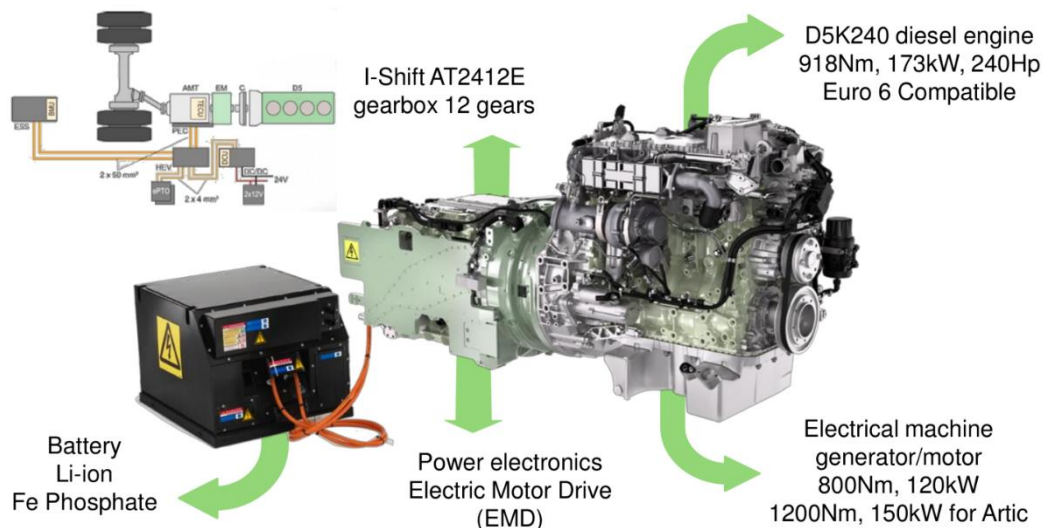
Tablica 2-1. Opći parametri razmatranog Volvo 7900 Electric Hybrid gradskog autobusa [83, 84].

Parametri	Volvo 7900 Electric Hybrid
Duljina šasije [m]	12.0
Visina šasije [m]	2.95
Širina šasije [m]	2.55
Polumjer kotača/pneumatika, r_w [m]	0.481 [275/70R22.5]
Maksimalna nosiva masa autobusa, $M_{v,max}$ [kg]	19000
Maksimalna masa putnika, $m_{p,max}$ [kg] (pretpostavka 67 kg – po putniku)	6365
Masa praznog autobusa, M_v [kg] (Izračunato kao $M_v = M_{v,max} - m_{p,max}$)	12635

2.1.2. Pogonski strojevi

U ovom poglavlju daju se opći tehnički podatci Diesellovog MSUI-a i M/G stroja sa slike 2-1. Neki su parametri javno dostupni, dok su mape specifične potrošnje goriva MSUI-a i učinkovitosti M/G stroja rekonstruirane na osnovu literature koja se bavi modeliranjem usporedivih pogonskih strojeva. Osnovni parametri MSUI-a i M/G stroja dani su u tablici 2-2 (v. također sliku 2-2) [83]. Rekonstruirane karakteristike maksimalnog momenta u funkciji brzine vrtnje te mape specifične potrošnje goriva A_{ek} i učinkovitosti M/G stroja η_{MG} dane su na slici 2-3, a preuzete su iz [84, 85] za strojeve sličnih veličina. Mape su dodatno skalirane kako bi odgovarale tehničkim podacima strojeva, danim u tablicama 2-2, koristeći pritom Willansov postupak skaliranja [86].

2. Unazadni model utičnog hibridnog električnog vozila

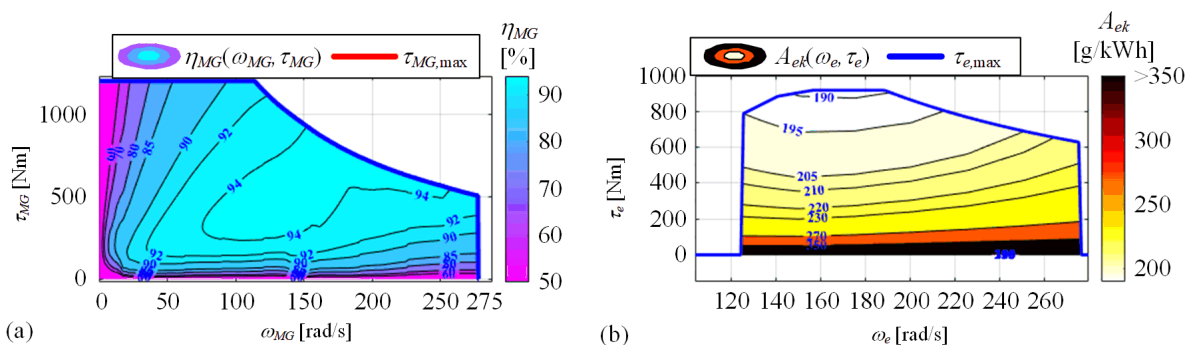


Slika 2-2. Detalji paralelnog pogonskog sklopa razmatranog PHEV-a [83].

Tablica 2-2. Parametri Dieselog motora i električnog (M/G) stroja razmatranog PHEV autobusa [83].

Parametri Dieselog motora	
Model motora	Volvo D5K240 EURO 6
Zapremnina [L]	5.1
Maksimalna snaga, $P_{e,max}$ [kW]	173
Brzina na kojoj se ostvaruje maksimalna snaga [1/min]	2200
Maksimalni moment, $\tau_{e,max}$ [Nm]	918
Brzina na kojoj se ostvaruje maksimalni moment [1/min]	1200-1600
Maksimalna brzina, $\omega_{e,max}$ [1/min]	2650
Brzina u praznom hodu [1/min]	500
Parametri M/G stroja	
Maksimalna snaga, $P_{MG,max}$ [kW]	150
Maksimalni moment, $\tau_{MG,max}$ [Nm]	1200
Maksimalna brzina, $\omega_{MG,max}$ [rpm]	2650

2. Unazadni model utičnog hibridnog električnog vozila

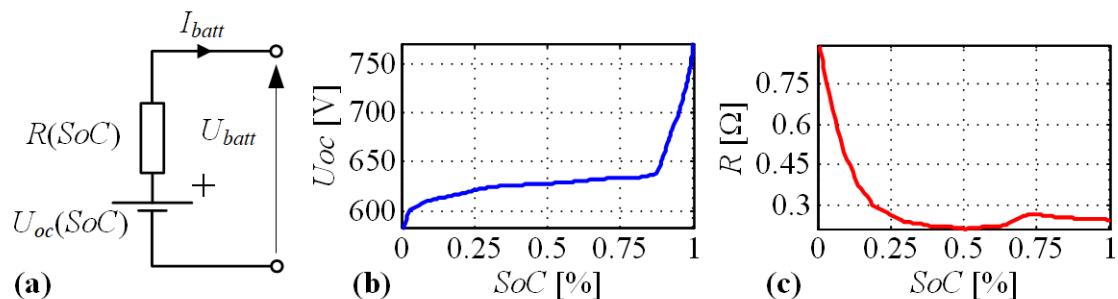


Slika 2-3. Rekonstruirane mape učinkovitosti M/G stroja (a) i specifične potrošnje Dieselog motora (b), te pripadne karakteristike maksimalnog momenta [84, 85].

2.1.3. Baterijski paket

Razmatrani PHEV koristi baterijski paket Ion'Drive proizvođača SAFT nazivnog kapaciteta od 19 kWh koji se sastoji od 192 Super-Phosphate VL30PFe ćelija spojenih u seriju [87, 88, 83]. Model baterije dobiven je skaliranjem modela pojedinačne ćelije u obliku nadomjesnog električnog kruga (slika 2-4a). Model se sastoji od naponskog izvora napona otvorenog kruga U_{oc} te unutarnjeg otpora R , koji ovise o stanju napunjenosti (SoC) baterije. Ovisnost ovih parametara o temperaturi zanemarena je s obzirom na to da su Volvo autobusi iz 7900 serije opremljeni sustavom regulacije temperature baterije radi produljenja njenog životnog vijeka.

Karakteristika napona otvorenog kruga $U_{oc}(SoC)$, dana na slici 2-4b, dobivena je skaliranjem karakteristike ćelije snimljene tijekom sporog pražnjenja ćelije sa strujom od 6 A [88]. Iako litij-ionske ćelije, pokazuju svojstvo histereze karakteristike $U_{oc}(SoC)$, procijenjeno je da ta histereza nema veliki utjecaj na potrošnju goriva i električne energije te je u ovom radu zanemarena. Prema priručniku unutarnji otpor R ćelije VL30PFe kreće se između 0.9 m Ω i 1.2 m Ω za strujne impulse u trajanju između 0.2 s i 2 s. Stoga je karakteristika $R(SoC)$ preuzeta iz [89] za različit kemijski sastav ćelije, ali za usporedive visoke specifične snage kao za VL30PFe ćeliju. Karakteristika otpora pojedinačne ćelije potom je skaliran tako da otpor na 50% SoC-a iznosi 1.1 m Ω , a konačna skalirana karakteristika cjelokupnog baterijskog paketa prikazan je na slici 2-4c.



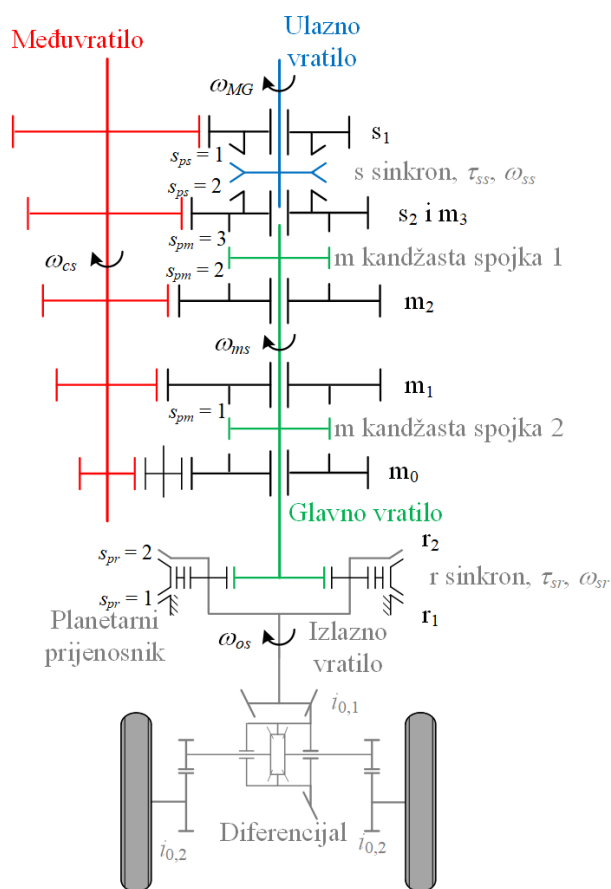
Slika 2-4. Ekvivalentni krug baterije (a), naponska karakteristika otvorenog kruga $U_{oc}(SoC)$ (b) i unutarnji otpor baterije $R(SoC)$ (c).

2.1.4. Automatska transmisija i spojka

Razmatrani PHEV-tip autobusa koristi I-Shift AMT s 12 stupnjeva prijenosa [90], koji se ostvaruju kroz tri razine redukcije kako je prikazano na slici 2-5. Prva, tzv. razdjelna razina redukcije (engl. splitter gear stage) povezuje ulazno transmisijsko vratilo s međuvratilom pomoću zupčaničkih parova s_1 i s_2 koji se ukapčaju sinkronom 1. Druga, glavna razina redukcije (engl. main reduction stage) sadrži zupčaničke parove m_1 , m_2 i m_3 za vožnju unaprijed te zupčanički par m_0 za vožnju unatrag. Glavna razina redukcije prenosi snagu s međuvratila na glavno vratilo, osim u slučaju kad su s_2 i m_3 parovi istovremeno ukopčani te se ulazno vratilo spaja izravno s glavnim vratilom. Za ukapčanje zupčaničkih parova na glavnoj redukcijskoj razini koriste se kandžaste spojke (engl. dog clutch) s ciljem smanjenja cjelokupne cijene mjenjača i smanjenjem gubitaka trenja tijekom sinkronizacije zupčanika. Naime, tijekom promjene stupnja prijenosa, koja zahtijeva prekapčanje kandžastih spojki, M/G stroj se koristi za sinkronizaciju (izjednačenje) brzine vrtnje međuvratila i glavnog vratila, nakon čega se bez gubitaka klizanja ukapča kandžasta spojka novog stupnja prijenosa. Treća, planetarna razina redukcije spaja glavno i izlazno vratilo mjenjača pomoću planetarnog prijenosnika. Izlazno vratilo povezano je s nosačem planeta, dok je glavno vratilo kruto povezano sa sunčanikom. U nižim stupnjevima prijenosa transmisije prsten planetarnog prijenosnika veže se za kućište transmisije preko sinkrona r_1 . Pri višim stupnjevima prijenosa planetarni prijenosnik se zaključava vezanjem prstena za nosač planeta preko sinkrona r_2 , čime se postiže ista brzina vrtnje glavnog i izlaznog vratila. U tablici 2-3 dana je lista stupnjeva prijenosa h_{idx} , njihovih prijenosnih omjera h te odgovarajućih ukopčanih zupčaničkih parova i položaja sinkrona i kandžastih spojki. Stupanj prijenosa za vožnju unatrag nije dan u tablici 2-3 jer se ne razmatra u ovom radu. Pozicije sinkrona i kandžastih spojki upravljaju se pneumatskim aktuatorima

2. Unazadni model utičnog hibridnog električnog vozila

integriranim u kućište mjenjača. U Prilogu A dani su podaci o broju zubi pojedinih zupčanika transmisije.



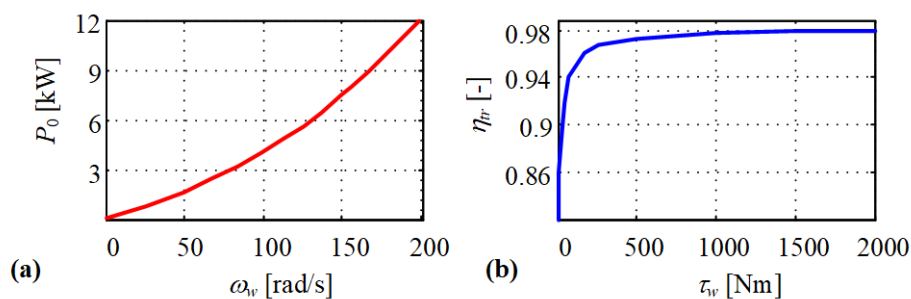
Slika 2-5. Shematski prikaz razmatrane automatizirane manualne transmisije (AMT) s 12 stupnjeva prijenosa te prigonoskog sklopa [91].

Za potrebe BWD modela, gubitci u transmisiji i prigonu opisuju se koncentrirano pomoću mapa učinkovitosti te stalnih gubitaka snage. Stalni gubitci P_0 odražavaju gubitke praznog hoda zbog bućkanja ulja i gubitaka u ležajevima, te ovise o brzini vrtnje pogona tj. pogonskih kotača ω_w , kako je dano na slici 2-6a. Učinkovitost prijenosa snage/momenta putem transmisije, η_{tr} , ovisi o momentu pogona tj. pogonskih kotača τ_w , kako je prikazano na slici 2-6b. Mapa učinkovitosti preuzeta je iz [92], dok je mapa stalnih gubitaka preuzeta iz [93] za HEV automobil te skalirana s obzirom na omjere maksimalnih snaga pogona dvaju vozila. U FWD modelu pogona vozila postavljen je precizniji model gubitaka transmisije, koji zasebno opisuje gubitke svakog zupčaničkog para [57], [91].

2. Unazadni model utičnog hibridnog električnog vozila

Tablica 2-3. Shema ukapčanja stupnjeva prijenosa AMT-a i odgovarajući prijenosi omjeri [90], [91].

Stupanj prijenosa h_{idx} [-]	Prijenosni omjer h [-]	s_1	s_2	m_1	m_2	m_3	r_1	r_2	s_{ps} [-]	s_{pm} [-]	s_{pr} [-]
1	14.94	x ¹		x			x		1	1	1
2	11.73		x	x			x		2	1	1
3	9.04	x			x		x		1	2	1
4	7.09		x		x		x		2	2	1
5	5.54	x				x	x		1	3	1
6	4.35		x			x	x		2	3	1
7	3.44	x		x				x	1	1	2
8	2.70		x	x				x	2	1	2
9	2.08	x			x			x	1	2	2
10	1.63		x		x			x	2	2	2
11	1.27	x				x		x	1	3	2
12	1.00		x			x		x	2	3	2



Slika 2-6. Mape ukupnih stalnih gubitaka snage u transmisiji (a) i mehaničke učinkovitosti transmisije (b) [84], [93].

Suha spojka s jednom tarnom lamelom koristi se za odvajanje MSUI-a od ostatka pogona [94]. Spojka, koja je normalno zatvorena, otvara se djelovanjem pneumatskog aktuatora na tanjurastu oprugu. Pneumatski aktuator smješten je koncentrično u odnosu na ulazno vratilo transmisije [91]. Momentom spojke upravlja se na podređenoj razini upravljačkog sustava koristeći regulator pozicije potisnog ležaja, koji preko proporcionalnog pneumatskog ventila upravlja tlakom zraka u tlačnom cilindru. Tlak zraka u pneumatskom sustavu iznosi od 6.5 do 10 bara [91], [94].

2.1.5. Prigonski sklop

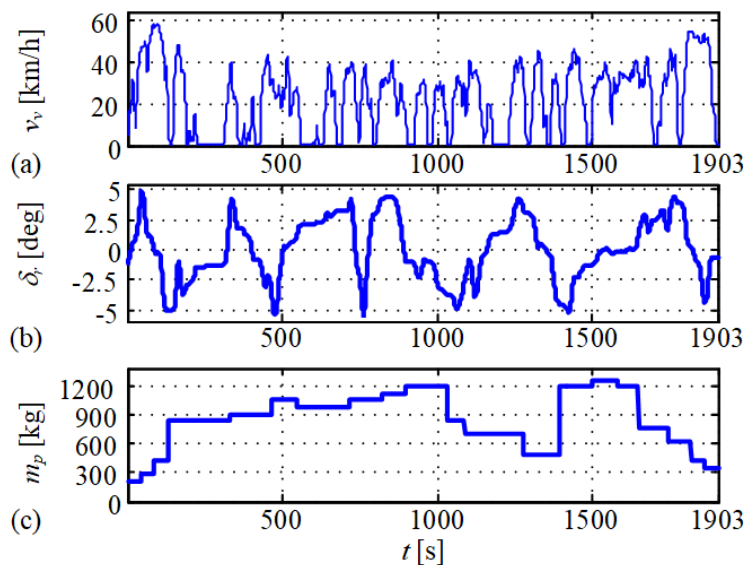
Razmatrano vozilo koristi stražnji pogon uz primjenu prigonskog sklopa ZF A132 koji uključuje diferencijal, poluvratila, dodatne reduktore te kotače [83], [91], [95]. S ciljem smanjenja dimenzija diferencijala i poluvratila, ukupni zahtijevani prijenosni omjer prigonskog sklopa podijeljen je na dva reduktora, od kojih je prvi smješten na diferencijalu a drugi uz samu glavinu dvaju kotača kako je prikazano na slici 2-5. Prigonski sklop namijenjen je za maksimalne ulazne momente do 50000 Nm te maksimalnu snagu do 260 kW [95]. Snaga pogonskih strojeva vratila preko elastičnog izlaznog vratila dolazi na stožnički par diferencijala prijenosnog omjera $i_{0,1} = 2$ (v. sliku 2-5). Diferencijal dijeli snagu na stranu lijevog i desnog kotača, postižući pri tome jednake momente kotača uz općenito različite brzine vrtnje. Snaga se potom preko reduktora prijenosnog omjera $i_{0,2} = 2,36$ dovodi do kotača, što daje ukupni prijenosni omjer prigonskog sklopa iznosa $i_o = i_{0,1}i_{0,2} = 4.72$ [91].

Elastičnosti poluvratila modeliraju se samo za potrebe FWD modela (poglavlje 3), gdje su uzete u obzir kroz elastičnost izlaznog vratila transmisije. Parametar krutosti ($c_{es} = 85943$ Nm/rad) određen je temeljem procjene duljine poluvratila te kataloga proizvođača GKN [96], gdje su parametri krutosti poluvratila dani po jedinici duljine za slične namjene i prijenos sličnih okretnih momenata. Koeficijent prigušenja ($b_{es} = 50$ Nm/(rad/s)) podešen je tako da se dobije uobičajeni slabo-prigušeni odziv prijenosnog momenta [91].

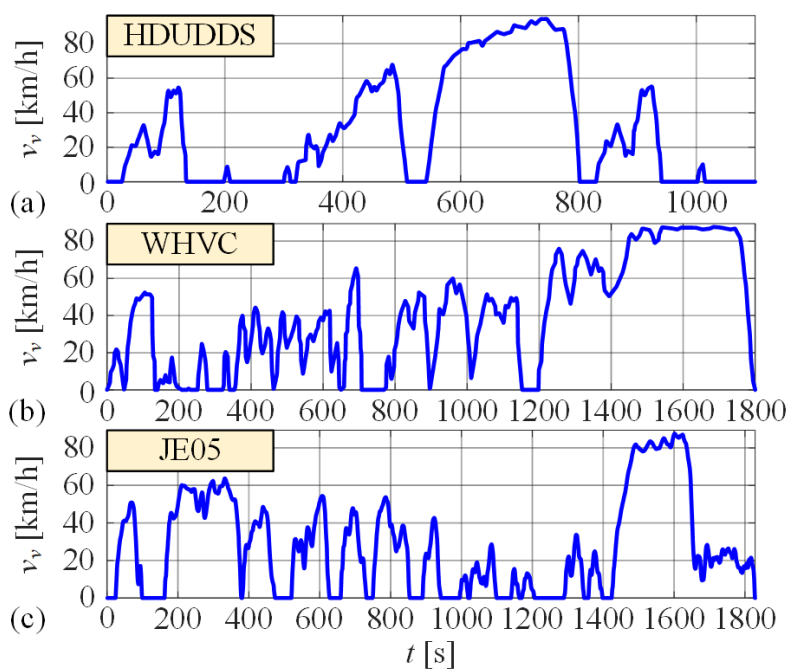
2.1.6. Uzdužna dinamika vozila

Radi pojednostavljenja BWD modela, vozilo se razmatra kao materijalna točka koja se giba u uzdužnom smjeru. Varijable pogona računaju se u unazadnom smjeru, dakle polazeći od varijabli voznog ciklusa, koje uključuju prije svih brzinu (implicitno i akceleraciju) vozila v_v u funkciji vremena t , nagib podloge δ_r te masu putnika m_p za razmatrani slučaj gradskog autobusa. Primjer voznog ciklusa snimljenog na kružnoj autobusnoj ruti Babin kuk-Pile-Babin kuk u gradu Dubrovniku dan je na slici 2-7 [97]. Uz DUB ciklus u ovom radu su korišteni i certifikacijski vozni ciklusi namijenjeni teškim cestovnim vozilima (kamionima, autobusima), koji definiraju samo profile brzine u vremenu, kako je prikazano na slici 2-8. HDUDDS te JE05 ciklusi predstavljaju prvenstveno gradsku vožnju, dok WHVC ciklus kombinira gradsku i prigradsku vožnju s vožnjom na autocesti.

2. Unazadni model utičnog hibridnog električnog vozila



Slika 2-7. Vremenski profili brzine vozila (a), nagiba ceste (b) te mase putnika (c) voznog ciklusa snimljenog na kružnoj autobusnoj ruti Babin kuk-Pile-Babin kuk u gradu Dubrovniku [97].



Slika 2-8. Certifikacijski vozni ciklusi za teška vozila: HDUDDS (a), WHVC (b) i JE05 (c).

Uzdužna dinamike vozila opisuje se jednačbom

2. Unazadni model utičnog hibridnog električnog vozila

$$(M_v + m_p)\dot{v}_v = \frac{\tau_w}{r_w} - \underbrace{\frac{1}{2}\rho_{air}A_f C_d v_v^2}_{\text{Otpor zraka}} - \underbrace{R_0(M_v + m_p)g \cos(\delta_r)}_{\text{Otpor kotrljanja}} - \underbrace{(M_v + m_p)g \sin(\delta_r)}_{\text{Otpor nagiba}} \quad (2-1)$$

gdje su M_v i m_p mase praznog autobusa i masa putnika, v_v je brzina vozila, r_w je efektivni polumjer autogume (pneumatika), τ_w je okretni moment pogonskog kotača, ρ_{air} je gustoća zraka ($\rho_{air} = 1.225 \text{ kg/m}^3$), A_f je čeona površina šasije autobusa, C_d je koeficijent aerodinamičkog otpora, R_0 je koeficijent otpora kotrljanja, g je gravitacijsko ubrzanje ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$) a δ_r je nagib ceste. Prvi član (τ_w / r_w) s desne strane jednadžbe (2-1) predstavlja ukupnu silu koju pogonski kotači prenose na podlogu (uz pretpostavku rada u području adhezije karakteristike autogume). Parametri uzdužne dinamike dani su tablici 2-4.

Tablica 2-4. Parametri uzdužne dinamike razmatranog PHEV-tipa gradskog autobusa.

Opis parametra	Iznos parametra
Čeona površina šasije, A_f [m^2]	7.52
Koeficijent aerodinamičkog otpora, C_d	0.70
Koeficijent otpora kotrljanja, R_0	0.01
Gustoća zraka, ρ_{air} [kg/m^3]	1.225
Efektivni polumjer autogume, r_w [m]	0.481
Masa praznog autobusa, M_v [kg]	12635

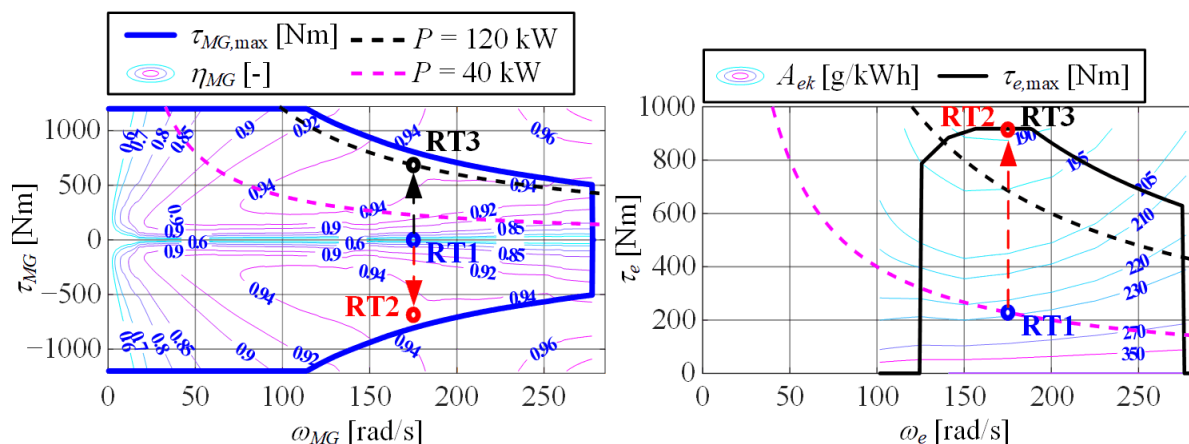
2.2. Analiza toka snage

2.2.1. Načini rada

Uz mala do srednja opterećenja pogona, M/G stroj može samostalno pogoniti PHEV-tip autobusa u visoko učinkovito, potpuno električnom načinu rada, pri čemu je dok je MSUI isključen i glavna spojka otvorena. Prilikom usporavanja vozila M/G stroj prelazi u generatorski način rada (regenerativno kočenje), pri čemu se kinetička energija vozila preko M/G stroja pretvara u električnu energiju i pohranjuje u bateriju. Kada je uključen, MSUI se pored prijenosa snage prema kotačima može koristiti i za punjenje baterije preko M/G stroja kao generatora. Pritom se radne točke MSUI-a pomiču u učinkovito područje viših okretnih momenata, kako je ilustrirano na slici 2-9 gdje se pogon iz radne točke 1 (RT1), prebacuje u

2. Unazadni model utičnog hibridnog električnog vozila

radnu točku 2 (RT2). M/G stroj se može koristiti i kao dodatni izvor snage prilikom naglih ubrzanja i/ili strmih uspona, pri čemu se radna točka M/G stroja pomiče RT3 a MSUI radi na krivulji maksimalnog momenta (ili maksimalne učinkovitosti) PHEV se preko sporog punjača ugrađenog u vozilo ili brzog pantografskog punjača može puniti energijom iz mreže kada miruje redom na remizi ili krajnjim stanicama, te time pruža dulji domet u čistom električnom načinu rada uz minimalne emisije štetnih plinova i buke.

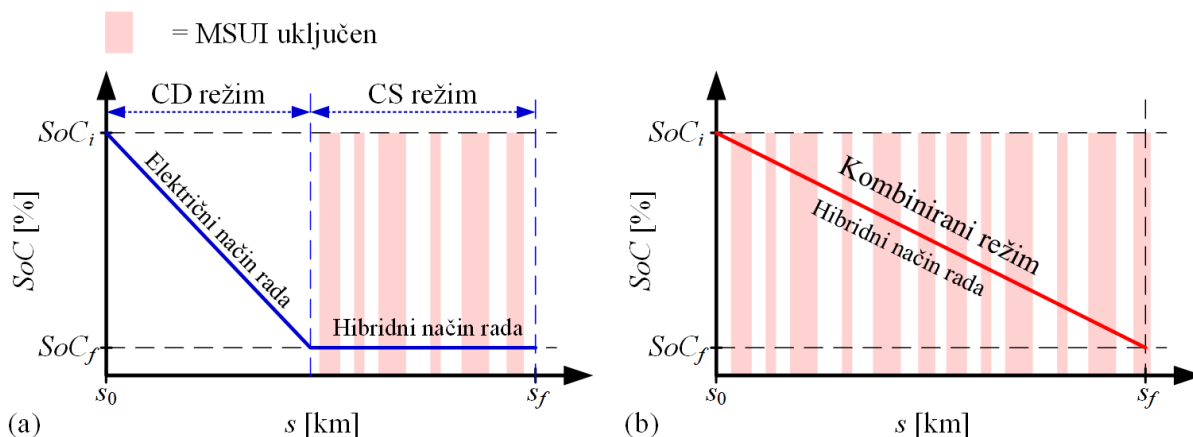


Slika 2-9. Ilustracija pomicanja radne točke MSUI-a u područja veće učinkovitosti (RT1 → RT2) generatorskim radom M/G stroja te pojačanja izlaznog momenta/snage motorskim radom M/G stroja (RT3).

2.2.2. Režimi rada

Kao što je spomenuto u uvodnom poglavlju, PHEV može općenito raditi u dva vozna režima (vidi sliku 2-10): a) kombiniranje električne vožnje u režimu pražnjenja baterije (engl. Charge Depleting, CD) i hibridne vožnje u režimu održavanja naboja baterije (engl. Charge Sustaining, CS), te b) kombinirani (engl. blended, BLND) režim rada u slučaju kada je udaljenost puta unaprijed poznata i kada se motor koristi tijekom cijelog voznog ciklusa za dodatne uštede u potrošnji goriva i smanjenju emisija štetnih plinova. U potonjem slučaju važno je postaviti prikladan profil reference SoC-a po prijašnjem putu [69], [34] (linearni na slici 2-10b), koji idealno završava u ciljnoj konačnoj vrijednosti SoC_f koja odgovara najmanjoj dopuštenoj vrijednosti SoC za dugu životnu dob baterije (primijenjenoj i u CS režimu, slika 2-10a).

2. Unazadni model utičnog hibridnog električnog vozila



Slika 2-10. Ilustracije CD-CS režima rada (a) i BLND režim rada (b) pomoću odziva SoC-a po prijedenoj puti voznog ciklusa.

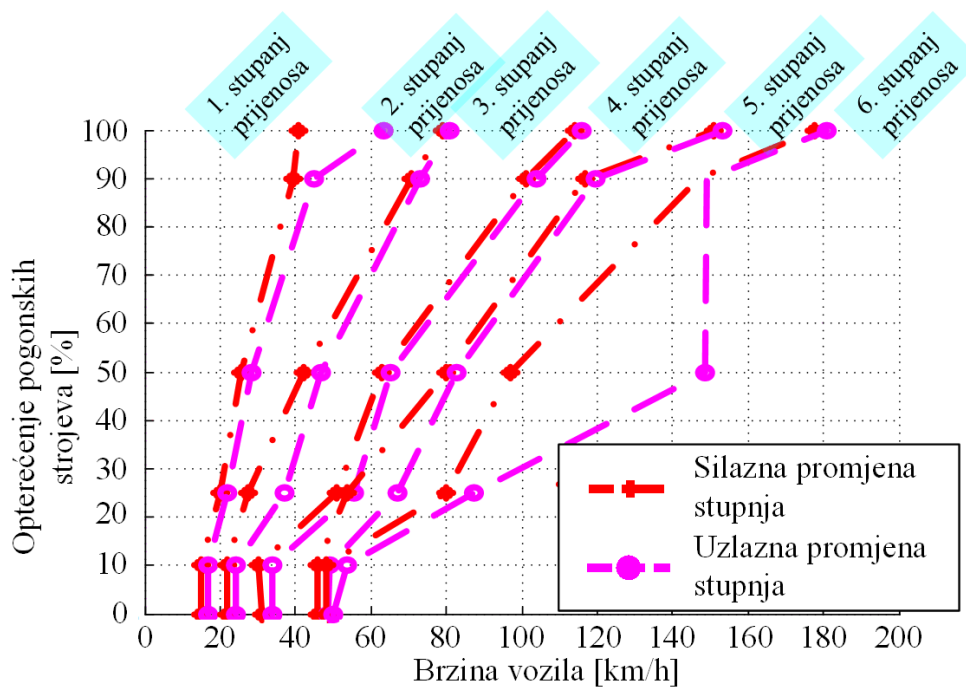
2.2.3. Upravljanje transmisijom

Dva su temeljna zadatka upravljanja transmisijom: a) određivanje optimalnog stupnja prijenosa (tj. mape promjene; engl. *shift scheduling*) te b) upravljanjem zadanom promjenom stupnja prijenosa (engl. *shift control*). Određivanje optimalnog stupnja prijenosa dio je nadređene strategije upravljanja te definira u kojem trenutku i u koji prijenosni omjer treba promijeniti stupanj prijenosa. U tu se svrhu najčešće primjenjuju unaprijed određene statičke mape planiranja promjena stupnjeva prijenosa. Cilj je postići kompromis između minimiziranja potrošnje goriva i učestalosti prebacivanja stupnjeva. To se ostvaruje optimiranjem van realnog vremena uz primjenu preciznih modela pogona [98]. Primjer mape planiranja promjene stupnja prijenosa za PHEV-tip osobnog vozila paralelne konfiguracije prikazan je na slici 2-11 [98]. Optimalne točke mape dobivene su optimizacijom uz primjenu genetskog algoritma, u ovisnosti o brzini vozila i relativnom opterećenju u smislu ukupne snage pogona. Pojava histerenze između krivulja uzlazne i silazne promjene stupnja prijenosa vezana je uz zahtjev za smanjenje učestalosti promjene stupnja prijenosa, uz popratno povećanje potrošnje goriva. Ograničenje opisanog pristupa planiranja prebacivanja stupnjeva prijenosa je u tome što se koriste statičke mape koje su dobivene optimiranjem na specifičnim voznim ciklusima i načinima rada PHEV-a. Stoga su one općenito podoptimalne za opće vozne i radne uvjete.

Upravljanje zadanom promjenom stupnja prijenosa definira način na koji se izvodi promjena stupnja prijenosa na razini podređenog sustava upravljanja. Prilikom samog izvođenja promjene stupnja prijenosa postavljaju se posebni zahtjevi poput kratkog trajanja promjene, smanjivanja uzdužnog trzaja te malim gubitcima snage u spojka i sinkronima. PHEV

2. Unazadni model utičnog hibridnog električnog vozila

struktura pogona omogućuje uključivanje brzog M/G stroja u proces promjene prijenosa kako bi se u većoj mjeri zadovoljili specificirani zahtjevi. Ove mogućnosti su šire kod automatske transmisije (npr. one s dvostrukom spojkom) [99], dok se u ovdje razmatranom slučaju AMT-a odnose na prije spomenutu sinkronizaciju kandžaste spojke.

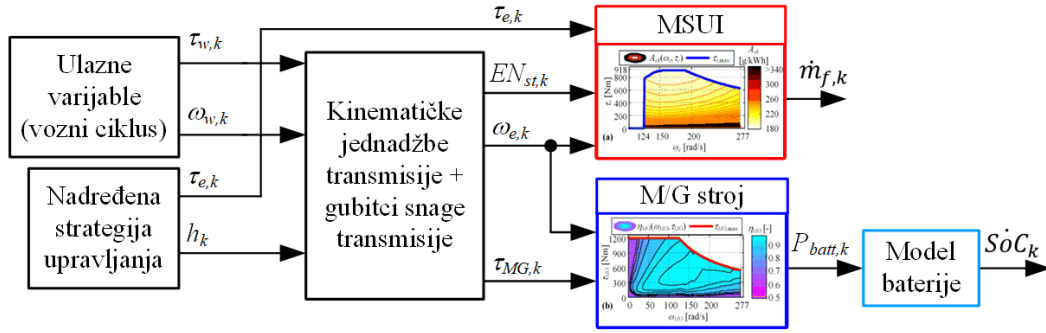


Slika 2-11. Mapa planiranja promjene stupnja prijenosa za PHEV-tip osobnog vozila [98].

2.3. Matematički model

BWD model zanemaruje dinamiku svih komponenti pogona, osim baterije kod koje se opisuje spora dinamika stanja napunjenosti (SoC). Kao takav, BWD model nije pogodan za sintezu podređenih regulacijskih krugova, te je općenito manje precizan nego FWD model. Redosljed računanja kod BWD modela vozila teče od varijabli voznog ciklusa prema varijablama pogonskih strojeva i baterije. Upravljačka strategija PHEV-a zadaje upravljačke varijable pogona koje zadovoljavaju zahtijevani okretni momenta (τ_w) i brzinu vrtnje (ω_w) pogonskih kotača te minimiziranja potrošnje goriva. Kinematske jednadžbe transmisije, opisane u ovom poglavlju, definiraju ostale varijable pogonskog sklopa iz kojih se određuju maseni protok goriva \dot{m}_f i vremenska derivacija SoC-a (slika 2-12). Njihovim integriranjem dobiva se potrošnja goriva i stanje napunjenosti baterije SoC.

2. Unazadni model utičnog hibridnog električnog vozila



Slika 2-12. Principni blokovski dijagram BWD modela PHEV-a.

Zahtijevani okretni moment pogonskih kotača dobiva se iz jednačbe uzdužne dinamike vozila (2-1):

$$\tau_w = r_w(M_v + m_p)\dot{v}_v + 0.5\rho_{air}A_fC_dv_v^2 + R_0(M_v + m_p)g \cos(\delta_r) + (M_v + m_p)g \sin(\delta_r). \quad (2-2)$$

Brzina kotača dobiva se iz brzine vozila:

$$\omega_w = \frac{v_v}{r_w}. \quad (2-3)$$

Uzimajući u obzir prijenosni omjer prigonskog sklopa (i_0) i transmisije (h), nadalje se dobiva brzina vrtnje M/G stroja (ω_{MG}), ujedno i brzina vrtnje MSUI-a (ω_e) za slučaj zatvorene glavne spojke:

$$\omega_e = \omega_{MG} = i_0 h \omega_w = i_0 h \frac{v_v}{r_w}. \quad (2-4)$$

Na sličan način, suma momenata MSUI-a (τ_e) i M/G stroja (τ_{MG}) određena je okretnim momentom pogonskih kotača i gubitcima u transmisiji:

$$\tau_e + \tau_{MG} = \frac{\tau_w \eta_{tr}^{k_t}(\tau_w) + \frac{P_0(\omega_w)}{\omega_w}}{i_0 h}, \quad (2-5)$$

gdje je $k_t = -1$ u slučaju radnog momenta ($\tau_w > 0$) odnosno $k_t = 1$ u slučaju kočnog momenta ($\tau_w \leq 0$). Pritom je snaga na ulazu u transmisiju definirana kao

$$P_d = \eta_{tr}^{k_t}(\tau_w)\omega_w\tau_w + P_0(\omega_w). \quad (2-6)$$

2. Unazadni model utičnog hibridnog električnog vozila

Maseni protok goriva izražen u [g/s] određuje se prema jednadžbi

$$\dot{m}_f = A_{ek}(\tau_e, \omega_e) \frac{\tau_e \omega_e}{3.6 \cdot 10^6}, \quad (2-7)$$

gdje se specifična potrošnja goriva A_{ek} izražava u [g/kWh] kako je dano na slici 2-3b. Ukupna potrošnja goriva na kraju voznog ciklusa ($t = t_f$) dobiva se integriranjem jednadžbe (2-7):

$$V_f = \frac{1}{\rho_{fuel}} \int_{t_0}^{t_f} \dot{m}_f dt, \quad (2-8)$$

gdje je ρ_{fuel} gustoća diesel goriva ($\rho_{fuel} = 850$ g/L).

Snaga baterije odgovara električnoj snazi M/G stroja:

$$P_{batt} = \eta_{MG}^{k_{MG}} \tau_{MG} \omega_{MG}, \quad (2-9)$$

gdje $k_{MG} = 1$ vrijedi u slučaju kada M/G stroj radi kao generator ($\tau_{MG} < 0$), odnosno $k_{MG} = -1$ odgovara slučaju kada M/G stroj radi kao motor ($\tau_{MG} > 0$). Valja primijetiti da se snaga baterije definira kao pozitivna ($P_{batt} > 0$) kada baterija daje snagu, tj. kada M/G stroj radi kao motor ($\tau_{MG} > 0$).

Baterija se modelira kao ekvivalentni strujni krug prikazan na slici 2-4a, koji se sastoji od izvora napona $U_{oc}(SoC)$ i unutarnjeg otpora $R(SoC)$ [100]. Stanje napunjenosti baterije SoC predstavlja varijablu stanja modela baterije, ujedno i jedinu varijablu stanja BWD modela. Iz nadomjesne sheme na slici 2-4a moguće izvesti sljedeću jednadžbu stanja baterije [2]:

$$S\dot{o}C(t) = -\frac{I_{batt}(t)}{Q_{max}} = \frac{\sqrt{U_{oc}^2(SoC) - 4R(SoC)P_{batt}(t)} - U_{oc}(SoC)}{2Q_{max}R(SoC)}, \quad (2-10)$$

gdje je I_{batt} struja baterije, Q_{max} je maksimalni kapacitet baterije, a SoC je definiran iz trenutnog naboja baterija Q kao $SoC = Q / Q_{max}$. Snaga baterije P_{batt} definirana je izrazom (2-9). Iz jednadžbe (2-10) izlazna struja baterije definira se kao:

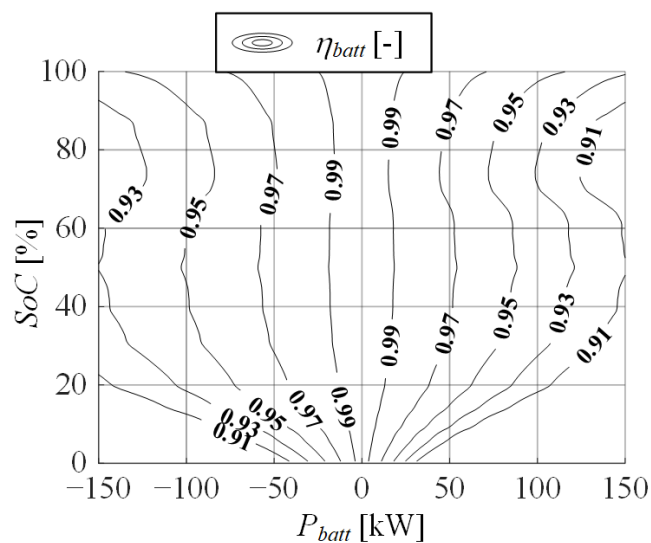
$$I_{batt} = \frac{U_{oc}(SoC) - \sqrt{U_{oc}^2(SoC) - 4R(SoC)P_{batt}(t)}}{2R(SoC)}, \quad (2-11)$$

Učinkovitost baterije može se izvesti iz ekvivalentnog kruga prikazanog na slici 2-4a, posebno za slučajeve pražnjenja i punjenja baterije i ovisno o izlaznoj struji baterije I_{batt} [2]:

2. Unazadni model utičnog hibridnog električnog vozila

$$\eta_{batt} = \begin{cases} \frac{P_{batt}}{P_{batt} + I_{batt}^2 R(SoC)}, & \text{za pražnjenje } (I_{batt} > 0), \\ \frac{P_{batt} - I_{batt}^2 R(SoC)}{P_{batt}}, & \text{za punjenje } (I_{batt} \leq 0). \end{cases} \quad (2-12)$$

Mapa učinkovitosti ovdje modelirane baterije (potpoglavlje 2.1) u ovisnosti o SoC-u i snazi baterije dana je na slici 2-13. Iz mape učinkovitosti vidljivo je da učinkovitost pada s rastom apsolutne vrijednosti opterećenja baterije, tj. izlazne snage P_{batt} . Ovaj pad učinkovitosti s rastom izlazne snage P_{batt} sporiji je za visoke vrijednosti SoC-a (iznad 90%) te vrijednosti SoC-a oko 50%.



Slika 2-13. Mapa učinkovitosti proračunata iz modela baterije u ovisnosti o SoC-u i opterećenju snazi P_{batt} .

3. Unaprijedni i prošireni unazadni model vozila

U ovom poglavlju opisuje se unaprijedni (FWD) model te prošireni unazadni (EXT-BWD) model PHEV-a. FWD model je detaljan ali i numerički manje efikasan, a EXT-BWD model razvija se s ciljem približavanja točnosti FWD modela, uz numeričku učinkovitost usporedivu s BWD modelom iz poglavlja 2. U prva dva potpoglavlja opisuju se redom FWD model te pripadna podređena strategija upravljanja. U trećem potpoglavlju postavlja se EXT-BWD model, koji se zatim validira u odnosu na FWD model u četvrtom potpoglavlju.

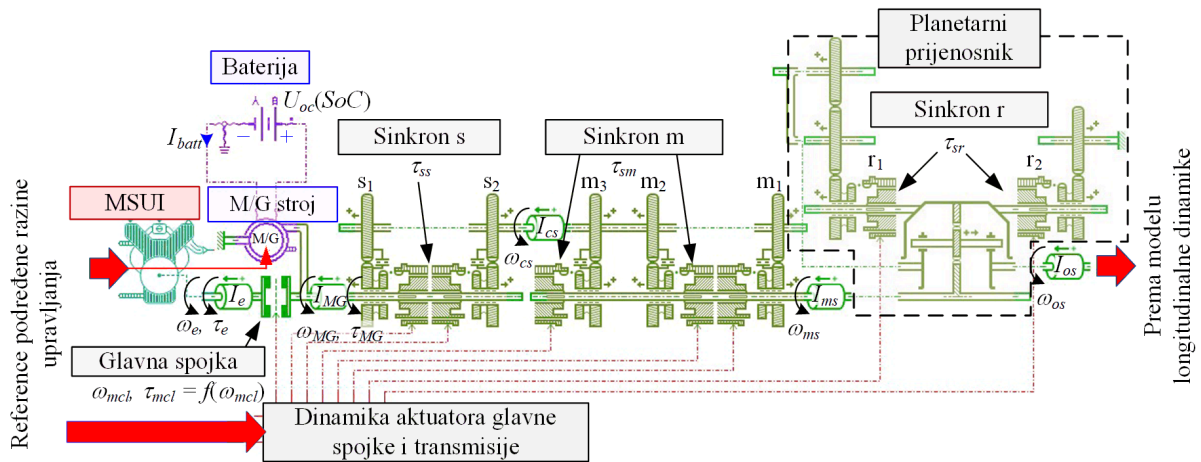
3.1. Unaprijedni model

FWD model pogona opisuje dominantnu dinamiku komponenti pogona uključujući inercije pogonskih vratila, elastičnost izlaznog vratila transmisije, dinamiku razvoja momenta pogonskih strojeva te dinamiku aktuatora glavne spojke i transmisije. FWD model implementiran je u Simcenter-ovu Amesim programskom okruženju gdje su odabrane postojeće komponente pogonskog sklopa, parametrirane i uključene u model cjelokupnog pogona [91]. Amesim model pogona prikazan je na slici 3-1, dok su modeli prigona i uzdužne dinamike vozila dani na slici 3-2. FWD model sadrži deset inercijskih elemenata, koji uključuju inerciju MSUI-a I_e , inerciju M/G stroja i ulaznog vratila transmisije I_{MG1} , inerciju međuvratila sa zupčanicima I_{cs} , inerciju glavnog vratila transmisije sa zupčanicima I_{ms} , inerciju izlaznog vratila I_{os} , četiri inercije kotača $I_{w1} = I_{w2} = I_{w3} = I_{w4} = I_w$ te masu vozila M_v . Glavni parametri FWD modela dani su u prethodnom poglavlju i Prilogu A. Prilikom simulacije FWD modela koristi se ugrađeni Amesimov algoritam numeričke integracije s promjenjivim vremenskim korakom [101].

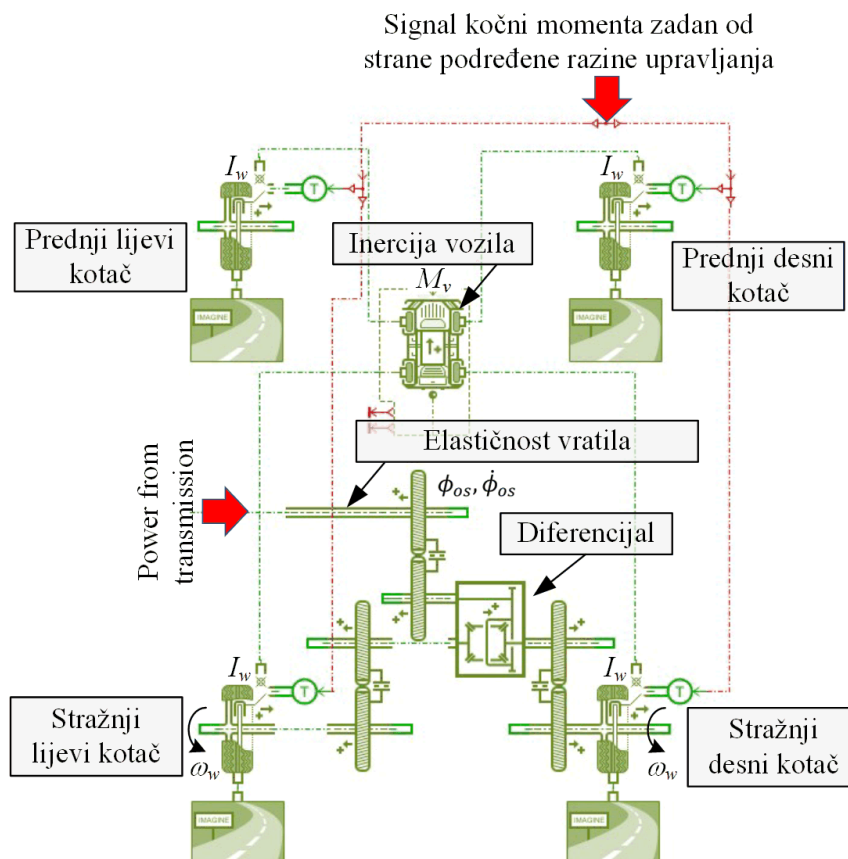
FWD model koristi isti model dinamike SoC-a kako je definiran za BWD model izrazima (2-9) i (2-10). Također, podmodel M/G stroja ugrađen u FWD model koristi istu mapu učinkovitosti kao i kod BWD modela (slika 2-3a). Dinamika razvoja momenta M/G stroja modelirana je PT1 članom s vremenskom konstantnom $T_{MG} = 10$ ms. Dinamika Diesellovog motora s turbopunjačem modelirana je ugrađenim Amesim blokom, gdje se u slučaju porasta momenta motora τ_e koristi PT1 član s vremenskom konstantom $T_e(\omega_e)$ ovisnoj o brzini motora ω_e (Slika 3-3), kako bi se uzela u obzir dinamika turbopunjača, dok se u slučaju pada momenta

3. Unaprijedni i prošireni unazadni model vozila

motora koristi fiksna vremenska konstanta $T_e = 10$ ms. Karakteristika otpora motora $\tau_{e,drag}(\omega_e)$, koja se primjenjuje kada je motor isključen ili kad mu je moment jednak nuli, prikazana je na slici 3-3a

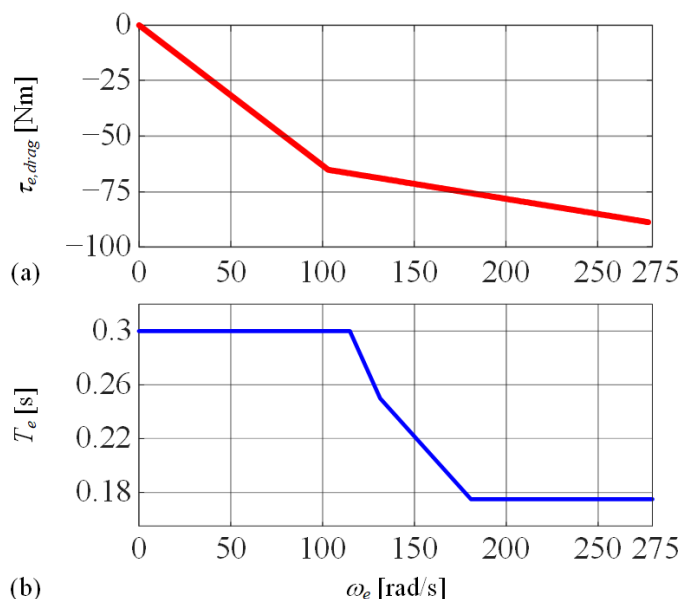


Slika 3-1. FWD model pogona implementiran u Amesim programskom okruženju.



Slika 3-2. Simulacijski model prigona i uzdužne dinamike kao dio Amesim FWD modela vozila.

3. Unaprijedni i prošireni unazadni model vozila



Slika 3-3. Karakteristika otpora isključenog Dieselog motora (a) te vremenska konstanta dinamike motora pri porastu momenta, vezana uz dinamiku turbopunjača (b).

Moment glavne spojke τ_{mcl} modeliran je pomoću klasičnog Coulombovog modela trenja, gdje je iznos momenta trenja proporcionalan zadanom normiranom kapacitetu momenta spojke c_{mcl} , koji poprima vrijednosti između 0 i 1 koje redom odgovaraju krajnjem otvorenom i zatvorenom stanju spojke [91]. Radi jednostavnosti implementacije modela, dvije kandžaste spojke transmisije zamijenjene su modelom sinkrona za ukapčanja zupčanika m_1 i m_2 te modelom polusinkrona za ukapčanje zupčanika m_3 . Tijekom sinkronizacije, momenti sinkrona s (τ_{ss}), m (τ_{sm}) i r (τ_{sr}) određeni su dinamičkim Coulombovim modelom trenja, gdje su u klizanju iznosi momenata proporcionalni normiranom kapacitetu momenta odgovarajućeg sinkrona (c_{ss} , c_{sm} i c_{sr}), a koji ovise o normiranim pozicijama sinkrona (s_{ss} , s_{sm} i s_{sr}). Nakon zatvaranja sinkrona, momenti statičkog trenja sinkrona modeliraju se pomoću paralelnog spoja prigušivača i opruge [91].

Kako bi se uzela u obzir dinamika pneumatskih aktuatora glavne spojke, dinamika normiranog kapaciteta c_{mcl} modelira se PT1 članom s vremenskom konstantom $T_{mcl} = 50$ ms. Vrijednosti normiranih pozicija sinkrona s_{ps} , s_{pm} i s_{pr} poprimaju vrijednosti ovisno o zadanom stupnju prijenosa h , kako je dano u tablici 2-3. Normirane pozicije sinkrona također su modelirane PT1 članom s vremenskom konstantom jednakoj 20 ms, kako bi se uzela u obzir dinamika njihovih pneumatskih aktuatora.

3. Unaprijedni i prošireni unazadni model vozila

Gubici trenja u parovima zupčanika i gubici bućkanja mazivog ulja modelirani su za svaki pojedini par zupčanika koristeći ugrađeni Amesim-ov alat [101]. Elastičnost stražnjih pogonskih poluvratila zamijenjena je ekvivalentnom elastičnošću izlaznog vratila transmisije. Za modeliranje uzdužne sile autogume na kotačima korišten je pojednostavljeni Pacejkin model sa statičkim izrazom za efektivni radijus gume r_w . Masa vozila jednoliko je raspoređena na sva četiri kotača, tj. nije uzeta u obzir dinamika razdiobe okomitih sila kotača uslijed ubrzanja ili usporenja vozila. To je pretpostavke rada autoguma u području adhezije (visok koeficijent trenja podloge) te malog utjecaja promjene klizanja kotača s promjenom okomite sile. Ukupni kočni moment svih mehaničkih kočnica, τ_{brk} , modeliran je kao odziv PT1 člana s vremenskom konstantom od 20 ms, kako bi se uzela u obzir dinamika pneumatskih aktuatora kočnica. Pretpostavlja se jednaka distribucija ukupnog kočnog momenta τ_{brk} na sva četiri kotača.

3.2. Podređena strategija upravljanja

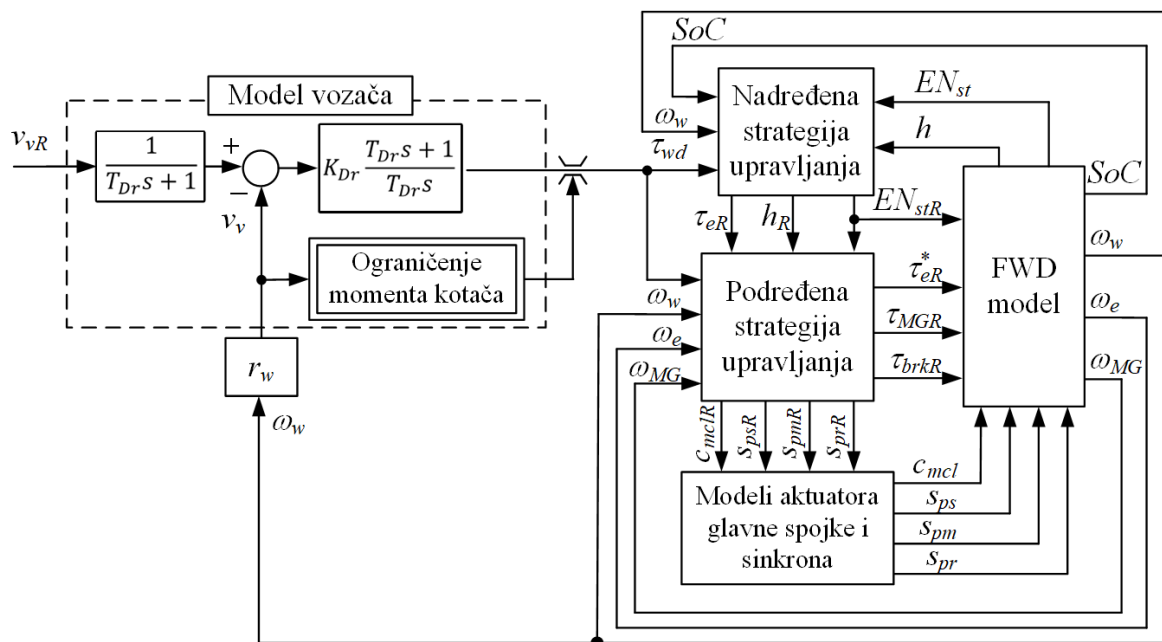
U ovom poglavlju opisuje se podređeni sustav upravljanja PHEV pogonom, koja predstavlja sastavni dio FWD modela implementiranog u Amesim okruženju. Prikazuju se i simulacijski rezultati za tri karakteristična scenarija podređenog upravljanja PHEV-om, koji uključuju: a) pokretanje MSUI-a, b) uzlazna promjena stupnja prijenosa te c) silazna promjena stupnja prijenosa uključujući aktiviranje mehaničkih kočnica.

3.2.1. Struktura cjelokupnog sustava upravljanja

Cjelokupna struktura sustava upravljanja PHEV pogonom prikazana je je blokovskim dijagramom na slici 3-4, a sastoji se od modela vozača, nadređene strategije upravljanja i podređenog sustava upravljanja. Model vozača implementiran je kao proporcionalno-integralni (PI) regulator brzine vozila koji zadaje zahtijevani moment kotača τ_{wd} i prosljeđuje ga nadređenoj strategiji upravljanja. Pojačanja PI regulatora, K_{Dr} te T_{Dr} , određena su iz zahtjeva da faktor relativnog prigušenja te vremenska konstanta ekvivalentnog zatvorenog kruga regulacije redom iznose $\zeta = 0.45$ i $T_{eq} = 0.75$ s [102]. Zahtijevani moment vozača τ_{wd} zasićen je s obzirom na karakteristiku maksimalnog momenta kotača, koja je određena zbrojem karakteristika maksimalnog momenta MSUI-a i M/G stroja te prijenosnim omjerima transmisije (h) i prigona (i_0). Na temelju zahtijevanog momenta τ_{wd} pri trenutnoj brzini kotača ω_w i trenutne vrijednosti SoC-a, nadređena strategija upravljanja određuje radnu točku MSUI-a tako da zadaje reference momenta MSUI-a τ_{eR} i stupnja prijenosa transmisije h_R , kao i

3. Unaprijedni i prošireni unazadni model vozila

referencu statusa uključenja MSUI-a EN_{stR} . Podređena strategija upravljanja zadužena je za ostvarivanje referentne radne točke motora s transmisijom pogona. To se postiže koordinirajući reference kapaciteta momenta glavne spojke c_{mclR} , reference pozicije sinkrona (s_{psR} , s_{pmR} i s_{prR}), prilagođenu referencu MSUI-a τ_{eR}^* , referencu M/G stroja τ_{MGR} , te referencu kočnog momenta mehaničkih kočnica τ_{brkR} . Podređena strategija implementirana je u C programskom jeziku unutar Amesim programskog okruženja, uz vrijeme uzorkovanja od 20ms.



Slika 3-4. Blokovski dijagram cjelokupne strukture sustava upravljanja PHEV-uz primjenu FWD modela vozila.

U slučaju kada nema prijelaznih pojava ukapčanja MSUI-a i promjene stupnja prijenosa, prilagođena referenca momenta MSUI-a τ_{eR}^* zadana od strane podređene strategije jednaka je referenci momenta τ_{eR} koju zadaje nadređena strategija upravljanja. Iznimno, prilikom uključivanja MSUI-a ili tokom promjene stupnja prijenosa dok je MSUI uključen, podređena strategija zasebno prilagođuje referencu momenta τ_{eR}^* neovisno o referenci momenta τ_{eR} koju zadaje nadređena strategija upravljanja. Referenca momenta M/G stroja računa se kao razlika između zahtijevanog momenta kotača (τ_{wd}) reduciranog na ulazno vratila transmisije i prilagođenog referentnog momenta MSUI-a τ_{eR}^* s ciljem uspostavljanja ravnoteže momenata s obzirom na jednadžbu (2-5):

3. Unaprijedni i prošireni unazadni model vozila

$$\tau_{MGR} = \frac{\tau_{wd}\eta_{tr}^{k_t}(\tau_{wd}) + \frac{P_0(\omega_w)}{\omega_w}}{i_o h} - \tau_{eR}^* \quad (3-1)$$

Prilikom kočenja podređena strategija upravljanja isključuje MSUI ($\tau_{eR}^* = 0$) te maksimalno koristi regenerativno kočenje putem M/G stroja. Kočni moment mehaničkih kočnice τ_{brk} koristi se isključivo u slučaju kad je minimalni moment M/G stroja (tj. maksimalni moment regenerativnog kočenja) nedovoljan da ispuni vozačev zahtjev za momentom $\tau_{wd} < 0$. Referenca kočnog momenta računa se ponovno iz uvjeta ravnoteže momenata (usp. izraz (3-1)):

$$\tau_{brkR} = \begin{cases} \tau_{wd}\eta_{tr}^{k_t}(\tau_{wd}) + \frac{P_0(\omega_w)}{\omega_w} - i_o h \tau_{MG,min}(\omega_{MG}), & \text{za } \tau_{MGR} < \tau_{MG,min}(\omega_{MG}), \\ 0, & \text{u suprotnom,} \end{cases} \quad (3-2)$$

U nastavku ovog potpoglavlja prikazuju se detalji sinteze podređene strategije upravljanja na karakterističnim primjerima zadataka upravljanja. Sinteza se ilustrira simulacijskim rezultatima uz primjenu FWD modela pogona. Budući da je sinteza zasnovana na modelu pogona, primjenjiva je na druge kombinacije upravljačkih zadataka (npr. druge promjene stupnja prijenosa), od kojih se neke karakteristične također diskutiraju u okviru prikazanih primjerima. Takva cjelovita strategija podređenog upravljanja implementirana je u okviru Amesim okruženja te ilustrirana na primjeru jednog potpunog voznog ciklusa.

3.2.2. Podređeno upravljanje prilikom uključivanja MSUI-a

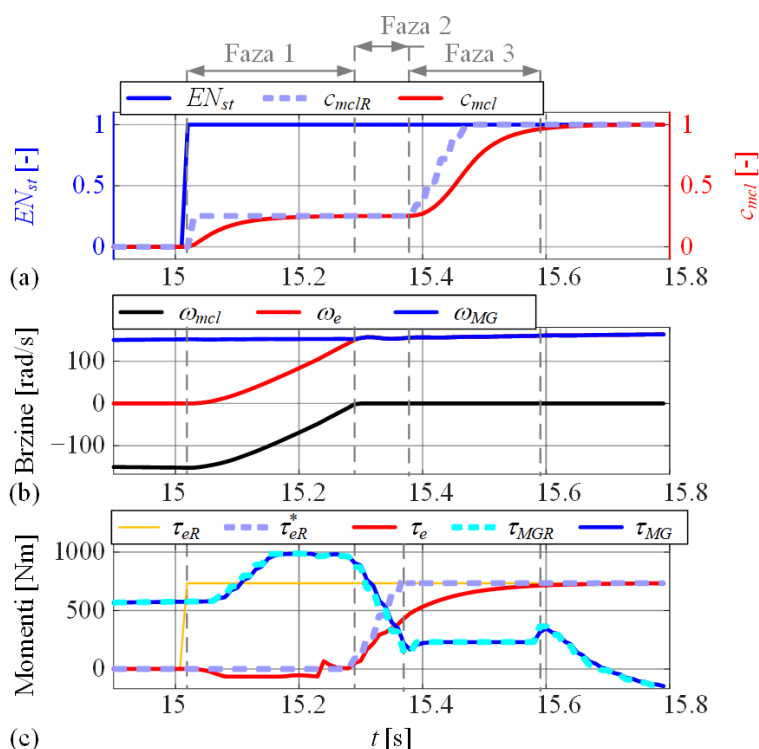
Simulacijski odziv pogona u slučaju uključivanja MSUI-a dan je na slici 3-5. Odziv je podijeljen u tri faze. U prvoj fazi sinkroniziraju se brzine vrtnje MSUI-a (ω_e) i M/G stroja (ω_{MG}) primjenom glavne spojke. Pritom se referenca normiranog kapaciteta glavne spojke c_{mclR} određuje uz pretpostavku linearnog odziva brzine proklizavanja spojke ω_{mcl} te imajući u vidu vremensku konstantu aktuatora spojke T_{mcl} i zahtijevano vrijeme sinkronizacije (tj. vrijeme zatvaranja glavne spojke) $\Delta t_{mcl} = 0.27s$ (v. Dodatak B.1 za izvod):

$$c_{mclR} = \frac{1}{\tau_{mcl,max}} \frac{I_e |\omega_{mcl,start}|}{\left(T_{mcl} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_{mcl}}{T_{mcl}}} \right) - \Delta t_{mcl} \right)}, \quad (3-3)$$

gdje je $\tau_{mcl,max} = 3000$ Nm maksimalni moment trenja glavne spojke, a $\omega_{mcl,start}$ je početna brzina proklizavanja spojke. Referenca momenta MSUI-a postavlja se na nulu ($\tau_{eR}^* = 0$ Nm), a referenca momenta M/G stroja određuje se prema izrazu (3-1).

3. Unaprijedni i prošireni unazadni model vozila

Faza 2 počinje nakon što brzina klizanja spojke ω_{mcl} padne na nulu. U narednih 0.1 s, prilagođena referenca momenta MSUI-a τ_{eR}^* linearno se povećava od nule do reference momenta τ_{eR} zadane od strane nadređene strategije upravljanja. Konačno, u trećoj fazi referenca normiranog kapaciteta glavne spojke linearno se povećava od vrijednosti određene s (3-3) do vrijednosti $c_{mclR} = 1$ koja odgovara potpuno (sigurno) zatvorenoj spojci. Prijelazna pojava uključivanja MSUI-a završava nakon što stvarni kapacitet spojke dosegne postavljenu referentnu vrijednost (v. sliku 3-5a).



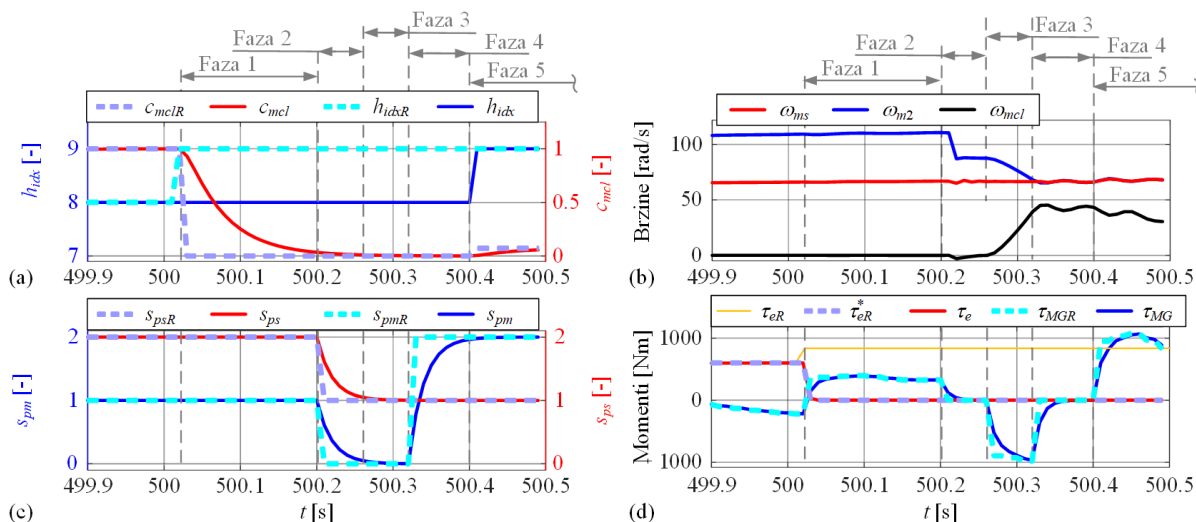
Slika 3-5. Odziv podređenog sustava upravljanja tijekom uključivanja MSUI-a.

3.2.3. Podređeno upravljanje prilikom uzlazne promjene stupnja prijenosa

Slika 3-6 prikazuje simulacijski odziv promjene stupnja prijenosa iz 8. u 9. stupanj, kod koje se mijenja stanje glavne razine redukcije transmisije (tj. kandžaste spojke). Promjena stupnja prijenosa inicira se kad nadređena strategija upravljanja promijeni referencu stupnja prijenosa h_R . Ako je u tom trenutku MSUI uključen, prva faza promjene stupnja prijenosa počinje isključenjem momenta MSUI-a i istovremenim otvaranjem glavne spojke postavljanjem referenci MSUI-a τ_{eR}^* i kapaciteta spojke c_{mclR} u nulu ($\tau_{eR}^* = 0$ Nm i $c_{mclR} = 0$). Time MSUI ostaje u vrtnji ali rasterećen i spreman je preuzeti opterećenje nakon promjene stupnja prijenosa.

3. Unaprijedni i prošireni unazadni model vozila

Faza 2 počinje nakon što se glavna spojka potpuno otvori, tj. kada njen stvarni kapacitet c_{mcl} padne na nulu. U drugoj fazi izvršavaju se promjene pozicija sinkrona s i r (s_{ps} i s_{pr}) s obzirom na zahtijevani stupanj prijenosa h_R . Ako promjena stupnja zahtjeva promjenu glavnog stupnja redukcije, kao što je slučaj za razmatranu 8-9 promjenu, aktivira se treća faza u kojoj se brzina novo-ukapčavajućeg m sinkrona usklađuje s brzinom glavnog vratila. Sinkronizacija se izvodi pomoću M/G stroja vođenog u petlji regulacije brzine vrtnje ω_{MG} uz primjenu PI regulatora, gdje se referenca brzine ω_{MGR} zadaje tako da odražava brzinu glavnog vratila ω_{ms} . Pojačanja PI regulatora određuju se pomoću metode dvostrukog optimuma [102] te ovise o ekvivalentnoj inerciji M/G stroja i međuvratila, a koja se mijenja promjenom stupnja prijenosa h . Ako promjena stupnja prijenosa ne zahtjeva promjenu pozicije sinkrona m, treća faza se preskače.



Slika 3-6. Odziv podređenog sustava upravljanja tijekom uzlazne promjene stupnja prijenosa (8-9).

Faza 4 počinje nakon što se sinkronizira ciljani zupčanik m_2 , tj. nakon što se brzina ω_{m2} izjednači s brzinom glavnog vratila ω_{ms} (v. sliku 3-6b). U ovoj fazi zadaje se nova referenca normirane pozicije s_{pmR} sinkrona m u skladu s zahtijevanim stupnjem prijenosa h_R (v. tablicu 2-3). Nakon što stvarna pozicija m sinkrona, s_{pm} , dosegne svoju referentnu vrijednost s_{pmR} , stupanj prijenosa transmisije je promijenjen te četvrta faza završava. Potom slijedi proces uključivanja MSUI-a, koji započinje zatvaranjem glavne spojke u petoj fazi. Radi bolje preglednosti odziva, slika 3-6 pokriva samo početak pete faze koja odgovara prvoj fazi procesa uključivanja MSUI-a diskutiranog uz sliku 3-5. Ostatak odziva (faze 6 i 7) odnosi se na podizanje momenta MSUI-a i zaključavanje glavne spojke, te odgovara fazama 2 i 3 sa slike 3-5. Za slučaj da je simultano s promjenom stupnja prijenosa nadređena strategija tražila isključivanje MSUI-a (prijelaz u

3. Unaprijedni i prošireni unazadni model vozila

električni način rada, $EN_{stR} = 0$), glavna spojka ostaje otvorena kroz cijeli prijelazni proces, tj. faze 5-7 se izostavljaju. Slično, ako se promjena stupnja izvodi u električnom načinu rada, faza 1 se izostavlja (v. sliku 3-7).

3.2.4. Podređeno upravljanje prilikom silazne promjene stupnja prijenosa i aktivacije mehaničkih kočnica

Simulacijski odziv na slici 3-7 prikazuje djelovanje podređene strategije upravljanja za vrijeme silazne (12-10) promjene stupnja prijenosa, koje se odvija za vrijeme usporavanja vozila i električnog načina rada ($EN_{st} = 0$) te uključuje promjenu stanja kandžaste spojke. Pogon se inicijalno nalazi u stanju regenerativnog kočenja M/G strojem, koje je dovoljno da zadovoljni vozačev zahtjev za kočenjem $\tau_{wd} < 0$. Stoga su mehaničke kočnice inicijalno isključene ($\tau_{brkR} = 0$ Nm).

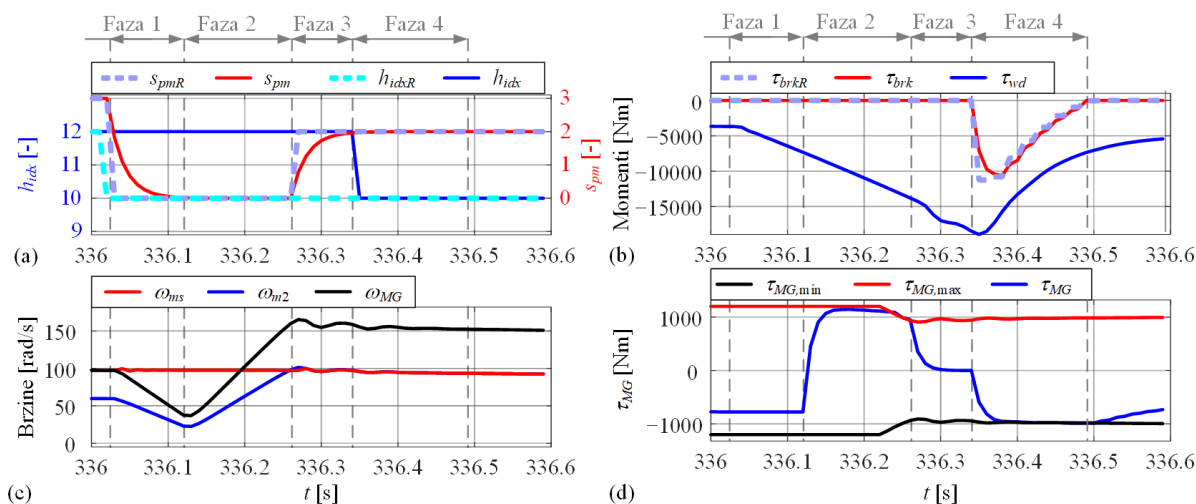
U prvoj fazi promjene stupnja prijenosa, kandžasta spojka stavlja se u potpuno otvorenu poziciju postavljajući referencu njene pozicije u nulu ($s_{pmR} = 0$). Kad se kandžasta spojka potpuno otvori, započinje druga faza u kojoj se M/G strojem sinkronizira brzina vrtnje novoukapčavajućeg zupčanika m_2 s obzirom na brzinu glavnog vratila ω_{ms} . Valja primijetiti da u tom periodu M/G stroj ne ostvaruje čvrstu vezu s izlaznim vratilom tj. kotačima zbog otvorenog stanja sinkrona m. Posljedično, prekida se dostava kočnog momenta zahtijevanog od strane vozača ($\tau_{wd} < 0$ Nm), što uzrokuje određenu pogrešku slijeđenja referentne brzine vozila v_{vR} . Iako bi se gubitak kočnog momenta mogao kompenzirati primjenom mehaničkih kočnica referenca kočnog momenta ipak se postavlja u nulu ($\tau_{brkR} = 0$ Nm) kako bi se izbjeglo rasipanje energije na mehaničkim kočnicama. Manji gubitak deceleracije očekivano će rezultirati povećanjem zahtjeva za kočnim momentom od strane vozača (kao 'regulatora' brzine vozila), te će se kompenzirati nakon sinkronizacije kandžaste spojke kroz povećani moment regenerativnog kočenja.

Po završetku procesa sinkronizacije, tj. kada ω_{m2} dostigne ω_{ms} , započinje treća faza u kojoj se isključuje moment M/G stroja te zadaje nova referentna pozicija kandžaste spojke s_{pmR} za zadani prijenosni omjer h_R . Nakon što se kandžasta spojka m zatvori u zadanoj poziciji s_{pmR} , referenca momenta M/G stroja τ_{MGR} postavlja se na vrijednost koju generira nadređena strategija upravljanja te se ponovno uspostavlja prijenos regenerativnog kočnog momenta na kotače. Budući da se u danom primjeru regenerativni moment M/G stroja zasićuje na karakteristiku minimalnog momenta $\tau_{MG,\min}(\omega_{MG})$, podređena strategija upravljanja zadaje

3. Unaprijedni i prošireni unazadni model vozila

referencu kočnog momenta mehaničkih kočnica (τ_{brkR}) prema izrazu (3-2) te tako dopunjuje regenerativno kočenje.

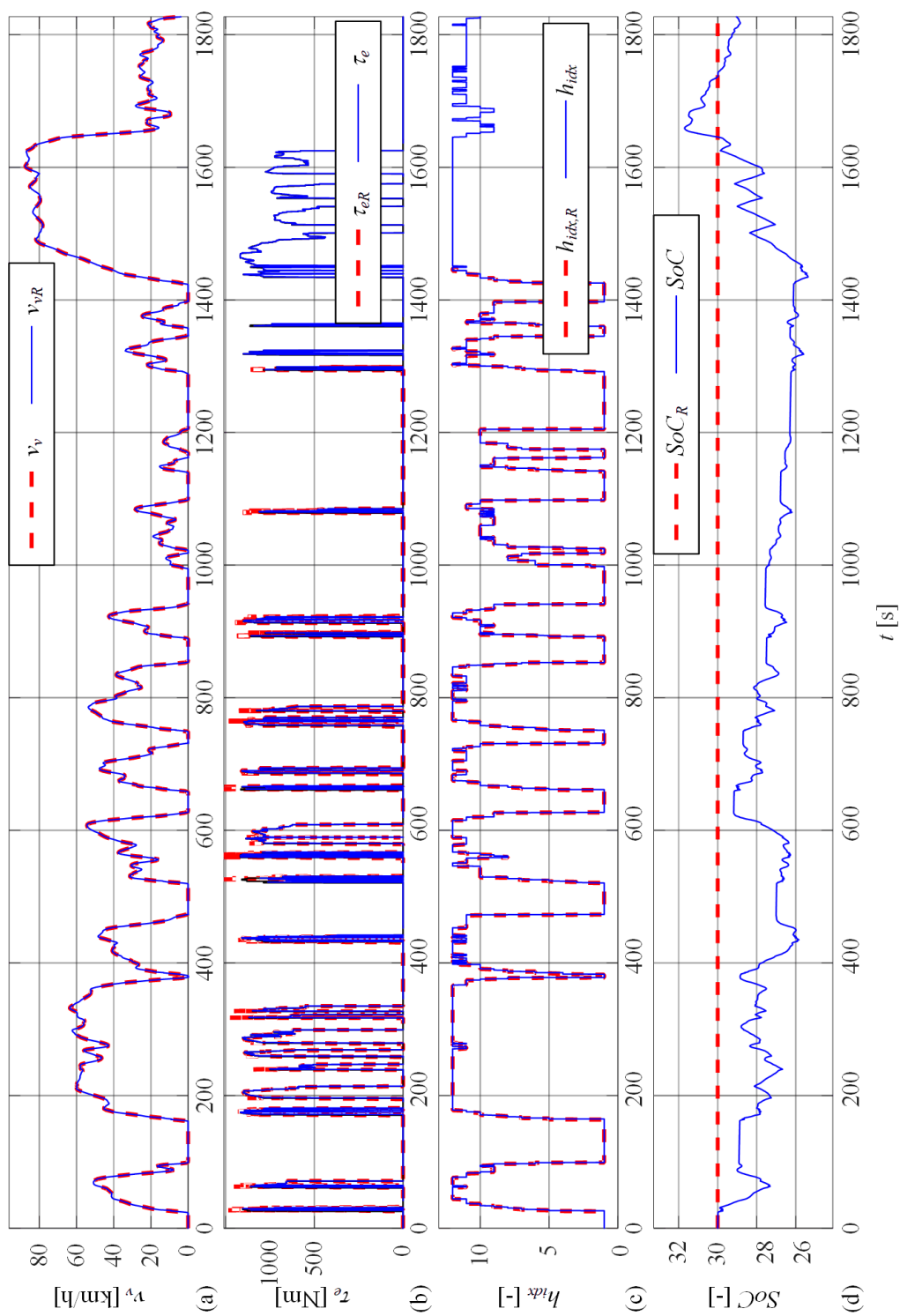
Opisano upravljanje silaznom promjenom stupnja prijenosa i mehaničkim kočnicama ostaje isto i u slučaju kad je MSUI uključen. No, prethodno se MSUI isključi kako je opisano u odjeljku 3.2.3 i prikazano kroz fazu 1 slike 3-6.



Slika 3-7. Odziv podređenog sustava upravljanja tijekom silazne promjene stupnja prijenosa (12-1) i aktivacije mehaničkih kočnica.

3.2.5. Rezultati simulacije FWD modela

Vremenski odzivi dobiveni uz primjenu FWD modela i RB+ECMS nadređene strategije upravljanja prikazani su na slici 3-8. Iz odziva se može vidjeti da vozač može blisko pratiti referentnu brzinu voznog ciklusa. Stvarni moment MSUI-a τ_e ponešto odstupa od referentnog momenta τ_{eR} zadanog od strane nadređene strategije upravljanja, što je posljedica dinamike MSUI-a (posebno "rupe" momenta) opisane jednadžbama (3-4) i (3-8). Iz odziva stupnja prijenosa h_{idx} danog na slici 3-8c može se vidjeti da podređena strategija uspješno koordinira rad sinkrona i kandžastih spojki radi ostvarivanja referentnog stupnja prijenosa. Konačno, SoC regulator uspješno održava SoC oko referentne vrijednosti SoC_R , uzimajući u obzir mrtvu zonu regulatora SoC-a iznosa 2%.



Slika 3-8. Simulacijski odzivi FWD modela preko cijelog (JE05) voznog ciklusa.

3.3. Unazadni model proširen učinkima dinamičkih gubitaka

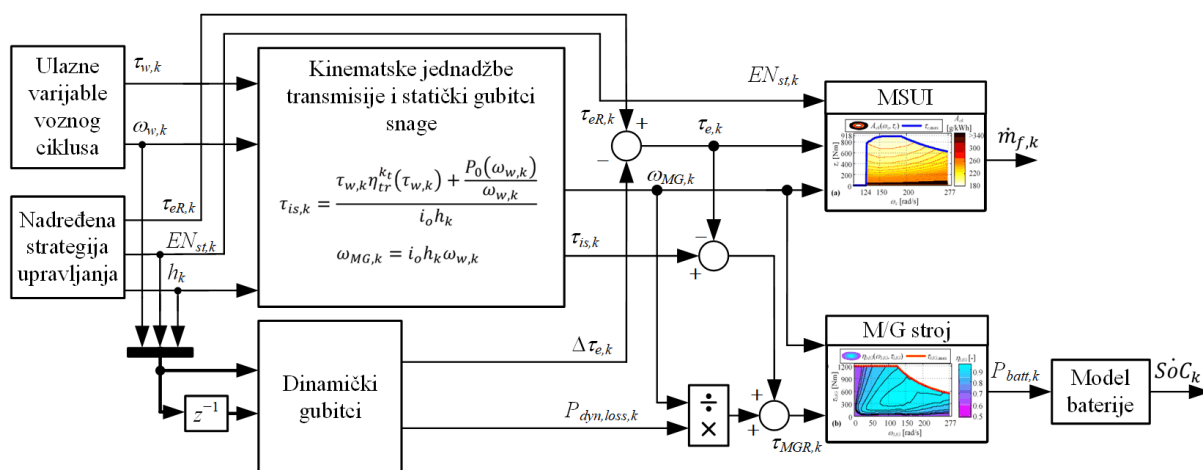
Kako bi se objedinila računalna učinkovitost BWD modela s fizikalnom točnošću FWD modela, predlaže se prošireni BWD model (engl. extended backward, EXT-BWD), koji za

3. Unaprijedni i prošireni unazadni model vozila

razliku od standardnog BWD modela uzima u obzir utjecaj gubitaka u prijelaznim stanjima uključenja MSUI-a i promjene stupnja prijenosa na dodatnu potrošnju goriva, odnosno električne energije. Predloženi, većinom fizikalni modeli dinamičkih gubitaka temelje se na simulacijskim odzivima FWD modela.

3.3.1. Modeliranje dinamičkih gubitaka

Blokovski dijagram predloženog EXT-BWD modela prikazan je na slici 3-9. Kao što je ilustrirano simulacijskim odzivima u prethodnom potpoglavlju, tijekom prijelaznih pojava uključenja MSUI-a i promjene stupnja prijenosa, prilagođeni referentni moment motora τ_{eR}^* smanjuje se u odnosu na referentnu vrijednost τ_{eR} koju generira nadređena strategija upravljanja (i koju bi imao BWD model), tj. javlja se gubitak momenta motora. Također, pokretanje motora zahtijeva dodatnu energiju M/G stroja, pri čemu se javlja i disipacija energije klizanja glavne spojke. Slično, prilikom promjene stupnja prijenosa javljaju se gubici u sinkronima, kao i gubici sinkronizacije kandžastih spojki.



Slika 3-9. Blokovski dijagram EXT-BWD modela pogona.

Slika 3-9 prikazuje blokovski dijagram EXT-BWD modela, koji uključuje sljedeća dva podmodela za izračun dinamičkih gubitaka prilikom uključenja MSUI i promjene stupnja prijenosa: a) gubitak momenta MSUI-a $\Delta \tau_{e,k}$ te b) gubici snage $P_{dyn,loss}$. Za izračun dinamičkih gubitka momenta i snage potrebno je znati sljedeće varijable u prethodnom vremenskom koraku ($k-1$): status uključenosti MSUI-a ($EN_{st,k-1}$), prijenosni omjer (h_{k-1}) te brzinu kotača ($\omega_{w,k-1}$). U tu svrhu, EXT-BWD model uključuje memorijski blok $1/z$ za svaku od ove tri varijable (v. sliku 3-9), kao dodatne dinamičke blokove uz već postojeći integrator vezan uz izračun SoC-a baterije.

3. Unaprijedni i prošireni unazadni model vozila

Izračunati gubitak momenta motora $\Delta\tau_e$ jednostavno se oduzima od referentnog momenta motora τ_{eR} , zadanog od nadređene strategije upravljanja, kako bi se dobio moment motora τ_e (v. sliku 3-9). Dinamički gubitci snage $P_{dyn,loss}$ dijele se s brzinom M/G stroja ω_{MG} kako bi se dodali na moment M/G stroja koji ih treba pokriti (slika 3-9). Postupak izračuna formalno se opisuje sljedećim izrazom kao proširenjem jednadžbe ravnoteže momenata (2-5):

$$\tau_{MGR,k} = \underbrace{\frac{\tau_{w,k} \eta_{tr}^{k_t}(\tau_{w,k}) + \frac{P_0(\omega_{w,k})}{\omega_{w,k}}}{i_o h_k}}_{\tau_{is,k}} + \frac{P_{dyn,loss,k}}{\omega_{MG,k}} - \underbrace{\tau_{eR,k} + \Delta\tau_{e,k}}_{\tau_{e,k}} \quad (3-4)$$

Dinamički gubitci snage $P_{dyn,loss}$ svedeni na vremenski interval uzorkovanja nadređene strategije upravljanja (T_d) računaju se iz gubitaka energije tijekom zatvaranja tj. klizanja glavne spojke i sinkrona s i r ($E_{mcl,loss}$ i $E_{sync,loss}$), gubitka energije vezanih uz pokretanje MSUI-a ($E_{e,ON,loss}$) te energije sinkronizacije zupčanika m putem M/G stroja ($E_{MG,sync}$):

$$P_{dyn,loss,k} = \frac{1}{T_d} (E_{mcl,loss,k} + E_{sync,loss,k} + E_{e,loss,k} + E_{MG,sync,k}). \quad (3-5)$$

Pritom se pretpostavlja da se odgovarajućim djelovanjem podređene strategije upravljanja prijelazne promjene uključenja MSUI-a i promjene stupnja prijenosa obave unutar $T_d = 1$ s.

Ekvivalentna masa rotirajućih komponenti pogonskog sklopa m_{add} , koja predstavlja inercije MSUI-a, M/G stroja, vratila sa zupčanicima te kotača, reducira se na masu vozila preko efektivnog radijusa autogume r_w [103]:

$$m_{add} = \frac{2I_w + (I_e + I_{MG} + I_{cs} + I_{ms} + I_{os})\hat{h}^2 i_o^2}{r_w^2}, \quad (3-6)$$

gdje \hat{h} predstavlja unaprijed nepoznati prijenosni omjer transmisije definiran mapom promjene stupnja prijenosa čiji su ulazi brzina (ω_w) i zahtijevani moment kotača (τ_w). Ta mapa promjene stupnja prijenosa dobivena je van realnog vremena minimizirajući gubitke pogona u električnom načinu rada kako je opisano u poglavlju 5. Ekvivalentna masa pogona m_{add} dodaje se na masu vozila M_v i putnika m_p , te tako modificira izraz (2-2) za izračun okretnog momenta na kotačima:

$$\tau_w = r_w \left((M_v + m_{add} + m_p)(\dot{v}_v + R_0 g \cos(\delta_R) + g \sin(\delta_R)) + 0.5 A_f C_d \rho_{air} v_v^2 \right) \quad (3-7)$$

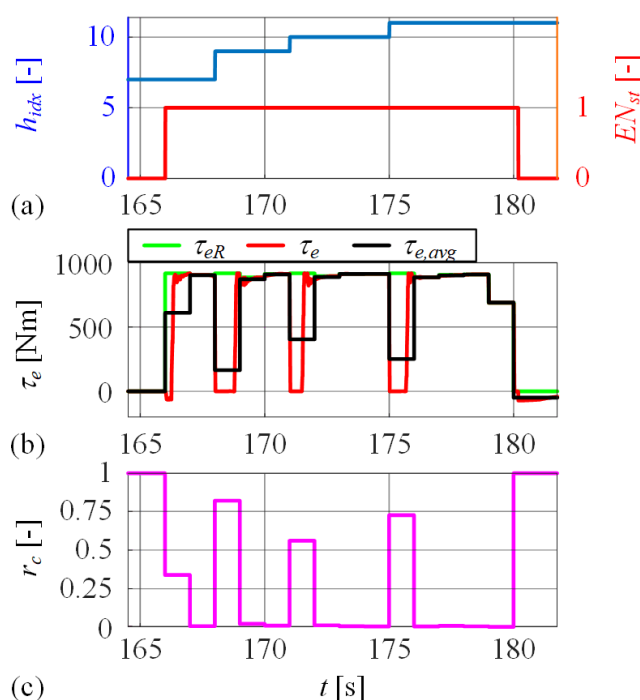
3.3.2. Modeliranje gubitka momenta motora s unutarnjim izgaranjem

Dinamički gubitak momenta MSUI-a definira se kao

$$\Delta\tau_{e,k} = r_c(EN_{st,k}, EN_{st,k-1}, h_k, h_{k-1})\tau_{eR,k} \quad (3-8)$$

gdje je $0 \leq r_c(\cdot) \leq 1$ mapa faktora gubitka momenta, koja ovisi o stanju uključenja MSUI-a i stupnju prijenosa u tekućem (k) i prethodnom vremenskom koraku ($k-1$), te koja se određuje iz odziva FWD modela. Za identifikaciju faktora r_c izračunava se prosjek stvarnog momenta motora $\tau_{e,avg}$ dobivenog simulacijom FWD modela u svakom intervalu uzorkovanja nadređene strategije upravljanja $T_d = 1$ s. Prosječni moment motora $\tau_{e,avg}$ i odgovarajuća referenca τ_{eR} zadana od strane nadređene strategije upravljanja koriste se za određivanje faktora r_c prema jednadžbi (vidi ilustraciju na slici 3-10):

$$r_{c,k} = 1 - \frac{\tau_{e,avg,k}}{\tau_{eR,k}} \quad (3-9)$$



Slika 3-10. Ilustracija identifikacije faktora gubitka momenta MSUI-a r_c iz odziva FWD modela.

Vrijednosti faktora $r_{c,k}$ izračunate prema jednadžbi (3-9) za različite kombinacije ulaza r_c -mape, koje opisuju pet karakterističnih prijelaznih pojava pogonskog sklopa opisanih u dodatku B.4, pohranjuju se u mapu $r_c(EN_{st,k}, EN_{st,k-1}, h_k, h_{k-1})$. Faktor r_c postavlja se na vrijednosti $r_c = 0$ za slučaj da nije aktivna prijelazna pojava uključenja motora, tj. prema izrazima (3-4) i (3-8)

3. Unaprijedni i prošireni unazadni model vozila

stvarni moment motora τ_e jednak je referentnom momentu τ_{eR} (kao i u BWD modelu). Ako je MSUI isključen, postavlja se $r_c = 1$, tj. vrijedi $\tau_e = 0$.

3.3.3. Modeliranje gubitaka energije prilikom uključivanja motora s unutarnjim izgaranjem

Gubitci energije tijekom uključivanja MSUI-a ($E_{e,ON,loss}$) dijele se na energiju utrošenu za ubrzanje zamašne mase motora do brzine paljenja motora tj. praznog hoda ($E_{e,idle}$) i na odgovarajuću energiju svladavanja otpora motora opisanih karakteristikom $\tau_{e,drag}(\omega_e)$ na slici 3-3a ($E_{e,drag,loss}$):

$$E_{e,ON,loss} = E_{e,idle} + E_{e,drag,loss} = \frac{I_e \omega_{e,idle}^2}{2} + \int_0^{\Delta t_{idle}} \omega_e(t) \tau_{e,drag}(\omega_e) dt, \quad (3-10)$$

gdje se kao brzina praznog hoda uzima $\omega_{e,idle} = 124$ rad/s (v. sliku 2.3b), a Δt_{idle} je prosječno trajanje dostizanja brzine praznog hoda, koja je izračunata iz bogatog skupa odziva FWD modela. Integral u (3-10) riješen je numerički van realnog vremena uz pretpostavku da MSUI tijekom uključivanja ima konstantnu akceleraciju $\omega_{e,idle}/\Delta t_{idle}$. Konačne brojčane vrijednosti gubitaka iznose: $E_{e,idle} = 7.7$ kW s odnosno $E_{e,drag,loss} = 0.7$ kW s i $E_{e,ON,loss} = 8.4$ kW s.

Vrijedi napomenuti da se pokretanje motora provodi putem glavne spojke (potpoglavlje 3.2, slika 3-5). Tijekom tog procesa, pored utroška energije za zalet motora javljaju se i gubitci energije zbog klizanja spojke, koji se razmatraju u narednom odjeljku.

3.3.4. Modeliranje gubitaka energije uslijed klizanja glavne spojke

Glavna spojka se zatvara i u klizanju prenosi moment a time i disipira gubitke uvijek kada se pokreće MSUI ili mijenja stupanj prijenosa (potpoglavlje 3.2). Ovi gubitci kao i gubitci zaleta motora iz prethodnog odjeljka pokrivaju se iz M/G stroja, tj. električnom energijom iz baterije.

Uzimajući u obzir da je referenca momenta MSUI-a prilikom zatvaranja spojke jednaka nuli ($\tau_{eR}^* = 0$ Nm; v. sliku 3-5) te da je brzina M/G stroja približno konstantna ($\dot{\omega}_{MG} = 0$ rad/s²) zbog visoke mase vozila koju pogoni M/G stroj, dinamika brzine proklizavanje spojke može se zapisati kao:

$$\dot{\omega}_{mcl} = \dot{\omega}_e - \dot{\omega}_{MG} \cong \dot{\omega}_e = \frac{1}{I_e} (\tau_e - \tau_{mcl}) \cong -\frac{\tau_{mcl}}{I_e}, \quad (3-11)$$

3. Unaprijedni i prošireni unazadni model vozila

gdje je I_e inercija motora. Pritom se vremenska derivacija brzine vrtnje motora $\dot{\omega}_e$ računa iz dva susjedna uzorka, što daje izraz za početnu brzinu klizanja spojke

$$\omega_{mcl,start} = \omega_{e,k} - \omega_{e,k-1}. \quad (3-12)$$

gdje se $\omega_{e,k-1}$ postavlja na nulu za slučaj pokretanja motora, dok kod promjene stupnja prijenosa $\omega_{e,k-1}$ odgovara brzini motora u prethodnom koraku (prije promjene stupnja prijenosa).

Integracijom izraza (3-11), uz pretpostavku linearnog pada brzine klizanja s početnog iznosa $\omega_{mcl}(k) = \omega_{mcl,start}$ danog izrazom (3-12), dobiva se sljedeći izraz za energiju gubitaka klizanja:

$$\begin{aligned} E_{mcl,loss} &= \int_0^{\Delta t_{mcl}} P_{mcl,loss} dt = \int_0^{\Delta t_{mcl}} \tau_{mcl} \omega_{mcl} dt \cong \\ &\cong \int_0^{\Delta t_{mcl}} \tau_{mcl} \left(\omega_{mcl,start} - \frac{\tau_{mcl}}{I_e} t \right) dt, \end{aligned} \quad (3-13)$$

gdje vrijeme zatvaranja spojke $\Delta t_{mcl} = 0.27s$ odgovara zadanom vremenu pokretanja motora (v. izraz (3-3)) odnosno sinkronizacije spojke. Uzimajući u obzir konstantu vrijednost normiranog kapaciteta glavne spojke C_{mclR} , danog izrazom (3-3), te dinamiku aktuatora glavne spojke modeliranu PT1 članom s vremenskom konstantom $T_{mcl} = 50$ ms, moment trenja glavne spojke u fazi sinkronizacije izražava se kao

$$\tau_{mcl} = \tau_{mcl,max} C_{mcl} = \tau_{mcl,max} C_{mclR} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{mcl}}} \right). \quad (3-14)$$

Uvrštavanjem izraza (3-14) u (3-13) te rješavanjem integrala i sređivanjem (v. prilog B.2) dobiva se konačni izraz za gubitak energije klizanja glavne spojke :

$$E_{mcl,loss,k} = \begin{cases} k_{mcl} \omega_{mcl,start}^2, & \text{ako } (EN_{st,k} = 1 \text{ i } EN_{st,k-1} = 0) \\ & \text{ili } (EN_{st,k} = 1 \text{ i } h_k \neq h_{k-1}), \\ 0, & \text{u suprotnom,} \end{cases} \quad (3-15)$$

gdje je koeficijent k_{mcl} jednak:

$$k_{mcl} = I_e \left(-\frac{1}{2d_{mcl}^2} (T_{mcl}^2 b_{mcl} + T_{sync}^2 + 4T_{mcl}^2 a_{mcl} - 2T_{mcl} T_{sync} a_{mcl}) - 1 \right), \quad (3-16)$$

a izrazi za koeficijente a_{mcl} , b_{mcl} i d_{mcl} dani su u dodatku B.2.

3.3.5. Modeliranje gubitaka energije uslijed promjene stanja sinkrona

Ukupni gubici energije uslijed proklizavanja sinkrona $s_{1,2}$ i $r_{1,2}$ kod promjene njihovog stanja određuju se kao

$$E_{sync,loss,k} = \sum_i \sum_j E_{s,i,j,loss,k}, \quad (3-17)$$

gdje je $i \in [s, r], j \in [1, 2]$. Kako bi se olakšao analitički izvod gubitaka energije kod ukapčanja s-sinkrona uvedene su sljedeće pretpostavke: a) utjecaj dinamike aktuatora sinkrona je zanemariv, b) tijekom mijenjanja brzina samo sinkron s mijenja stanje (tj. sinkroni m i r ostaju zatvoreni), te c) međuvratilo ima približno konstantu brzinu ($\dot{\omega}_{cs} = 0$) zbog visoke izlazne inercije (tj. velike mase vozila; v. sliku 2.5). Uz ove pretpostavke i uz izvod dan u prilogu B.3 gubitak energije u sinkronu s može se izraziti kao

$$E_{s,s,j,loss,k} = \frac{1}{2} I_{MG1} (\omega_{w,k} i_o h_k - \omega_{w,k-1} i_o h_{k-1})^2, \quad (3-18)$$

gdje je I_{MG1} inercija M/G stroja i ulaznog vratila transmisije koji su direktno spojeni (odnosno nema prijelaznih omjera između njih, v. sliku 2-1 i 2.5).

Slično, pod pretpostavkama zanemarive dinamike aktuatora sinkrona i približno konstante brzine izlaznog vratila transmisije ($\dot{\omega}_{os} = 0$), gubitak energije u r sinkronu računa se kao:

$$E_{s,r,j,loss,k} = \frac{1}{2} I_{MG2} (\omega_{w,k} i_o h_{r,k} - \omega_{w,k-1} i_o h_{r,k-1})^2, \quad (3-19)$$

gdje je h_r prijenosni omjer r stupnja redukcije dok je I_{MG2} ekvivalentna inercija M/G stroja te ulaznog vratila, međuvratila i glavnog vratila jednaka

$$I_{MG2} = I_{MG1} + \frac{\left(I_{cs} + \frac{I_{ms}}{h_m^2} \right)}{h_s^2}, \quad (3-20)$$

gdje je h_m prijenosni omjer glavne redukcije (v. Dodatak A).

3.3.6. Modeliranje energije sinkronizacije kandžastih spojki

Kako je opisano u potpoglavlju 3.2, sinkronizacija kandžastih spojki provodi se M/G strojem reguliranim po brzini vrtnje. Pritom se iz baterije povlači ili vraća energija koja odgovara promjeni razini kinetičke energije M/G stroja tijekom sinkronizacije, ovisno redom o tome

3. Unaprijedni i prošireni unazadni model vozila

podiže li se ili spušta brzina M/G stroja ω_{MG} . Ova energija se uključuje u izraz (3-5) kao energija sinkronizacije i računa kao promjena kinetičke energije M/G stroja tijekom sinkronizacije zupčanika m aproksimira se sljedećim izrazom:

$$E_{MG, sync, k} = \left\{ \frac{1}{2} I_{MG3} (\omega_{MG, k}^2 - \omega_{MG, k-1}^2) \right\}, \quad (3-21)$$

gdje je I_{MG3} ekvivalentna inercija vratila M/G stroja, ulaznog vratila i međuvratila. koje je spojeno preko s-stupnja redukcije h_s :

$$I_{MG3} = I_{MG1} + \frac{I_{cs}}{h_s^2}. \quad (3-22)$$

3.4. Validacija i analiza proširenog unazadnog modela

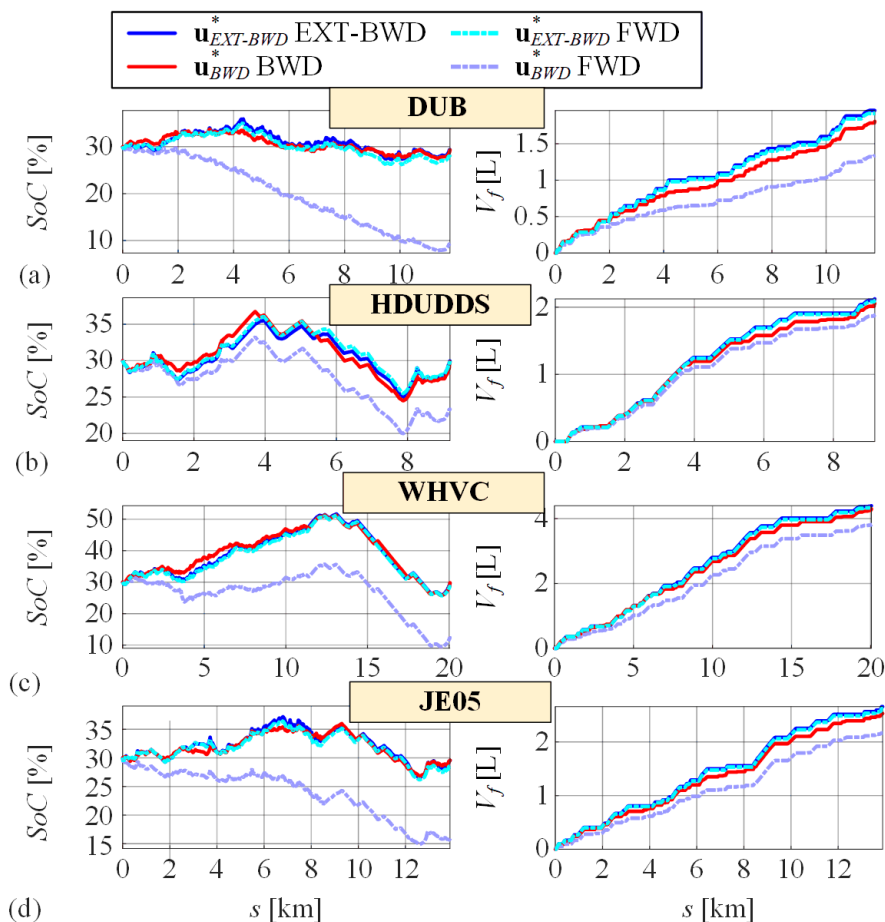
3.4.1. Validacija modela

EXT-BWD model razvijen u potpoglavlju 3.2 validira se simulacijskom usporedbom s polaznim FWD modelom. Isto se provodi za BWD model iz poglavlja 2, radi usporedbe točnosti EXT-BWD i BWD modela. Simulacija se provodi u CS režimu (v. sliku 2.10a) za nekoliko voznih ciklusa. Za usporedbu EXT-BWD i FWD modela primjenjuju se upravljački ulazi $\mathbf{u}_{EXT-BWD}^*$ $[\tau_{eR} \ h]^T$ optimirani dinamičkim programiranjem (DP, poglavlje 4) uz korištenje EXT-BWD modela, koji se izravno zadaju podređenoj upravljačkoj strategiji (izostavlja se nadređena strategija upravljanja na slici 3-9). Na sličan način, za usporedbu BWD i FWD modela primjenjuju se upravljački ulazi \mathbf{u}_{BWD}^* dobiveni DP optimiranjem uz korištenje BWD modela.

Usporedni simulacijski odzivi SoC-a i kumulativne potrošnje goriva prikazani su na slici 3-11 za snimljeni DUB ciklus te HDUDDS, WHVC te JE05 certifikacijske cikluse. Odzivi se odnose na CS režim s početnim i konačnim uvjetima $SoC_i = SoC_f = 30\%$. Rezultati pokazuju da EXT-BWD model puno bolje opisuje ponašanje FWD modela u odnosu na BWD model. Naime, odzivi SoC-a i kumulativne potrošnje goriva V_f su vrlo slični za EXT-BWD i FWD model, pri čemu konačne vrijednosti SoC-a međusobno odstupaju maksimalno za $\pm 1.5\%$, dok je razlika finalne potrošnje goriva unutar $\pm 1\%$. S druge strane, pogreške SoC i V_f trajektorija su velike kod BWD modela u odnosu na FWD model, pri čemu posmacci konačnog SoC-a u odnosu na ciljane vrijednost 30% iznose od 10% do 15%, a konačne potrošnje goriva su i do 30% veće tj. precijenjene.

3. Unaprijedni i prošireni unazadni model vozila

Ovi rezultati potvrđuju značaj i kvalitetu modeliranja dinamičkih gubitaka kod EXT-BWD modela, te također da tako formulirani EXT-BWD model može precizno reproducirati ponašanje izvornog FWD modela.



Slika 3-11. Usporedni simulacijski odzivi SoC-a i kumulativne potrošnje goriva s obzirom na prijeđeni put i u CS režim rada, dobiveni primjenom BWD, EXT-BWD i FWD modela s upravljačkim ulazima optimiranim DP algoritmom za BWD i EXT-BWD modele.

3.4.2. Energetska analiza

Kao dodatna provjera EXT-BWD modela, provodi se energetska analiza koja se odnosi na bilancu proizvodnje i potrošnje energije temeljem simulacijskih rezultata dobivenih uz primjenu BWD, EXT-BWD i FWD modela, kako je opisano u prethodnom odjeljku. Na temelju veznog dijagrama FWD modela danog u prilogu C [57] može se izvesti sljedeća jednadžba energetske ravnoteže:

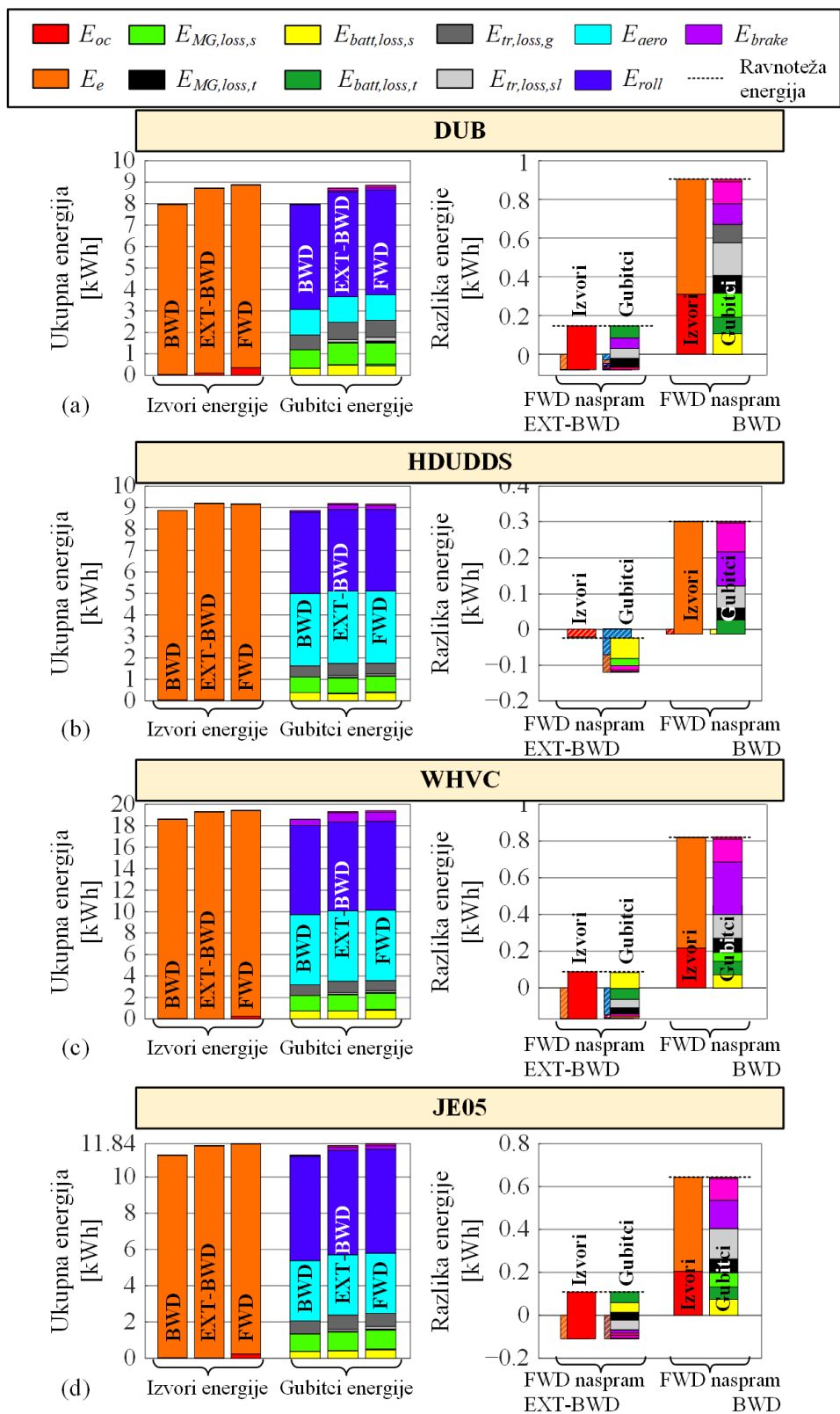
3. Unaprijedni i prošireni unazadni model vozila

$$\begin{aligned} E_{oc} + E_e = & E_{batt,loss,s} + E_{batt,loss,t} + E_{MG,loss,s} + \dots \\ & + E_{MG,loss,t} + E_{tr,loss,g} + E_{tr,loss,sl} + \dots \\ & + E_{aero} + E_{roll} + E_{brake} + E_i, \end{aligned} \quad (3-23)$$

gdje je E_{oc} energija otvorenog kruga baterije, E_e je mehanička energija MSUI-a, $E_{batt,loss}$ i $E_{MG,loss}$ su gubitci energije baterije i M/G stroja gdje indeksi 's' i 't' redom označavaju stacionarne i dinamičke gubitke, $E_{tr,loss,g}$ su gubitci prijenosnika uključujući stalne gubitke, a $E_{tr,loss,sl}$ su gubitci energije vezani uz klizanje glavne spojke i sinkrona. Nadalje, E_{aero} i E_{roll} su redom aerodinamički otpori i otpori kotrljanja, E_{brake} je gubitak energije na mehaničkim kočnicama, dok E_i predstavlja kinetičku i potencijalnu energiju pohranjenu redom u inercijskim elementima i elastičnom vratilu. Pohranjena energija E_{i+es} na kraju ciklusa jednaka je nuli jer vozilo započinje i završava ciklus s nulom brzinom i momentom. Matematički izrazi za svaki član jednadžbe (3-23) dani su u prilogu C, pri čemu su članovi ekvivalentni za EXT-BWD i FWD model, dok se kod BWD modela izostavljaju gubitci baterije i M/G stroja tijekom prijelaznih pojava $E_{batt,loss,t}$ i $E_{MG,loss,t}$ te gubitci klizanja spojke i sinkrona $E_{tr,loss,sl}$. Gubitci na mehaničkim kočnicama E_{brake} u slučaju BWD i EXT-BWD modela prisutni su kad je regenerativni moment M/G stroja manji od karakteristike minimalnog momenta (v. odjeljak 3.2.1. i izraz (3-2)).

Usporedni rezultati energetske analize za tri modela i četiri vozna ciklusa prikazani su na slici 3-12. U lijevoj koloni slike dani su apsolutni iznosi izvora i gubitaka energije, dok su u desnoj koloni dane razlike izvora odnosno gubitaka energije za FWD i EXT-BWD te FWD i BWD modele. U slučaju DUB ciklusa, FWD model predviđa potrošnju energije veću za 0.16 kWh u odnosu na EXT-BWD model i čak za 0.9 kWh u odnosu na BWD model (slika 3-12a). Ovi odnosi su slični i za ostale (certifikacijske) vozne cikluse, s tim da su iznosi razlike manji (slike 3-12b,c,d). To je u skladu s odnosima na slici 3-11 i činjenicom da su ovi ciklusi manje dinamični u odnosu na DUB ciklus. Sva tri modela daju vrlo slične aerodinamičke gubitke E_{aero} i gubitke kotrljanja E_{roll} . Karakteristika učinkovitost transmisije $\eta_{tr}(\tau_w)$ modela skalirana je tako da stacionarni gubitci transmisije $E_{tr,loss,g}$ dobiveni na BWD i EXT-BWD modelima budu približno isti istim gubiticima dobivenim na FWD modelu.

3. Unaprijedni i prošireni unazadni model vozila



Slika 3-12. Rezultati usporedne energetske analize za BWD, EXT-BWD i FWD modele i četiri vozna ciklusa u CS režimu rada (odgovara rezultatima sa slike 3-11).

4. Optimiranje upravljačkih varijabli

U ovom poglavlju prvo se formulira problem optimiranja upravljačkih varijabli PHEV pogona. Zatim se primjenjuje rješenje problema uz primjenu algoritma dinamičkog programiranja (DP). Konačno, prikazuju se i analiziraju rezultati optimiranja za CS i BLND režime rada, uključujući posebne slučajeve promjenjivog nagiba ceste te prisustva zone niskih emisija (LEZ-a).

4.1. Općenito o dinamičkom programiranju

DP algoritam se koristi za rješavanje generalnih nekonveksnih optimizacijskih problema, uzorkovanih u vremenu te s uniformno-uzorkovanim varijablama stanja i upravljačkim varijablama [35], [104]. Zbog svoje računalne kompleksnosti, DP algoritam je računalno primjenjiv samo za optimizacijske probleme karakterizirane s malim brojem upravljačkih varijabli i varijabli stanja, kao što je slučaj s BWD te EXT-BWD modelima PHEV-a [105], [106]. DP razlaže globalni optimizacijski problem na manje potprobleme, koji se lakše rješavaju i zahtijevaju manje računalno opterećenje. DP se temelji na principu optimalnosti koji nalaže da su optimalne varijable potproblema podskup optimalnih varijabli globalnog optimizacijskog problema [104]. Stoga, DP unazad kroz vrijeme iterativno rješava optimizacijske potprobleme, čija rješenja pohranjuje te ih koristi u rekonstrukciji optimalnih rješenja koja se odvijaju unaprijed u vremenu krenuvši od zadanog početnog uvjeta [104].

Zadatak DP-a je smanjiti neki nepoželjni učinak rada dinamičkog procesa, koji se definira vremenski uzorkovanom ciljnom funkcijom [104], [35]:

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} F(\mathbf{x}_{k+1}, \mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k), \quad (4-1)$$

gdje je N ukupan broj vremenskih uzoraka definiran kao $N = t_f/T_d$, t_f je ukupno trajanje ciklusa, a T_d je vrijeme uzorkovanja, k je vremenski korak uzorkovanja definiran kao $k = [0, 1, \dots, N-1]$, \mathbf{x}_k je vektor varijabli stanja, \mathbf{u}_k je vektor upravljačkih varijabli dok je \mathbf{v}_k vektor vanjskih ulaznih varijabli (npr. onih vezanih uz vozni ciklus). Dinamički model procesa definira se u diskretnom prostoru stanja sustavom jednažbi diferencija

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k), \quad (4-2)$$

4. Optimiranje upravljačkih varijabli

s uvjetima na vrijednosti početnih i konačnih varijabli stanja

$$\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}_i, \quad \mathbf{x}_N = \mathbf{x}_f \quad (4-3)$$

te ograničenjima na vrijednosti varijabli stanja i upravljačkih varijabli

$$\mathbf{x}_{\min} \leq \mathbf{x}_k \leq \mathbf{x}_{\max}, \quad (4-4)$$

$$\mathbf{u}_{\min}(k) \leq \mathbf{u}_k \leq \mathbf{u}_{\max}(k), \quad (4-5)$$

gdje su \mathbf{x}_{\min} i \mathbf{u}_{\min} te \mathbf{x}_{\max} i \mathbf{u}_{\max} minimalne i maksimalne vrijednosti varijabli stanja odnosno upravljačkih varijabli koje u općenitom slučaju mogu biti ovisne o vremenu (k).

Iznos optimalne ciljne funkcije globalnog problema koji je definiran od $k = 0$ do $k = N-1$ za zadani početni uvjet \mathbf{x}_0 može se zapisati kao rješenje minimizacije sume aditivnih funkcija cilja za svaki k -ti korak:

$$J_N(\mathbf{x}_0) = \min_{\mathbf{u}_0, \dots, \mathbf{u}_{N-1}} \sum_{k=0}^{N-1} F(\mathbf{x}_{k+1}, \mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k). \quad (4-6)$$

Na osnovi svojstva kauzalnosti dinamičkog sustava opisanog jednadžbom stanja (4-2), iznos optimalne ciljne funkcije može se prikazati kao

$$J_N(\mathbf{x}_0) = \min_{\mathbf{u}_0} \left(F(\mathbf{x}_1, \mathbf{u}_0, \mathbf{v}_0) + \min_{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_{N-1}} \sum_{k=1}^{N-1} F(\mathbf{f}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k), \mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k) \right), \quad (4-7)$$

gdje drugi član s desne strane (4-7), analogno izrazu (4-6), predstavlja iznos optimalne ciljne funkcije potproblema od $k = 1$ do $k = N-1$ za vrijednost \mathbf{x}_1 dobivenu prema (4-2):

$$J_{N-1}(\mathbf{x}_1) = \min_{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_{N-1}} \sum_{k=1}^{N-1} F(\mathbf{f}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k), \mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k). \quad (4-8)$$

Stoga se ciljne funkcije optimizacijskih potproblema mogu zapisati na rekurzivan način kao:

$$J_k(\mathbf{x}_{N-k}) = \min_{\mathbf{u}_{N-k}} \left(F(\mathbf{f}(\mathbf{x}_{N-k}, \mathbf{u}_{N-k}, \mathbf{v}_{N-k}), \mathbf{u}_{N-k}, \mathbf{v}_{N-k}) + J_{k-1}(\mathbf{f}(\mathbf{x}_{N-k}, \mathbf{u}_{N-k}, \mathbf{v}_{N-k})) \right). \quad (4-9)$$

Optimizacijski potproblem u zadnjem vremenskom trenutku, J_1 , svodi se na minimizaciju odgovarajuće aditivne funkcije cilja:

$$J_1(\mathbf{x}_{N-1}) = \min_{\mathbf{u}_{N-1}} \left(F(\mathbf{f}(\mathbf{x}_{N-1}, \mathbf{u}_{N-1}, \mathbf{v}_{N-1}), \mathbf{u}_{N-1}, \mathbf{v}_{N-1}) \right). \quad (4-10)$$

4. Optimiranje upravljačkih varijabli

U slučajevima gdje je zadano konačno stanje \mathbf{x}_f , u ciljnu funkciju (4-9) dodaje se izraz J_f koji kažnjava odstupanje vrijednosti varijable stanja u zadnjem (N -tom) koraku od zadane \mathbf{x}_f vrijednosti:

$$J_1(\mathbf{x}_{N-1}) = \min_{\mathbf{u}_{N-k}} \left(F(\mathbf{x}_N, \mathbf{u}_{N-1}, \mathbf{v}_{N-1}) + \underbrace{\mathbf{K}_f(\mathbf{x}_f - \mathbf{x}_N)^2}_{J_f} \right), \quad (4-11)$$

gdje je \mathbf{K}_f vektor težinskih koeficijenta koji se postavljaju na dovoljno visoke vrijednosti kako bi se konačni uvjet zadovoljio.

DP algoritam se prvo rješava kroz vremenski-unazadnu fazu krenuvši od potproblema danog u (4-10), gdje se nalaze i pohranjuju optimalne upravljačke varijable \mathbf{u}_{N-1}^* te pripadne optimalne ciljne funkcije $\mathbf{J}_1(\mathbf{x}_{N-1})$ za sve kombinacije po-amplitudi uniformno-uzorkovanih vrijednosti varijabli stanja \mathbf{x}_{N-1} . Rekurzivnim rješavanjem problema (4-8) unazad kroz vrijeme pohranjuju se optimalne vrijednosti upravljačkih varijabli \mathbf{u}_{N-k}^* te optimalnih ciljnih funkcija $\mathbf{J}_k(\mathbf{x}_{N-k})$ za sve vremenske korake $k = 2, \dots, N$.

Nakon završetka unazadne faze, optimalne upravljačke varijable dobivaju se u rekonstrukcijskoj fazi koja se odvija unaprijed u vremenu. Počevši od zadanog početnog uvjeta $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}_i$, pretražuju se pohranjene vrijednosti upravljačkih varijabli \mathbf{u}_0^* kako bi se pronašao optimalan \mathbf{u}_0 koji minimizira funkciju cilja $\mathbf{J}_N(\mathbf{x}_0)$ pohranjenu u unazadnoj fazi. Proces se ponavlja u idućem koraku, gdje se na osnovu dobivene vrijednosti \mathbf{x}_1 prema (4-2) određuju upravljačke varijable \mathbf{u}_1 koje će minimizirati funkciju cilja $\mathbf{J}_{N-1}(\mathbf{x}_1)$. Nastavkom iterativne procedure pretraživanja pohranjenih rješenja unaprijed u vremenu dobivaju se optimalni upravljački vektori za preostale vremenske korake uzorkovanja, tj. $\mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_{N-1}$.

U rekurzivnoj jednadžbi (4-9) jednadžba stanja $\mathbf{f}(\mathbf{x}_{N-k}, \mathbf{u}_{N-k}, \mathbf{v}_{N-k})$ može rezultirati vrijednostima varijabli stanja \mathbf{x}_{N-k+1} koje se nalaze između uniformno-uzorkovanih vrijednosti varijabli stanja. U tom se slučaju iznos ciljne funkcije $J_{k-1}(\mathbf{x}_{N-k+1})$ u (4-8) dobiva linearnom interpolacijom na temelju iznosa ciljnih funkcija J_{k-1} u susjednim vrijednostima uzorkovanja vektora stanja. Na isti se način linearna interpolacija koristi u unaprijednoj fazi za dobivanje optimalnih upravljačkih vektora iz skupa podataka pohranjenog u unazadnoj fazi.

Prilikom uzorkovanja varijabli stanja i upravljačkih varijabli, izbor većeg konačnog broja uzorkovanih vrijednosti (viša rezolucija) povećava točnost optimalnog rješenja, ali i računalno

4. Optimiranje upravljačkih varijabli

opterećuje algoritam što rezultira duljim vremenom izvođenja. Izbor rezolucije obično se provodi u koracima, od niže prema višoj, sve dok se iznos ciljne funkcije ne počne zasićivati.

4.2. Formulacija optimizacijskog problema

4.2.1. Optimizacijski problem za slučaj EXT-BWD modela

U ovom radu optimiraju se upravljačke varijable \mathbf{u}_k EXT-BWD modela paralelnog PHEV pogona, koje uključuju referencu momenta MSUI-a te prijenosni omjer transmisije (v. sliku 3-9):

$$\mathbf{u}_k = [\tau_{eR,k} \quad h_k]^T. \quad (4-12)$$

Dinamika pogona definirana je s tri varijable stanja uključene u vektor stanja \mathbf{x}_k , a to su SoC_k te stanje uključenosti MSUI-a i prijenosni omjer u prošlom vremenskom koraku $EN_{st,prev,k}$ i $h_{prev,k}$ (v. član z^{-1} na slici 3-9, uz napomenu da treću ulaz ovog člana, $\omega_{w,k}$, ne predstavlja varijablu stanja već vanjsku varijablu raspoloživu DP-u):

$$\mathbf{x}_k = [SoC_k \quad EN_{st,prev,k} \quad h_{prev,k}]^T. \quad (4-13)$$

Jednadžba stanja po SoC_k dobiva se vremenskom diskretizacijom kontinuirane jednadžbe stanja (2-10) uz korištenje unaprijedne Eulerove metode integracije s vremenom uzorkovanja $T_d = 1s$. Tako dobivena diskretna jednadžba stanja proširuje se jednadžbama stanja za preostale dvije varijable stanja iz izraza (4-13):

$$EN_{st,prev,k+1} = f_{EN,st}(\tau_{eR,k}), \quad (4-14)$$

$$h_{prev,k+1} = h_k, \quad (4-15)$$

gdje je $f_{EN,st}(\tau_e)$ funkcija okidanja koja je jednaka 1 u slučaju $\tau_e > 0$ Nm, odnosno 0 za $\tau_e \leq 0$ Nm.

Vektor vanjskih ulaznih varijabli \mathbf{v}_k uključuje varijable voznog ciklusa $\tau_{w,k}$ i $\omega_{w,k}$, prethodnu vrijednost $\omega_{w,k-1}$ i dodatnu varijablu $K_{LEZ,k}$ vezanu uz prisustvo LEZ-a u tekućem koraku:

$$\mathbf{v}_k = [\tau_{w,k} \quad \omega_{w,k} \quad \omega_{w,k-1} \quad K_{LEZ,k}]^T. \quad (4-16)$$

gdje se K_{LEZ} ujedno koristi kao težinski koeficijent ciljne funkcije (v. izraz (4-20) niže) i definira kao $K_{LEZ} = 10^3$ u slučaju ako je vozila unutar LEZ-a, odnosno $K_{LEZ} = 0$ ako je vozilo van LEZ-a [73].

4. Optimiranje upravljačkih varijabli

Početne i konačne vrijednosti varijabli stanja zadaju se kao:

$$\mathbf{x}_i = [SoC_i \quad EN_{st,prev,i} \quad h_{prev,i}]^T, \quad (4-17)$$

$$\mathbf{x}_f = [SoC_f \quad EN_{st,prev,f} \quad h_{prev,f}]^T, \quad (4-18)$$

gdje se za CS režima rada postavlja $SoC_i = SoC_f = 30\%$, dok u BLND režimu zadaje odnosno $SoC_i = 90\%$ i $SoC_f = 30\%$. Početno i konačno stanje postavlja se kao isključeno: $EN_{st,prev,i} = EN_{st,prev,f} = 0$; dok se početno i konačno stanje prijenosnog omjera proizlazi iz početne i krajnje brzine vozila jednake nuli: $h_{prev,i} = h_{prev,f} = 14.94$ (prvi stupanj prijenosa, v. Tablicu 2-3). Vektor težinskih faktora za penalizaciju konačnih stanja u izrazu (4-11) postavlja se kao

$$\mathbf{K}_f = [K_{f,SoC} \quad 0 \quad 0], \quad (4-19)$$

gdje je $K_{f,SoC} = 10^9$. Konačna stanja stupnja prijenosa i statusa uključenosti MSUI-a nisu kritična za rad pogona te se radi jednostavnosti ne koriste, tj. odgovarajući težinski koeficijenti u izrazu (4-19) postavljaju se na nulu.

Aditivna funkcija cilja $F(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k)$ za svaki vremenski korak glasi:

$$\begin{aligned} F(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k) = & \dot{m}_{f,k} T_d + K_{LEZ,k} \dot{m}_{f,k} T_d + \\ & + K_g \{H^-(SoC_k - SoC_{\min}) + H^-(SoC_{\max} - SoC_k)\} + \\ & + K_g \{H^-(P_{batt,\max} - P_{batt,k}) + H^-(P_{batt,k} - P_{batt,\min})\} + \\ & + K_g \{H^-(\tau_{e,k} - \tau_{e,\min}) + H^-(\tau_{e,\max}(\omega_{e,k}) - \tau_{MG,k})\} + \\ & + K_g \{H^-(\omega_{e,k} - \omega_{e,\min}) + H^-(\omega_{e,\max} - \omega_{e,k})\} + \\ & + K_g \{H^-(\tau_{MG,k} - \tau_{MG,\min}(\omega_{MG,k})) + H^-(\tau_{MG,\max}(\omega_{MG,k}) - \tau_{MG,k})\} + \\ & + K_g \{H^-(\omega_{MG,k} - \omega_{MG,\min}) + H^-(\omega_{MG,\max} - \omega_{MG,k})\}. \end{aligned} \quad (4-20)$$

Prvi član na desnoj strani jednadžbe (4-20) odgovara potrošnji goriva u k -tom intervalu uzorkovanja, uz definiciju masenog protoka goriva \dot{m}_f danu izrazom (2-7), što nakon procesa sumacije u ciljnoj funkciji (4-1) daje ukupnu masu tj. potrošnju goriva koja se minimizira. Drugi član u izrazu (4-20) dodatno penalizira potrošnju goriva unutar LEZ-a, gdje se profil težinskog faktora $K_{LEZ,k}$ zadaje kako je opisano uz izraz (4-16). Preostali članovi aditivne funkcije cilja (4-20) penaliziraju prekoračenje donjih i gornjih ograničenja momenata MSUI-a i M/G stroja ovisnih o njihovim brzinama vrtnje (v. sliku 2-3) te fiksnih ograničenja brzina vrtnje, snage baterije i SoC-a. Invertirana Heavisideova funkcija $H^-(x)$ u izrazu (4-20) definirana je kao

4. Optimiranje upravljačkih varijabli

$$H^-(x) = \begin{cases} 0, & \text{za } x \geq 0 \\ 1, & \text{za } x < 0 \end{cases} \quad (4-21)$$

Gornje i donje ograničenje na SoC postavljeni su kao $SoC_{\max} = 0.99$ i $SoC_{\min} = 0.01$ da pokriju maksimalan raspon unutar kojeg se SoC može mijenjati. Penalizacijski težinski faktor K_g postavlja se na dovoljno visoku vrijednosti da se osigura zadovoljenje postavljenih ograničenja ($K_g = 10^{12}$). Varijable pogona, uključujući maseni protok goriva \dot{m}_f , moment MSUI-a i M/G stroja τ_e i τ_{MG} te snagu baterije P_{batt} , određuju se prema EXT-BWD modelu opisanom potpoglavlju 3.3.

Broj razina kvantizacije varijabli stanja uključenja MSUI-a i prijenosnog omjer transmisije jednaki su $N_{s2,ENst} = 2$ i $N_{s3,h} = N_{u1,h} = 12$, što odgovara realnom broju stanja ovih izvorno-diskretnih varijabli. S druge strane, broj razina kvantizacije SoC-a i momenta MSUI-a postavlja se redom na $N_{s1,SoC} = 200$ i $N_{u2,\tau_e} = 200$, kao kompromis između brzine izvođenja i točnosti DP optimiranja [105].

4.2.2. Redukcija optimizacijskog problema za slučaj BWD modela

Optimizacijski problem postavljen u prethodnom odjeljku za slučaj EXT-BWD modela može se pojednostavniti za primjenu na BWD model. U tom slučaju koriste se iste upravljačke varijable kao što je dano u (4-12). Za razliku od EXT-BWD modela, BWD model koristi SoC kao jedinu varijablu stanja:

$$\mathbf{x}_k = SoC_k. \quad (4-22)$$

s pripadnim početnim i konačnim uvjetima SoC_i i SoC_f . To je stoga jer BWD model ne računa dinamičke gubitke, te time niti ne treba prethodne vrijednosti stanja uključenja MSUI-a i stupnja prijenosa (usp. (4-22) i (4-13)). Iz istog razloga, iz vektora vanjskih ulaza (4-16) izuzima se prethodna brzina kotača $\omega_{w,k-1}$, što daje:

$$\mathbf{v}_k = [\tau_{w,k} \quad \omega_{w,k} \quad K_{LEZ,k}]^T. \quad (4-23)$$

Aditivna funkcija cilja (4-20) ostaje ista kao kod EXT-BWD modela, no maseni protok goriva \dot{m}_f , snaga baterije P_{batt} i shodno tome dinamika SoC-a određuju se prema pojednostavljenom BWD modelu opisanom u poglavlju 2, kod kojeg se zanemaruju dinamički gubitci.

4.3. Rezultati optimiranja

Optimiraju se upravljačke varijable EXT-BWD modela u CS i BLND režimima preko nekoliko vozničkih ciklusa. Rezultati optimiranja dobiveni na EXT-BWD modelu uspoređeni su s onima dobivenim na BWD modelu. Analizirani su i uspoređeni optimalni vremenski odzivi potrošnje goriva i SoC-a, kao i raspored optimalnih radnih točaka pogonskih strojeva. Dodatno se analiziraju optimalni odzivi u slučajevima promjenjivog nagiba ceste i prisustva LEZ-ova.

4.3.1. Rezultati optimiranja za CS režim rada

DP optimiranje upravljačkih varijabli PHEV-a provedeno je za slučaj CS režima s rubnim uvjetima $SoC_i = SoC_f = 30\%$ i tri certifikacijska ciklusa te snimljeni DUB ciklus s nultim nagibom ceste. Rezultati optimiranja dobiveni uz primjenu BWD i EXT-BWD modela dani su u tablici 4-1 u vidu sljedećih pokazatelja kvalitete upravljanja: konačna potrošnja goriva V_f , konačno stanje SoC-a $SoC(t_f)$ te broj uključivanja MSUI-a N_e i promjene stupnja prijenosa N_g . U slučaju realističnog DUB ciklusa, potrošnja goriva je za 9% veća u slučaju točnijeg EXT-BWD modela u odnosu na pojednostavljeno BWD model. U slučaju blažih, certifikacijskih ciklusa relativna razlika u potrošnji dvaju modela pada na oko 5%. Pritom je finalni SoC praktički jednak u svim slučajevima, jer predstavlja konačni uvjet optimiranja. Kako je već pojašnjeno u poglavlju 3, BWD podcjenjuje potrošnju goriva jer ne uključuje dinamičke gubitke. Iz istog razloga, ovaj model forsira često isključenje motora i promjenu stupnja prijenosa. Drugim, riječima kako bi smanjio dinamičke gubitke, EXT-BWD smanjuje broj uključivanja motora i promjene stupnja prijenosa za oko 50%.

Na slikama 4-1 i 4-2 prikazane su odgovarajuće trajektorije SoC-a i kumulativne potrošnje goriva V_f u funkciji prijeđenog puta. Ove trajektorije imaju vrlo slične oblike za oba modela, a glavna razlika je u već spomenutom podcijenjenom predviđanju potrošnje goriva od strane BWD modela. Može se zaključiti da je BWD model kvalitativno precizan, ali uz kvantitativne manjkavosti zbog zanemarenja dinamičkih gubitaka.

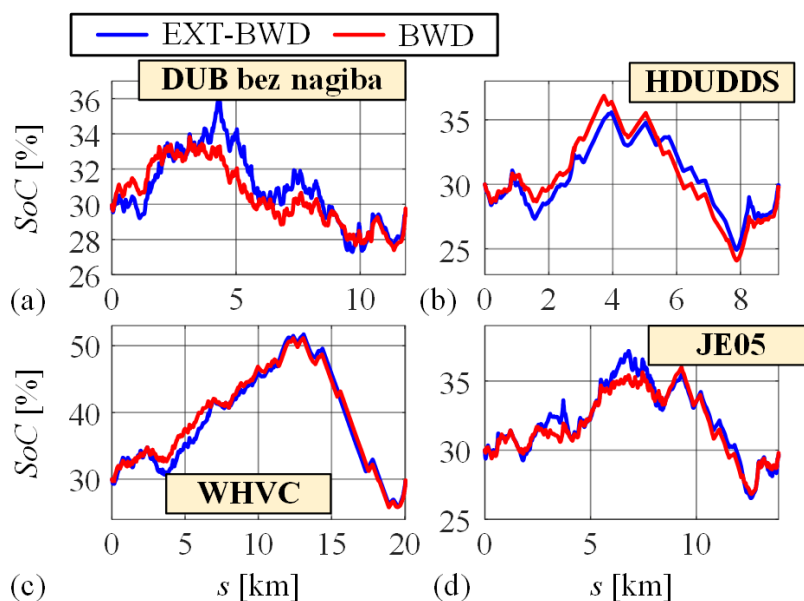
Razmještaj optimalnih radnih točki MSUI-a i M/G stroja prikazan je na slici 4.3 za slučaj DUB ciklusa. Razmještaj optimalnih radnih točki je kvalitativno sličan za oba modela, tj. smještaju se u područja visoke korisnosti tj. male potrošnje oba stroja. Valja primijetiti da je optimalno rješenje u slučaju EXT-BWD model takvo da su radne točke MSUI-a dublje u području minimilane potrošnje, uz određeno žrtvovanje korisnosti energetske učinkovitijeg M/G stroja.

4. Optimiranje upravljačkih varijabli

Kod EXT-BWD modela svaka promjena stupnja prijenosa uvodi dodatne gubitke koje M/G stroj i baterija moraju pokriti.

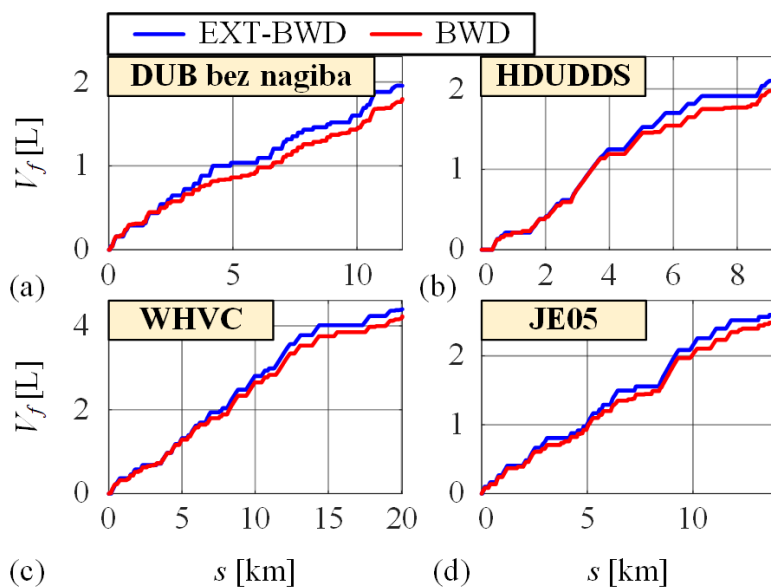
Tablica 4-1. Usporedni rezultati DP optimiranja upravljačkih varijabli BWD i EXT-BWD modela PHEV-a za razne vozne cikluse i CS režim rada.

		V_f [L]	$SoC(t_f)$ [%]	N_e [-]	N_g [-]
DUB bez nagiba	BWD	1.80 (+0.0%)	29.75 (+0.0%)	64 (+0.0%)	967 (+0.0%)
	EXT-BWD	1.96 (+8.9%)	29.76 (+0.0%)	28 (-56.3%)	555 (-42,6%)
HDUDDS	BWD	2.02 (+0.0%)	29.74 (+0.0%)	25 (+0.0%)	168 (+0.0%)
	EXT-BWD	2.12 (+5.0%)	29.89 (+0.5%)	13 (-48.0%)	92 (-45.0%)
WHVC	BWD	4.22 (+0.0%)	29.85 (+0.0%)	51 (+0.0%)	365 (+0.0%)
	EXT-BWD	4.40 (+4.3%)	29.69 (-0.5%)	26 (-49.0%)	190 (-47.9%)
JE05	BWD	2.54 (+0.0%)	29.80 (+0.0%)	54 (+0.0%)	466 (+0.0%)
	EXT-BWD	2.66 (+4.7%)	29.61 (-0.6%)	22 (-59.3%)	224 (-51.9%)

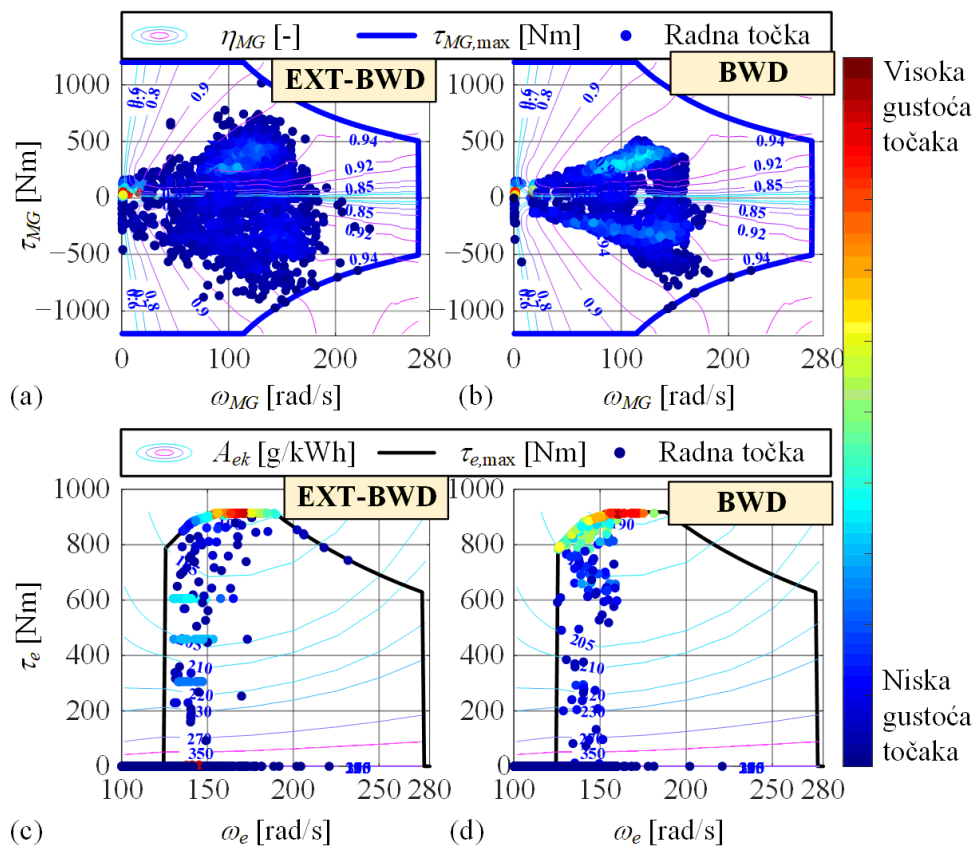


Slika 4-1. DP optimalni odzivi SoC-a po prijedenoj puti dobiveni primjenom BWD i EXT-BWD modela za razne vozne cikluse i CS režim rada.

4. Optimiranje upravljačkih varijabli



Slika 4-2. DP optimalni odzivi kumulativne potrošnje goriva po prijađenome putu dobiveni primjenom BWD i EXT-BWD modela za razne vozne cikluse i CS režim rada.



Slika 4-3. Razmještaj DP optimalnih radnih točaka MSUI-a i M/G stroja uz primjenu BWD i EXT-BWD modela, DUB ciklusa bez nagiba ceste i CS radnog režima.

4. Optimiranje upravljačkih varijabli

4.3.2. Rezultati optimiranja za BLND režim rada

Rezultati DP optimiranja u BLND režimu rada dani su u tablici 4-2 za iste vozne cikluse kao u tablici 4-1, ali uz njihovo repetitivno izvođenje kako bi se mogao ostvariti konačni uvjet $SoC_f = 30\%$ za početni uvjet $SoC_i = 90\%$. BWD model ponovno podcjenjuje potrošnju goriva, tako da je ona veća u odnosu na slučaj EXT-BWD modela u rasponu od 5.9% do 13.9% ovisno o voznom ciklusu. Iako su to slični iznosi povećanja potrošnje kao u slučaju CS režima rada, primjetno je da se najveći indeksi povećanja potrošnje kod BLND režima postižu za različite vozne cikluse nego kod CS režima (HDUDDS i WHVC za CS u odnosu na DUB za BLND). Slično kako kod CS režima rada, broj uključenja MSUI-a (N_e) i promjena stupnja prijenosa (N_g) smanjen je za oko 50% za EXT-BWD model u odnosu na BWD model.

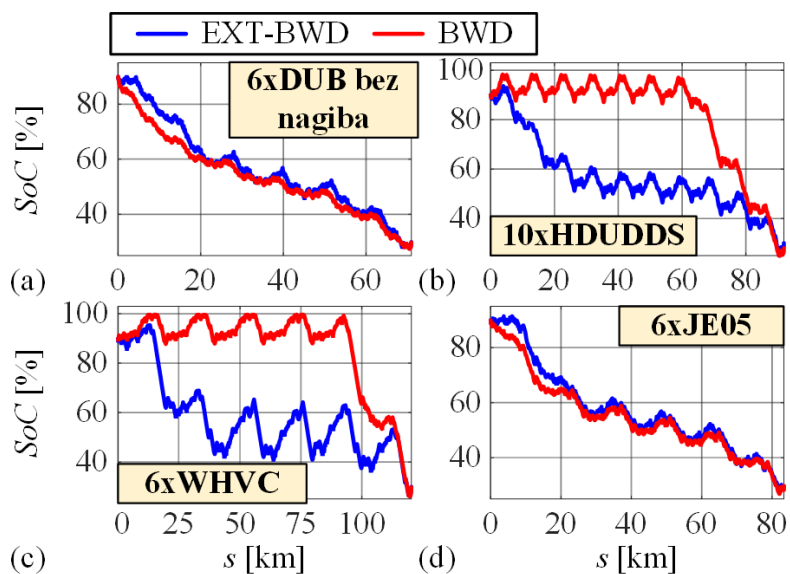
Tablica 4-2. Usporedni rezultati DP optimiranja upravljačkih varijabli BWD i EXT-BWD modela PHEV-a za razne repetitivne vozne cikluse i BLND režim rada.

		V_f [L]	$SoC(t_f)$ [%]	N_e [-]	N_g [-]
6xDUB bez nagiba	BWD	8.24 (+0.0%)	29.76 (+0.0%)	304 (+0.0%)	5791 (+0.0%)
	EXT-BWD	9.23 (+12.0%)	29.86 (+0.3%)	143 (-53.0%)	3336 (-42.4%)
10xHDUDDS	BWD	16.29 (+0.0%)	29.75 (+0.0%)	244 (+0.0%)	1572 (+0.0%)
	EXT-BWD	18.55 (+13.9%)	30.04 (+1.0%)	112 (-58.9%)	922 (-41.3%)
6xWHVC	BWD	21.60 (+0.0%)	29.82 (+0.0%)	288 (+0.0%)	2016 (+0.0%)
	EXT-BWD	23.68 (+9.6%)	29.94 (-0.4%)	118 (-49.0%)	1128 (-47.9%)
6xJE05	BWD	12.64 (+0.0%)	29.78 (+0.0%)	242 (+0.0%)	2752 (+0.0%)
	EXT-BWD	13.38 (+5.9%)	29.70 (-0.2%)	112 (-53.7%)	1295 (-52.9%)

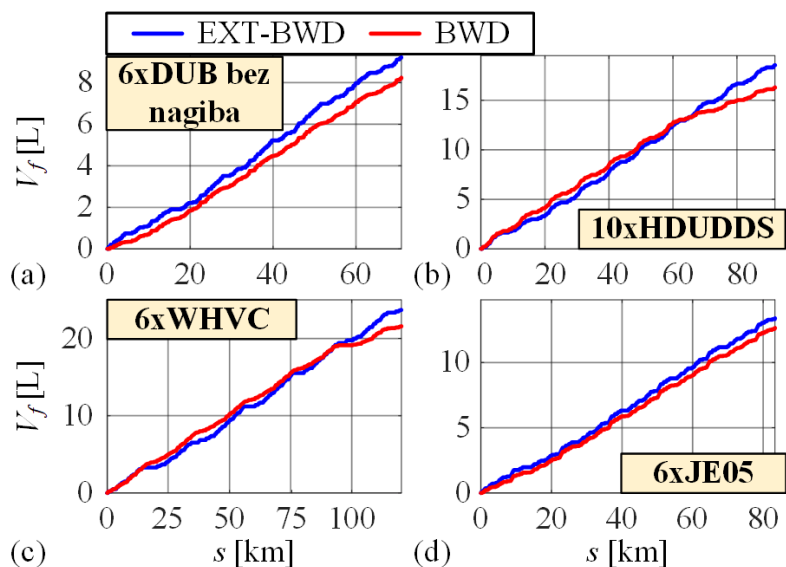
Na slikama 4-4 i 4-5 dani su odgovarajući optimalni odzivi SoC-a i kumulativne potrošnje goriva po prijedrenom putu. Primjetno je da se ove trajektorije najviše razlikuju kod dva modela za one vozne cikluse (HDUDDS i WHVC) za koje su potrošnje goriva bila najrazličitije (v. tablice 4-1 i 4-2). K tome, valja uočiti da iako je najčešći oblik trajektorije SoC-a linearan, javljaju se i nelinearni profili koji podsjećaju na CD-CS i CS-CD režime. Podrobnija analiza

4. Optimiranje upravljačkih varijabli

optimalnih odziva SoC-a za različite rubne uvjete i duljine voznih ciklusa, dobivenih na EXT-BWD modelu u BLND i CS režimu rada, dana je u potpoglavlju 4.4, dok su slične analize optimalnih odziva SoC-a dobivenih na BWD modelu izložene u [105].



Slika 4-4. DP optimalni odzivi SoC-a po prijedenoj puti dobiveni primjenom BWD i EXT-BWD modela za razne vozne cikluse i BLND režim rada.

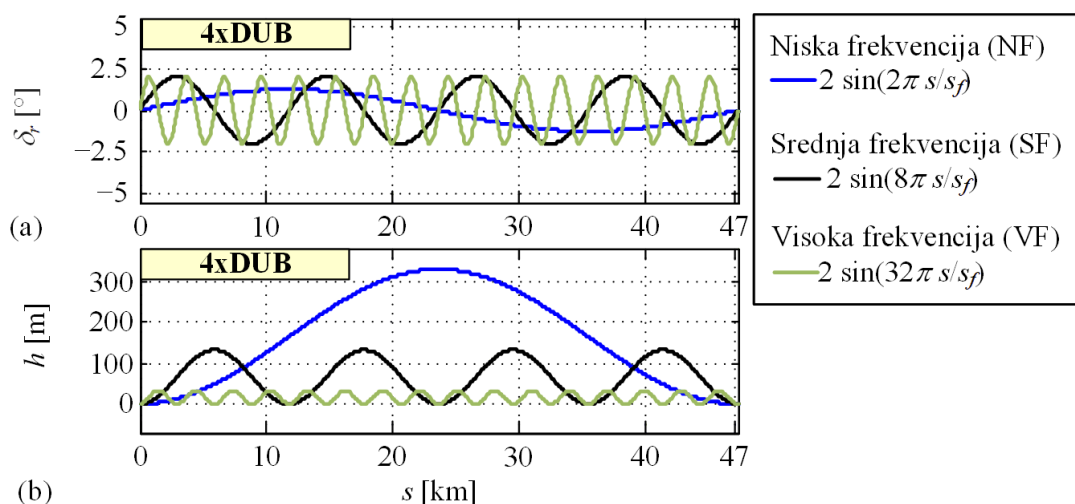


Slika 4-5. DP optimalni odzivi kumulativne potrošnje goriva po prijedenoj puti dobiveni primjenom BWD i EXT-BWD modela za razne vozne cikluse i BLND režim rada.

4.3.3. Rezultati optimiranja za slučaj promjenjivog nagiba ceste i BLND režima

Optimiranje upravljačkih varijabli za EXT-BWD model provedene su i za realan slučaj DUB ciklusa s promjenjivim nagibom ceste prikazanog na slici 2-7b. Da bi se dodatno ispitao utjecaj promjenjivog nagiba na optimalno ponašanje PHEV pogona, optimiranja su provedena preko repetitivnog 4xDUB ciklusa sa sinusnim profilima nagiba ceste po prijašnjem putu s različitim prostornim frekvencijama. Rezultati optimiranja za slučaj BWD modela izloženi su i diskutirani u [79].

Na slici 4-6a prikazana su tri razmatrana slučaja sinusnih profila nagiba ceste po prijašnjem putu, dok su na slici 4-6b prikazani pripadni profili nadmorskih visina. Slučaj niske frekvencije nagiba (NF) predstavlja scenarij relativno blagog penjanja na veliku nadmorsku visinu (340 m) te naknadnog spuštanja. Kod slučajeva srednje frekvencije (SF) i posebno visoke frekvencije nagiba (VF), radi se strmijim i višestrukim penjanjima na manje visine (redom 140 i 30 m nadmorske visine).



Slika 4-6. Razmatrani sinusni profili nagiba ceste po prijašnjem putu (a) te pripadni profili nadmorskih visina (b).

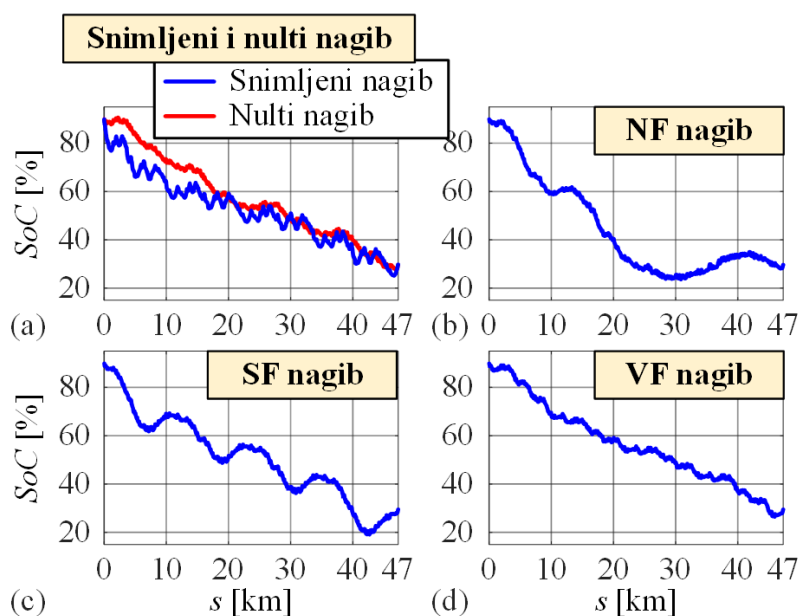
Rezultati optimiranja dobiveni za različite profile nagiba dani su u tablici 4-3 te uspoređeni sa slučajem nultog nagiba ceste. Uključivanje promjenjivog nagiba ceste u DUB ciklus povećava potrošnju goriva za 6.6%. Relativno povećanje potrošnje manje je za slučaj sinusnih nagiba ceste (do približno 2%). Nadalje, u prisustvu promjenjivog nagiba podloge, optimalna rješenja karakterizirana su manjim brojem uključivanja MSUI i promjene stupnja prijenosa (smanjenje je u rasponu od približno 20% do 33%). To se primjerice objašnjava duljim intervalima

4. Optimiranje upravljačkih varijabli

uključenja MSUI-a uslijed povećanog opterećenja na uzbrdici i duljim intervalima isključenja MSUI-a na nizbrdici kada je dominantno aktivan električni (regenerativni) rad. Konačno, prisustvo promjenjivog nagiba podloge ima značajan utjecaj na oblik optimalnih odziva SoC-a po putu (slika 4-7). Razlike su najveće kod nisko- i srednje-frekvencijskog nagiba zbog duljih intervala pražnjenja (uzbrdica) i regenerativnog punjenja baterije (nizbrdica).

Tablica 4-3. Rezultati DP optimiranja upravljačkih varijabli EXT-BWD modela PHEV-a za 4xDUB repetitivni vozni ciklus i različite profile nagiba ceste u BLND režimu rada.

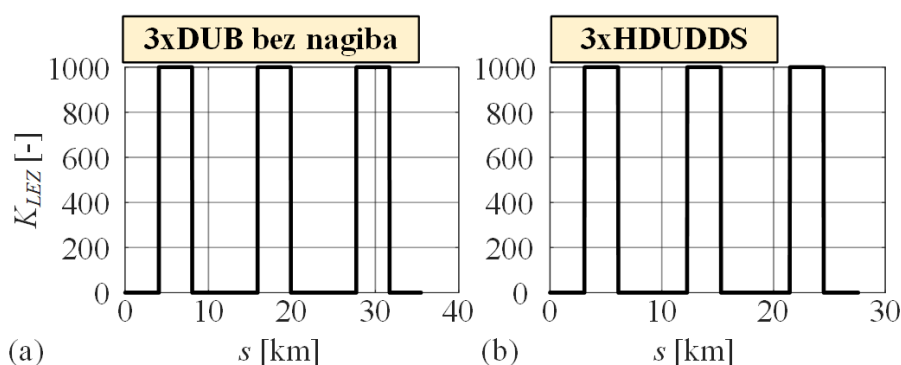
4xDUB ciklus	V_f [L]	$SoC(t_f)$ [%]	N_e [-]	N_g [-]
Nulti nagib ceste	5.28 (+0.0%)	29.86 (+0.0%)	85 (0.0%)	2220 (0.0%)
Snimljeni nagib ceste	5.63 (+6.6%)	29.50 (-1.2%)	69 (-18.8%)	1443 (-35.0%)
Niskofrekvencijski (NF nagib)	5.35 (+1.3%)	29.61 (-0.8%)	67 (-21.2%)	1667 (-24.9%)
Srednjefrekvencijski (SF nagib)	5.38 (+1.9%)	29.45 (-1.4%)	57 (-32.9%)	1643 (-26.0%)
Visokofrekvencijski (VF nagib)	5.29 (+0.2%)	29.43 (-1.4%)	69 (-18.8%)	1520 (-31.5%)



Slika 4-7. DP optimalni odzivi SoC-a po prijeđenom putu dobiveni za 4xDUB repetitivni vozni ciklus i različite profile nagibe te BLND režim rada.

4.3.4. Rezultati optimiranja za slučaj prisustva zone s niskom emisijom

Profili zona niskih emisija (LEZ) prikazani su na slici 4-8 preko binarnog faktora K_{LEZ} , ujedno korištenog i definiranog u izrazu (4-15) i također (4-19). Svaki LEZ (dan za $K_{LEZ} = 1000$) je širine 3km, a centrirani su oko sredine voznog ciklusa, što u slučaju DUB ciklusa predstavlja okretište autobusne linije centru grada (krajnja stanica Pile). Rezultati DP optimiranja upravljačkih varijabli dani su u tablici 4-4 za 3xDUB bez nagiba i 3xHDUDDS repetitivne cikluse u CS i BLND režimima rada, a dobiveni su uz primjenu EXT-BWD modela. Odgovarajući odzivi SoC-a i kumulativne potrošnje goriva dani su na slici 4-9. Ovi rezultati pokazuju da su optimalna rješenja takva da čim više izbjegavaju potrošnju goriva, tj. preferiraju električnu vožnju unutar LEZ-ova. Time se ukupno gledano povećava potrošnja goriva za između 2.4% i 5.0% ovisno o ciklusu i režimu rada, no ona je virtualno nula u LEZ-u tj. ekozonama (MSUI se koristi samo kod visokih zahtjevima za snagom, a uz to se smanjuje i buka). K tome, smanjuje se broj uključivanja MSUI-a i promjena stupnja prijenosa, jer se forsira isključenje MSUI u LEZ-u, da bi se onda više koristio van LEZ-a radi dopune baterije. Trajektorije SoC-a značajnije odstupaju od linearnih, jer strmo padaju unutar LEZ-a, da bi se oporavljale van LEZ-a. Drugim riječima, optimalno rješenje anticipativno podiže (u slučaju CS režima) ili održava SoC (u slučaju BLND režima) prije ulaska u LEZ kako bi se baterija unaprijed pripremila za agresivnije pražnjenje kroz LEZ. Također, optimalni odzivi SoC-a prate po dijelovima linearni trend koji se može iskoristiti za metodu generiranja referentne SoC trajektorije u slučaju prisustva LEZ-ova detaljnije opisane u osmom poglavlju.

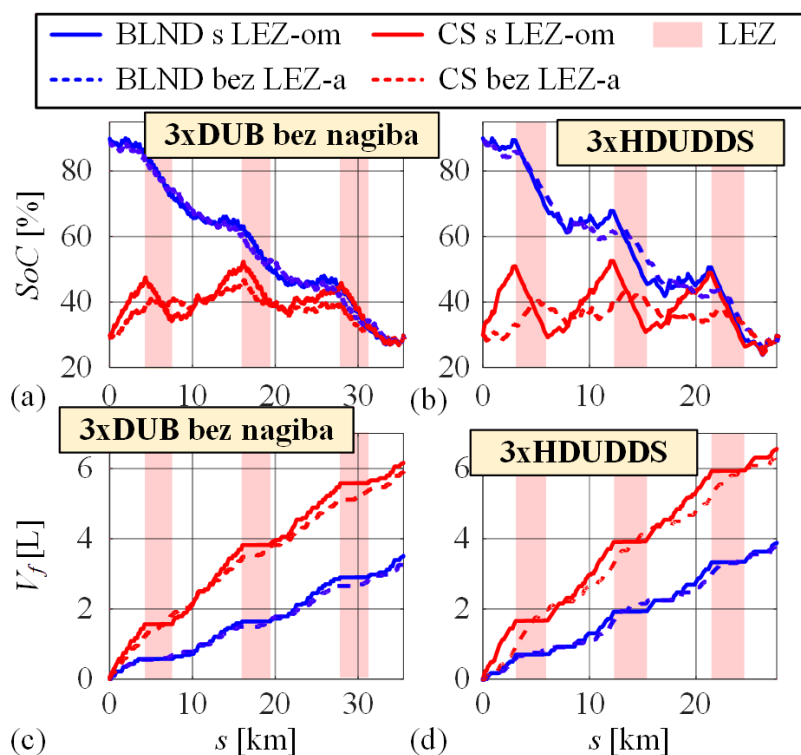


Slika 4-8. Profili (težinskih faktora) LEZ-a za 3xDUB bez nagiba (a) i 3xHDUDDS (b) repetitivne vozne cikluse.

4. Optimiranje upravljačkih varijabli

Tablica 4-4. Rezultati DP optimiranja upravljačkih varijabli EXT-BWD modela PHEV-a za 3xDUB i 3xHDUDDS repetitivne vozne cikluse s i bez prisustva LEZ-a u BLND i CS režimima rada.

			V_f [L]	$SoC(t_f)$ [%]	N_e [-]	N_g [-]
3xDUB bez nagiba	CS	bez LEZ-a	5.91 (+0.0%)	29.81 (+0.0%)	67 (+0.0%)	1668 (+0.0%)
		s LEZ-om	6.17 (+4.4%)	29.76 (-0.2%)	59 (-11.9%)	1656 (-0.7%)
	BLND	bez LEZ-a	3.34 (+0.0%)	29.84 (+0.0%)	65 (+0.0%)	1670 (+0.0%)
		s LEZ-om	3.51 (+5.0%)	29.76 (-0.3%)	57 (-12.3%)	1669 (-0.1%)
3xHDUDDS	CS	bez LEZ-a	6.35 (+0.0%)	29.90 (+0.0%)	44 (+0.0%)	272 (+0.0%)
		s LEZ-om	6.56 (+3.3%)	29.70 (-0.2%)	36 (-18.2%)	288 (+5.9%)
	BLND	bez LEZ-a	3.80 (+0.0%)	29.90 (+0.0%)	43 (+0.0%)	270 (+0.0%)
		s LEZ-om	3.89 (+2.4%)	29.73 (-0.2%)	36 (-16.3%)	279 (+3.3%)



Slika 4-9. DP optimalni odzivi SoC-a po prijednom putu dobiveni za 3xDUB i 3xHDUDDS repetitivne vozne cikluse s i bez prisustva LEZ-a te BLND i CS režimima rada.

4.4. Analiza optimalnih trajektorija stanja napunjenosti baterije

Sa stanovišta generiranja optimalne referentne trajektorije SoC-a kao ulaza nadređene strategije upravljanja u BLND režim (poglavlje 8), od posebnog interesa je analizirati odzive SoC-a dobivene DP optimiranjem.

4.4.1. Analiza optimalne brzine promjene SoC-a

Optimalna brzina promjene SoC-a, $\dot{S}oC$, u ovisnosti o zahtijevanoj snazi na ulazu u transmisiju P_d danoj izrazom (2-6) prikazana je na slici 4-10 za slučajeve različitih repetitivnih ciklusa (bez nagiba) u BLND režimu rada i uz primjenu EXT-BWD modela. Iz danih grafova jasno se mogu identificirati karakteristični klasteri radnih točaka, koji se odnose na regenerativno kočenje te električni i hibridni način rada. Regenerativno kočenje aktivno je dok je $P_d < 0$, kada se kočna snaga M/G stroja pohranjuje u bateriju što rezultira rastućim SoC-om tj. pozitivnom vrijednošću derivacije $\dot{S}oC$. Električni način rada aktivan je uz $P_d > 0$, baterija se prazni, te je $\dot{S}oC < 0$. Objedinjena karakteristika $\dot{S}oC(P_d)$ za regenerativno kočenje i električni način rada ima kvadratni oblik (v. crtkanu zelenu krivulju na slici 4-10). U slučaju kad se zanemari utjecaj potrošnje energije od strane pomoćnih uređaja, karakteristika $\dot{S}oC(P_d)$ za električni način rada predstavlja minimalnu (donju) vrijednost (v. sliku 4-10), tj. pražnjenje baterije je najagresivnije u tom slučaju. Hibridni način rada rezultira radnim točkama u području $P_d > 0$, pri čemu je $\dot{S}oC$ veće od onog u električnom načinu rada. Ovdje se MSUI koristi za rasterećenje M/G stroja (i posredno baterije) uz $\dot{S}oC < 0$ ili za direktno punjenje baterije preko M/G stroja uz $\dot{S}oC > 0$. Pritom se iz optimalnih rezultata sa slike slike 4-10 može i identificirati prag zahtijevane snage $P_{d,th}$ iznad kojeg se pretežito koristi hibridni način rada. Ovaj prag nalazi se za sva četiri ciklusa u području između 25 i 50 kW.

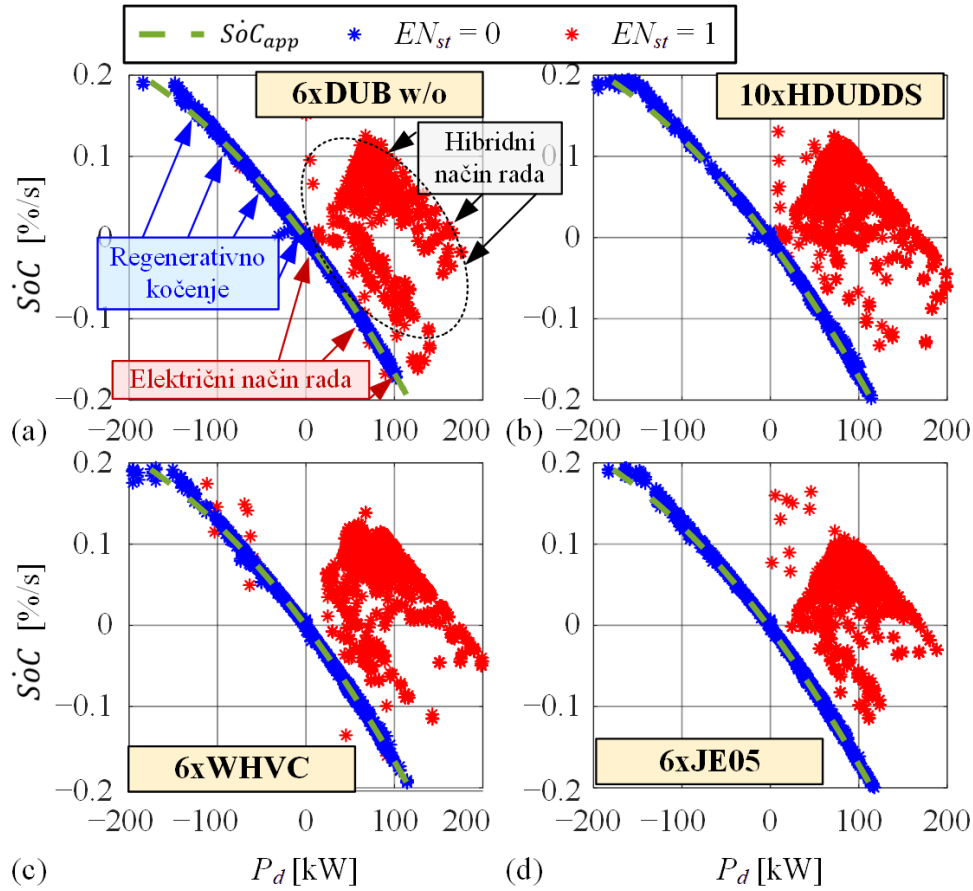
Spomenuta kvadratna ovisnost $\dot{S}oC(P_d)$ u regenerativnom kočenju i električnom načinu rada zapisuje se kao:

$$\dot{S}oC_{app} = k_{1,SoC}P_d^2 + k_{2,SoC}P_d, \quad (4-24)$$

te vrijedi, tj. ima iste parametre neovisno o voznom ciklusu, prisustvu nagiba ili LEZ-a [79]. Vrijedi primijetiti da izraz (4-24) ne uključuje slobodan parametar, tj. vrijedi $\dot{S}oC_{app} = 0$ za $P_d = 0$. Parametri regresijskog modela (4-22) dobiveni su metodom najmanjih kvadrata iz podataka

4. Optimiranje upravljačkih varijabli

za sva četiri ciklusa (slika 4-10) te za razmatrani PHEV iznose: $k_{1,SoC} = -0.0011$ i $k_{2,SoC} = -0.0015$.



Slika 4-10. Optimalne brzine promjene SoC-a, \dot{SoC} , u ovisnosti o zahtijevanoj snazi na ulazu u transmisiju P_d za slučajeve raznih repetitivnih voznih ciklusa i BLND režim.

S druge strane, na slici 4-10 ne uočava se jasna ovisnost $\dot{SoC}(P_d)$ u hibridnom načinu rada. Stoga se optimalni odzivi SoC-a po putu razlažu na parove promjene SoC-a, ΔSoC_k , te promjene puta Δs_k za sve korake uzorkovanja. Parovi $(\Delta SoC_k \Delta s_k)$ grupiraju se u faze električnog načina rada, hibridnog načina rada i regenerativnog kočenja.

$$\Delta SoC_{el} = \Delta SoC_k, \quad \Delta s_{el} = \Delta s_k \quad \forall P_{d,k} > 0 \text{ i } EN_{st,k} = 0, \quad (4-25)$$

$$\Delta SoC_{hib} = \Delta SoC_k, \quad \Delta s_{hib} = \Delta s_k \quad \forall P_{d,k} > 0 \text{ i } EN_{st,k} = 1, \quad (4-26)$$

$$\Delta SoC_{reg} = \Delta SoC_k, \quad \Delta s_{reg} = \Delta s_k, \quad \forall P_{d,k} \leq 0, \quad (4-27)$$

Dobiveni vektori redom se uključuju u vektor promjena SoC-a i prijedelog puta

$$\Delta SoC_{rec} = \Delta SoC_{el} - \Delta SoC_{hib} - \Delta SoC_{reg}, \quad (4-28)$$

4. Optimiranje upravljačkih varijabli

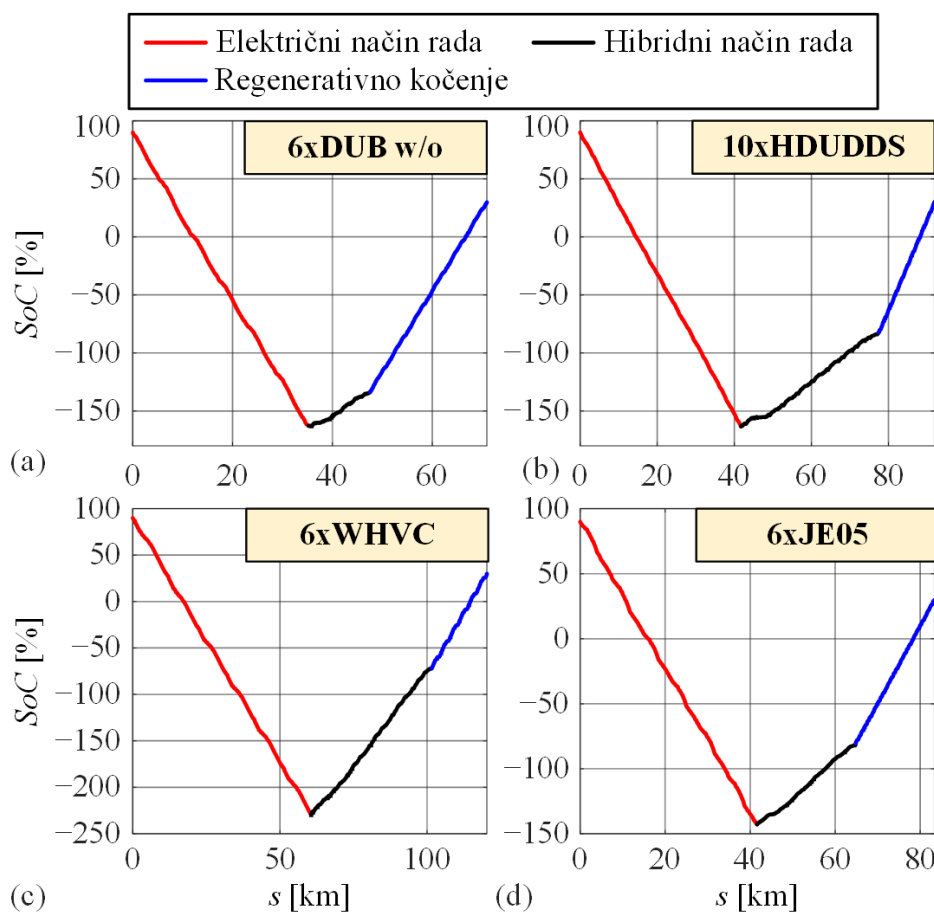
$$\Delta s_{rec} = \Delta s_{el} \frown \Delta s_{hib} \frown \Delta s_{reg}, \quad (4-29)$$

gdje simbol \frown označava ulančavanje vektora. Na kraju se rekurzivno rekonstruira optimalni preuređeni odziv SoC-a:

$$SoC_{rec,k+1} = SoC_{rec,k} + \Delta SoC_{rec,k}, \quad (4-30)$$

$$s_{rec,k+1} = s_{rec,k} + \Delta s_{rec,k}. \quad (4-31)$$

koji je razložen po načinima rada kako je prikazano na slici 4-11 za različite vozne cikluse. Ovako prikazani, razloženi grafovi ukazuju na linearnu ovisnost SoC-a o putu, što je posebno izraženo za električnom i regenerativnom načinu rada, dok se u hibridnom načinu rada uočavaju slabe oscilacije.



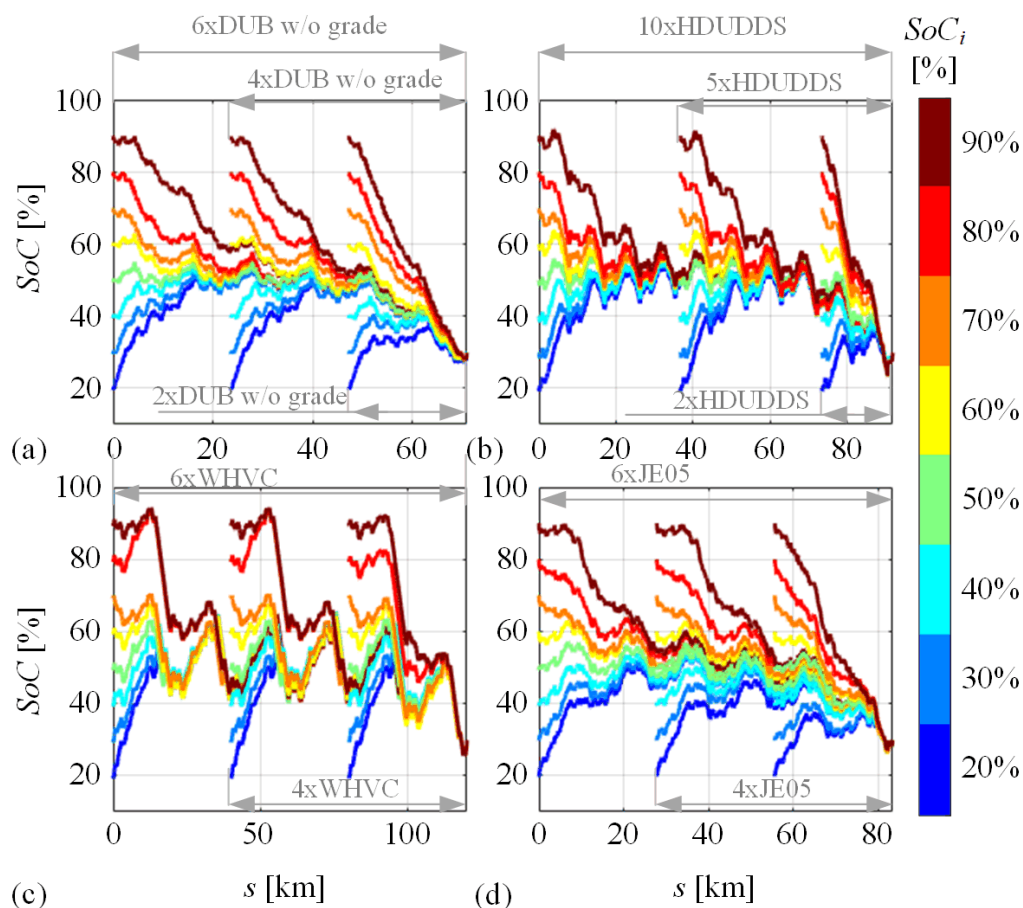
Slika 4-11. Optimalni odzivi SoC-a po prijednom putu nakon preuređenja po fazama električne vožnje, hibridne vožnje i regenerativnog kočenja za različite vozne cikluse i BLND režim.

4.4.2. Analiza utjecaja duljine prijeđenog puta na oblik optimalnih odziva SoC-a

Funkcije cilja pohranjene u unazadnoj fazi DP algoritma (v. izraz (4-8)), primijenjenog na EXT-BWD modelu u BLND-načinu rada, iskorištene su za generiranje skupa optimalnih odziva SoC-a po prijeđenom putu s različitim početnim vrijednostima SoC-a i različitim duljinama puta [105], a rezultati su prikazani na slici 4-12. Zbog zadanog konačnog uvjeta $SoC_f = 30\%$ (v. izraz (4-11)), svi odzivi završavaju upravo na toj, finalnoj vrijednosti SoC-a. Optimalni odzivi SoC-a dobiveni na dugačkim repetitivni ciklusima poput 6xDUB, 10xHDUDDS, 6xWHVC te 6xJE05 prate uzorak CD-CS-CD režima. S obzirom na analize optimalnih SoC odziva i rasporeda radnih točaka baterije danih na slici 4-13 može se zaključiti da u slučajevima dugačkih voznih ciklusa optimalna rješenja preferiraju držati SoC u vrijednostima između 40% i 60% kroz većinu ciklusa neovisno o početnoj vrijednosti SoC_i . To se može objasniti relativno većom učinkovitošću baterije u tom rasponu SoC-a za širi raspon iznosa izlazne snage baterije P_{batt} (v. sliku 4-13).

Kod kraćih repetitivnih ciklusa s manjim brojem ponavljanja, a shodno tome i kraćom duljinom ciklusa, optimirani odzivi SoC-a prate jasniji linearni trend za slučajeve početnih vrijednosti SoC-a iznad ~50%. U ovim slučajevima SoC se ne mora održavati u područjima relativno veće učinkovitosti baterije kroz cijeli ciklus, nego se postepeno prazni kroz ciklus. Veće oscilacije optimalnog odziva SoC-a oko linearnog trenda vidljive su za HDUDDS i WHVC cikluse, gdje M/G stroj koji se napaja od baterije pokriva relativno intenzivnije zahtjeve za ubrzanjem i kočenjem od onih koji su prisutni za DUB i JE05 cikluse. U slučajevima s početnom vrijednošću SoC_i ispod 50%, baterija se prvo puni pomoću MSUI-a kako bi SoC došao u područje maksimalne učinkovitosti između 40% i 60%, gdje se ponovno održava kroz veći dio ciklusa te pri kraju ciklusa ruši prema SoC_f .

4. Optimiranje upravljačkih varijabli

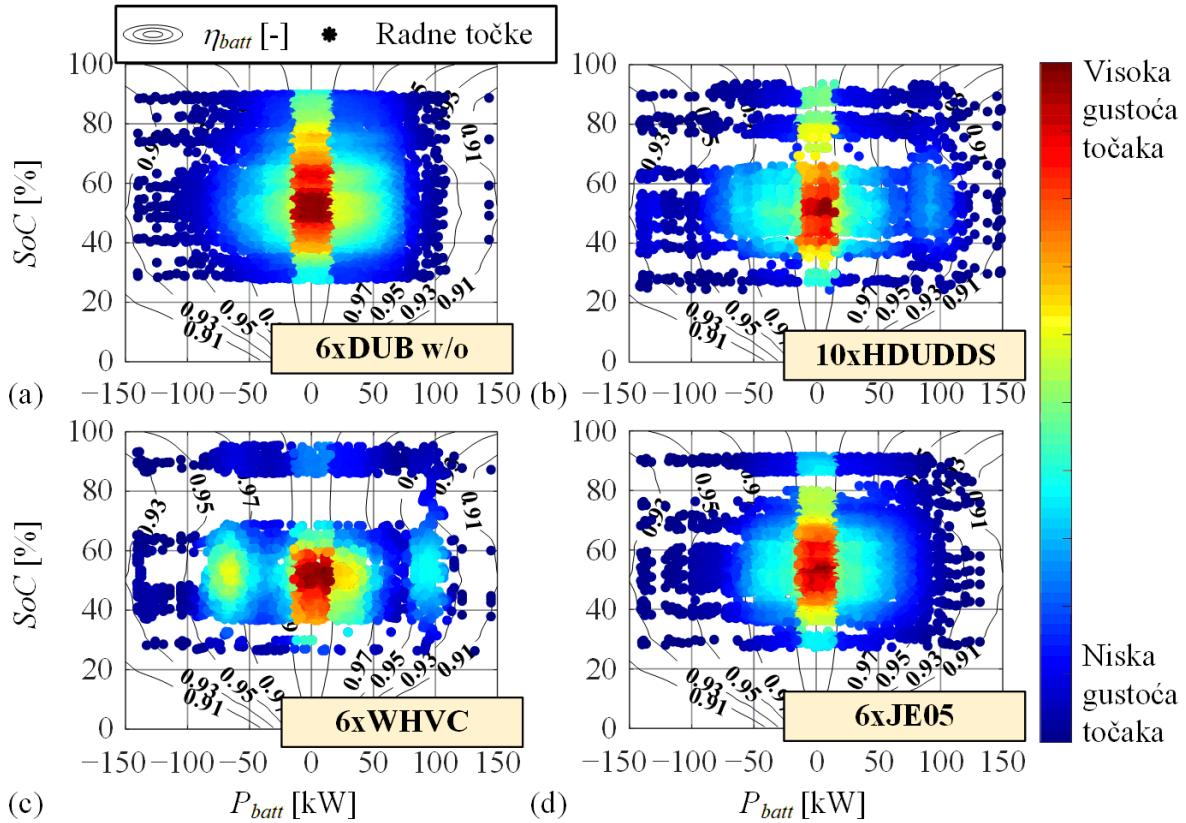


Slika 4-12. Optimalni odzivi SoC-a po prijednom putu rekonstruirani iz DP-optimalnih rezultata iz unazadne faze i prikazani za različite duljine repetitivnih ciklusa i početne vrijednosti SoC-a.

Nadalje se detaljnije analizira razlika u izgledima optimalnih odziva SoC-a prikazanih na slici 4-12 za 6xDUB i 6xJE05 cikluse (linearniji odziv) naspram onih dobivenih za 10xHDUDDS i 6xWHVC cikluse (nelinearniji, CD-CS-CD odziv). Ova razlika ima poveznicu s rasporedom radnih točaka baterije. Kako je već spomenuto, u oba slučaja najviše radnih točaka baterije grupirano je oko vrijednosti SoC-a od 50%, gdje je i korisnost baterije najviša (v. također sliku 2-13). No, u slučajevima DUB i JE05 ciklusa radne točke jednoliko su raspoređene i u području SoC-a između 30% i 90%. S druge strane, kod HDUDDS i WHVC ciklusa, optimalna rješenja primjetno izbjegavaju područja SoC-a između 60% i 80%, pogotovo na većim apsolutnim vrijednostima izlazne snage P_{batt} gdje je manja učinkovitost. HDUDDS i WHVC ciklusi imaju periode izraženijeg ubrzanja i kočenja nego DUB i JE05 ciklusi što predstavlja dodatna opterećenja na bateriju kroz izlaznu snagu P_{batt} . Kako bi se minimizirali električni gubici baterije (tj. ohmski gubici) u tim periodima, optimalna rješenja za HDUDDS i WHVC cikluse izbjegavaju područja SoC-a koja imaju manju učinkovitost za velike iznose izlazne snage P_{batt}

4. Optimiranje upravljačkih varijabli

a time i velike struje I_{batt} . Može se zaključiti da izgled optimalnih odziva SoC-a za različite duljine puta ovisi o karakteristikama učinkovitosti baterije kao i o specifičnostima voznih ciklusa (v. [105] za detaljniju analizu).



Slika 4-13. DP-optimalne radne točke baterije za razne repetitivne vozne cikluse i BLND režim rada ($SoC_i = 90\%$).

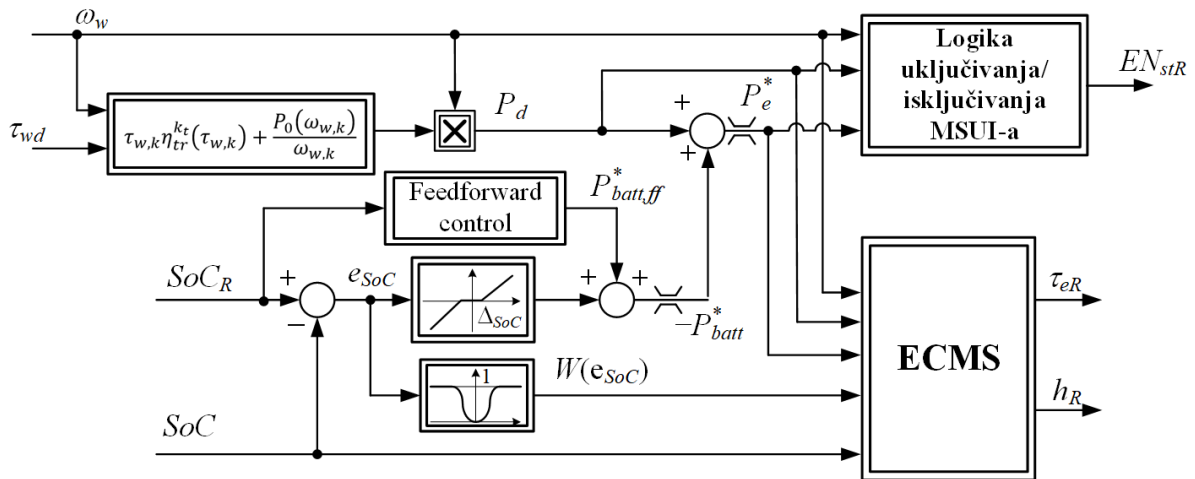
5. Nadređena strategija upravljanja

U ovom poglavlju izlaže se nadređena strategija upravljanja, koja prema slici 3-4 upravlja tokovima snage te zadaje reference podređenoj strategiji opisanoj u poglavlju 3. Ciljevi strategije upravljanja su maksimiziranje učinkovitosti pogonskog sklopa PHEV-a, uz zadržavanje visokog stupnja udobnosti vožnje te isporuku zahtijevanog momenta kotača i praćenje reference SoC-a. Strategija se postavlja u dvije inačice, ovisno o tome koristi li se BWD ili EXT-BWD model vozila. Ispituje se u odnosu na globalno DP-optimalno rješenje, te simulacijom na preciznom, FWD modelu vozila.

5.1. Formulacija strategije upravljanja

5.1.1. Temeljna struktura strategije upravljanja

Predložena strategija upravljanja prikazan je blokovskim dijagramom na slici 5-1. Strategija se temelji se na kombiniranju regulatora zasnovanog na bazi pravila (RB regulatora) i minimiziranju ekvivalentne potrošnje goriva (ECMS), te se nadalje označava kao RB+ECMS strategija [34], [100].



Slika 5-1. Blokovski dijagram RB+ECMS strategije upravljanja tokovima snage PHEV-a.

5.1.2. RB regulator

RB dio strategije sastoji se od regulatora SoC-a te logike za uključivanje i isključivanje MSUI-a. SoC regulator je proporcionalnog (P) tipa s mrtvom zonom širine Δ_{SoC} . Ako je pogreška

5. Nadređena strategija upravljanja

regulacije SoC-a, $e_{SoC} = SoC_R - SoC$, po apsolutnoj vrijednosti veća od praga mrtve zone ΔSoC , SoC regulator zadaje zahtijevanu snagu pražnjenja baterije $-P_{batt}^* = K_{SoC}(e_{SoC} - \Delta SoC \cdot \text{sgn } e_{SoC})$ kako bi dopunio ($P_{batt}^* < 0$) ili ispraznio bateriju ($P_{batt}^* > 0$) radi zadržavanja SoC blizu referentne vrijednosti SoC_R . U slučaju BLND režima rada, u kojem je referenca SoC_R vremenski promjenjiva (poglavlje 2), SoC regulator proširuje se s unaprijednim upravljanjem (engl. feedforward control) kako bi se poboljšala kvaliteta slijeđenja referentne trajektorije SoC_R . Zakon predupravljanja temelji se na modelu baterije (2-10), čijom se inverzijom uz supstituciju $SoC = SoC_R$ dobiva

$$P_{batt,ff}^* = \frac{U_{oc}^2(SoC) - \left(2Q_{\max}R(SoC)\dot{SoC}_R + U_{oc}(SoC)\right)^2}{4R(SoC)}. \quad (5-1)$$

U CS režimu vrijedi $SoC_R = \text{const.}$, tj. $\dot{SoC}_R = 0$, što daje $P_{batt,ff}^* = 0$ te strategija počiva isključivo na SoC regulatoru.

Istovremeno se iz signala zahtijevanog ukupnog momenta kotača τ_{wd} i brzine kotača $\omega_w = v_w/r_w$ izračunava zahtijevana ulazna snaga transmisije P_d dana izrazom (2-6). Zbrajanjem zahtjeva za snagom od strane vozača (P_d) i SoC regulatora ($-P_{batt}$) dobiva se referentna snaga MSUI-a P_e^* . Ovisno o ovoj snazi i unaprijed definiranim pragovima uključanja/isključanja MSUI-a određuje se stanje uključanja motora EN_{stR} . Također, referenca snage motora P_e^* uvodi se u ECMS algoritam koji alokira upravljačke varijable τ_{eR} i h_R , tj. određuje optimalnu radnu točku motora.

MSUI će se uključiti ($EN_{stR} = 1$) ako je zahtijevana snaga P_e^* veća ili jednaka pragu uključanja P_{on} , dok u slučaju kada P_e^* padne ispod praga isključanja $P_{off} < P_{on}$ MSUI se isključuje ($EN_{stR} = 0$). Uvođenje histereze $P_{hyst} = P_{on} - P_{off}$ osigurava da se motor ne isključuje prečesto, kako bi se smanjili dinamički gubici te unaprijedila voznost i trajnost pogona. MSUI će ostati uključen bez obzira na iznos snage P_e^* u iznimnom slučaju kada M/G stroj ne može sam dostaviti traženu snagu na kotačima zbog ograničenja njegovog momenta prema slici 2-3a. S obzirom na navedeno, logika uključanja MSUI-a može se opisati izrazom

$$EN_{st,k} = \begin{cases} 0, & \text{ako } P_{e,k}^* < P_{off} \text{ i } \tau_{MG,\max}\omega_{MG,k} > P_{d,k}, \\ EN_{st,k-1}, & \text{ako } P_{e,k}^* \geq P_{off} \text{ i } P_{e,k}^* < P_{on} \text{ i } \tau_{MG,\max}\omega_{MG,k} > P_{d,k}, \\ 1, & \text{u suprotnom,} \end{cases} \quad (5-2)$$

5.1.3. Minimizacija ekvivalentne potrošnje goriva (ECMS)

ECMS provodi trenutačno optimiranje referentnih vrijednosti momenta MSUI-a (τ_{eR}) i prijenosnog omjera (h_R) s ciljem minimizacije ekvivalentne potrošnje goriva $\dot{m}_{eq,k}$ [34], [100]:

$$\min_{\tau_{eR,k}, h_{R,k}} \dot{m}_{eq,k} = \dot{m}_{f,k} + \dot{m}_{batt,k} = \begin{cases} \dot{m}_{f,k} + A_{ek,k} \eta_{battc,k} P_{batt,k}, & \text{za } P_{batt,k} \leq 0 \\ \dot{m}_{f,k} + \bar{A}_{ek} \eta_{battd,k}^{-1} P_{batt,k}, & \text{za } P_{batt,k} > 0 \end{cases} \quad (5-3)$$

gdje se ekvivalentna potrošnja sastoji od stvarnog masenog protoka goriva \dot{m}_f definiranog izrazom (2-7) i virtualnog masenog protoka goriva \dot{m}_{batt} kojim se pokriva snaga baterije P_{batt} . Maseni protok \dot{m}_f određuje se primjenom jednadžbi BWD modela (2-4) i (2-7) uz supstituciju $\tau_e = \tau_{eR}$, dok se snaga baterije računa se prema izrazima (2-4), (2-5) i (2-9) uz $\tau_e = \tau_{eR}$ i $h = h_R$. Virtualni maseni protok goriva \dot{m}_{batt} posebno je definiran u jednadžbi (5-3) za slučajeve pražnjenja ($P_{batt} > 0$) i punjenja baterije ($P_{batt} \leq 0$) i izravno je proporcionalan izlaznoj snazi baterije P_{batt} . Prilikom punjenja baterije, \dot{m}_{batt} ovisi o trenutnoj specifičnoj potrošnji goriva A_{ek} danoj mapom na slici 2-3b, te o učinkovitosti baterije $\eta_{batt,c}$ koja uzima u obzir kružne gubitke prilikom punjenja i pražnjenja baterije [34]:

$$\eta_{battc} = \frac{P_{batt,d}}{P_{batt,c}} = \frac{U_{oc}(SoC) - I_{batt}R(SoC)}{U_{oc}(SoC) + I_{batt}R(SoC)} \quad (5-4)$$

gdje je I_{batt} definiran izrazom (2-11). Prilikom pražnjenja baterije, \dot{m}_{batt} se računa iz srednje specifične potrošnje goriva \bar{A}_{ek} , koja se odnosi na punjenje baterije u prošlosti, te o trenutnoj učinkovitosti baterije $\eta_{batt,d}$ danoj s izrazom (2-12) tj. s

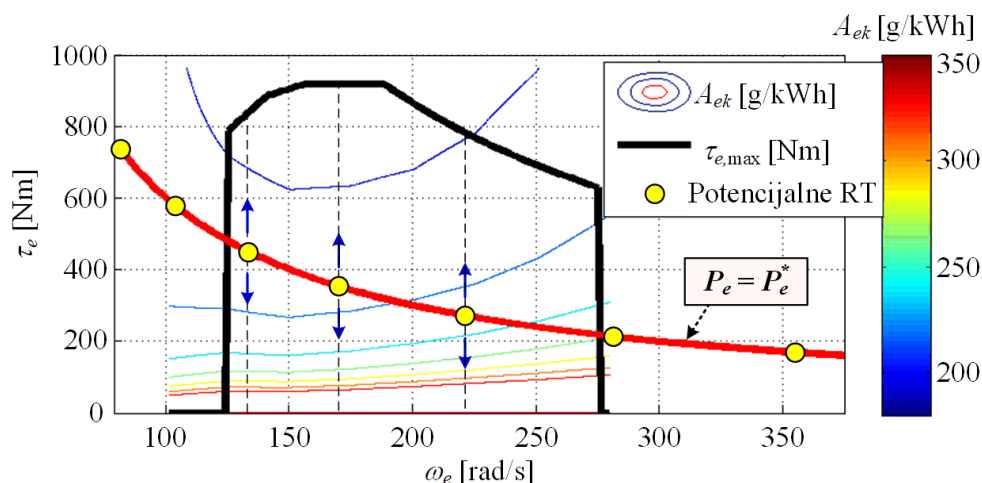
$$\eta_{battd} = \frac{P_{batt}}{P_{batt} + I_{batt}^2 R(SoC)} \quad (5-5)$$

Parametar \bar{A}_{ek} se postavlja uz pretpostavku da će u glavnini slučajeva radne točke motora biti postavljene u područje minimalne specifične potrošnje motora na ili u blizini maksimalne karakteristike momenta (v. rezultate optimiranja u poglavlju 4). Tako se \bar{A}_{ek} može postaviti u srednju vrijednost A_{ek} tog optimalnog područja ili naprosto na minimalni iznos A_{ek} cijelog područja tj. mape motora [34], [100]. Potonji pristup je primijenjen ovdje, što $\bar{A}_{ek}=185$ g/kWh (v. žute točke na slici 2-3b).

ECMS nominalno minimizira ekvivalentnu potrošnju goriva \dot{m}_{eq} duž hiperbolne krivulje konstantne zahtijevane snage MSUI-a $P_e = P_e^*$ (slika 5-2). Drugim riječima, ECMS traži

5. Nadređena strategija upravljanja

optimalnu vrijednost stupnja prijenosa h_R , tj. odgovarajuće brzine vrtnje motora $\omega_{eR} = i_o h_R \omega_w$, za koju se dobiva minimalna vrijednost ekvivalentne potrošnje goriva prema izrazu (5-3). Druga upravljačka varijabla, tj. referenca momenta motora τ_{eR} , proizlazi izravno iz zahtijevane snage P_e^* i optimalne brzine ω_{eR} , odnosno vrijedi $\tau_{eR} = P_e^* / \omega_{eR}$. Time se kroz zahtjev za striktnim ispunjenjem zahtjeva $P_e = P_e^*$ koristi samo jedan stupanj upravljanja, tj. govori se o 1D-ECMS-u [34].



Slika 5-2. Ilustracija principa minimizacije ekvivalentne potrošnje goriva (ECMS; dano za radnu točku $v_v = 30 \text{ km/h}$ i $P_e^* = 60 \text{ kW}$).

Ako je SoC blizu reference SoC_R , tj. ako održivost SoC-a nije ugrožena, aktivira se i drugi stupanj slobode unutar ECMS-a, tj. odustaje se od striktnog zadovoljenja zahtjeva $P_e = P_e^*$. Time se pored stupnja prijenosa h_R optimira i referenca momenta motora τ_{eR} (v. plave strelice na slici 5-2), kako bi se postigla bolja učinkovitost pogona, tj. u konačnici smanjena potrošnja goriva. Pritom se područje pretraživanja optimalne referentne momenta motora postavlja ovisnim o pogreški regulacije SoC-a, $e_{SoC} = SoC_R - SoC$, tj. širi se uz manje pogreške regulacije SoC-a:

$$\tau_{eR,low}(e_{SoC}) \leq \tau_{eR} \leq \tau_{eR,high}(e_{SoC}), \quad (5-6)$$

uz

$$\tau_{eR,low} = \frac{1}{\omega_e} \left(P_{off} (1 - W(e_{SoC})) + P_e^* W(e_{SoC}) \right), \quad (5-7)$$

$$\tau_{eR,high} = \frac{1}{\omega_e} \left(\tau_{e,max}(\omega_e) (1 - W(e_{SoC})) + P_e^* W(e_{SoC}) \right), \quad (5-8)$$

gdje je $W(e_{SoC})$ težinska funkcija definirana kao

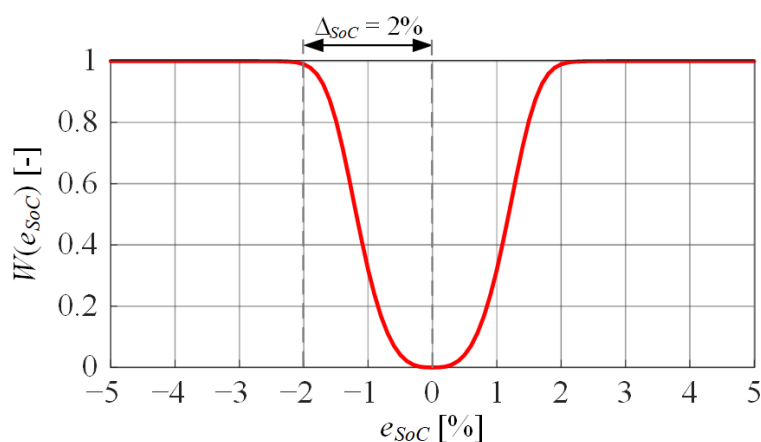
5. Nadređena strategija upravljanja

$$W(e_{SoC}) = |\tanh\{b[e_{SoC} - \tanh(e_{SoC})]\}|. \quad (5-9)$$

Iz uvjeta da se van mrtve zone $\pm \Delta_{SoC}$ regulatora SoC-a treba ispoštovati zahtjev $P_e = P_e^*$, tj. da treba vrijediti $W(e_{SoC}) = 1$ uz odstupanje od 1%, dobiva se sljedeći izraz za koeficijent oblikovanja težinske funkcije b :

$$b = \frac{\operatorname{arctanh}(0.99)}{\Delta_{SoC} - \tanh(\Delta_{SoC})}. \quad (5-10)$$

Tako podešena težinska funkcija prikazana je na slici 5-3.



Slika 5-3. Težinska funkcija u izrazima za širinu područja ECMS pretraživanja momenta MSUI-a.

U iznimnim slučajevima kad vrijede uvjeti $P_e^* < P_{off}$ ili $P_e^* \geq P_{off}$ i $P_e^* < P_{on}$ ali M/G stroj ne može sam dostaviti zahtijevanu snagu na ulazu u transmisiju P_d , tj. kada vrijedi $\tau_{MG,max}(\omega_{MG,k})\omega_{MG,k} \leq P_{d,k}$, MSUI će biti uključen (vidi jednadžbu (5-2)), a granice pretraživanja momenta MSUI-a će biti modificirane kao:

$$0 \leq \tau_{eR} \leq \frac{P_d}{\omega_e}. \quad (5-11)$$

Na taj način snaga MSUI-a ($P_e = \tau_e \omega_e$) nikad neće biti veća od zahtijevane snage P_d . Kako se moment M/G stroja τ_{MG} određuje kao razlika zahtijevanog momenta na ulazu u transmisiju P_d/ω_e i momenta MSUI-a (v. izraze (2-5) i (2-6)) τ_{MG} neće biti manji od nule ($\tau_{MG} > 0$ Nm) te će se onemogućiti punjenje baterije preko MSUI-a što bi potencijalno unijelo dodatna odstupanja od praćenja reference SoC-a.

5. Nadređena strategija upravljanja

U slučaju kad je MSUI isključen, tj. kada je pogon ostvaren samo preko M/G stroja, jedina upravljačka varijabla je referentni prijenosni omjer transmisije h_R . Varijabla h_R određuje se minimizacijom ukupne potrošnje električne snage u slučaju pražnjenja baterije ($P_{batt} > 0$), odnosno maksimizacijom rekuperirane električne snage u slučaju regenerativnog kočenja ($P_{batt} \leq 0$), stoga se koristi min operator u gornjem redu (5-12) umjesto operatora max:

$$h_{R,k} = \underset{h_{R,k}}{\operatorname{argmin}} \left(P_{batt,k} + I_{batt,k}^2 R(SoC_k) \right). \quad (5-12)$$

Optimizacijski problemi (5-3) i (5-12) rješavaju se linearnim pretraživanjem područja pretraživanja po upravljačkim varijablama h_R i τ_{eR} , pri čemu rezolucija potonje iznosi 2 Nm. U obzir se uzimaju samo ona rješenja koja zadovoljavaju sljedeća ograničenja na varijable pogona:

$$\begin{aligned} SoC_{\min} &\leq SoC_k \leq SoC_{\max} \\ P_{batt,\min} &\leq P_{batt,k} \leq P_{batt,\max} \\ 0 &\leq \tau_{e,k} \leq \tau_{e,\max}(\omega_{e,k}) \\ 0 &\leq \omega_{e,k} \leq \omega_{e,\max} \\ \tau_{MG,\min}(\omega_{MG,k}) &\leq \tau_{MG,k} \leq \tau_{MG,\max}(\omega_{MG,k}) \\ 0 &\leq \omega_{MG,k} \leq \omega_{MG,\max} \end{aligned} \quad (5-13)$$

5.1.4. Nadogradnja nadređene strategije s algoritmom za odgađanje prebacivanja stupnja prijenosa

Kako bi optimirala radnu točku u svakom koraku uzorkovanja i u konačnici minimizirala potrošnju goriva, nadređena strategija upravljanja formulirana u prethodnim odjeljcima sklona je učestaloj promjeni stupnja prijenosa. Međutim, to može u stvarnosti povećati gubitke i potrošnju zbog dinamičkih gubitaka zanemarenih u BWD modelu, te također smanjiti udobnost vožnje zbog čestih tranzijenata. Stoga se s ciljem smanjenja broja promjena stupnja prijenosa uvodi algoritam za odgađanje prebacivanja stupnja prijenosa (engl. Gear shift delay, GSD [100]). GSD pristup svodi se na proširenje ciljne funkcije (5-3) s diskontnim težinskim faktorom r_f :

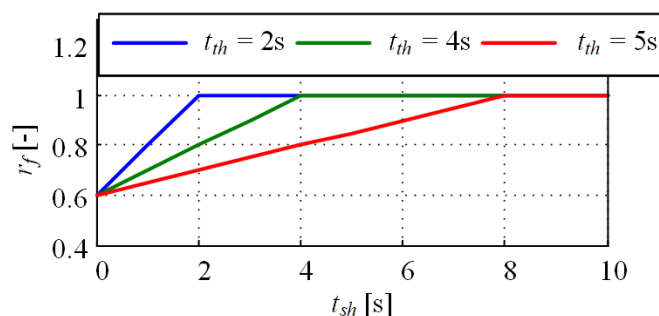
$$\dot{m}_{eq,k}(h_{R,k}) = r_f(t_{sh}, h_{k-1}, h_{R,k})(\dot{m}_f + \dot{m}_{batt}). \quad (5-14)$$

5. Nadređena strategija upravljanja

koji je definiran kao:

$$r_f = \begin{cases} r_0 + t_{sh} \frac{1 - r_0}{t_{th}}, & \text{za } t_{sh} < t_{th} \text{ i } h_{R,k} = h_{k-1}, \\ 1, & \text{u suprotnom,} \end{cases} \quad (5-15)$$

gdje je t_{sh} vrijeme proteklo od prethodne promjene stupnja prijenosa, h_{k-1} je prijenosni omjer aktivan u prethodnom koraku uzorkovanja, $r_0 = r_f(t_{sh} = 0) = 0,6$ je početna tj. minimalna vrijednost diskontnog faktora, a t_{th} je podesivi vremenski prag nakon kojeg diskontni faktor poprima nominalnu tj. maksimalnu vrijednost 1 (v. sliku 5-4). Vrijednosti diskontnog faktora r_f niže od 1, dakle one koje smanjuju funkciju troška (5-14), dodjeljuju se samo ako ECMS odabere ne mijenjati stupanj prijenosa ($h_{R,k} = h_{k-1}$) i ako je vrijeme proteklo od zadnje promjene stupnja prijenosa manje od t_{th} . Na ovaj se način uvodi blagi poticaj ECMS-u da ostane od promjene stupnja ako je proteklo vrijeme od prethodne promjene malo.



Slika 5-4. Ovisnost diskontnog faktora r_f o vremenu proteklom od zadnje promjene stupnja prijenosa t_{sh} za različite vrijednosti podesivog praga t_{th} .

5.1.5. Prilagodba nadređene strategije upravljanja za EXT-BWD model

EXT-BWD model PHEV-a uzima u obzir dinamičke gubitke prisutne tijekom uključanja MSUI-a i promjene stupnja prijenosa (slike 3-9), te se time po točnosti značajno približava FWD modelu, uz minimalno smanjenje numeričke učinkovitosti u odnosu na BWD model (poglavlje 3). Stoga se korištenjem EXT-BWD modela unutar ECMS otvara mogućnost poboljšanja kvalitete upravljanja, odnosno smanjenja potrošnje goriva u odnosu na primjenu BWD modela. Pritom se ne mijenja struktura ECMS-a opisana u odjeljku 5.1.1, ali se za određivanje ekvivalentne potrošnje goriva \dot{m}_{eq} dane izrazom (5-3) koristi EXT-BWD model definiran jednadžbama (3-4)–(3-21), uz memoriranje prethodne vrijednosti stupnja prijenosa (h_{k-1}), stanja uključanja MSUI-a ($EN_{st, k-1}$) i brzine kotača ($\omega_{w, k-1} = v_{v, k-1}/r_w$; v. 1/z elemente na slici 3-9) neophodnih za računanje dinamičkih gubitaka. Primjerice, stvarni moment MSUI-a

5. Nadređena strategija upravljanja

τ_e nije više jednak τ_{eR} , nego se umanjuje za iznos gubitka momenta motora $\Delta\tau_e$ za vrijeme trajanja prijelaznog procesa, definiranog izrazom (3-8). Pritom se moment M/G stroja τ_{MG} određuje prema izrazu (3-4), kako bi se kompenzirao dinamički gubitak momenta $\Delta\tau_e$ kao i dinamički gubitak snage $P_{dyn,loss}$. Nakon preciznijeg izračuna momenata MSUI-a i M/G stroja, stvarni i virtualni maseni protok goriva određuju se i koriste u ECMS algoritmu na isti način kao i za BWD model (odjeljak 5.1.3).

RB regulator prikazan na slici 5-1 i opisan u odjeljku 5.1.2 ostaje nepromijenjen. S druge strane, GSD proširenje ciljne funkcije (odjeljak 5.1.4) postaje nepotrebno, jer se uključenjem dinamičkih gubitaka prirodno obeshrabruje ECMS da prečesto izvodi promjene stupnja prijenosa. Sveukupna nadređena strategija upravljanja uz primjenu EXT-BWD modela označava se nadalje kao RB+ECMS-EXT.

5.2. Simulacijski rezultati

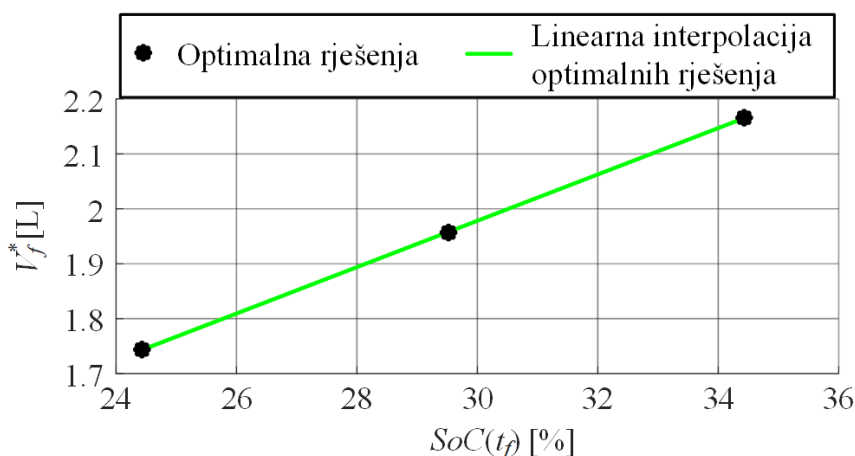
5.2.1. Rezultati simulacija uz primjenu EXT-BWD modela

RB+ECMS i RB+ECMS-EXT inačice strategije upravljanja, opisane u prethodnom potpoglavlju, simulacijski su provjerene na EXT-BWD modelu u CS režimu ($SoC_i = SoC_R = 30\%$). Simulacijske provjere za BLND režim rada daju se poglavlju 8. RB+ECMS sustav simuliran je u slučajevima s i bez uključenog GSD algoritma, gdje je u prvotnom slučaju odabran vremenski prag $t_{th} = 2$ s. Kako je opisano u potpoglavlju 5.1, RB+ECMS-EXT strategija ne uključuje GSD algoritam. Usporedni rezultati simulacija dobiveni na DUB, HDUDDS, WHVC i JE05 voznim ciklusima dani su u tablici 5-1. Kao i kod rezultata optimiranja u poglavlju 4, rezultati simulacija uključuju sljedeće pokazatelje: ukupna potrošnja goriva V_f , konačna vrijednost SoC-a, $SoC(t_f)$, broj uključivanja MSUI-a N_e te broj prebacivanja stupnja prijenosa N_g .

Prva kolona tablice 5-1 u zagradama uključuje i relativna povećanja potrošnje goriva u odnosu na globalno optimalno referentno mjerilo dobiveno primjenom DP algoritma izloženog u poglavlju 4. Kako strategija upravljanja nema striktno zadan finalni SoC, vrijednosti $SoC(t_f)$ u tablici 5-1 općenito odstupaju od $SoC_f = 30\%$ te rezultati potrošnje goriva nisu izravno usporedivi s onima dobivenim u DP mjerilu (gdje je postavljen i ostvaren $SoC_f = 30\%$). Stoga je prema pristupu uspostavljenom u [34] provedeno nekoliko dodatnih DP optimiranja za razne vrijednosti SoC_f , te su dobivene optimalne potrošnje goriva V_f^* linearno interpolirane s obzirom

5. Nadređena strategija upravljanja

na $SoC(t_f)$, kako je prikazano na slici 5-5 za slučaj DUB ciklusa. Linearno interpoliran graf potrošnje goriva tako postaje referentno mjerilo za vrednovanje sustava upravljanja.



Slika 5-5. Linearno interpolirana DP optimalna rješenja za potrošnju goriva dobivena za razne vrijednosti finalnog SoC-a (DUB vozni ciklus).

Analizirajući rezultate iz Tablice 5-1 može se vidjeti da se korištenjem GSD algoritma kod RB+ECMS inačice strategije upravljanja smanjuje broj promjena stupnja prijenosa N_g za oko 50% za sve razmatrane cikluse, uz zanemariv utjecaj na potrošnju goriva.

RB+ECMS-EXT strategija daje konzistentno bolju kvalitetu upravljanja u pogledu potrošnje goriva u odnosu na RB+ECMS strategiju. To je posebno primjetno kod realističnog DUB voznog ciklusa, gdje je relativno povećanje potrošnje goriva u odnosu na referentno mjerilo smanjeno s 9% na 5.2%. Broj uključivanja MSUI-a i promjena stupnja prijenosa ostaje podjednak kao kod RB+ECMS sustava s uključenim GSD algoritmom, uz napomenu da RB-ECMS-EXT strategija to postiže bez primjene GSD algoritma (zbog uključenih dinamičkih gubitaka, potpoglavlje 5.1).

Odgovarajući odzivi SoC-a i kumulativne potrošnje goriva po prijedenoj puti prikazane su na slikama 5-6 i 5-7, pri čemu se u RB+ECMS slučaju primjenjuje GSD algoritam. Usporedbe rasporeda radnih točaka pogonskih strojeva za slučaj DUB ciklusa dane su na slici 5-8. Odzivi SoC-a i potrošnje goriva za dvije inačice strategije upravljanja imaju vrlo slične trendove, a glavna razlika je u već uočenoj manjoj potrošnji goriva kod RB+ECMS-EXT sustava (tablica 5-1), posebno za DUB vozni ciklus. Prema rezultatima na slici 5-8, ovo se postiže gušćim raspoređivanjem radnih točaka pogonskih strojeva u područja veće učinkovitosti. Drugim

5. Nadređena strategija upravljanja

riječima, budući da RB+ECMS koristi manje točan model (bez dinamičkih gubitaka), njegove radne točke se rasipaju šire oko područja visoke korisnosti.

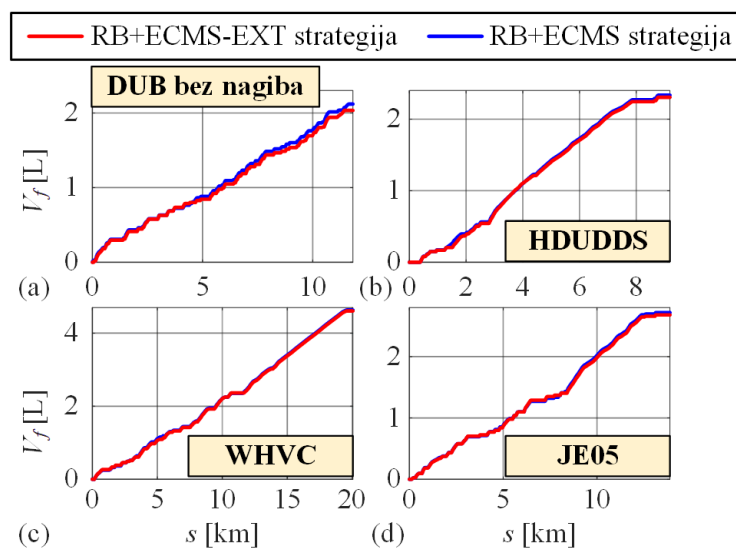
Tablica 5-1. Usporedni rezultati simulacije RB+ECMS i RB+ECMS-EXT sustava upravljanja na EXT-BWD modelu u CS režimu rada.

		V_f [L]	$SoC(t_f)$ [%]	N_e [-]	N_g [-]
DUB bez nagiba	RB+ECMS, bez GSD-a	2.11 (+9.0%)	28.91	48 (0.0%)	696 (0.0%)
	RB+ECMS, s GSD-om	2.10 (+8.7%)	28.93	48 (0.0%)	383 (-45.0%)
	RB+ECMS- EXT	2.04 (+5.2%)	28.95	45 (-6.7%)	371 (-46.7%)
HDUDDS	RB+ECMS, bez GSD-a	2.33 (+3.2%)	32.99	11 (0.0%)	167 (+0.0%)
	RB+ECMS, s GSD-om	2.34 (+3.4%)	33.14	11 (0.0%)	88 (-47.3%)
	RB+ECMS- EXT	2.31 (+2.1%)	33.12	12 (+9.1%)	79 (-52.7%)
WHVC	RB+ECMS, bez GSD-a	4.64 (+3.8%)	31.35	21 (0.0%)	327 (0.0%)
	RB+ECMS, s GSD-om	4.63 (+3.7%)	31.35	22 (+4.8%)	187 (-42.8%)
	RB+ECMS- EXT	4.61 (+3.1%)	31.38	22 (+4.8%)	188 (-42.5%)
JE05	RB+ECMS, bez GSD-a	2.72 (+4.6%)	28.15	24 (0.0%)	480 (0.0%)
	RB+ECMS, s GSD-om	2.72 (+4.6%)	28.18	24 (0.0%)	220 (-54.2%)
	RB+ECMS- EXT	2.68 (+3.0%)	28.24	24 (0.0%)	236 (-50.8%)

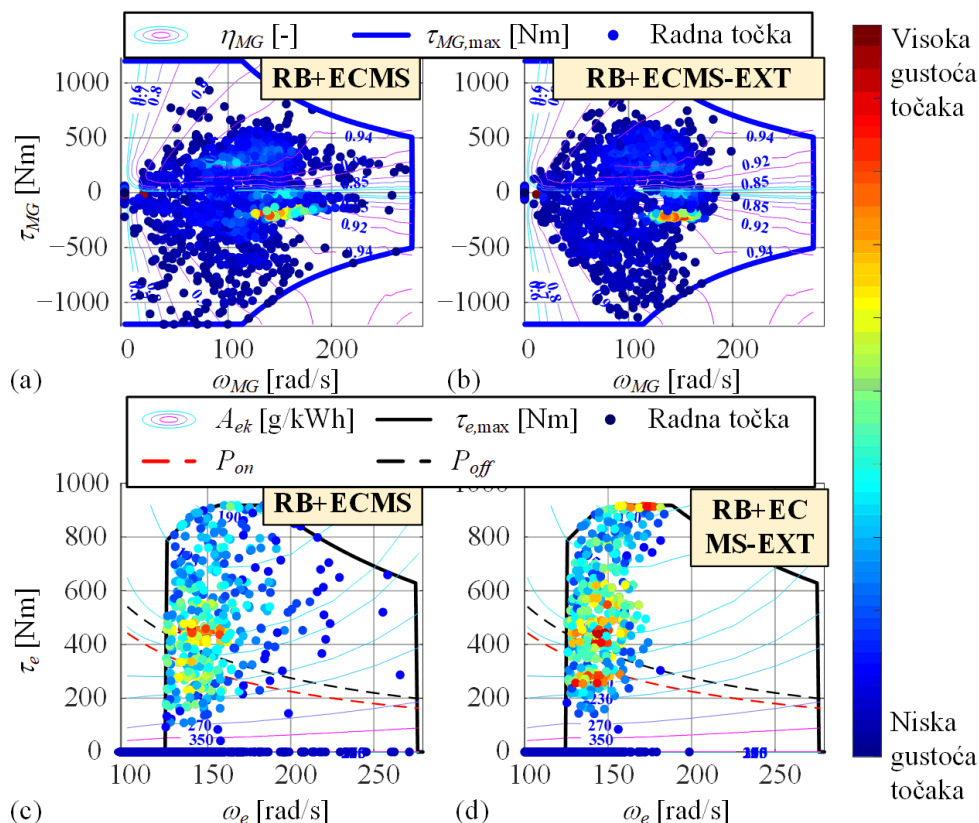
5. Nadređena strategija upravljanja



Slika 5-6. Odzivi SoC-a po prijeđenoj puti dobiveni simulacijom RB+ECMS i RB+ECMS-EXT sustava upravljanja (EXT-BWD model i CS režim rada).



Slika 5-7. Odzivi kumulativne potrošnje goriva po prijeđenoj puti dobiveni simulacijom RB+ECMS i RB+ECMS-EXT sustava upravljanja (EXT-BWD model i CS režim rada).



Slika 5-8. Razmještaji radnih točaka MSUI-a i M/G stroja dobiveni simulacijom RB+ECMS i RB+ECMS-EXT sustava upravljanja (EXT-BWD model, CS režim rada i DUB vozni ciklus).

5.2.2. Rezultati simulacija uz primjenu FWD modela

Primjena FWD modela PHEV-a omogućuje vjernije usporedne rezultate simulacije raznih inačica sustava upravljanja, s tim da zbog složenosti FWD modela nije moguće provesti DP optimiranje pa time niti usporedbu u odnosu na referentno mjerilo. Tablica 5-2 prikazuje usporedne rezultate simulacija RB+ECMS-EXT i RB+ECMS sustava upravljanja dobivenih na FWD modelu vozila, uz napomenu da RB+ECMS uključuje primjenu GSD algoritma. U nedostatku DP referentnog mjerila, rezultate simulacije više (ovdje dvaju) sustava upravljanja treba svesti na zajednički $SoC(t_f) = SoC_f = 30\%$ kako bi se potrošnje goriva mogle usporediti. Ovo se provodi korekcijom potrošnje goriva ($V_{f,corr}$) s obzirom na odstupanje konačne vrijednosti $SoC(t_f)$ od ciljane vrijednosti $SoC_f = 30\%$ [34]. Korigirana potrošnja goriva $V_{f,corr}$ temelji se na parovima ukupne potrošnje goriva V_f i konačne vrijednosti $SoC(t_f)$ prikupljenih putem višestrukih simulacija sustava upravljanja uz korištenje različite vrijednosti reference SoC-a (SoC_R) u okolini ciljane vrijednosti $SoC_f = 30\%$. Dobiveni rezultati linearno se interpoliraju u obliku $\hat{V}_f(\Delta SoC_f)$ karakteristike prikazane na slici 5-9a, gdje je $\Delta SoC_f = SoC(t_f)$

5. Nadređena strategija upravljanja

– SoC_f . Od tako dobivenih interpoliranih karakteristika oduzima se odgovarajuća (interpolirana) vrijednost za $\Delta SoC_f = 0$, kako bi se odredili inkrementi potrošnje goriva u ovisnosti o ΔSoC_f :

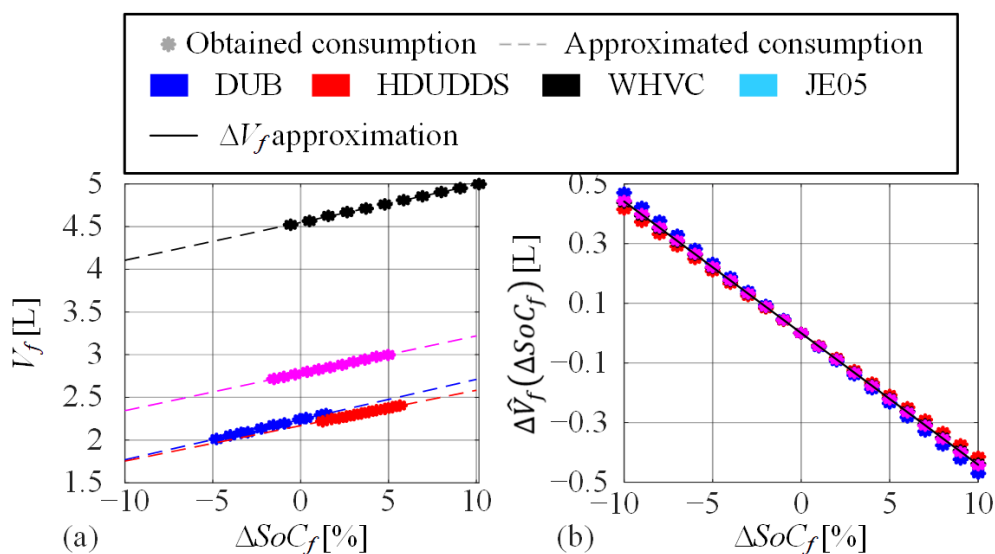
$$\Delta V_f(\Delta SoC_f) = \hat{V}_f(\Delta SoC_f) - \hat{V}_f(\Delta SoC_f = 0). \quad (5-16)$$

Tako dobiveni inkrementi potrošnje za razne cikluse interpoliraju se zajedničkom linearnom karakteristikom $\Delta \hat{V}_f(\Delta SoC_f)$, kako je dano na slici 5-9b. Konačno, korigirana potrošnje goriva računa se iz rezultata simulacije ($V_f, \Delta SoC_f = SoC(t_f) - SoC_f$) kao:

$$V_{f,corr} = V_f + \Delta \hat{V}_f(\Delta SoC_f). \quad (5-17)$$

te je dodana u rezultate simulacije u tablici 5-2.

Prema rezultatima u tablici 5-2, RB+ECMS-EXT strategija upravljanja daje konzistentno niže (korigirane) potrošnje goriva u odnosu na RB+ECMS strategije i na FWD modelu. Najveće smanjenje potrošnje opet se dobiva za realistični DUB vozni ciklus te iznosi 2.2%.



Slika 5-9. Simulirane potrošnje goriva za različite SoC_R (a) i iz njih izračunati inkrementi potrošnje u odnosu na onu koja odgovara slučaju $\Delta SoC_f = SoC(t_f) - SoC_f$ (b).

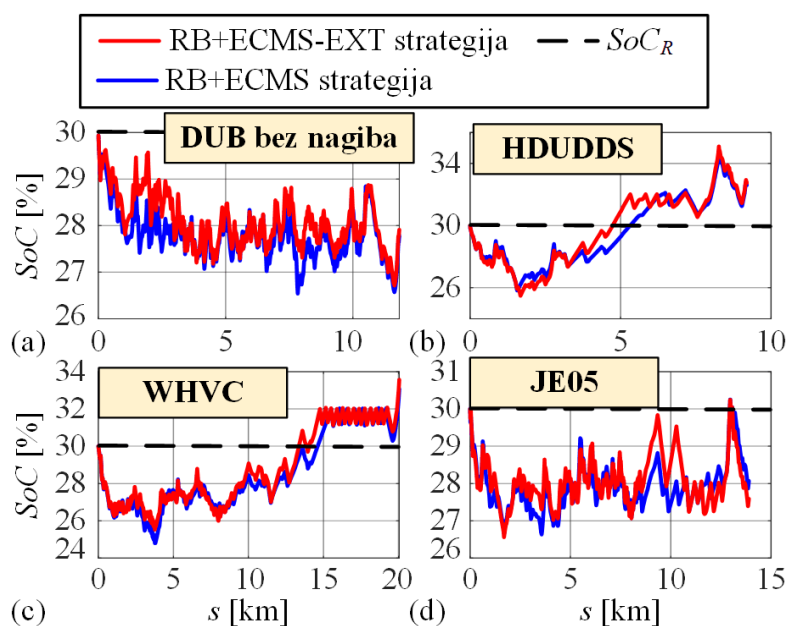
Na slikama 5-10 i 5-11 dani su odzivi SoC -a i potrošnje goriva po putu dobiveni simulacijom strategija upravljanja na FWD modelu. Kao i kod simulacijskih rezultata dobivenih na EXT-BWD modelu (usp. slike 5-6 i 5-7), obje strategije upravljanja rezultiraju vrlo sličnim trendovima odziva potrošnje goriva i SoC -a, no konačna potrošnja goriva je uvijek manja za RB+ECMS-EXT strategiju kako je i komentirano uz Tablicu 5-2. Ovo je ujedno i dodatna

5. Nadređena strategija upravljanja

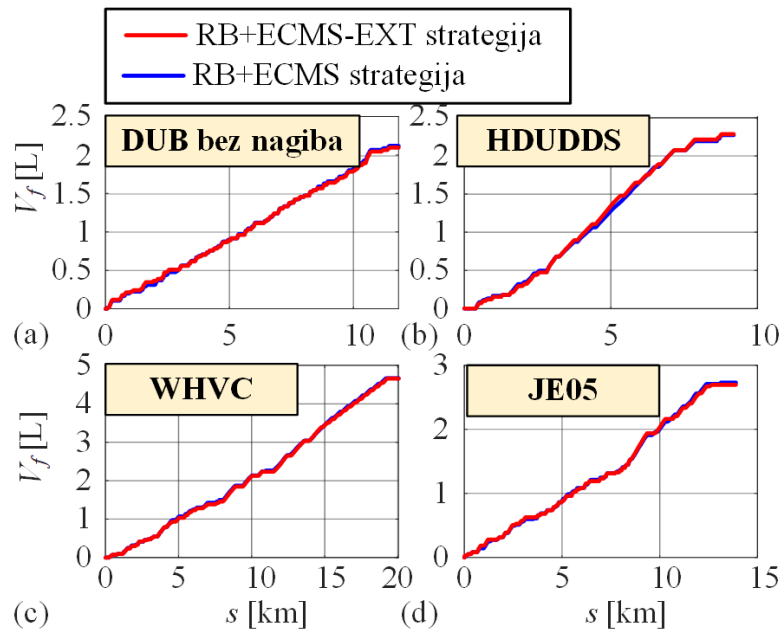
potvrda kvalitete EXT-BWD modela, u smislu da njegova primjena u okviru strategije upravljanja daje bolje rezultate u simulacijskoj provjeri na FWD modelu u odnosu na primjenu BWD modela.

Tablica 5-2. Usporedni rezultati simulacije RB+ECMS i RB+ECMS-EXT sustava upravljanja na FWD modelu u CS režimu rada.

		V_f [L]	$V_{f,corr}$ [L]	$SoC(t_f)$ [%]	N_e [-]	N_g [-]
DUB bez nagiba	RB+ECMS, s GSD-om	2.13	2.28 (0.0%)	27.78	61 (0.0%)	499 (0.0%)
	RB+ECMS-EXT	2.16	2.23 (-2.2%)	28.45	59 (-3.3%)	452 (-9.4%)
H DUDDS	RB+ECMS, s GSD-om	2.29	2.18 (0.0%)	32.60	17 (0.0%)	97 (0.0%)
	RB+ECMS-EXT	2.30	2.16 (-0.9%)	33.46	12 (-29.4%)	106 (+9.3%)
WHVC	RB+ECMS, s GSD-om	4.68	4.56 (0.0%)	33.07	22 (0.0%)	288 (0.0%)
	RB+ECMS-EXT	4.73	4.53 (-0.7%)	34.79	24 (+8.3%)	266 (-7.6%)
JE05	RB+ECMS, s GSD-om	2.71	2.79 (0.0%)	28.07	22 (0.0%)	239 (0.0%)
	RB+ECMS-EXT	2.84	2.77 (-0.7%)	31.68	25 (+13.6%)	253 (-5.9%)



Slika 5-10. Odzivi SoC-a po prijedenoj puti dobiveni simulacijom RB+ECMS i RB+ECMS-EXT sustava upravljanja (FWD model i CS režim rada).



Slika 5-11. Odzivi kumulativne potrošnje goriva po prijeđenome putu dobiveni simulacijom RB+ECMS i RB+ECMS-EXT sustava upravljanja (FWD model i CS režim rada).

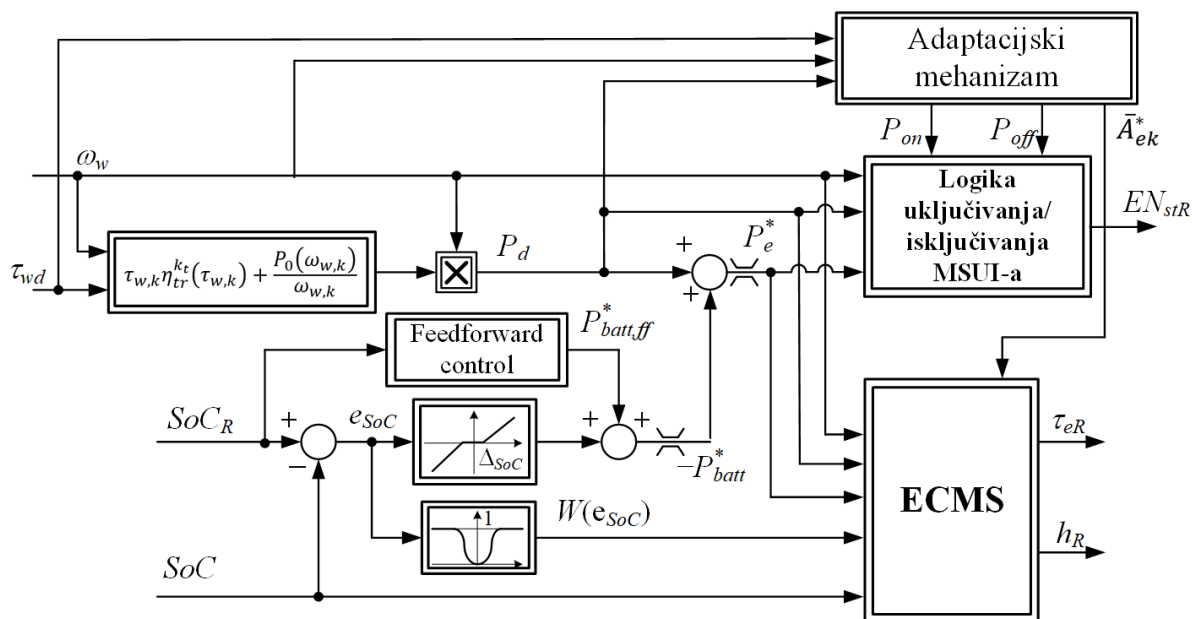
6. Adaptivna strategija upravljanja

U ovom poglavlju opisuje se adaptacija RB+ECMS-EXT strategije upravljanja PHEV-om. Za adaptaciju triju utjecajnih parametara strategije koriste se linearni regresijski modeli u funkciji značajki voznih ciklusa koje se ažuriraju u realnom vremenu. Modeli se parametriraju na temelju rezultata DP optimiranja upravljačkih varijabli, dobivenih preko karakterističnih mikrociklusa izdvojenih iz certifikacijskih voznih ciklusa. Kvaliteta adaptivnog upravljanja ispituje se simulacijom uz primjenu EXT-BWD i FWD modela, a rezultati se uspoređuju s onim dobivenim standardnom (ne-adaptivnom) RB+ECMS-EXT strategijom.

6.1. Sinteza adaptivne strategije upravljanja

6.1.1. Struktura adaptivne strategije upravljanja

Adaptivna strategija upravljanja predstavlja proširenje RB+ECMS-EXT strategije sa slike 5-1 s dodatnim mehanizmom adaptacije ključnih parametara strategije upravljanja, kako je prikazano na slici 6-1. Adaptivna strategija nadalje se označava kao A-RB+ECMS-EXT. Parametri koji se adaptiraju uključuju pragove snage uključivanja (P_{on}) i isključivanja MSUI-a (P_{off}) prisutnih u izrazu (5-2), te srednju specifičnu potrošnju goriva \bar{A}_{ek} iz izraza (5-3). Naime, simulacijskim provjerama na nizu voznih ciklusa [100] pokazano je da upravo ovi parametri imaju najveći utjecaj na kvalitetu upravljanja. Adaptacijski mehanizam temelji se na polinomskim regresijskim modelima za svaki od adaptiranih parametara. Modeli su linearni u parametrima, s ulaznim značajkama koje predstavljaju srednje vrijednosti i standardne devijacije ključnih varijabli voznih ciklusa poput brzine kotača/vozila te zahtijevanog momenta i snage PHEV pogona, te koje se računaju preko pomičnog prozora u neposrednoj prošlosti. Na taj se način strategija upravljanja adaptira s obzirom na promjenu značajki voznih ciklusa, a sami tim dobiva i potencijal za daljnje približenje globalno optimalnom ponašanju koje reprezentira DP referentno mjerilo. U tom su smislu parametri adaptacijskih regresijskih modela određeni temeljem DP rezultata optimiranja na karakterističnim sekcijama voznih ciklusa.



Slika 6-1. Blokovski dijagram adaptivne RB+ECMS-EXT strategije upravljanja PHEV-om.

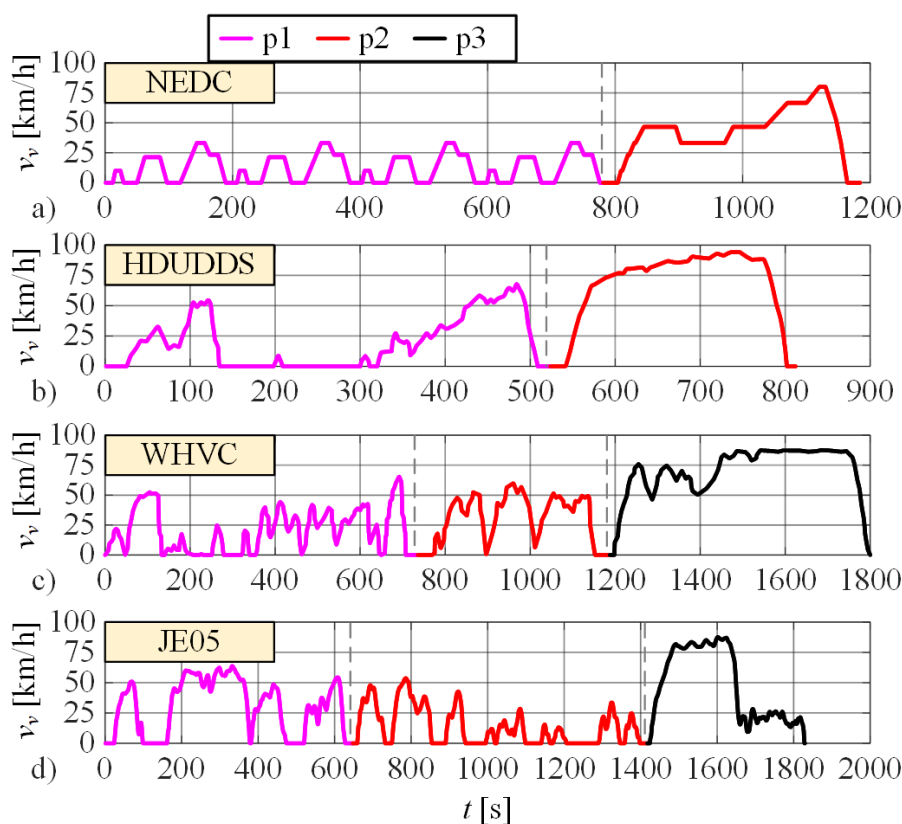
6.1.2. Optimizacijski okvir za uspostavljanje adaptacijskog mehanizma

Za uspostavljanje optimalnog adaptacijskog mehanizma, DP optimiranje upravljačkih varijabli provedeno je za karakteristične mikrocikluse dobivene segmentacijom NEDC, HDUDDS, WHVC i JE05 certifikacijskih voznih ciklusa u CS režimu rada ($SoC_i = SoC_f = 30\%$). Segmentacija voznih ciklusa temelji se na vizualnoj inspekciji kako bi odražavali različitih voznih scenarija. Proces segmentacije ilustriran je na slici 6-2, gdje mikrociklusi NEDC-p1, WHVC-p1 i JE05-p2 odražavaju vožnju u urbanim sredinama, HDUDDS-p1, WHVC-p2 i JE05-p1 imaju karakteristike prigradske vožnje, a NEDC-p2, HDUDDS-p2, WHVC-p3 i JE05-p3 odražavaju vožnju na otvorenoj cesti (magistralnoj ili autocesti).

Preko segmentiranih mikrociklusa provedeno je DP optimiranje upravljačkih varijabli uz primjenu EXT-BWD modela vozila. Rezultati su iskorišteni za identifikaciju optimalnih vrijednosti parametara strategije upravljanja te odgovarajućih značajki sekcija mikrociklusa, koje se redom uključuju u regresijski i izlazni vektor regresijskog modela za potrebe određivanja njegovih parametara. Prvo se ilustrira proces identifikacije vrijednosti parametra P_{on} , pri čemu se koristi primjer HDUDDS-p1 mikrociklusa te odgovarajući DP-optimalni odziv snage MSUI-a $P_e = \tau_e \omega_e$ prikazan na slici 6-3. Razina snage u prvom vremenskom koraku nakon što se MSUI uključi identificira se kao optimalni prag snage uključivanja motora P_{on}^* . Tako određeni pragovi snage svih uključivanja motora unutar svih mikrociklusa upareni su sa

6. Adaptivna strategija upravljanja

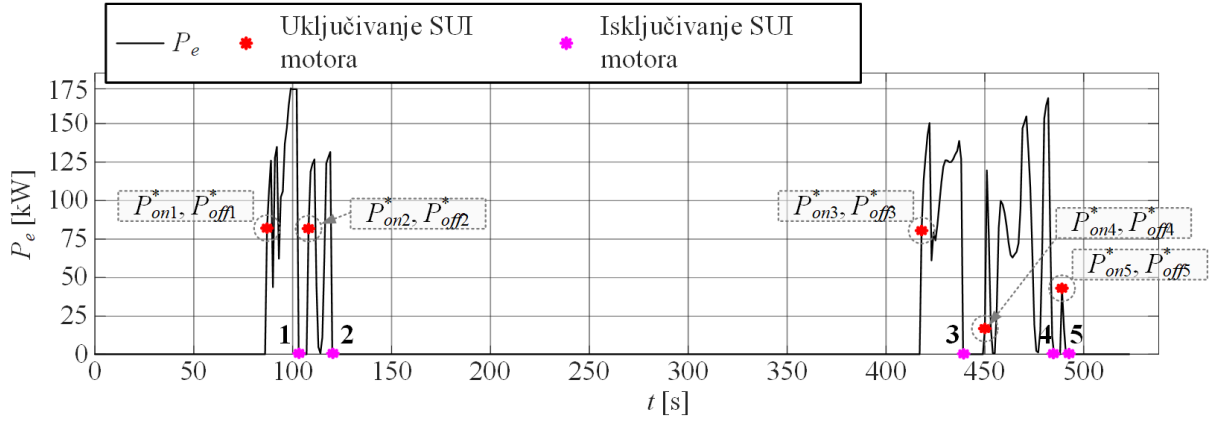
značajkama voznog ciklusa koje se računaju na pomičnom horizontu od N_h prošlih vremenskih koraka uzorkovanja prije uključivanja motora.



Slika 6-2. Segmentacija certifikacijskih voznih ciklusa u mikro cikluse.

Optimalne vrijednosti praga snage isključivanja motora P_{off}^* ne mogu se jednoznačno odrediti iz odziva optimalne snage motora. Naime, optimalna snaga motora u vremenskom koraku neposredno prije isključivanja može primjetno varirati i često je iznad uobičajenog praga uključivanja P_{on} . Zadavanje praga snage isključivanja P_{off}^* za kojeg vrijedi $P_{off}^* > P_{on}^*$ rezultiralo bi nedosljednom logikom uključivanja i isključivanja motora. Kako bi se izbjegao ovaj problem, prag snage isključivanja P_{off}^* izjednačuje se s pripadnim pragom uključivanja P_{on}^* koji prethodi odgovarajućem događaju isključivanja MSUI-a. Ovako provedena identifikacija zasniva se na pretpostavci da se karakteristike voznog ciklusa bitnije ne mijenjaju neposredno ispred i iza trenutka uključivanja motora, što je ispunjeno korištenjem izdvojenih mikrociklusa koji odgovaraju jednom tipu vožnje. Identificirani prag snage isključivanja P_{off}^* uparuje se sa značajkama voznih ciklusa izračunatih na pomičnom horizontu od N_h koraka unazad prije trenutka isključivanja motora.

6. Adaptivna strategija upravljanja



Slika 6-3. Ilustracija identifikacije vrijednosti pragova snage uključivanja i isključivanja MSUI-a za potrebe formiranja regresijskog modela.

Vrijednosti parametra specifične potrošnje goriva \bar{A}_{ek}^* identificiraju se primjenom ECMS alokacije u svim vremenskim koracima DP optimalnih rezultata u kojima je MSUI uključen. Vrijednost parametra specifične potrošnje goriva \bar{A}_{ek} koji minimizira odstupanje upravljačkih varijabli dobivenih ECMS alokacijom $(h_k, \tau_{eR,k})$ od onih dobivenih DP algoritmom $(h_k^*, \tau_{eR,k}^*)$, identificira se kao optimalna specifična potrošnja goriva $\bar{A}_{ek,k}^*$ za dani korak k u kojem je MSUI uključen:

$$\bar{A}_{ek,k}^* = \underset{A_{ek,k}}{\operatorname{argmin}} \left(100(h_k^* - h_k) + (\tau_{eR,k}^* - \tau_{eR,k}) \right). \quad (6-1)$$

Identificirane optimalne vrijednosti $\bar{A}_{ek,k}^*$ uparuju se sa značajkama mikrociklusa izračunatim na vremenskom horizontu od N_h koraka unazad, tj. na intervalu $[k-N_h+1, k]$. Na ovaj se način DP optimalne upravljačke varijable pokušavaju "ugraditi" u rad ECMS-a, kako bi se kroz adaptaciju približio globalno optimalnom ponašanju.

6.1.3. Adaptacijski regresijski modeli

Identificirani DP-optimalni pragovi snage uključivanja MSUI-a P_{on}^* mogu se opisati sljedećim kvadratnim regresijskim modelom koji je linearan u parametrima:

$$\mathbf{y}_{on} = \mathbf{\Phi}_{on} \cdot \boldsymbol{\theta}_{on}, \quad (6-2)$$

gdje je $\mathbf{\Phi}_{on}$ regresijska matrica čiji redčani vektori uključuju prve i druge potencije srednje vrijednosti μ i standardne devijacije σ sljedećih varijabli voznog ciklusa, koje se računaju na pomičnom prozoru od N_h koraka unazad od trenutnog koraka k : a) zahtijevani ukupni moment

6. Adaptivna strategija upravljanja

kotača τ_{wd} ; b) brzina kotača ω_w ; c) akceleracija kotača α_w koja se dobiva diferenciranjem brzine kotača te d) zahtijevana ulazna snaga transmisije P_d . Ove se značajke računaju na pomičnom prozoru od N_h koraka unazad od trenutnog koraka k . Vektor \mathbf{y}_{on} predstavlja predviđanja regresijskog modela za dani vektor parametara $\boldsymbol{\theta}_{on}$, koji se određuje iz uvjeta da takvo predviđanje bude čim bliže identificiranim vrijednostima \mathbf{P}_{on}^* . Matrica $\boldsymbol{\Phi}_{on}$ dimenzija je $N_{on} \times 17$ gdje je N_{on} broj identificiranih uzoraka \mathbf{P}_{on}^* , a k -ti redak matrice $\boldsymbol{\Phi}_{on}$ definiran je kao

$$\boldsymbol{\Phi}_{on,k} = [1 \quad \mu_{\tau_{wd},k} \quad \mu_{\tau_{wd},k}^2 \quad \sigma_{\tau_{wd},k} \quad \sigma_{\tau_{wd},k}^2 \quad \dots \quad \mu_{P_d,k} \quad \mu_{P_d,k}^2 \quad \sigma_{P_d,k} \quad \sigma_{P_d,k}^2]. \quad (6-3)$$

Pripadni vektor parametara $\boldsymbol{\theta}_{on}$ uključuje 17 parametara model te se zapisuje se kao:

$$\boldsymbol{\theta}_{on} = [\theta_{on,0} \quad \theta_{on,\mu l,\tau_w} \quad \theta_{on,\mu s,\tau_w} \quad \theta_{on,\sigma l,\tau_w} \quad \theta_{on,\sigma s,\tau_w} \quad \dots \quad \dots \quad \theta_{on,\mu l,P_d} \quad \theta_{on,\mu s,P_d} \quad \theta_{on,\sigma l,P_d} \quad \theta_{on,\sigma s,P_d}]^T, \quad (6-4)$$

gdje prvi parametar ($\theta_{on,0}$) predstavlja posmak modela. Vrijednosti regresijske matrice $\boldsymbol{\Phi}_{on}$ i pragovi snaga uključivanja motora \mathbf{P}_{on}^* normalizirani su s obzirom na odgovarajuće maksimalne vrijednosti iz prikupljenog skupa podataka.

Regresijski koeficijenti određeni su minimizacijom kvadrata pogreške između optimalnih pragova uključivanja \mathbf{P}_{on}^* i onih dobivenih regresijskim modelom \mathbf{y}_{on} prema (6-2), što odgovara standardnoj metodi najmanjih kvadrata (engl. least squares, LS). Kako bi se izbjeglo potencijalno preučavanje regresijskog modela, LS metoda proširena je operacijom najmanjeg apsolutnog skupljanja i odabira (engl. Least Absolute Shrinkage and Selection Operator, LASSO) [107], koja se definira kao

$$\boldsymbol{\theta}_{on} = \underset{\boldsymbol{\theta}_{on}}{\operatorname{argmin}} \left(\frac{1}{2N_{on}} (\mathbf{P}_{on}^* - \boldsymbol{\Phi}_{on} \boldsymbol{\theta}_{on})^T (\mathbf{P}_{on}^* - \boldsymbol{\Phi}_{on} \boldsymbol{\theta}_{on}) + \lambda \|\boldsymbol{\theta}_{on}\|_1 \right) \quad (6-5)$$

gdje prvi član s desne strane odgovara funkciji cilja standardne LS metode, dok drugi član penalizira L1 normu vektora regresijskih koeficijenata $\boldsymbol{\theta}_{on}$ kako bi se ohrabrilo "skupljanje" modela na što manji broj članova, tj. parametara. Koeficijent regularizacije λ određen je iterativno uz primjenu Matlab funkcije *lasso(.)* [107], s ciljem maksimizacije koeficijenta determinacije R^2 između predviđanja modela \mathbf{y}_{on} i identificiranih pragova uključivanja motora \mathbf{P}_{on}^* . Ako se faktor regularizacije λ postavi u nulu, rješenje regresijskog problema (6-5) svodi se na standardno LS rješenje. LASSO i LS rješenja uspoređuju se u sljedećem potpoglavlju.

6. Adaptivna strategija upravljanja

Identificirani DP-optimalni pragovi snage isključenja MSUI-a P_{off}^* opisuje se istim, u parametrima linearnim regresijskim modelom kao u slučaju pragove P_{on}^* (usp. izraz (6-2)):

$$\mathbf{y}_{off} = \Phi_{off} \cdot \boldsymbol{\theta}_{off}, \quad (6-6)$$

gdje je regresijska matrica Φ_{off} dimenzije $N_{off} \times 17$, pri čemu N_{off} označava broj identificiranih pragova P_{off}^* unutar matrice \mathbf{P}_{off} , tj. dimenziju vektora \mathbf{y}_{off} . Vektor parametara regresijskog modela određuje se ponovno kao rješenje problema (6-5), uz formalnu zamjenu indeksa on s indeksom off .

Konačno, identificirane optimalne vrijednosti parametra srednje specifične potrošnje goriva $\bar{A}_{ek,k}^*$ spremaju se u vektor \mathbf{A}_{ek} i aproksimiraju regresijskim modelom, koji ima istu strukturu kao regresijski modeli (6-2) i (6-6), no dodatno uključuje sljedeće značajke vezane uz zahtijevanu snagu baterije P_{batt} u regresijsku matricu Φ_{Aek} (dodatne kolone matrice): $\mu_{P_{batt}}$, $\mu_{P_{batt}}^2$, $\sigma_{P_{batt}}$ i $\sigma_{P_{batt}}^2$. To rezultira linearnim regresijskim modelom s ukupno 21 koeficijentom:

$$\mathbf{y}_{Aek} = \Phi_{Aek} \cdot \boldsymbol{\theta}_{Aek}, \quad (6-7)$$

čiji se parametri dani u vektoru $\boldsymbol{\theta}_{Aek}$ identificiraju kao rješenje LASSO problema (6-5), uz zamjenu vektora \mathbf{P}_{on} s \mathbf{A}_{ek} i indeksa on s Aek .

Nakon određivanja optimalnih parametara regresijskog modela van realnog vremena (npr. onog za P_{on} prema (6-5)), regresijski model je spreman za izvođenje u realnom vremenu (u svakom koraku uzorkovanja k) u obliku

$$P_{on,k} = \boldsymbol{\varphi}_{on,k} \boldsymbol{\theta}_{on}, \quad (6-8)$$

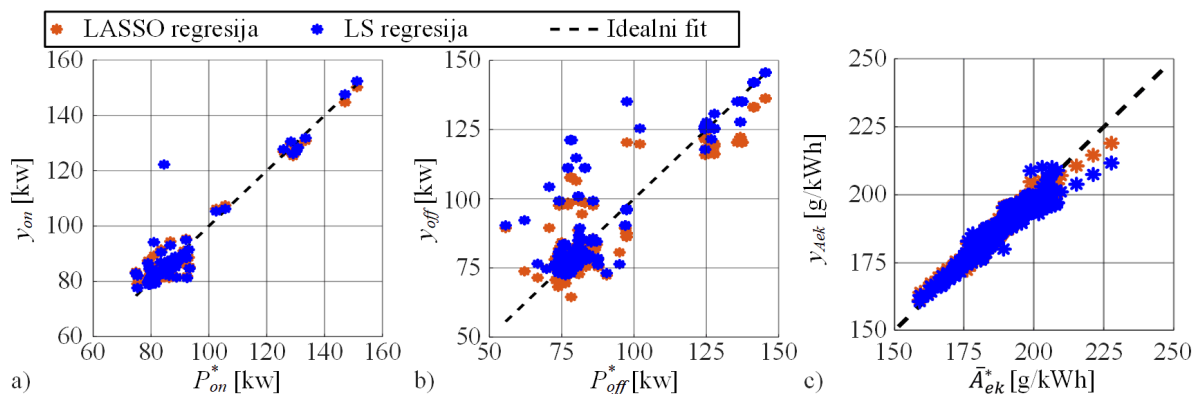
gdje se su regresijski vektor $\boldsymbol{\varphi}_{on,k}$ i vektor parametara $\boldsymbol{\theta}_{on}$ definirani redom izrazima (6-3) i (6-4). Isto vrijedi za preostala dva regresijska modela, uz prije spomenutu zamjenu varijabli/indeksa modela. Regresijski vektor ažurira se na pomičnom horizontu u neposrednoj prošlosti, s istom duljinom $N_h = 8$ koraka uzorkovanja (tj. 8 sekundi) kao kod identifikacije parametara modela.

6.1.4. Analiza točnosti adaptacijskih regresijskih modela

Regresijski modeli za adaptaciju parametara RB+ECMS-EXT strategije upravljanja parametrirani su na skupu za učenje, koji se odnosi na NEDC-p1, HDUDDS-p1, WHVC-p1, WHVC-p2, JE05-p1 i JE05-p3 mikrocikluse dok su simulacijski provjereni na testnom skupu

6. Adaptivna strategija upravljanja

voznih ciklusa, koji se odnosi na NEDC-p2, HDUDDS-p2, WHVC-p3 i JE05-p2 mikrocikluse. Rezultati provjere (testiranja) triju regresijskih modela prikazani su na slici 6-4 za LASSO i LS pristupe. U tablici 6-1 dani su odgovarajući kvantitativni pokazatelji točnosti modela, uključuju koeficijente determinacije na skupu za učenje (R^2) i testiranje (R_t^2) te očekivanje (μ_{rt}) i standardnu devijaciju reziduala (σ_{rt}) na testnom skupu podataka. Tablica 6-1 također uključuje broj parametara LASSO-reduciranog modela (N_{cs}).



Slika 6-4. Odnosi DP-identificiranih parametara strategije upravljanja i onih određenih LASSO i LS regresijskim postupcima na testnom skupu podataka.

Slika 6-4 ukazuje na vrlo solidnu točnost regresijskih modela, posebno onih koji se odnose na parametre P_{on} i \bar{A}_{ek} . Točnost je viša u slučaju primjene LASSO postupka, što ukazuje na tendenciju preučavanja modela s izvornim, velikim brojem parametara. Manja točnost P_{off} -modela objašnjava se većom nesigurnosti o identifikaciji vrijednosti praga isključenja motora iz DP-optimalnih podataka (v. odjeljak 6.1.3). Raspon varijacija parametara strategije upravljanja je značajan (i do $\pm 30\%$), što ukazuje na potrebu za adaptacijom parametara s obzirom na trenutačne značajke voznih ciklusa.

Ovi rezultati se kvantitativno potvrđuju vrijednostima pokazatelja iz tablice 6-1. Koeficijent determinacije R^2 i R_t^2 imaju visoke vrijednosti (iznad 0.8), primjetno su sniženi za slučaj P_{off} -modela. Testni koeficijent determinacije R_t^2 primjetno je viši kod LASSO pristupa u odnosu na LS postupak. Očekivanja (μ_{rt}) i standardne devijacije reziduala (σ_{rt}) relativno su niski, posebno kod LASSO pristupa.

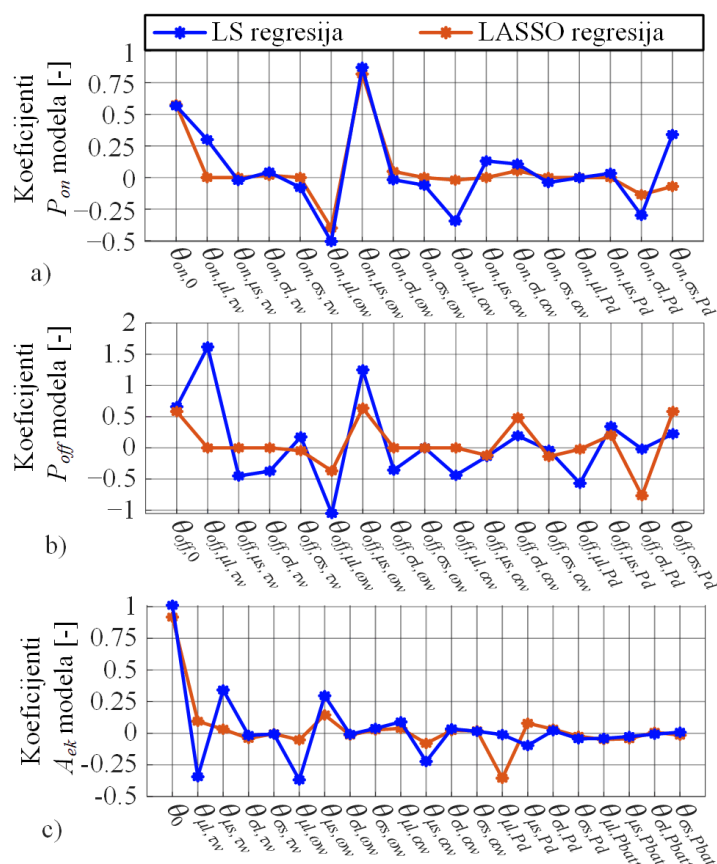
LS i LASSO metode uspoređene su u tablici 6-1 i s obzirom na broj značajnih koeficijenata u regresijskom modelu N_{cs} , to jest po broju koeficijenata regresijskog modela koji su veći od proizvoljno malog praga od 10^{-4} . LASSO metoda dosljedno daje manji broj značajnih

6. Adaptivna strategija upravljanja

koeficijenta N_{cs} od LS pristupa, tj. LASSO model je jednostavniji za implementaciju, a uz to i točniji kako je gore diskutirano. Slika 6-5 prikazuje iznose parametara (normiranog) LASSO modela, koji pokazuju da mnoge značajke tj. članovi modela imaju relativno nizak značaj. One druge, dakle utjecajne značajke odnose se pretežno na srednje vrijednosti brzine i ubrzanja kotača ω_w odnosno α_w (shodno tome i vozila) te zahtijevanu snagu P_d .

Tablica 6-1. Pokazatelji točnosti i dimenzija regresijskih modela temeljenih na LS i LASSO postupcima.

Model	Tip regresije	R^2 [-]	μ_{rt} [kW]	σ_{rt} [kW]	R_t^2 [-]	N_{cs} [-]
P_{on} regresijski model	LS	0.93	1.91	7.12	0.90	17
	LASSO	0.92	1.35	4.49	0.96	10
P_{off} regresijski model	LS	0.80	-3.11	10.52	0.74	16
	LASSO	0.78	0.00	9.46	0.80	11
\bar{A}_{ek} regresijski model	LS	0.91	0.68	2.91	0.85	19
	LASSO	0.92	-0.07	2.51	0.89	18



Slika 6-5. Vrijednosti koeficijenata LASSO regresijskih modela za adaptaciju parametara strategije upravljanja.

6.2. Simulacijski rezultati

6.2.1. Rezultati simulacija uz primjenu EXT-BWD modela

Adaptacijski mehanizam temeljen na regresijskim modelima dobivenim LASSO postupkom implementiran je u sklopu RB+ECMS-EXT strategije upravljanja kako je ilustrirano na slici 6-1. Adaptacija se provodi s obzirom na značajke voznog ciklusa određene unutar zadnjih $N_h = 8$ koraka uzorkovanja strategije upravljanja. Zbog činjenice da je identifikacija praga isključivanja P_{off} podrazumijevala da je $P_{off}^* = P_{on}^*$ (v. sliku 6-3), a da realna strategija upravljanja zahtijeva histerezu između ovih pragova (poglavlje 5), uvodi se histereza snage ΔP_{hyst} za čiji iznos se umanjuje prag P_{off} dobiven iz adaptacijskog modela. Širina histereze postavljena je na vrijednost $\Delta P_{hyst} = 30\text{kW}$, koja je određena linearnim pretraživanjem s donjim i gornjim granicama $\Delta P_{hyst,min} = 5\text{kW}$ i $\Delta P_{hyst,max} = 75\text{kW}$ te korakom od 5 kW s ciljem minimizacije korigirane potrošnje goriva dobivene simulacijom EXT-BWD modela na DUB voznom ciklusu.

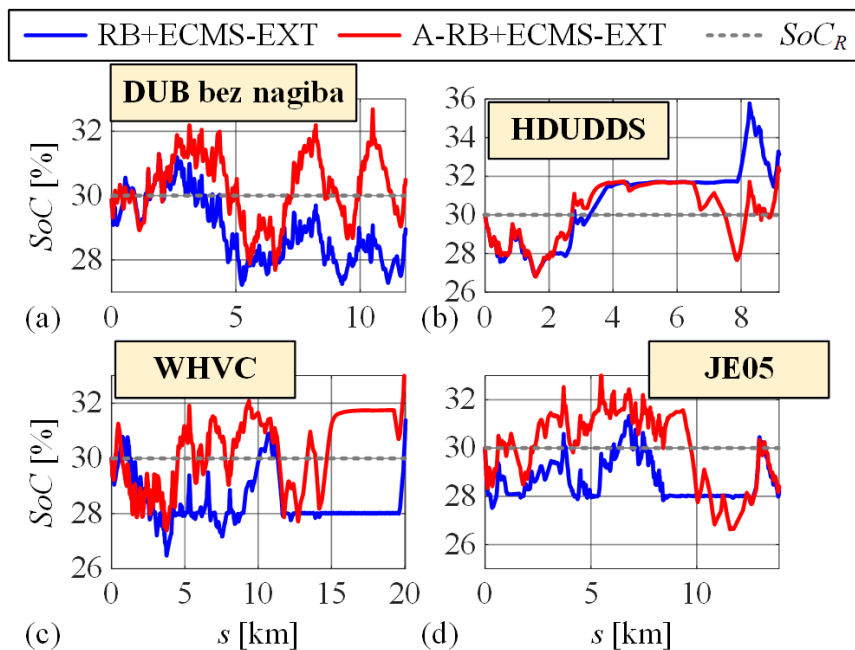
Usporedni simulacijski rezultati RB+ECMS-EXT i A-RB+ECMS-EXT strategija upravljanja dani su u tablici 6-2 za EXT-BWD model, SC režim rada i razne vozne cikluse uključujući DUB koji nije korišten u učenju regresijskog modela. Primjena adaptacijskog mehanizma daje dosljedno i značajno smanjenje potrošnje goriva u odnosu na temeljnu RB+ECMS-EXT strategiju. Pretičak potrošnje goriva u odnosu na DP referentno mjerilo smanjuje se adaptacijom za oko 35% (primjerice s 5.2% na 3.4% kod DUB ciklusa), što dovodi adaptivnu strategiju na samo 1,2-3,4% razlike u odnosu na DP rješenje. Pritom, adaptacija ne utječe primjetno na broj uključivanja MSUI-a (N_e) i promjena stupnja prijenosa (N_g).

Odgovarajući odzivi SoC-a i kumulativne potrošnje gorive po prijeđenome putu prikazani su na slikama 6-6 i 6-7. Trajektorije SoC-a su prilično različite, pri čemu su one dobivene za adaptivnu strategiju bliže po srednjoj vrijednosti ciljnom iznosu $SoC_R = 30\%$, uz općenito nešto više oscilacije. Prvotno upućuje na povećanu kvalitetu regulacije, a potomje na agresivnije korištenje MSUI-a prilikom punjenja baterije te odnosno jače oslanjanje na M/G stroj prilikom pražnjenja baterije. Razlike u SoC trajektorijama odražavaju se i na određene razlike u odzivu kumulativnih potrošnji goriva.

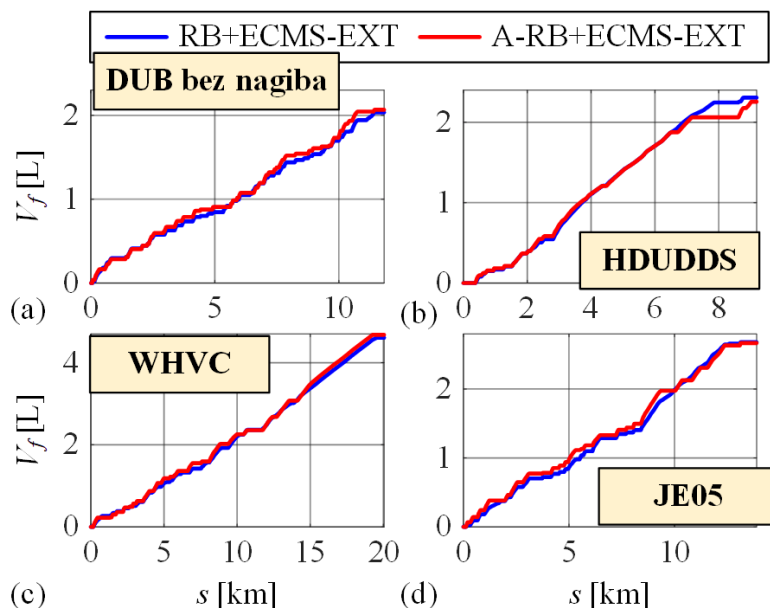
6. Adaptivna strategija upravljanja

Tablica 6-2. Usporedni rezultati simulacija RB+ECMS-EXT i A-RB+ECMS-EXT sustava upravljanja (EXT-BWD model, CS režim).

Ciklus	Strategija	V_f [L]	$SoC(t_f)$ [%]	N_e [-]	N_g [-]
DUB bez nagiba	RB+ECMS-EXT	2.04 (+5.2%)	28.95	45 (0.0%)	371 (0.0%)
	A-RB+ECMS-EXT	2.06 (+3.4%)	30.37	41 (-8.8%)	360 (-2.7%)
HDUDDS	RB+ECMS-EXT	2.31 (+2.0%)	33.12	12 (0.0%)	79 (0.0%)
	A-RB+ECMS-EXT	2.17 (+1.2%)	30.35	16 (+33.3%)	80 (+1.3%)
WHVC	RB+ECMS-EXT	4.62 (+3.1%)	31.38	22 (0.0%)	188 (0.0%)
	A-RB+ECMS-EXT	4.68 (+2.0%)	34.08	25 (+13.6%)	189 (+0.5%)
JE05	RB+ECMS-EXT	2.68 (+3.0%)	28.24	22 (0.0%)	236 (0.0%)
	A-RB+ECMS-EXT	2.64 (+1.9%)	28.04	25 (+13.6%)	237 (+0.4%)



Slika 6-6. Usporedni odzivi SoC-a po prijedenoj puti dobiveni simulacijom A-RB+ECMS-EXT i RB+ECMS-EXT sustava upravljanja (EXT-BWD model i CS režim rada)-

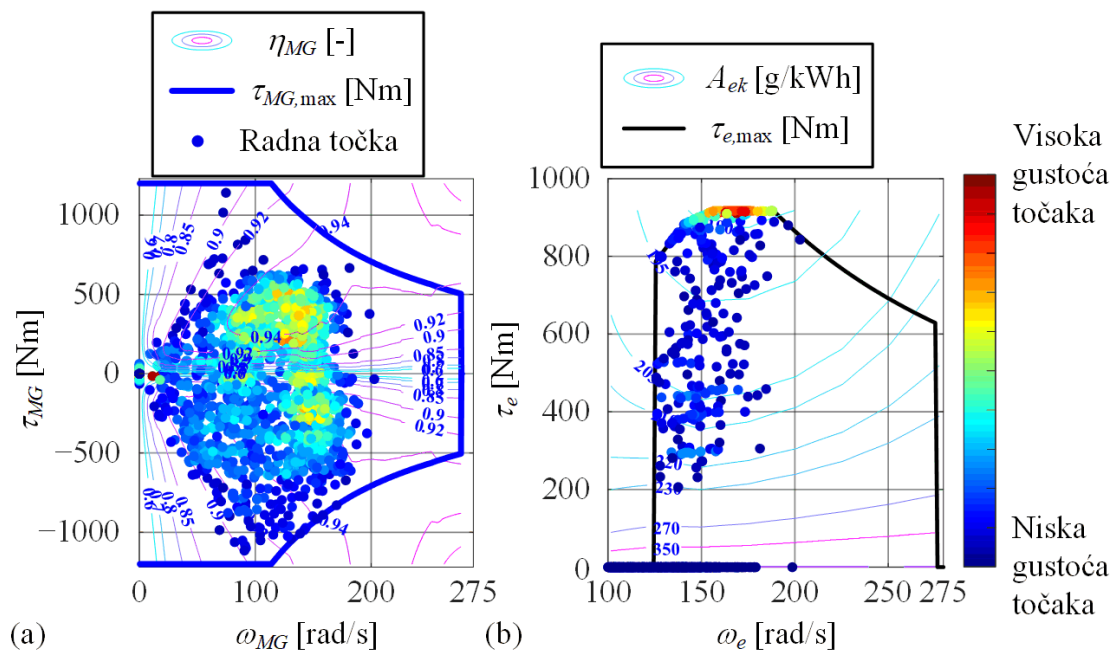


Slika 6-7. Usporedni odzivi kumulativne potrošnje goriva po prijedenoj puti dobiveni simulacijom A-RB+ECMS-EXT i RB+ECMS-EXT sustava upravljanja (EXT-BWD model i CS režim rada).

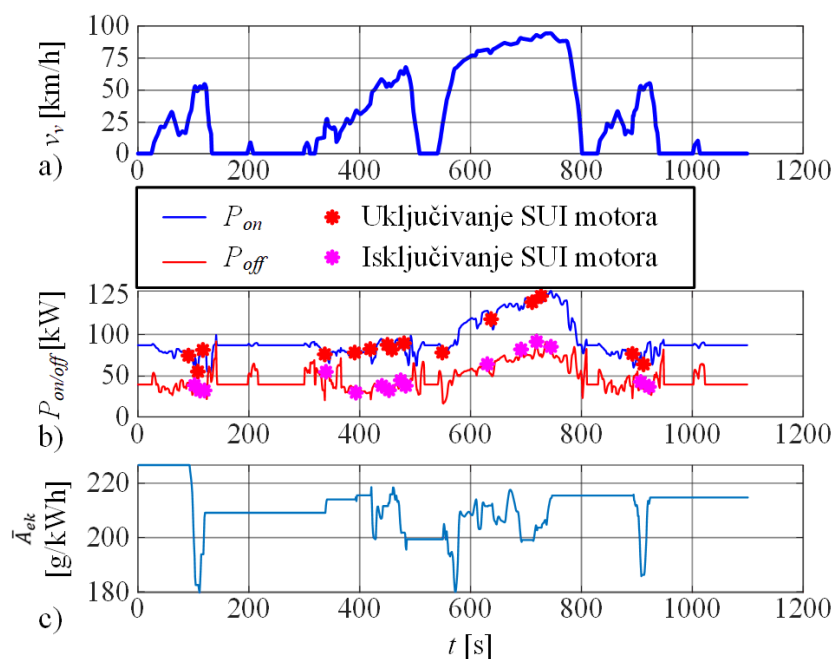
Odgovarajući razmještaji radnih točaka MSUI-a i M/G stroja prikazani su na slici 6-8 za DUB vozni ciklus. U usporedbi s RB+ECMS-EXT strategijom čije su radne točke dane na slici 5-8, A-RB+ECMS-EXT strategija uspijeva primjetno pogustiti radne točke dvaju strojeva u područja manje specifične potrošnje goriva, odnosno više učinkovitosti.

Vremenski odzivi adaptiranih parametara strategije upravljanja prikazani su na slici 6-6 za HDUDDS vozni ciklus. Ovaj odziv potvrđuje da se adaptirani parametri značajno mijenjaju kroz ciklus (usp. sliku 6-4 uz napomenu da je parametar P_{off} na kraju umanjen za širinu histereze). Pragovi P_{on} i P_{off} rastu kako vozilo prelazi iz urbane vožnje u vožnju na autocesti, što zorno potkrjepljuje adaptabilnost strategije s obzirom na vozne uvjete. Veći pragovi uključivanja MSUI-a otvaraju mogućnost strategiji upravljanja da koristi radne točke isključivo u područjima veće učinkovitosti MSUI-a, kako je prikazano na slici 6-8. Adaptirana specifična potrošnja goriva \bar{A}_{ek} mijenja se samo dok je MSUI uključen.

6. Adaptivna strategija upravljanja



Slika 6-8. Razmještaji radnih točaka MSUI-a i M/G stroja dobiveni simulacijom A-RB+ECMS-EXT i RB+ECMS-EXT sustava upravljanja (EXT-BWD model, CS režim rada i DUB vozni ciklus).



Slika 6-9. Vremenski odzivi adaptiranih parametara A-RB+ECMS-EXT strategije (b,c) za HDUDDS ciklus (a).

6. Adaptivna strategija upravljanja

6.2.2. Rezultati simulacija uz primjenu FWD modelu

Kvaliteta upravljanja primjenom RB+ECMS-EXT i A-RB+ECMS-EXT strategija ispitana je također uz primjenu preciznijeg FWD modela. Usporedni rezultati simulacije dani su u tablici 6-3. Adaptivna strategija i ovdje daje dosljedno bolje rezultate u odnosu na regularnu (RB+ECMS-EXT) strategiju u smislu manje korigirane potrošnje goriva. Razmjeri smanjenja potrošnje goriva slični su kao i u slučaju primjene EXT-BWD simulacijskog modela (usp. Tablicu 6-2). Obje strategije na FWD modelu ostvaruju nešto veće brojeve uključivanja MSUI-a i promjene stupnja prijenosa nego u slučaju primjene EXT-BWD simulacijskog modela, što se može objasniti dodatnom dinamikom koju uvodi model vozača sadržan isključivo u FWD modelu.

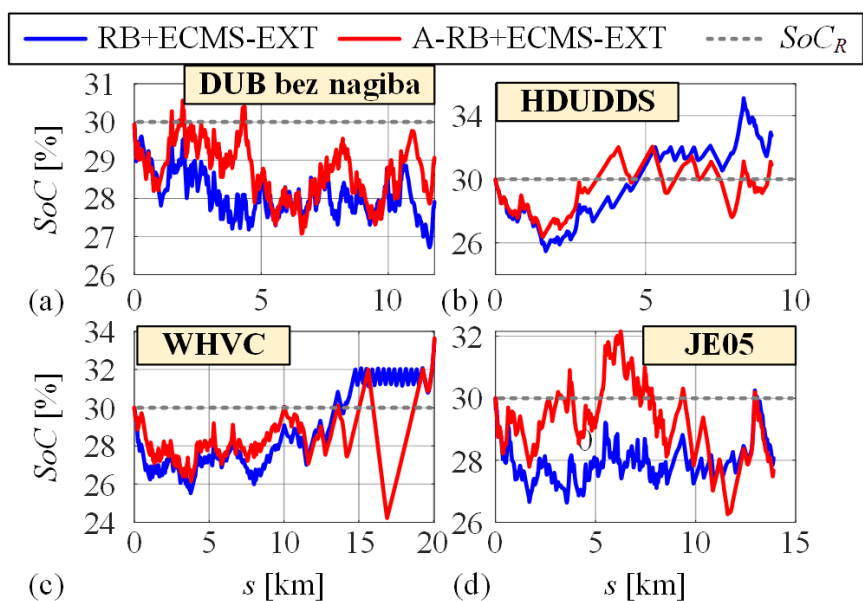
Tablica 6-3. Usporedni rezultati simulacija RB+ECMS-EXT i A-RB+ECMS-EXT sustava upravljanja (FWD model, CS režim).

		V_f [L]	$V_{f,corr}$ [L]	$SoC(t_f)$ [%]	N_e [-]	N_g [-]
DUB bez nagiba	RB+ECMS-EXT	2.16	2.23 (0.00%)	27.95	59 (0.0%)	452 (0.0%)
	A-RB+ECMS-EXT	2.17	2.19 (-1.6%)	29.05	59 (0.0%)	453 (+0.2%)
HDUDDS	RB+ECMS-EXT	2.30	2.16 (0.00%)	33.26	12 (0.0%)	106 (0.0%)
	A-RB+ECMS-EXT	2.14	2.15 (-0.5%)	30.90	17 (+41.6%)	113 (+6.6%)
WHVC	RB+ECMS-EXT	4.73	4.53 (0.00%)	33.40	29 (0.0%)	266 (0.0%)
	A-RB+ECMS-EXT	4.64	4.50 (-0.8%)	33.90	30 (+3.4%)	259 (-2.6%)
JE05	RB+ECMS-EXT	2.846	2.77 (0.00%)	28.07	25 (0.0%)	253 (0.0%)
	A-RB+ECMS-EXT	2.68	2.76 (-0.5%)	27.85	28 (+10.7%)	247 (-2.4%)

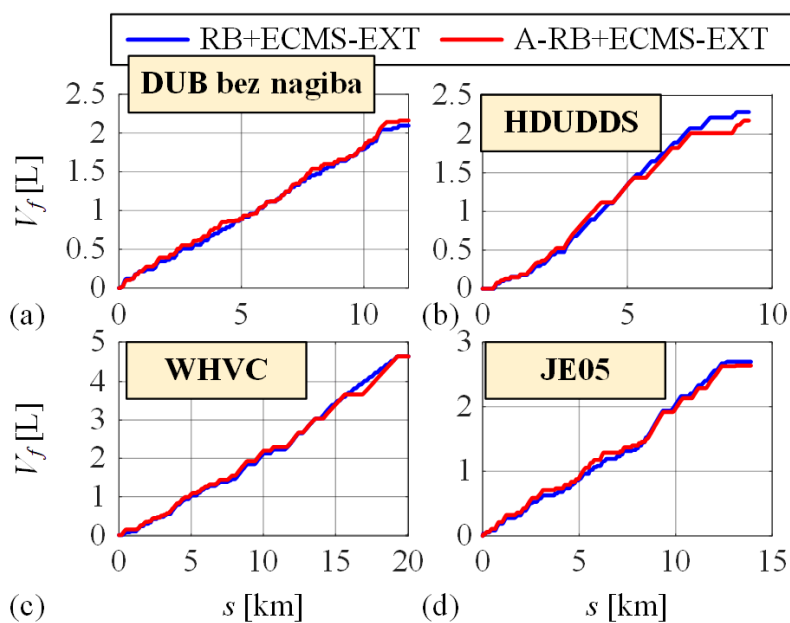
Odgovarajuće trajektorije SoC-a i kumulativne potrošnje goriva po prijedenoj puti izložene su na slikama 6-10 i 6-11. Slično kao i kod rezultata dobivenih uz primjenu EXT-BWD modela (usp. sliku 6-6), trajektorije SoC-a bliže su zadanoj vrijednosti $SoC_R = 30\%$, uz nešto veće oscilacije. Kako je pojašnjeno uz sliku 6-6, ovi rezultati upućuju na agresivnije punjenje i

6. Adaptivna strategija upravljanja

pražnjenje baterije korištenjem redom MSUI-a i M/G stroja u područjima veće učinkovitosti strojeva.



Slika 6-10. Usporedni odzivi SoC-a po prijedenoj puti dobiveni simulacijom A-RB+ECMS-EXT i RB+ECMS-EXT sustava upravljanja (FWD model i CS režim rada).



Slika 6-11. Usporedni odzivi kumulativne potrošnje goriva po prijedenoj puti dobiveni simulacijom A-RB+ECMS-EXT i RB+ECMS-EXT sustava upravljanja (FWD model i CS režim rada).

7. Modelsko prediktivna strategija upravljanja

U ovom poglavlju opisano je modelsko prediktivno upravljanje (MPC) PHEV-om. Predložena MPC strategija uzima u obzir dinamičke gubitke pogona opisane kroz EXT-BWD prediktivni model, provodi DP optimiranje na pomičnom horizontu te ostvaruje održivost SoC-a bez korištenja faktora ciljne funkcije koji bi bili osjetljivi na karakteristike voznog ciklusa. Formulacija ciljne funkcija zasniva se na Bellmanovom principu optimalnosti kroz formiranje regresijskog modela koji predviđa potrošnju goriva od kraja predikcijskog horizonta do kraja voznog ciklusa. MPC strategija provjerava se simulacijski uz primjenu EXT-BWD modela i u CS režimu rada. Razmatraju se slučajevi idealne predikcije brzine vozila i predviđanja brzine pomoću neuronske mreže.

7.1. Formulacija prediktivne strategije upravljanja

U svakom vremenskom koraku uzorkovanja ($T_d = 1$ s) MPC strategija upravljanja rješava optimizacijski problem na konačnom horizontu, kako bi se pronašao optimalni slijed upravljačkih varijabli tj. momenta MSUI-a τ_{eR}^* i prijenosnog omjera transmisije h^* . Samo prvi uzorak optimalnog upravljačkog vektora primjenjuje se na proces simuliran uz primjenu EXT-BWD modela. Kako bi se osiguralo globalno optimalno rješenje primjenjuje se DP algoritam optimiranja iz poglavlja 4. Pritom se koristi EXT-BWD predikcijski model dinamike vozila te predviđa brzina vozila. U tekućem koraku uzorkovanja primjenjuju se mjereni (ili estimirani) signali brzine vozila i SoC-a baterije te tako osigurava regulacijsko djelovanje MPC strategije.

U danom vremenskom koraku k , MPC strategija minimizira sljedeću funkciju cilja J_p na konačnom predikcijskom horizontu $k_p = [k, k+1, \dots, k+N_p-1]$:

$$J_{p,k} = \hat{J}_{k+N_p}(\mathbf{x}_{k+N_p}) + \sum_{k_p=k}^{k+N_p-1} F(\mathbf{x}_{k_p+1}, \mathbf{u}_{k_p}, \hat{\mathbf{v}}_{k_p}), \quad (7-1)$$

gdje drugi član na desnoj strani jednadžbe odražava funkciju cilja koja odražava potrošnju goriva na predikcijskom horizontu te uključuje meka ograničenja na varijable pogona PHEV-a kao što je definirano u (4-20). Optimizacijski problem rješava se DP algoritmom koristeći jednadžbu stanja EXT-BWD modela s tri varijable stanja danim jednadžbom (4-13) i upravljačkim varijablama danim u (4-12). Početne vrijednosti varijabli stanja optimizacijskog

7. Modelsko prediktivna strategija upravljanja

problema definiraju se varijablama stanja u trenutnom k -tom koraku, dok se konačnim vrijednostima varijabli stanja na kraju predikcijskog horizonta ($k+N_p$) ne zadaje ciljane vrijednosti te je vektor težinskih funkcija postavljen kao $\mathbf{K}_f = [0 \ 0 \ 0]^T$ (usp. s (4-19)). Optimizacijski problem koristi vektor ulaza \mathbf{v} dan jednadžbom (4-16) definiran na pomičnom horizontu duljine N_p . Prvi član na desnoj strani izraza (7-1), \hat{J}_{k+N_p} , predstavlja predviđenu optimalnu (minimalnu) kumulativnu potrošnju goriva od kraja predikcijskog horizonta $k+N_p$ i odgovarajućeg stanja sustava \mathbf{x}_{k+N_p} do vremenskog koraka $N-1$ i ciljanog stanja sustava \mathbf{x}_f . Član \hat{J}_{k+N_p} može se smatrati kao nadomjestak za penalizaciju končanog stanja na kraju horizonta predikcije, \mathbf{x}_{k+N_p} , a da se pritom ne koristi težinski faktor koji bi općenito bio ovisan o karakteristikama voznog ciklusa (primijetiti da su članovi ciljane funkcije (7-1) iste mjerne jedinice). Iz profila predikcije brzine $\hat{\mathbf{v}}_{k_p}$ određuju se moment kotača τ_w i brzina kotača ω_w prema izrazu (3-7) odnosno (2-3), koji predstavljaju vanjske ulazne varijable sadržane u vektoru \mathbf{v} prema izrazu (4-16). U idealnom slučaju vrijednosti \hat{J}_{k+N_p} člana za sve kombinacije diskretnih vrijednosti stanja \mathbf{x}_{k+N_p} trebale bi biti unaprijed poznate i mapirane u unazadnoj fazi DP algoritma za optimizacijski problem s zadanim stanjem sustava na kraju ciklusa \mathbf{x}_f kako je opisano u četvrtom poglavlju (v. jednadžbe (4-8) te (4-11)).

Egzaktno određivanje optimalne preostale potrošnje goriva \hat{J}_{k+N_p} iz ciljane funkcije (7-1) koristeći DP algoritam implicira potpuno znanje nadolazećeg voznog ciklusa, što nije realno. Stoga se član \hat{J}_{k+N_p} aproksimira van realnog vremena regresijskim modelom optimalne preostale potrošnje goriva, koja osim o konačnom stanju SoC-a na kraju predikcijskog horizonta SoC_{k+N_p} ovisi i o temeljnim značajkama preostalog voznog ciklusa:

$$\hat{J}_{k+N_p} \approx V_{f,m} \left(SoC_{k+N_p}, s_f - s_{k+N_p}, \mu_{\omega_w} |_{k+N_p}^N, \sigma_{\omega_w} |_{k+N_p}^N \right), \quad (7-2)$$

gdje $s_f - s_{k+N_p}$ predstavlja preostali put od kraja predikcijskog horizonta do kraja voznog ciklusa, dok značajke voznog ciklusa $\mu_{\omega_w} |_{k+N_p}^N$ i $\sigma_{\omega_w} |_{k+N_p}^N$ predstavljaju srednju vrijednosti i standardnu devijaciju brzine vrtnje kotača ω_w na preostalom segmentu voznog ciklusa. Struktura i parametrizacija regresijskog modela $V_{f,m}(\dots)$ prikazuje se u sljedećem potpoglavlju.

Kako bi se osigurala robusnost MPC strategije s obzirom na pogreške modela preostale potrošnje goriva $V_{f,m}(\cdot)$, tj. kako bi se povećala točnost ostvarenja konačnog uvjeta SoC_f , sljedeći penalizacijski član dodaje se ciljnoj funkciji (7-1):

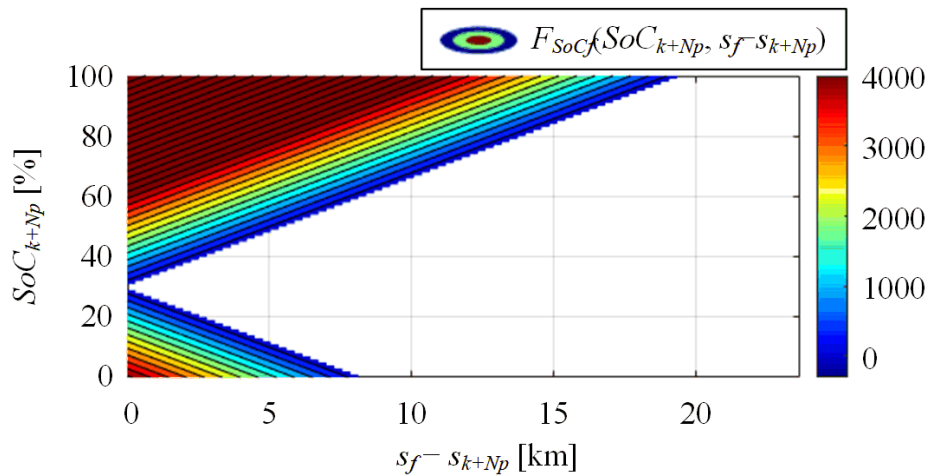
7. Modelsko prediktivna strategija upravljanja

$$F_{SoCf}(SoC_{k+N_p}, s_{k+N_p}) = \begin{cases} 0, & \text{ako } f_{SoCf} \leq 10^3 \\ f_{SoCf}(SoC_{k+N_p}, s_{k+N_p}), & \text{u suprotnom,} \end{cases} \quad (7-3)$$

gdje se član $f_{SoCf}(\cdot)$ određuje kao

$$f_{SoCf}(SoC_{k+N_p}, s_{k+N_p}) = k_1 |SoC_f - SoC_{k+N_p}| - k_2 (s_f - s_{k+N_p}), \quad (7-4)$$

tj. ovisi o preostalom putu ciklusa $s_f - s_{k+N_p}$ te odstupanju vrijednosti SoC-a na kraju predikcijskog horizonta, SoC_{k+N_p} , od ciljane vrijednosti SoC_f na kraju ciklusa. Težinski faktori k_1 i k_2 fiksirani su na vrijednosti $k_1 = 140000$ g odnosno $k_2 = 0.5$ g/m te nisu ovisni o voznom ciklusu. Penalizacijski član (7-3) ima za cilj implicitno usmjeriti odziv SoC-a prema ciljanoj vrijednosti $SoC_f = 30\%$ na kraju puta tj. kako pada $s_f - s_{k+N_p}$ (v. sliku 6-1 i primijetiti da $f_{SoCf}(\cdot)$ raste s približavanjem kraju voznog ciklusa, tj. uz $s_{k+N_p} \rightarrow s_f$ te utjecaj njegove minimizacije unutar ciljne funkcije (7-1) raste). Važno je napomenuti da u slučaju preciznog modela preostale potrošnje $V_{f,m}(\cdot)$, penalizacijski član ostaje neaktivan ($F_{SoCf} = 0$ g) zbog mrtve zone uključene u (7-3). U tom smislu, penalizacijski član djeluje kao sigurnosni mehanizam te se težinski koeficijenti k_1 i k_2 mogu fiksirati (nisu osjetljivi na značajke voznog ciklusa).



Slika 7-1. Ovisnost penalizacijskog člana F_{SoCf} o preostalom putu voznog ciklusa te o vrijednosti SoC-a na kraju predikcijskog horizonta.

U rubnom slučaju kada horizont predviđanja prijeđe preostalu duljinu voznog ciklusa ($k+N_p - 1 \geq N$), tj. neposredno pred kraj vožnje, MPC DP optimizacija se i dalje izvodi za istu duljinu horizonta predviđanja. No, uzorci predviđanja brzine vozila koji prelaze kraj voznog ciklusa

7. Modelsko prediktivna strategija upravljanja

postavljaju se na nulu. Preostala udaljenost $s_f - s_{k+N_p}$ korištena kao ulaz regresijskog modela (7-2) također se postavlja na nulu.

Kako bi se smanjio opseg pretraživanja optimalnog rješenja DP algoritma, donje i gornje vrijednosti SoC-a na predikcijskom horizontu ograničavaju se u svakom koraku uzorkovanja k na varijabilne limite, koji se konzervativno računaju primjenom sljedećih izraza:

$$SoC_{\min,p,k} = SoC_k - \frac{N_p P_{batt,max} T_d}{Q_{max} U_{oc}(SoC_f)}, \quad (7-5)$$

$$SoC_{\max,p,k} = SoC_k + \frac{N_p P_{batt,min} T_d}{Q_{max} U_{oc}(SoC_f)}, \quad (7-6)$$

gdje je model baterije pojednostavljen u linearni oblik, na temelju pretpostavke o bateriji kao skladištu energije a ne naboja. Ideja je da se SoC limiti odrede iz trenutnog stanja SoC_k i očekivanog prirasta odnosno pada SoC-a preko predikcijskog horizonta N_p , uz konzervativnu pretpostavku primjene maksimalne odnosno minimalne snage punjenja baterije. Definiranje užih granica minimalnih i maksimalnih vrijednosti SoC-a omogućava DP algoritmu korištenja manjeg broja koraka diskretizacije po SoC-u, $N_{s1,SoC}$, te time i smanjenja računalnog opterećenja bez utjecaja na točnost optimalnog rješenja.

7.2. Parametriranje prediktivne strategije upravljanja

S ciljem uspostavljanja i parametriranja regresijskog modela preostale potrošnje goriva $V_{f,m}(\cdot)$, formuliranog izrazom (7-2), obavljeno je DP optimiranje upravljačkih varijabli van realnog vremena, preko HDUDDS, JE05 i DUB ciklusa i u CS režimu rada ($SoC_i = SoC_f = 30\%$). Dimenzionalnost optimalnih funkcija cilja $J_k(\mathbf{x}_{N-k})$, koje se određuju u unazadnoj fazi DP algoritma (v. (4-9)) za sve kombinacije varijabli stanja, smanjuje se zanemarivanjem varijabli stanja $EN_{st,prev,k}$ te $h_{prev,k}$ (usp. s (4-13)), što u konačnici rezultira pojednostavljenjem parametrizacije modela preostale potrošnje goriva $V_{f,m}(\cdot)$. Naime, reducirana funkcija cilja $J_{k,j}(SoC_j, s_f - s_k)$, koja ovisi samo o diskretnoj razini SoC_j ($j = 1, 2, \dots, N_{s1,SoC}$) i preostaloj udaljenosti voznog ciklusa $s_f - s_k$, izvodi se iz originalne DP funkcije cilja $J_k(\mathbf{x}_{N-k})$, uzimanjem uzorka $J_{k,j}$ koji imaju najmanju vrijednost među onima za različite vrijednosti $EN_{st,prev,k}$ i $h_{prev,k}$, za svaku diskretnu vrijednost $SoC_{k,j}$.

7. Modelsko prediktivna strategija upravljanja

Slika 7-2 prikazuje DP optimalnu funkciju cilja $J_{k,j}(SoC_j, s_f - s_k)$ za 2xJE05 ciklusu. Ovako izdvojeni optimalni rezultati iz unazadne faze DP rješenja predstavljaju osnovu za tvorbu regresijskog modela (7-2). Slično kao u poglavlju 6, primjenjuje kvadratni regresijski model linearan u parametrima (usp. izraz (6-2)):

$$\mathbf{V}_{f,m} = \mathbf{\Phi}_{Vf} \cdot \boldsymbol{\theta}_{Vf}, \quad (7-7)$$

gdje je $\mathbf{\Phi}_{Vf}$ regresijska matrica čiji redci odgovaraju regresijskim vektorima $\boldsymbol{\varphi}_{Vf}$ za svaki k -ti korak uzorkovanja i j -tu razinu SoC-a:

$$\boldsymbol{\varphi}_{Vf} = \left[1 \quad s_f - s_k \quad (s_f - s_k)^2 \quad SoC_j \quad SoC_j^2 \quad \mu_{\omega w}|_{k+N_p}^N \quad \sigma_{\omega w}|_{k+N_p}^N \right] \quad (7-8)$$

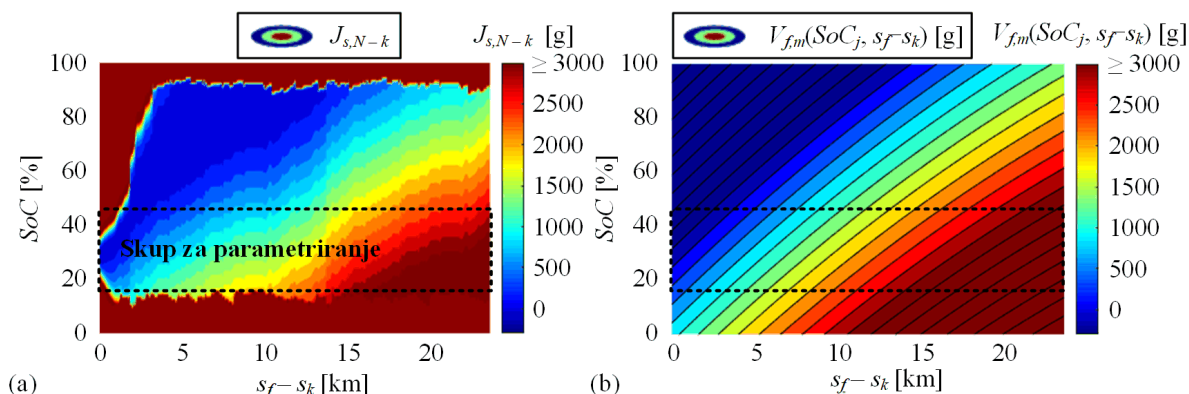
Vektor koeficijenata $\boldsymbol{\theta}_{Vf}$ u (7-7) dobiva se primjenom LASSO metode, koja je objašnjena u poglavlju 6 te formulirana izrazom (6-5).

DP optimalne mape $J_{k,j}(SoC_j, s_f - s_k)$, dobivene na 2xJE05 i 2xHDUDDS repetitivnim voznim ciklusima u CS režimu, koriste se u skupu za učenje odnosno parametriranje regresijskog modela. Budući da se razmatra CS režim, ne očekuje se da će vrijednost SoC-a značajno odstupati od zadanih rubnih uvjeta $SoC_i = SoC_f = 30\%$. Stoga se skup za učenje ograničava samo na vrijednosti mape $J_{k,j}(SoC_j, s_f - s_k)$ u području $[0.85, 1.15]SoC_f$, kao što je ilustrirano crtkanim linijama na slici 7-2a.

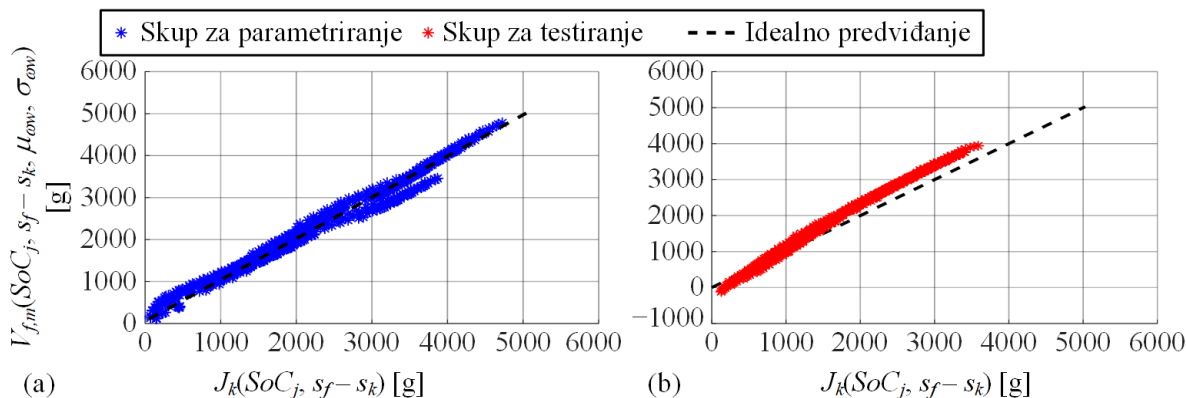
Regresijski modeli parametrirani LASSO i LS pristupima provjereni su na testnom skupu podataka dobivenom DP optimiranjem za 2xDUB repetitivni ciklus, koji odražava realistične i drugačije (dinamičke) uvjete vožnje u odnosu na certifikacijske cikluse korištene u učenju modela. Rezultati provjere dani su na slici 7-3, gdje su izlazi modela uspoređeni s vrijednostima funkcije cilja $J_{k,j}(SoC_j, s_f - s_k)$ skupa za učenje i testnog skupa. Modelom rekonstruirana je mapa preostale potrošnje goriva prikazana je na slici 7-2b za 2xJE05 vozni ciklus. U tablici 7-1 dani su pokazatelji točnosti regresijskog modela, gdje r označava linearnu korelaciju, R^2 označava koeficijent determinacije, a μ_r i σ_r su redom srednja relativna vrijednost i relativna standardna devijacija pogreške predviđanja (reziduala). Relativni iznosi μ_r i σ_r dobivene su dijeljenjem odgovarajućih apsolutnih vrijednosti s pripadnim maksimalnim apsolutnim vrijednostima pogreški predviđanja. Prema rezultatima danim na slici 7-3 i u tablici 7-1, regresijski model samo blago odstupi od DP optimalne mape, posebno na testnom skupu gdje je koeficijent R^2 ima vrijednost oko 0.9 dok je $\mu_r = -6.3\%$. Preciznost regresijskog model $V_{f,m}(\cdot)$

7. Modelsko prediktivna strategija upravljanja

potencijalno bi se mogla poboljšati uvođenjem preostalih varijabli stanja $EN_{st,prev,k}$ te $h_{prev,k}$ kao ulaznih varijabli modela, što bi s druge strane povećalo njegovu složenost.



Slika 7-2. Optimalna funkcija cilja $J_{k,j}(SoC_j, s_f - s_k)$ dobivena za 2xJE05 repetitivni ciklus (a) te odgovarajući odziv regresijskog modela (b) (2xJE05 vozni ciklus).



Slika 7-3. Ilustracija točnosti regresijskog modela preostale potrošnje goriva na skupu za učenje (a) i testiranje (b).

Tablica 7-1. Pokazatelji točnosti regresijskog modela preostale potrošnje goriva.

	$r[-]$	$R^2[-]$	μ_r [%]	σ_r [%]
Skup za učenje	0.986	0.972	0.1	10.6
Skup za testiranje	0.991	0.907	-6.3	14.5

Kako bi se dodatno ispitala robusnost razvijenog regresijskog modela $V_{f,m}(\cdot)$, model je preparametriran na skupu za učenje kojeg čine dva vozna ciklusa iz skupa (2xHDUDDS, 2xJE05, 2xDUB), a testiranje se provodi na trećem ciklusu iz istog skupa. Rezultati ovakve unakrsne provjere, dani u tablici 7-2, pokazuju da R^2 vrijednosti ostaju relativno visoke u svim slučajevima (veće ili jednake 0.9), tj. potvrđuje se robusnost modela. Najniža R^2 vrijednost

7. Modelsko prediktivna strategija upravljanja

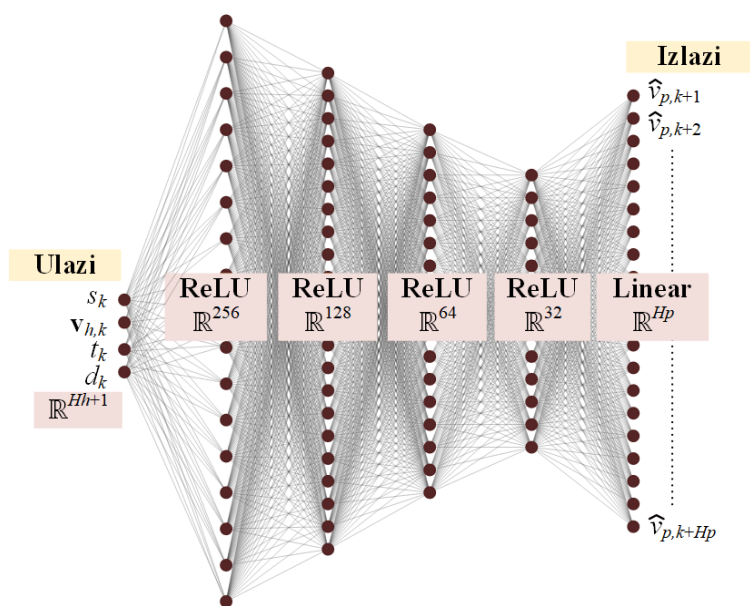
iznosa 0.895 dobiva se u slučaju gdje se DUB i JE05 ciklusi koriste za učenje modela, dok se HDUDDS ciklus primjenjuje za testiranje. Ovo se može objasniti prilično različitim uvjetima vožnje za ta dva skupa voznih ciklusa (v. sliku 2-8).

Tablica 7-2. Koeficijenti determinacije (R_t^2) unakrsne provjere modela preostale potrošnje goriva.

$R_t^2(V_{f,m}, J_k)$		Skup za učenje		
		2xHDUDDS, 2xJE05	2xHDUDDS, 2xDUB	2xDUB, 2xJE05
Skup za testiranje	2xHDUDDS	0.940	0.916	0.895
	2xJE05	0.990	0.977	0.988
	2xDUB	0.906	0.984	0.981

7.3. Predviđanje brzine vozila

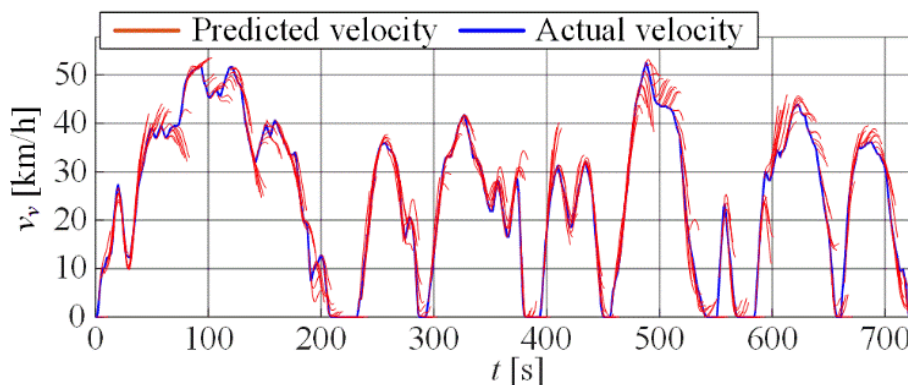
Model predviđanja profila brzine gradskog autobusa na pomičnom predikcijskom horizontu predložen je u [108] i [109] u obliku neuronske mreže i usvojen u ovom radu za potrebe realizacije MPC sustava. Model se temelji na velikom broju snimljenih voznih ciklusa na istoj ruti kojoj odgovaraju DOB vozni ciklusi. Prema shemi na slici 7-4, ulazi u model su trenutačna pozicija vozila s_k na danoj ruti, vektor neposredne povijesti brzina duljine N_h , te podataka o vremenu i danu u tjednu. Model predviđa budući profil brzine na pomičnom horizontu duljine N_p .



Slika 7-4. Struktura modela predviđanja brzine vozila temeljenog na neuronskoj mreži [109].

7. Modelsko prediktivna strategija upravljanja

U [109] je pokazano da se dobra točnost predviđanja brzine vozila može postići za duljinu vektora prethodnih brzina N_h postavljenu u rasponu od 20 do 50 s (što uz $T_d = 1$ odgovara vremenskom intervalu od 20 do 50 s). Primjerice, uz $N_h \leq 10$ s postiže se $R_t^2 > 0,8$, dok se solidna točnost predstavljena s $R_t^2 > 0,6$ postiže uz $N_p \leq 25$. Točnost predviđanja ilustrira se vremenskim odzivima prikazanim slici 7-5 na primjeru. Više detalja o tvorbi i provjeri modela predviđanja brzine vozila mogu se naći u [108] te [109].



Slika 7-5. Ilustracija predviđanja brzine gradskog autobusa pomoću modela danog na slici 7-4.

7.4. Simulacijski rezultati

Predložena MPC strategija simulacijski je provjerena primjenom EXT-BWD modela vozila i za razne vozne ciklusa i CS režim rada. Razmatraju se različite inačice MPC strategije s obzirom na različite duljine horizonta predviđanja N_p , različite realizacije regresijskog modela preostale potrošnje goriva $V_{f,m}$ te idealizirano i realno predviđanje brzine vozila. Rezultati dobiveni MPC strategijom uspoređuju se s optimalnim i adaptivnim strategijama (RB+ECMS, RB+ECMS-EXT, A-RB+ECMS-EXT) prikazanim u poglavljima 5 i 6.

7.4.1. Usporedni rezultati za slučaj idealiziranog predviđanje brzine vozila

Tablica 7-3 prikazuje usporedne rezultate simulacijske provjere gore spomenutih strategija upravljanja, uključujući dvije inačice MPC strategije koje se razlikuju u parametrizaciji $V_{f,m}$ -modela danog u (7-7):

MPC-1) osim konačne SoC vrijednosti na kraju horizonta predviđanja SoC_{k+N_p} , samo preostala prijeđena udaljenost $s_f - s_{k+N_p}$ se uzima u obzir kao ulaz $V_{f,m}$ -modela;

7. Modelsko prediktivna strategija upravljanja

MPC-2) srednja vrijednost (μ_{ow}) i standardna devijacija (σ_{ow}) brzine kotača na preostalom putu također su uključeni kao ulazi $V_{f,m}$ -modela, upravo kao što je dano u (7-8).

Duljina horizonta predviđanja postavljena je na $N_p = 10$ na temelju analize dane u sljedećem odjeljku. Pretpostavlja se idealizirano (egzaktno) poznavanje profila brzine na horizontu predviđanja. Unutar MPC DP algoritma, amplituda varijable stanja SoC_j diskretizirana je u 10 razina ($N_{s1,SoC} = 10$) na rasponu između $SoC_{min,p,k}$ i $SoC_{max,p,k}$ (danih u jednadžbama (7-5) odnosno (7-6)), dok broj razina diskretizacije uzorkovanja momenta MSUI-a iznosi $N_{u2,te} = 25$. Simulacijska provjera provedena je za slučaj CS režima ($SoC_i = SoC_f = SoC_R = 30\%$). Kvaliteta upravljanja analizira se kao i u prethodnim poglavljima s obzirom na pokazatelje konačne potrošnje goriva V_f (uz pridodan podatak o relativnom povećanju u odnosu na DP referentno mjerilo), broja pokretanja MSUI-a N_e i broja promjena stupnja prijenosa N_g .

Usporedni rezultati dani u tablici 7-3 pokazuju da za najrealističniji DUB vozni ciklus, MPC strategija daje značajnije smanjenje potrošnje goriva u odnosu na ostalim strategije, te da je ostvarena potrošnja goriva vrlo blizu globalno optimalne potrošnje dobivene DP algoritmom (u slučaju MPC-2 potrošnja goriva je samo 1.10% veća od DP optimalne). Osim toga, MPC strategija općenito završava s konačnom vrijednošću $SoC(t_f)$ bliže ciljnoj vrijednosti $SoC_f = 30\%$ te rezultira primjetno nižim brojem događaja uključivanja motora (N_e) i promjene stupnja prijenosa (N_g) u usporedbi s ECMS pristupima. Kvaliteta upravljanja ostvarena jednostavnijom i sa stanovišta primjene manje zahtjevnom MPC-1 strategijom bliske su performansama MPC-2 strategije (1.68% u odnosu na 1.10% veća potrošnja goriva u usporedbi s DP referentnim mjerilom). Sveukupno, rezultati pokazuju da poboljšanje strategija upravljanja uvođenjem novih svojstava rezultira dosljednim i značajnim smanjenjem potrošnje goriva tj. približenjem globalnom optimumu (s 8.70%, preko 3.39% i 5.21%, na 1.1% približenja). Isti trendovi dosljednog poboljšanja kvalitete upravljanja uz uvođenje naprednijih strategija upravljanja uočeni su i za druge certifikacijske cikluse dane u tablici 7-3, ali s nešto manjim razmjerima smanjenja potrošnje goriva nego za dinamičniji i realističniji DUB vozni ciklus. Određeni izuzetak od ovog trenda može se primijetiti na HDUDDS voznom ciklusu, za koji MPC strategije daju nešto veću potrošnju goriva u odnosu na adaptivne i regularnu RB+ECMS-EXT strategiju. Ovaj gubitak performansi pripisuje se nižoj točnosti $V_{f,m}$ -modela za taj određeni vozni ciklus (v. tablicu 7-2 i pripadnu diskusiju).

7. Modelsko prediktivna strategija upravljanja

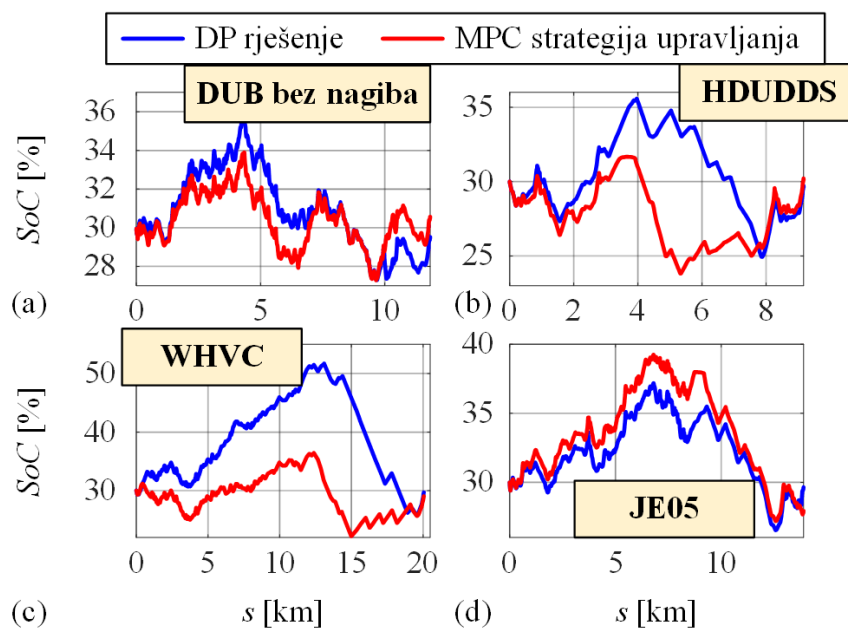
Tablica 7-3. Usporedni pokazatelji kvalitete upravljanja PHEV-om uz primjenu raznih razvijenih strategija upravljanja uključujući dvije inačice MPC strategije.

Ciklus	Strategija	V_f [L]	$SoC(t_f)$ [%]	N_e [-]	N_g [-]
DUB bez nagiba	RB+ECMS	2.103 (+8.7%) ¹	28.93	383	48
	RB+ECMS-EXT	2.035 (+5.2%)	28.95	371	45
	Adaptivna RB+ECMS-EXT	2.061 (+3.4%)	30.37	360	41
	MPC-1	2.030 (+1.7%)	30.51	425	29
	MPC-2	2.011 (+1.1%)	29.42	432	30
HDUDDS	RB+ECMS	2.342 (+3.4%)	33.14	88	11
	RB+ECMS-EXT	2.306 (+2.1%)	33.12	79	12
	Adaptivna RB+ECMS-EXT	2.169 (+1.2%)	30.35	80	16
	MPC-1	2.030 (+2.7%)	30.05	62	12
	MPC-2	2.206 (+2.3%)	30.12	67	13
WHVC	RB+ECMS	4.631 (+3.7%)	31.35	187	22
	RB+ECMS-EXT	4.618 (+3.1%)	31.38	188	22
	Adaptivna RB+ECMS-EXT	4.677 (+2.0%)	34.08	189	25
	MPC-1	4.420 (+1.1%)	29.05	224	22
	MPC-2	4.375 (+0.8%)	28.33	113	21
JE05	RB+ECMS	2.720 (+4.6%)	28.18	220	24
	RB+ECMS-EXT	2.680 (+3.0%)	28.24	236	22
	Adaptivna RB+ECMS-EXT	2.644 (+2.0%)	28.04	237	25
	MPC-1	2.560 (+1.8%)	27.94	131	24
	MPC-2	2.755 (+1.6%)	30.23	131	26

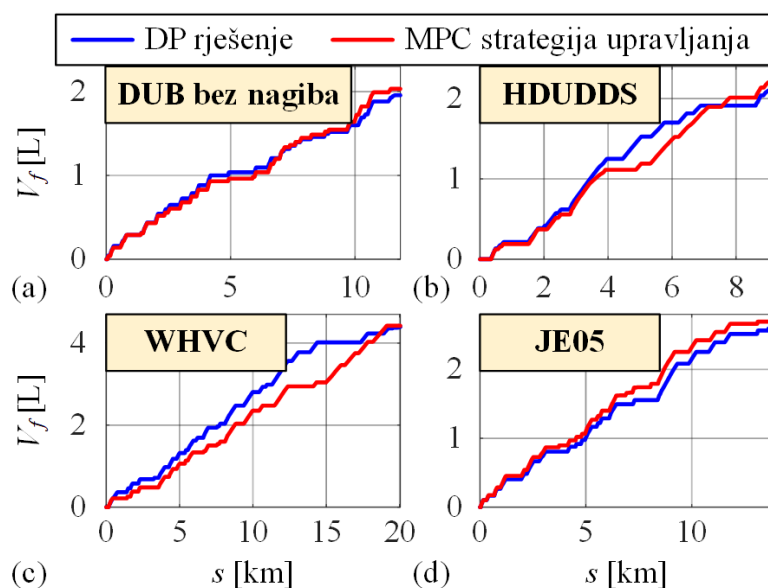
Odgovarajuće trajektorije SoC-a i kumulativne potrošnje goriva po prijedenoj puti za slučaj praktičnije MPC-1 strategije prikazane su na slikama 7-6 i 7-7 te su uspoređene s optimalnim trajektorijama dobivenim DP optimiranjem van realnog vremena. Za slučajeve DUB i JE05 voznih ciklusa, SoC trajektorije (a slično i V_f -trajektorije) dobivene MPC strategijom blisko prate DP optimalne SoC trajektorije, dok u slučajevima WHVC i HDUDDS ciklusa dolazi do primjetnih kvantitativnih odstupanja. Radne točke MSUI-a i M/G stroja dobivene MPC-1 strategijom za DUB vojni ciklus dane su na slici 7-8. MPC strategija uspijeva koncentrirati veliku većinu radnih točaka pogonskih strojeva u područja visoke učinkovitosti posebno niže

7. Modelsko prediktivna strategija upravljanja

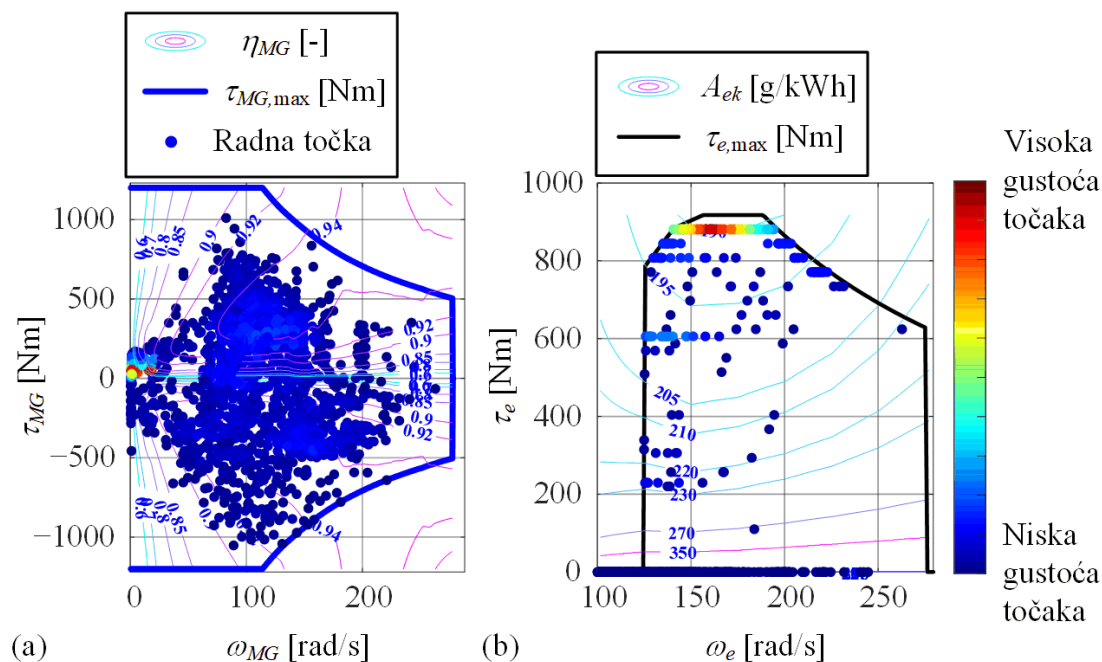
korisnog MSUI-a (usp. sliku 6-8), što u konačnici rezultira manjom potrošnjom goriva u odnosu na A-RB+ECMS-EXT i ostale RB+ECMS strategije.



Slika 7-6. Odzivi SoC-a po prijedenoj puti uz primjenu MPC-1 strategije u usporedbi s DP-optimalnim rezultatima (EXT-BWD model i CS režim rada).



Slika 7-7. Odzivi kumulativne potrošnje goriva po prijedenoj puti uz primjenu MPC-1 strategije u usporedbi s DP-optimalnim rezultatima (EXT-BWD model i CS režim rada).



Slika 7-8. Razmještaji radnih točaka MSUI-a i M/G stroja dobiveni simulacijom MPC-1 sustava upravljanja (EXT-BWD model, CS režim rada i DUB vozni ciklus).

7.4.2. Analiza utjecaja predikcijskog horizonta

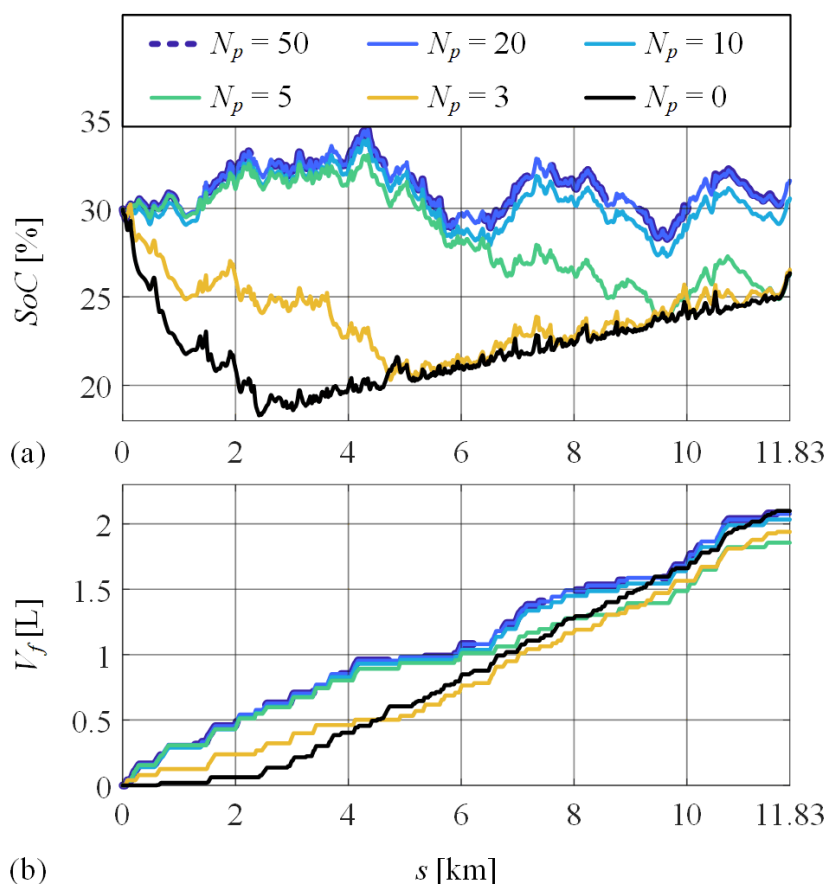
Usporedni pokazatelji kvaliteta upravljanja uz primjenu MPC-1 strategije i razne iznose duljine predikcijskog horizonta N_p izloženi su u tablici 7-4 za DUB vozni ciklus. Najdulji razmatrani predikcijski horizont ($N_p = 50$) očekivano rezultira najmanjom potrošnjom goriva, no uz praktično zanemarivu razliku u odnosu na slučajeve $N_p = 20$ i $N_p = 10$. Performanse MPC strategije počinju biti primjetno lošije za slučajeve $N_p < 5$. U slučaju $N_p = 0$, gdje MPC strategija optimira upravljačke varijable samo u trenutnom koraku, dobivena potrošnja goriva je drastično povećana (čak preko 15% viša od referentnog mjerila), dok se broj prebacivanja stanja MSUI-a poveća pet puta u odnosu na sve druge duljine horizonta.

Pripadne trajektorije SoC-a i kumulativne potrošnje goriva po prijedenoj puti dane su na slici 7-9. Za duljine horizonta $N_p \geq 10$ SoC trajektorije i potrošnje goriva imaju vrlo sličan izgled. Za $N_p = 5$ konačna vrijednost SoC-a kreće odstupati od zadane vrijednosti od $SoC_f = 30\%$ te se pri kraju puta stabilizira, očito zbog djelovanja penalizacijskog člana $F_{SoC_f}(\cdot)$ danog izrazom (7-3). No, u tom slučaju se i dalje ostvaruje svega 1.88% veću potrošnju goriva od referentnog mjerila (Tablica 7-4), što je bolje nego za A-RB+ECMS-EXT strategiju. Značajna degradacija trajektorija SoC-a može se primijetiti za $N_p \leq 3$, gdje utjecaj člana $F_{SoC_f}(\cdot)$ postaje snažniji u stabilizaciji SoC-a kako ciklus odmiče, a što pak ima značajan utjecaj na potrošnju goriva.

7. Modelsko prediktivna strategija upravljanja

Tablica 7-4. Usporedni pokazatelji kvalitete upravljanja uz primjenu MPC-1 strategije za razne duljine predikcijskog horizonta i DUB vozni ciklus.

Ciklus	Duljina predikcijskog horizonta N_p	V_f [L]	$SoC(t_f)$ [%]	N_e [-]	N_g [-]
DUB bez nagiba	$N_p = 50$	2.110 (+1.6%)	32.42	418	29
	$N_p = 20$	2.111 (+1.6%)	32.48	422	29
	$N_p = 10$	2.030 (+1.7%)	30.51	425	29
	$N_p = 5$	1.870 (+1.9%)	26.68	441	28
	$N_p = 3$	1.87 (+2.6%)	26.33	442	29
	$N_p = 0$	2.100 (+15.2%)	26.30	569	148



Slika 7-9. Trajektorije SoC-a (a) i kumulativne potrošnje goriva (b) po prijedenoj puti dobivene uz primjenu MPC-1 strategije za različite duljine predikcijskog horizonta N_p i DUB vozni ciklus.

7.4.3. Utjecaj penalizacijskog člana konačnog SoC-a na performanse MPC-a

Utjecaj dodatnog penalizacijskog člana $F_{SoC_f}(\cdot)$, danog izrazom (7-6) i povezanog s penalizacijom odstupanja konačne vrijednosti SoC-a na kraju predikcijskog horizonta od ciljane vrijednosti SoC_f , analiziran je na temelju simulacijskih rezultata MPC-2 sustava upravljanja. Rezultati su dani u Tablici 7-5 i vrlo su slični u oba slučaja, tj. s i bez uključenog člana $F_{SoC_f}(\cdot)$. Ovime se potvrđuje da, zahvaljujući $V_{f,m}$ -modelu, MPC strategija može kvalitetno funkcionirati čak i bez penalizacije odstupanja od ciljanog SoC_f na horizontu predviđanja. Pa ipak, prisutnost penalizacijskog člana $F_{SoC_f}(\cdot)$ dosljedno rezultira time da je konačna vrijednost $SoC(t_f)$ bliža zadanoj konačnoj vrijednosti $SoC_f = 30\%$. Također, potrošnja goriva je ponešto smanjena, uz manju iznimku DUB ciklusa.

Tablica 7-5. Usporedni pokazatelji kvalitete upravljana uz primjenu MPC-1 strategije za slučajeve s i bez penalizacije SoC-a na kraju predikcijskog horizonta.

Ciklus	Strategija	V_f [L]	$SoC(t_f)$ [%]	N_e [-]	N_g [-]
DUB	MPC-2 s $F_{SoC_f}(\cdot)$	2.011 (+1.1%) ¹	29.42	432	30
	MPC-2 bez $F_{SoC_f}(\cdot)$	1.930 (+0.9%)	27.60	433	29
HDUDDS	MPC-2 s $F_{SoC_f}(\cdot)$	2.206 (+2.3%)	30.12	67	13
	MPC-2 bez $F_{SoC_f}(\cdot)$	2.128 (+2.9%)	28.49	66	13
WHVC	MPC-2 s $F_{SoC_f}(\cdot)$	4.375 (+0.8%)	28.33	113	21
	MPC-2 bez $F_{SoC_f}(\cdot)$	4.232 (+0.9%)	24.82	113	21
JE05	MPC-2 s $F_{SoC_f}(\cdot)$	2.755 (+1.6%)	30.23	131	26
	MPC-2 bez $F_{SoC_f}(\cdot)$	2.602 (+1.7%)	27.22	132	26

7.4.4. Utjecaj pogreške predviđanja brzine vozila

Tablica 7-6 prikazuje rezultate simulacije MPC-2 sustava za slučajeve idealiziranog (egzaktnog) i realističnog predviđanja brzine, gdje se potonji temelji na neuronskoj mreži

7. Modelsko prediktivna strategija upravljanja

opisanoj u odjeljku 7.3. Simulacijske provjere obavljene su preko tri snimljena vozna ciklusa izdvojena iz skupa za testiranje modela predikcije brzine, a koji su označeni kao DUB-1, DUB-2 i DUB-3. U svrhu sveobuhvatnije usporedbe, tablica 7-6 također uključuje rezultate dobivene uz primjenu adaptivnu i regularne RB+ECMS-EXT strategije upravljanja.

Tablica 7-6. Usporedni pokazatelji kvalitete upravljanja uz primjenu adaptivne i regularne RB+ECMS-EXT strategije te MPC strategija s idealiziranim i realističnim predviđanjem brzine vozila.

Ciklus	Strategija	V_f [L]	$SoC(t_f)$ [%]	N_e [-]	N_g [-]
DUB-1	RB+ECMS-EXT	0.742 (+3.4%)	28.45	113	16
	Adaptivna RB+ECMS-EXT	0.837 (+2.2%)	30.82	104	11
	MPC-2 s idealnim znanjem $v(t)$	0.675 (+1.6%)	27.23	68	18
	MPC-2 s predikcijom $v(t)$	0.668 (+3.3%)	26.80	72	19
DUB-2	RB+ECMS-EXT	0.953 (+2.0%)	30.77	146	18
	Adaptivna RB+ECMS-EXT	0.953 (+2.5%)	30.91	145	17
	MPC-2 s idealnim znanjem $v(t)$	0.923 (+0.7%)	30.35	79	11
	MPC-2 s predikcijom $v(t)$	0.953 (+1.8%)	30.77	80	10
DUB-3	RB+ECMS-EXT	0.836 (+2.6%)	28.34	156	12
	Adaptivna RB+ECMS-EXT	0.962 (+1.7%)	31.42	155	10
	MPC-2 s idealnim znanjem $v(t)$	0.868 (+0.1%)	29.61	177	11
	MPC-2 s predikcijom $v(t)$	0.868 (+1.6%)	29.60	111	9

MPC strategija s idealiziranim predviđanjem brzine vozila ponovno je superiorna u odnosu na druge strategije i vrlo je blizu globalnog DP rješenja. Očekivano, kada se koristi realistično

7. Modelsko prediktivna strategija upravljanja

predviđanje brzine vozila, performanse MPC sustava degradiraju. Međutim, u dva od tri slučaja iz tablice 7-6 (DUB-2 i DUB-3), realistična MPC strategija je nešto bolja od obje ECMS strategije. Također, u većini slučajeva MPC strategija značajno smanjuje broj događaja uključivanja motora (N_e) i promjena brzina (N_g). Pa ipak, ako se uzme u obzir kompleksnost tj. računalna zahtjevnost MPC strategije, za očekivati je da će računalno učinkovita i po kvaliteti konkurentna adaptivna strategija biti pogodnija za primjenu.

8. Planiranje reference stanja napunjenosti baterije za kombinirani način rada

U ovom poglavlju predlažu se postupci planiranja optimalnih nelinearnih referenci SoC-a baterije za BLND režim rada, koje zahtijevaju predznanje ili procjenu samo nekoliko značajki nadolazećeg voznog ciklusa te se izvode prije početka vožnje (van realnog vremena) ili adaptivno tj. tijekom same vožnje (u stvarnom vremenu). Predloženi postupci temelje se na analizama optimalnih SoC trajektorija dobivenih primjenom DP algoritma na EXT-BWD model PHEV-a, kako je dano u poglavlju 4. Simulacijska provjera provodi se u sklopu RB+ECMS-EXT strategiju upravljanja uz primjenu EXT-BWD modela i karakterističnih voznih ciklusa, uključujući različite profile nagiba ceste te prisustvo zona niske emisije (LEZ). Pritom se provodi i analiza robusnosti s obzirom na pogreške u procjeni značajki voznog ciklusa.

8.1. Planiranje reference SoC-a van realnog vremena

8.1.1. Linearna referenca

Za BLND režim u literaturi se najčešće koristi i predlaže linearno padajući profil SoC reference po prijedenoj puti, što je u skladu s globalno optimalnim SoC odzivima za slučaj uobičajenih (certifikacijskih) voznih ciklusa (poglavlje 4). Linearna SoC referenca ima na početku voznog ciklusa vrijednost jednaku početnom stanju $SoC_i = SoC(0)$, a završava s ciljnom vrijednošću $SoC_f = SoC(t_f)$ za kraj voznog ciklusa [79]:

$$SoC_{R,k+1} = SoC_{R,k} + \frac{SoC_f - SoC_i}{s_f} v_{v,k} T_d, \quad (8-1)$$

pri čemu je dovoljno poznavanje samo puta s_f kojeg treba prijeći kroz nadolazeći vozni ciklus tj. putovanje (brzina vozila v_v je mjerljiva a $T_d = 1$ s je vrijeme uzorkovanja).

8.1.2. Nelinearna referenca u prisustvu LEZ-ova

U slučaju prisustva jednog ili više LEZ-ova koristi se profil SoC reference po prijedenoj puti koja je po dijelovima linearna (v. potpoglavlje 4.3) kako bi pratila trendove odgovarajućih optimalnih SoC odziva danih u četvrtom poglavlju (slika 4-8, [79]). Pritom se ponovno

8. Planiranje reference stanja napunjenosti baterije za kombinirani način rada

pretpostavlja poznavanje puta s_f kojeg treba prijeći, te k tome i rasporeda LEZ-ova po prijednom putu s . Uz to, uzima se u obzir da se kumulativna promjena SoC-a, $\Delta\widehat{SoC}_{LEZ}$, kroz ukupan put duž LEZ-ova, s_{LEZ} , može unaprijed odrediti kako je pokazano uz potpoglavlju 2.2 [77]. Uz navedene pretpostavke, gradijenti SoC reference računaju odvojeno za odsječke puta van LEZ-ova prema izrazu

$$\frac{\Delta SoC_{R,k}}{\Delta s_k} = \begin{cases} \frac{SoC_f - SoC_i - \Delta\widehat{SoC}_{LEZ}}{s_f - s_{LEZ}}, & \text{za } K_{LEZ}(s_k) = 0, \\ \frac{\Delta\widehat{SoC}_{LEZ}}{s_{LEZ}}, & \text{za } K_{LEZ}(s_k) > 0, \end{cases} \quad (8-2)$$

Konačno, trajektorija SoC reference rekonstruira se kao:

$$SoC_{R,k+1} = SoC_{R,k} + \frac{\Delta SoC_{R,k}}{\Delta s_k} v_{v,k} T_d. \quad (8-3)$$

8.1.3. Nelinearna referenca u slučaju promjenjivog nagiba ceste

U slučaju promjenjivog nagiba ceste, uz znanje o duljini puta s_f pretpostavlja se i znanje o profilu nagiba ceste $\delta_r(s)$, srednjoj brzini vozila \bar{v}_v te srednjoj zahtijevanoj snazi ciklusa \bar{P}_d . Ukupna duljina puta s_f i profil nagiba ceste $\delta_r(s)$ mogu se odrediti iz navigacijskog sustava vozila, dok se srednja brzina \bar{v}_v i srednja zahtijevana snaga \bar{P}_d mogu odrediti iz povijesnih podataka za dani segment ceste i period dana ili umreženih sustava za nadzor prometa u realnom vremenu, prva izravno a druga izravno za flote istovjetnih vozila (npr. gradski autobusi ili dostavni kamioni) ili neizravno, tj. uz primjenu modela uzdužne dinamike vozila.

Kao što je prikazano na slici 4-10 i dano izrazom (4-24), optimalna vremenska derivacija SoC-a u regenerativnom kočenju i električnom načinu rada ($\dot{SoC}_{app,k}$) može se precizno aproksimirati kvadratnom jednadžbom u funkciji zahtijevane snage na ulazu u transmisiju $P_{d,k}$. Kombiniranjem izraza (2-2) i (2-3), zahtijevana snaga $P_{d,k}$ može se izraziti kao

$$P_{d,k} = \underbrace{M_{v,k} \dot{v}_{v,k} v_{v,k} \eta_{tr,k}^{k_t}}_{P_{d,acc,k}} + \underbrace{\rho_{air} A_f C_d v_{v,k}^3 \eta_{tr,k}^{k_t}}_{P_{d,aero,k}} + \underbrace{M_{v,k} R_0 g \cos(\delta_{r,k}) v_{v,k} \eta_{tr,k}^{k_t}}_{P_{d,roll,k}} + \underbrace{M_{v,k} g \sin(\delta_{r,k}) v_{v,k} \eta_{tr,k}^{k_t}}_{P_{d,grade,k}} + P_{0,k}(\omega_w). \quad (8-4)$$

Uz pretpostavku konstantne srednje brzine kroz ciklus \bar{v}_v , konstantne mase vozila M_v te srednje učinkovitosti transmisije $\bar{\eta}_{tr}$, zahtijevana snaga $P_{d,k}$ može se unaprijed približno odrediti kao:

8. Planiranje reference stanja napunjenosti baterije za kombinirani način rada

$$\begin{aligned} \hat{P}_{d,k} = & \hat{P}_{d,acc} + \underbrace{\rho_{air} A_f C_d \bar{v}_v^3 \bar{\eta}_{tr}^{k_t}}_{\hat{P}_{d,aero}} + \underbrace{M_v R_0 g \cos(\delta_{r,k}) \bar{v}_v \bar{\eta}_{tr}^{k_t}}_{\hat{P}_{d,roll,k}} + \\ & + \underbrace{M_v g \sin(\delta_{r,k}) \bar{v}_v \bar{\eta}_{tr}^{k_t}}_{\hat{P}_{d,grade,k}} + \underbrace{P_0 \left(\frac{\bar{v}_v}{r_w} \right)}_{\hat{P}_0}, \end{aligned} \quad (8-5)$$

pri čemu se potrošnja energije vezana uz ubrzanje vozila $\hat{P}_{d,acc}$ računa se tako da zadovolji srednja zahtijevana snaga \bar{P}_d za koju je pretpostavljeno da je poznata unaprijed:

$$\hat{P}_{d,acc} = \bar{P}_d - \hat{P}_{d,aero} - \hat{P}_0 - \frac{\sum_{k=0}^{N-1} (\hat{P}_{d,roll,k} + \hat{P}_{d,grade,k})}{N}. \quad (8-6)$$

Za korake uzorkovanja u kojima vrijedi $\hat{P}_{d,k} < P_{d,th}$, tj. u kojima PHEV isključivo radi u električnom načinu rada (uključujući regenerativno kočenje), vremenska derivacija SoC reference određuje se prema (4-24). Pritom bi se prag $P_{d,th}$, iznad kojeg se pretežito koristi hibridni način rada, mogao odrediti iz slike 4-10. No, radi jednostavnosti i robusnosti s obzirom na vozni ciklus, u ovom, ionako aproksimativnom izračunu konzervativno se uzima $P_{d,th} = 0$, tj. prag se postavlja na rub regenerativnog načina rada. Temeljem rezultata na slici 4-11 koji impliciraju linearne gradijente SoC-a, u slučaju pretežitog hibridnog načina rada, tj. uz $\hat{P}_{d,k} \geq P_{d,th}$, zadaje se konstantni gradijent SoC reference po putu koji će zadovoljiti zadanu vrijednost SoC_f na kraju puta. Uzimajući u obzir navedeno, gradijent SoC reference

$$\frac{\Delta SoC_{R,k}}{\Delta s_k} = \begin{cases} (k_{1,SoC} \hat{P}_{d,k}^2 + k_{2,SoC} \hat{P}_{d,k}) \frac{1}{\bar{v}_v}, & \text{za } \hat{P}_{d,k} \leq 0, \\ \frac{SoC_i - SoC_f - \Delta SoC_{reg,off}}{s_f - \Delta s_{reg,off}}, & \text{u suprotnom,} \end{cases} \quad (8-7)$$

gdje $\Delta SoC_{reg,off}$ i $\Delta s_{reg,off}$ predstavljaju kumulativnu promjenu SoC-a i puta u regenerativnom kočenju (dakle, uz $P_{d,th} \leq 0$), a koji se uz pretpostavku konstantne (srednje) brzine \bar{v}_v mogu izračunati na sljedeći način iz aproksimirane trajektorije zahtijevane snage $\hat{P}_{d,k}$ dane izrazom (8-5):

$$\Delta SoC_{reg,off} = \sum_{k=0}^{N-1} \phi_{1,k} T_d, \quad \phi_{1,k} = \begin{cases} k_1 \hat{P}_{d,k}^2 + k_2 \hat{P}_{d,k} + k_3, & \text{za } \hat{P}_{d,k} \leq 0, \\ 0, & \text{u suprotnom,} \end{cases} \quad (8-8)$$

$$\Delta s_{reg,off} = \sum_{k=0}^{N-1} \phi_{2,k}, \quad \phi_{2,k} = \begin{cases} \bar{v}_v T_d, & \text{za } \hat{P}_{d,k} \leq 0, \\ 0, & \text{u suprotnom,} \end{cases} \quad (8-9)$$

8. Planiranje reference stanja napunjenosti baterije za kombinirani način rada

gdje se ukupni broj koraka procjenjuje kao $N=s_f/(T_d\bar{v}_v)$, tj. prijedeni put neophodan za ažuriranje nagiba ceste $\delta_{r,k}$ u izrazu (8-5) procjenjuje se prema $s_k=kT_d\bar{v}_v$.

Uz gradijent SoC reference određen prema izrazu (8-7), konačni profil SoC reference rekonstruira se prije početka voznog ciklusa primjenom iterativne jednadžbe (8-3). U slučaju nultog nagiba ceste, opisana nelinearna metoda rezultirat će linearnom trajektorijom SoC reference danoj izrazom (8-1). Naime, zbog pretpostavke konstantne brzine vozila \bar{v}_v te uz nulti nagib ceste, aproksimirana zahtijevana snaga $\hat{P}_{d,k}$ bit će prema izrazu (8-5) uvijek pozitivna (bez regenerativnog kočenja), što će prema (8-7), uz $\Delta SoC_{reg,off} = 0$ i $\Delta s_{reg,off}$, rezultirati jednakim gradijentom SoC reference kao onim u (8-1).

8.2. Planiranje reference SoC-a u realnom vremenu

Kako bi se planiranje reference SoC-a adaptiralo na varijabilne značajke voznih ciklusa, predlaže se metoda planiranja u realnom vremenu. Ideja je da se relevantne značajke SoC trajektorije ažuriraju u realnom vremenu koristeći mjerenja iz već prijednog dijela voznog ciklusa, te iskoriste za ažuriranje gradijenta reference SoC-a.

8.2.1. Procjena relevantnih značajki SoC trajektorije u realnom vremenu

Kod planiranja SoC reference van realnog vremena (potpoglavlje 2.1), ukupna promjena SoC-a i put koji će se prijeći u regenerativnom kočenju ($\Delta SoC_{reg,off}$ i $\Delta s_{reg,off}$) aproksimiraju se prije početka voznog ciklusa. Kod planiranja u realnom vremenu ove procjene se ažuriraju u stvarnom vremenu na osnovu mjernih vrijednosti od početka putovanja do tekućeg koraka uzrokovanja, te se označavaju kao $\Delta \widehat{SoC}_{reg,N}$ odnosno $\Delta \hat{s}_{reg,N}$. Iste veličine aproksimiraju se i za (radni) električni način rada, gdje se označavaju kao $\Delta \widehat{SoC}_{el,N}$ odnosno $\Delta \hat{s}_{el,N}$. Ažurirane procjene se zatim kasnije koriste za izračunavanje gradijenta SoC reference u realnom vremenu (odjeljak 2.2.2).

Kako je prikazano na slici 4-11 i diskutirano u poglavlju 4, optimalne trajektorije SoC-a razložene na sekcije regenerativnog kočenja te električnog i hibridnog načina rada prate linearan trendove unutar svake sekcije. Stoga se ukupna promjena SoC-a za regenerativno kočenje i električni način rada može procijeniti u realnom vremenu s pomoću linearne ekstrapolacije kumulativne promjene SoC-a u odgovarajućim načinima rada i prijednog puta izmjerenim do trenutnog (k -tog) koraka uzorkovanja.

8. Planiranje reference stanja napunjenosti baterije za kombinirani način rada

$$\Delta\widehat{SoC}_{reg,N} = \Delta\hat{s}_{reg,N} \frac{\Delta SoC_{reg,k}}{\Delta s_{reg,k}} = \frac{S_f}{S_k} \underbrace{\Delta s_{reg,k}}_{\Delta\hat{s}_{reg,N}} \frac{\Delta SoC_{reg,k}}{\Delta s_{reg,k}} = \frac{S_f}{S_k} \Delta SoC_{reg,k}, \quad (8-10)$$

$$\Delta\widehat{SoC}_{el,N} = \Delta\hat{s}_{el,N} \frac{\Delta SoC_{el,k}}{\Delta s_{el,k}} = \frac{S_f}{S_k} \underbrace{\Delta s_{el,k}}_{\Delta\hat{s}_{el,N}} \frac{\Delta SoC_{el,k}}{\Delta s_{el,k}} = \frac{S_f}{S_k} \Delta SoC_{el,k}, \quad (8-11)$$

gdje su s_k te $\Delta SoC_{reg,k}$ i $\Delta SoC_{el,k}$ redom prijeđeni put te kumulativne promjene SoC-a u regenerativnom kočenju i električnom načinu rada do k -tog koraka uzorkovanja.

Procjena ukupno prijeđenog puta u hibridnom načinu rada $\Delta\hat{s}_{hib,N}$ za općeniti slučaj prisustva LEZ-a određuje se kao

$$\Delta\hat{s}_{hib,N} = S_f - s_{LEZ} - \Delta\hat{s}_{reg,N} - \Delta\hat{s}_{el,N} = S_f - s_{LEZ} - \frac{S_f}{S_k} \underbrace{\Delta s_{reg,k}}_{\Delta\hat{s}_{reg,N}} - \frac{S_f}{S_k} \underbrace{\Delta s_{el,k}}_{\Delta\hat{s}_{el,N}}, \quad (8-12)$$

gdje se procjene ukupnog prijeđenog puta u regenerativnom kočenju i električnoj vožnji, $\Delta\hat{s}_{reg,N}$ i $\Delta\hat{s}_{el,N}$, također ažuriraju u svakom vremenskom koraku uzorkovanja k temeljem do tada prijeđenog puta s_k te do tada prijeđenih puteva u regenerativnoj i električnoj vožnji, $\Delta s_{reg,k}$ i $\Delta s_{el,k}$. Konačno, ukupna promjena SoC-a u hibridnoj vožnji, $\Delta\widehat{SoC}_{hib,N}$, ažurira se iz uvjeta da se zadovolji konačno stanje SoC_f na kraju ciklusa:

$$\Delta\widehat{SoC}_{hib,N} = SoC_f - SoC_i - \Delta\widehat{SoC}_{LEZ} - \Delta\widehat{SoC}_{el,N} - \Delta\widehat{SoC}_{reg,N}, \quad (8-13)$$

gdje su ažurirane vrijednosti $\Delta\widehat{SoC}_{el,N}$ i $\Delta\widehat{SoC}_{reg,N}$ dane izrazima (8-10) i (8-11). Pritom se ukupna promjena SoC-a unutar LEZ-a, $\Delta\widehat{SoC}_{LEZ}$, aproksimira na početku voznog ciklusa temeljem srednje brzine vozila \bar{v}_v i srednje zahtijevane snage \bar{P}_d , koji se mogu procijeniti iz povijesnih ili aktualnih prometnih podataka na određenoj ruti, kako je diskutirano u potpoglavlju 2.1 (usp. izraz (8-7)):

$$\Delta\widehat{SoC}_{LEZ} = \frac{s_{LEZ}}{\bar{v}_v} (k_{1,SoC} \bar{P}_d^2 + k_{2,SoC} \bar{P}_d). \quad (8-14)$$

U slučaju izraženo promjenjivog nagiba ceste, predstavljene procjene ukupne promjene SoC i prijeđenoga puta mogu biti neprecizne. Stoga se uvode ograničenja na procjene ukupne promjene SoC-a u regenerativnom kočenju s obzirom na vrijednost $\Delta SoC_{reg,off}$ izračunatu van realnog vremena za slučaj promjenjivog nagiba ceste prema izrazu (8-8):

8. Planiranje reference stanja napunjenosti baterije za kombinirani način rada

$$k_l \Delta SoC_{reg,off} \leq \Delta \widehat{SoC}_{reg,N} \leq k_u \Delta SoC_{reg,off}, \quad (8-15)$$

gdje se interval dopuštenih varijacija SoC-a definira faktorima $k_l = 0.85$ i $k_u = 1.15$. Drugim riječima, ne dopušta se da *on-line* procjena $\Delta \widehat{SoC}_{reg,N}$ odstupa za više od $\pm 15\%$ od *off-line* procjene $\Delta SoC_{reg,off}$. Također, postavlja se dodatno ograničenje na $\Delta \widehat{SoC}_{reg,N}$ prema nejednakosti

$$0 \geq (SoC_f - SoC_i - \Delta \widehat{SoC}_{reg,N} - \Delta \widehat{SoC}_{LEZ}) \geq \Delta \widehat{SoC}_{el,N}. \quad (8-16)$$

gdje donje ograničenje proizlazi iz (8-13) uz konzervativnu pretpostavku da nema hibridnog načina rada, dok nulto gornje ograničenje odražava činjenicu da SoC u električnoj vožnji može samo padati. Konačno, procjena ukupno prijednog puta u hibridnom načinu rada, ažurirana prema izrazu (8-12), ograničava se primjenom nejednakosti

$$0 \leq \Delta \hat{s}_{hib,N} \leq s_f - \Delta \hat{s}_{reg,N} - s_{LEZ}, \quad (8-17)$$

gdje nulto donje ograničenje odražava fizikalni limit, dok gornje ograničenje odgovara procjeni za konzervativni slučaj nepostojanja električne vožnje.

8.2.2. Generiranje SoC reference

Gradijent SoC reference računa se u svakom koraku uzorkovanja k temeljem zahtijevane snage na ulazu u transmisiju $P_{d,k}$, brzine vozila $v_{v,k}$ te procjena promjena SoC-a i puta u različitim načinima rada danim izrazima (8-10)-(8-14) uz ograničenja (8-15)-(8-17):

$$\frac{\Delta SoC_{R,k}}{\Delta S_k} = \begin{cases} (k_{1,SoC} P_{d,k}^2 + k_{2,SoC} P_{d,k}) \frac{1}{v_{v,k}}, & \text{za } P_{d,k} \leq P_{d,th} \text{ ili } K_{LEZ}(s_k) > 0, \\ \frac{\Delta \widehat{SoC}_{hib,N} + \Delta SoC_{R,corr}}{\Delta \hat{s}_{hyb,N}}, & \text{u suprotnom,} \end{cases} \quad (8-18)$$

gdje se u električnom, regenerativnom i LEZ načinu rada ponovno uzima u obzir kvadratna aproksimacija vremenske derivacije SoC-a prema izrazu (4-24), pri čemu se prema optimalnim rezultatima danim na slici 4-10 prag zahtijevane snage postavlja na $P_{d,th} = 50$ kW. Gradijent SoC reference određen jednadžbom (8-18) za svaki k -ti korak koristi se za određivanje SoC reference u realnom vremenu prema jednadžbi (8-3).

Gradijent SoC reference izračunat prema izrazu (8-18) ograničava se s donje i gornje strane primjenom sljedeće nejednakosti:

8. Planiranje reference stanja napunjenosti baterije za kombinirani način rada

$$\frac{1}{v_{v,k}} \dot{SoC}_{app}(P_{d,k}) \leq \frac{\Delta SoC_{R,k}}{\Delta s_k} \leq \frac{1}{v_{v,k}} \dot{SoC}_{max}, \quad (8-19)$$

gdje je derivacija SoC-a uključena u donji limit određen izrazom (4-24) te odražava činjenicu da pad SoC-a ne može biti veći od onog u električnoj vožnji odnosno da porast SoC-a ne može biti manji od onog u regenerativnom kočenju. Kako RB dio strategije ne može odrediti način rada u realnom vremenu prije određivanja vrijednosti reference SoC-a u k -tom koraku SoC_R , nejednakost dana u jednadžbi (8-19) primjenjuje se neovisno o hibridnom ili električnom načinu rada. Gornji limit uključuje maksimalnu vremensku derivaciju SoC-a, koja ovisi o maksimalnoj snazi baterije $P_{batt,max}$ prema izrazu koji slijedi iz jednadžbe (2-10) [79]:

$$\dot{SoC}_{max} = \frac{\sqrt{U_{oc}^2(SoC) - 4R(SoC)P_{batt,max}} - U_{oc}(SoC)}{2Q_{max}R(SoC)} \quad (8-20)$$

gdje su vrijednosti $U_{oc}(SoC)$ te $R(SoC)$ parametara uzeti za srednju vrijednost SoC-a: $SoC = 50\%$.

Predviđanja temeljena na jednadžbama (8-12) i (8-13) mogu biti neprecizna u određenim slučajevima promjenjivih nagiba ceste, mješovitih obrazaca vožnje (npr. urbana vožnja kombinirana s vožnjom na autocesti), što može rezultirati SoC referencom koja nije optimalna i odstupa od zadane vrijednosti SoC_f na kraju putovanja. Kako bi se poboljšala robusnost metode generiranja SoC reference, nametnuta su ograničenja predviđanja kako je dano nejednakostima (8-15) do (8-17). Uz ta ograničenja, u jednadžbu (8-18) uveden je i korektivni izraz $\Delta SoC_{R,corr}$ kako bi se dodatno poboljšala robusnost s obzirom na pogreške predviđanja danih jednadžbama (8-12) i (8-13). U tu svrhu postavlja se pomoćna SoC referentna putanja dobivena metodom generiranja nelinearne SoC reference van realnog vremena $SoC_{R,off}$, kako je opisano u odjeljku 8.1.3. Korektivni član računa se u svakom koraku uzrokovanja prema izrazu

$$\Delta SoC_{R,corr} = k_{R,corr}(SoC_{R,off,k} - SoC_{R,k}), \quad (8-21)$$

gdje je $SoC_{R,off,k}$ trenutna vrijednost SoC reference dobivene metodom planiranja van realnog vremena. Cilj korektivnog djelovanja $\Delta SoC_{R,corr}$ nije natjerati metodu generiranja SoC reference u realnom vremenu da čvrsto prati pomoćnu referencu $SoC_{R,off}$, nego da u slučajevima većih pogreški estimacija ukupno prijeđenog puta i promjene SoC-a u hibridnom načinu rada ($\Delta \hat{s}_{hib,N}$ odnosno $\Delta \widehat{SoC}_{hib,N}$), osigura dostatnu razinu robusnosti tako da dobivena SoC referenca završi blizu zadane vrijednosti SoC_f na kraju ciklusa. Stoga, pojačanje korektivnog

8. Planiranje reference stanja napunjenosti baterije za kombinirani način rada

člana postavljeno je empirijski na neveliki iznos $k_{R,corr} = 5$ s ciljem postizanja kompromisa između lokalno-optimalnog i robusnog generiranja reference SoC-a.

U početnom dijelu voznog ciklusa, procjene promjene SoC-a i prijednog puta u regenerativnom kočenju i električnom načinu rada mogu biti vrlo neprecizne jer se zasnivaju na malom skupu uzoraka. Stoga se isključivo u prva dva kilometra voznog ciklusa primjenjuje SoC gradijent izračunat van realnog vremena, prema izrazu (8-1) za temeljni slučaj, (8-7) za slučaj promjenjivog nagiba ceste ili (8-2) u slučaju prisustva LEZ-ova.

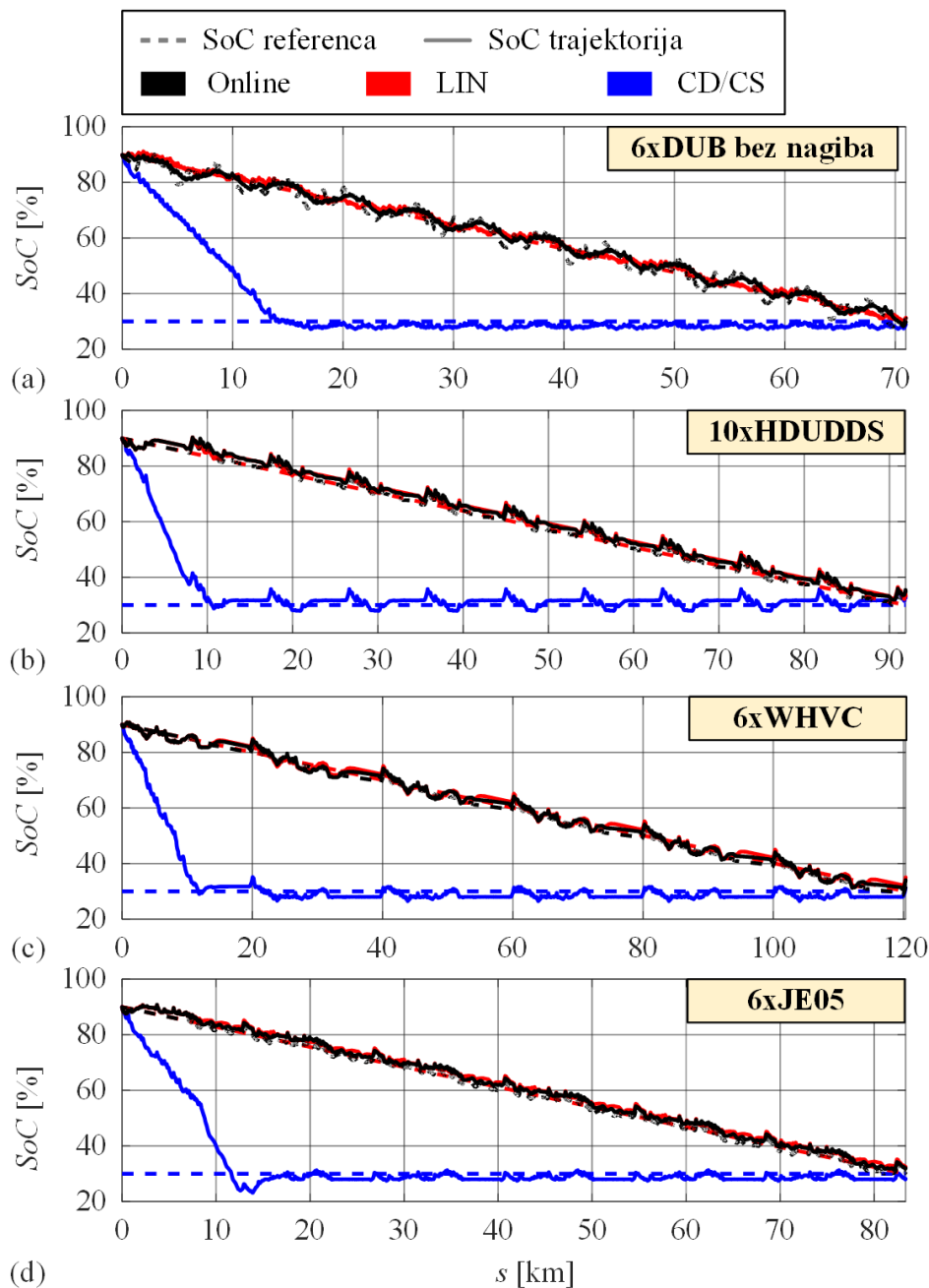
8.3. Rezultati simulacija

Simulacijska provjera predloženih postupaka sinteze referentne trajektorije SoC-a provedena je na EXT-BWD modelu PHEV-a koristeći neadaptivnu, RB+ECMS-EXT strategiju upravljanja. Dodatno je ispitana robusnost sinteze s obzirom na pogreške primijenjenih aproksimacija.

8.3.1. Nulti nagib ceste

Slika 8-1 prikazuje odzive SoC-a (pune linije) te odgovarajuće profile SoC referenci (crtkane linije) dobivene različitim metodama planiranja za BLND režim rada i razne vozne cikluse. Početna i konačna vrijednost SoC-a postavljeni su na $SoC_i = 90\%$ i $SoC_f = 30\%$. Na sliku je pridodan i odziv u CD/CS režimu rada, za koji je referenca SoC-a postavljena na $SoC_R = 30\%$. Svi SoC odzivi u BLND režimu prate jasan linearni trend. Odgovarajući pokazatelji kvalitete upravljanja dani su u tablici 8-1. Rezultati dobiveni za linearnu SoC referencu označeni su labelom 'LIN', dok su oni koji se odnose na sintezu reference SoC-a u realnom vremenu označeni kao 'Online'. Rezultati sinteze van realnog vremena nisu dani jer se podudaraju s 'LIN' rezultatima za razmatrani temeljni slučaj nultog nagiba ceste (potpoglavlje 2.1).

8. Planiranje reference stanja napunjenosti baterije za kombinirani način rada



Slika 8-1. SoC trajektorije po prijeđenom putu dobivene različitim metodama planiranja SoC referenci za 6xDUB bez nagiba (a) 10xHDUDDS (b) 6xWHVC (c) te 6xJE05 (d) repetitivne cikluse u BLND te CD-CS režimima.

Simulacijski rezultati izloženi u tablici 8-1 pokazuju da CD-CS režim rezultira za 3.7% do 8% većom potrošnjom goriva u odnosu na DP referentno mjerilo ovisno o voznom ciklusu. Primjenom BLND režima i linearne SoC reference potrošnja goriva se smanjuje na iznose koji su za 3.4% do 4.5% viši od globalno optimalnog rješenja. Primjenom metode planiranja u realnom vremenu potrošnja goriva se dosljedno smanjuje. No, za dani temeljni slučaj nultog nagiba ceste i bez prisustva LEZ-a, ovo smanjenje je malo, te je prirast potrošnje u odnosu na

8. Planiranje reference stanja napunjenosti baterije za kombinirani način rada

referentno mjerilo u rasponu od 3.3% do 4.3%. Svi razmatrani pristupi rezultiraju prihvatljivim odstupanjima od ciljanog konačnog stanja $SoC_f = 30\%$. Viša kvaliteta upravljanja u BLND režimu odnosu na CD/CS režim objašnjava se dodatnim stupnjem slobode upravljanja (poglavlje 2). Bolje performanse sinteze SoC reference u realnom vremenu u odnosu na linearnu referencu (odnosno onu dobivenu van stvarnog vremena) mogu se objasniti time da sinteza u realnom vremenu anticipira prilike za regenerativno kočenje te ažurira SoC referencu kako bi se učinkovitije koristila regenerirana energija.

Tablica 8-1. Rezultati simulacija RB+ECMS-EXT strategije upravljanja u CD-CS i BLND režimima za različite metode planiranja SoC reference i nulti nagib ceste.

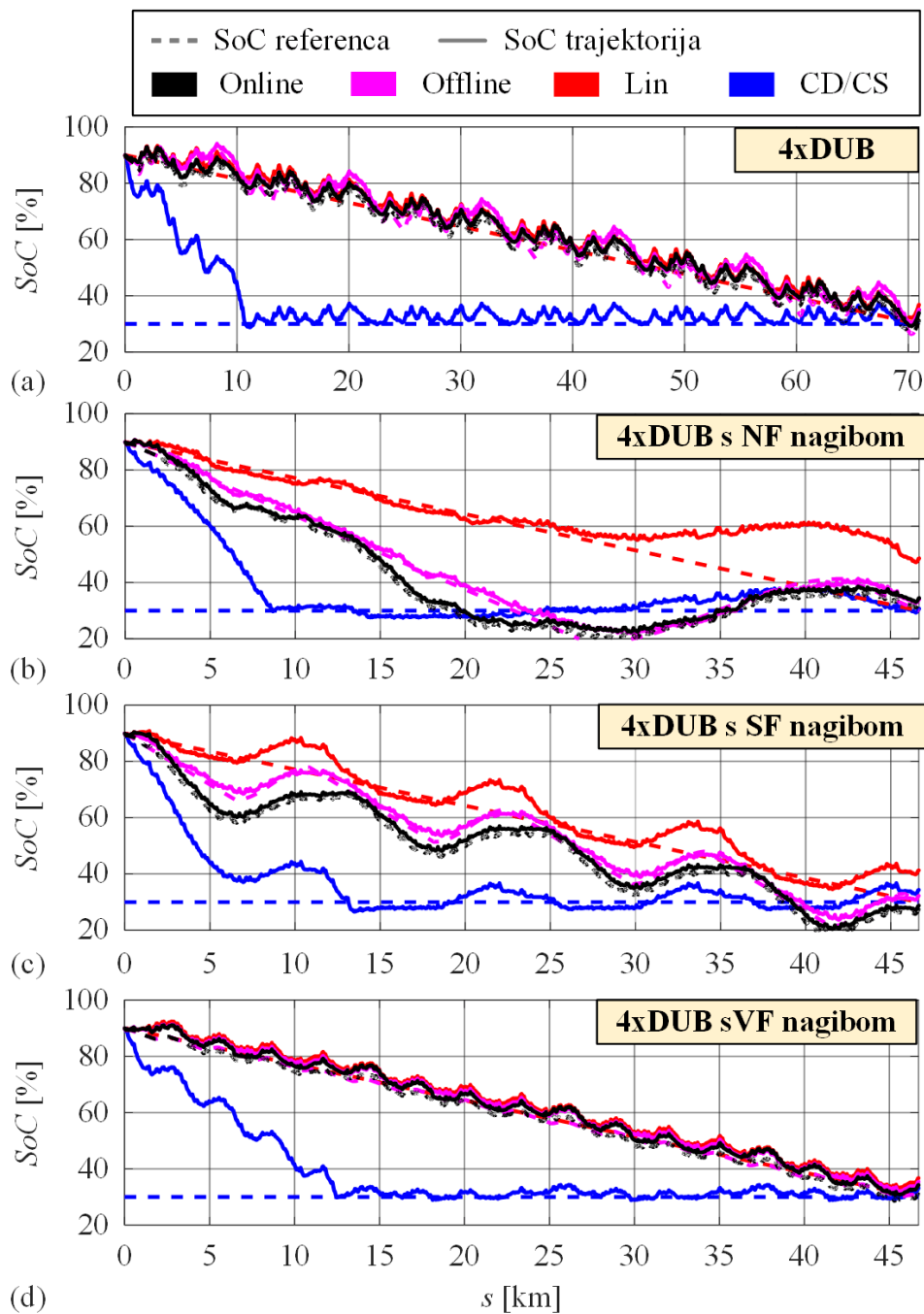
Ciklus	Strategija	V_f [L]	$SoC(t_f)$ [%]	N_e [-]	N_g [-]
6xDUB bez nagba	CD/CS	9.95 (+8.0%)	28.95	232	2190
	LIN	9.72 (+4.5%)	31.36	227	2171
	Online	9.83 (+4.3%)	29.81	217	2170
10xHDUDDS	CD/CS	19.37 (+3.7%)	33.12	116	764
	LIN	19.40 (+3.6%)	33.82	125	780
	Online	19.40 (+3.3%)	25.29	130	771
6xWHVC	CD/CS	24.86 (+4.7%)	31.38	126	1105
	LIN	24.81 (+3.8%)	35.03	115	1114
	Online	24.74 (+3.6%)	34.07	115	1119
6xJE05	CD/CS	13.98 (+4.8%)	28.23	112	1365
	LIN	14.03 (+3.8%)	32.54	132	1364
	Online	14.01 (+3.8%)	32.03	144	1362

8.3.2. Varijabilni nagib ceste

Promjenjivi nagib ceste realiziran je kroz repetitivni DUB ciklus sa snimljenim profilom nagiba ceste te sinusoidnim nagibima ceste različite prostorne frekvencije kako je ilustrirano na slici 4-6. Dobiveni odzivi SoC-a te pripadne SoC reference za BLND režim dane su na slici 8-2, zajedno s onima koji se odnose na CS-CS režim. Odgovarajući numerički rezultati prikazani su u tablici 8-2. Rezultati na slici 8-2 pokazuju da nagib ceste ima značajan utjecaj na oblik odziva SoC-a po prijeđenome putu. Pritom valja primijetiti da odzivi SoC-a vjerno prate projektirane reference samo u slučajevima nelinearnih referenci, bilo onih generiranih u ili van realnog vremena. Time se automatski osigurava i ostvarenje konačnog uvjeta, tj. $SoC(t_f) \cong SoC_f = 30\%$ (v. i tablicu 8-2). S druge strane, u slučaju linearne SoC reference, dobiveni odzivi SoC-a mogu značajno odstupati od referentne trajektorije, posebno kod niske (NF) i srednje frekvencije (SF) oscilacija nagiba ceste. na kraju ciklusa mogu drastično odstupati od zahtijevane vrijednosti SoC_f . To ujedno dovodi do značajnog prebačaja konačnog stanja. Drugim riječima, baterija je na kraju ciklusa ostala prepunjena na račun povećanje potrošnje goriva (tablica 8-2), što se protivi temeljnom zahtjevu da se vožnja u čim većoj mjeri obavi na temelju električne energije (iz mreže).

Potrošnja goriva dobivena različitim metodama planiranja SoC reference V_f uspoređena je s potrošnjom goriva dobivenom regresijskim modelom optimalne potrošnje za danu vrijednost $SoC(t_f)$ na kraju ciklusu (v. potpoglavlje 5.2. i sliku 5-5). Prema rezultatima u tablici 8-2, potrošnja goriva u CD-CS režimu povećana je u odnosu na DP referentno mjerilo za 2.5% do 7.4%, ovisno o voznom ciklusu. Primjenom BLND režima i linearne SoC reference, prirast potrošnja goriva u odnosu na DP rješenje iznosi od 1.9% do 6.2%. Planiranjem nelinearne reference van realnog vremena (*offline*) ostvaruje dodatne uštede goriva naspram linearne reference, tj. prirast potrošnje goriva u odnosu na DP optimum iznosi od 1.6% do 5.4%. Uz generiranje nelinearne reference u realnom vremenu (*online*), potrošnja goriva samo se blago smanjuje ili ostaje slična onoj koja odgovara *offline* generiranju, dok se konačni SoC nešto bliže primiče zadanoj vrijednosti $SoC_f = 30\%$.

8. Planiranje reference stanja napunjenosti baterije za kombinirani način rada



Slika 8-2. Stvarne i referentne SoC trajektorije po prijedenom putu dobivene različitim metodama planiranja SoC referenci za BLND režim (kao i one za CD/CS režim) i multi nagib ceste.

8. Planiranje reference stanja napunjenosti baterije za kombinirani način rada

Tablica 8-2. Rezultati simulacija RB+ECMS-EXT strategije upravljanja u CD-CS i BLND režimima za različite metode planiranja SoC referenci i promjenjivi nagib ceste.

Ciklus	Strategija	V_f [L]	SoC(t_f) [%]	N_e [-]	N_g [-]
4xDUB s nagibom	CD/CS	10.53 (+7.4%)	34.94	126	2000
	LIN	10.48 (+6.2%)	36.81	139	1998
	Offline	10.33 (+5.4%)	35.10	139	1977
	Online	10.30 (+5.5%)	33.87	159	2028
4xDUB s NF nagibom	CD/CS	5.55 (+2.7%)	30.76	97	1328
	LIN	6.21 (+2.1%)	48.64	105	1355
	Offline	5.63 (+1.8%)	34.14	121	1348
	Online	5.66 (+1.8%)	34.52	125	1354
4xDUB s SF nagibom	CD/CS	5.77 (+5.3%)	34.35	106	1317
	LIN	5.95 (+3.6%)	41.33	133	1377
	Offline	5.49 (+1.8%)	32.28	131	1358
	Online	4.95 (+1.3%)	28.78	115	1352
4xDUB s VF nagibom	CD/CS	5.58 (+2.5%)	33.13	93	1309
	LIN	5.70 (+1.9%)	36.73	101	1360
	Offline	5.62 (+1.6%)	35.43	101	1363
	Online	5.57 (+1.4%)	34.27	108	1378

8. Planiranje reference stanja napunjenosti baterije za kombinirani način rada

8.3.3. Prisustvo zona s niskom emisijom

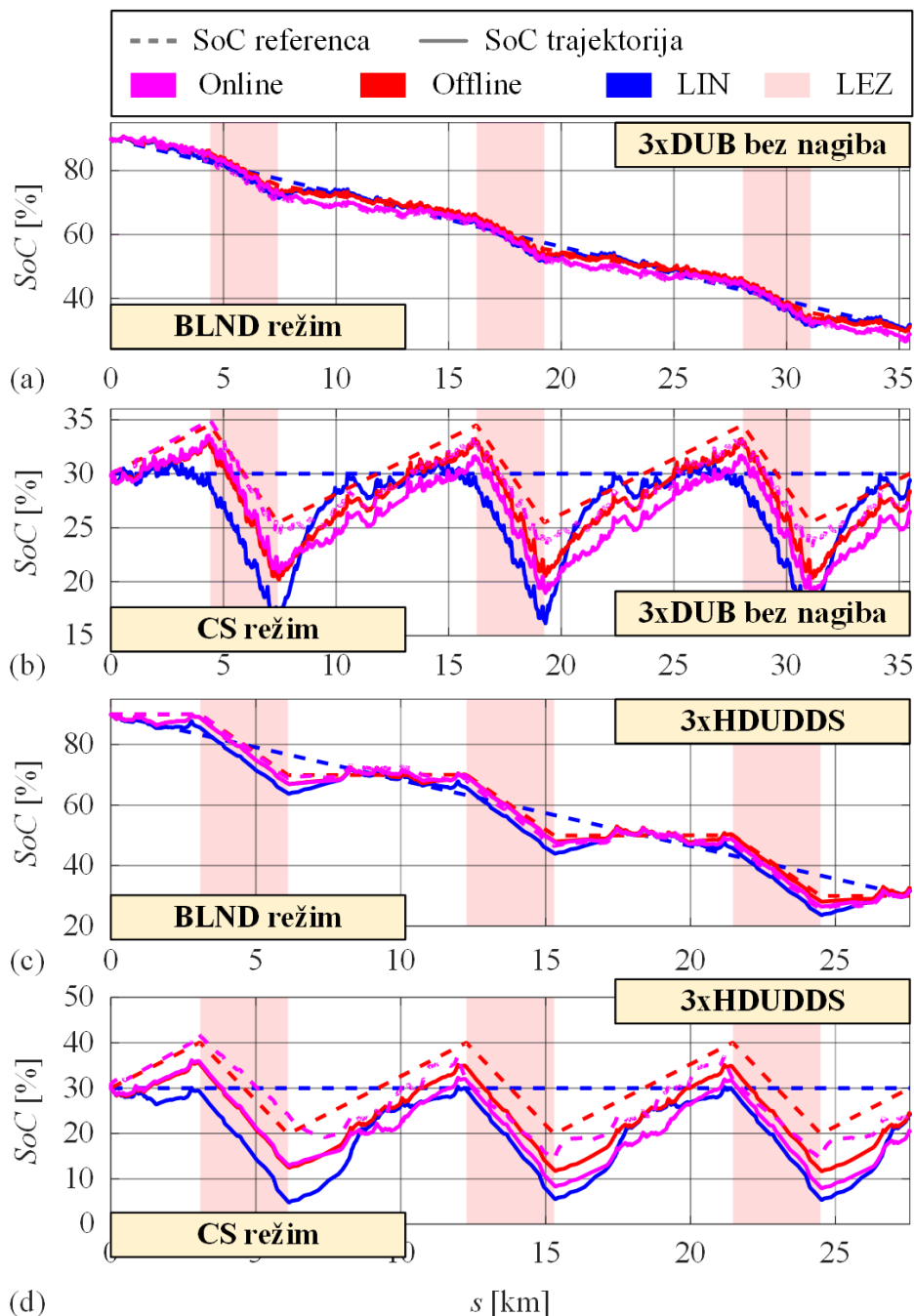
Prema rezultatima danim u tablici 8-3. Primjena linearne SoC reference rezultira povećanjem potrošnje goriva u odnosu na DP referentno mjerilo za 2.9% do +7.9%, ovisno o početnom uvjetu, odnosno režimu rada te voznom ciklusu. Primjena nelinearnih referenci SoC-a smanjuje potrošnju goriva u svim razmatranim slučajevima. Smanjenje je većinom za oko 1%-tni bod, osim u slučaju HDUDDS ciklusa i CS režima, gdje iznosi čak 4%-tna boda. Primjena *online* generiranja reference u odnosu na *offline* generiranje ne unosi dosljedno i značajno smanjenje potrošnje goriva, a uz to rezultira i nešto većom pogreškom končanog stanja SoC-a.

Tablica 8-3. Rezultati simulacija RB+ECMS-EXT strategije upravljanja u CS i BLND režimima za slučaj prisustva LEZ-a te uz primjenu različitih metoda planiranja SoC referenci.

Ciklus	Tip SoC reference	V_f [L]	SoC(t_f) [%]	N_e [-]	N_g [-]
3xDUB bez nagiba BLND	LIN	3.73 (+7.9%)	31.81	179	1052
	Offline	3.67 (+7.0%)	31.14	183	1066
	Online	3.54 (+6.0%)	28.86	165	1098
3xDUB bez nagiba CS	LIN	6.39 (+7.3%)	29.41	207	1114
	Offline	6.26 (+6.0%)	28.38	219	1095
	Online	6.18 (+5.8%)	26.52	221	1092
3xHDUDDS BLND	LIN	4.08 (+2.91%)	31.53	80	228
	Offline	4.10 (+2.40%)	32.46	86	234
	Online	4.08 (+2.60%)	31.58	90	239
3xHDUDDS CS	LIN	6.79 (+7.3%)	24.13	84	263
	Offline	6.63 (+3.1%)	24.35	70	249
	Online	6.44 (+3.4%)	20.47	80	257

8. Planiranje reference stanja napunjenosti baterije za kombinirani način rada

Niti jedna od predloženih metoda ne garantira da će konačna vrijednosti SoC-a postići ciljane vrijednosti SoC_f na kraju ciklusa. No, u slučajevima promjenjivog nagiba ceste i prisustva LEZ-ova, *offline* i *online* metode omogućuju prilagodbu referentnih SoC trajektorija vozne uvjetima. One time osiguravaju veću robusnost praćenja referentnog profila SoC-a, a time i vrijednosti $SoC(t_f)$ bližu zadanoj vrijednosti SoC .



Slika 8-3. SoC trajektorije po prijeđenom putu dobivene različitim metodama planiranja SoC referenci za slučaj prisustva LEZ-a u BLND te CD-CS režimima.

8.4. Analiza robusnosti

8.4.1. Utjecaj pogreški procjeni značajki voznog ciklusa

Tablica 8-4 daje rezultati analize robusnosti RB+ECMS-EXT sustava upravljanja s obzirom na pogreške određivanja nagiba ceste pri planiranju nelinearne reference SoC-a. Razmatra se DUB ciklus sa sinusoidalnom promjenom nagiba ceste i BLND režim rada, gdje je planiranje reference provedeno na jednoj frekvenciji nagiba, a ispituje se na istoj toj i ostale dvije frekvencije (unakrsna analiza). Dani rezultati pokazuju da obje metode planiranja referenci imaju zadovoljavajući stupanj robusnosti, jer se u najgorim slučajevima relativna potrošnja poveća samo za nekoliko postotaka. Najveće pogoršanje potrošnje goriva uočava se u slučaju stvarnog nagiba srednje frekvencije ('SF nagib') uz pretpostavku onog niske frekvencije ('NF nagib'), gdje relativna potrošnja s obzirom na DP optimalno rješenje naraste s približno 2% na oko 5%. Planiranje reference u realnom vremenu pokazuje višu robusnost u svim slučajevima u odnosu na planiranje van realnog vremena, pri čemu je potrošnja goriva najčešće niža za djelić postotka, a rjeđe i preko 1%. Također, konačni SoC je gotovo uvijek bliži zadanoj vrijednosti SoC_f za *on-line* u usporedbi s *off-line* postupkom.

Tablica 8-4. Rezultati analize robusnosti sustava upravljanja s obzirom na pogreške određivanja profila nagiba ceste.

			Pretpostavljeni profil ceste					
			NF nagib		SF nagib		VF nagib	
			V_f [L]	$SoC(t_f)$ [%]	V_f [L]	$SoC(t_f)$ [%]	V_f [L]	$SoC(t_f)$ [%]
Vozni ciklus i stvarni nagib	4xDUB s NF nagibom	Offline	5.63 (+1.8%)	34.14	6.11 (+2.2%)	45.91	6.22 (+2.2%)	48.58
		Online	5.66 (+1.8%)	34.52	6.09 (+2.1%)	45.48	6.16 (+1.9%)	47.71
	4xDUB s SF nagibom	Offline	6.25 (+5.7%)	45.62	5.49 (+1.8%)	32.28	5.94 (+3.7%)	40.75
		Online	6.16 (+5.0%)	44.55	4.95 (+1.3%)	28.78	5.80 (+2.2%)	39.74
	4xDUB s VF nagibom	Offline	5.84 (+3.1%)	38.52	5.67 (+3.4%)	34.18	5.62 (+1.6%)	35.43
		Online	5.77 (+3.0%)	36.82	5.68 (+3.0%)	34.69	5.57 (+1.4%)	34.27

U tablici 8-5 dani su rezultati analize robusnosti s obzirom na pogreške procjene relevantnih značajki voznog ciklusa, koje uključuju srednju brzinu \bar{v}_v i srednju zahtijevanu snagu \bar{P}_d .

8. Planiranje reference stanja napunjenosti baterije za kombinirani način rada

Scenarij točnog poznavanja značajki DUB voznog ciklusa uspoređuje se scenarijem gdje su stvarne značajke uvećane za 50% te s scenarijem gdje se pri planiranju SoC reference pogrešno koriste značajke koje odgovaraju WHVC ciklusu (v. tablicu 8-5 za vrijednosti voznih značajki). Obje metode planiranja nelinearne reference SoC-a ponovno pokazuju zadovoljavajuću robusnost. Naime, potrošnja goriva u prisustvu pogreški procjene značajki voznih ciklusa ostaje približno jednaka nominalnoj. Iznimka je jedino slučaj nisko-frekvencijskog nagiba ceste i pogrešnog pretpostavljenog voznog ciklusa, gdje se prirast potrošnje goriva u odnosu na DP rješenje povećava s oko 2% na približno 4%. *Online* postupak planiranja uvijek rezultira jednakom ili nižom potrošnjom goriva odnosu na *offline* postupak, a slično vrijedi i za pogrešku konačnog stanja SoC-a.

Tablica 8-5. Rezultati analize robusnosti sustava upravljanja s obzirom na pogreške procjeni značajki voznog ciklusa.

		Pretpostavljene vozne karakteristike						
		Stvarne karakteristike		Stvarne karakteristike uvećane za 50%		Karakteristike za WHVC ciklus $\bar{P}_d = 11.14\text{kW}$, $\bar{v}_v = 30.40\text{m}$		
		V_f [L]	$SoC(t_f)$ [%]	V_f [L]	$SoC(t_f)$ [%]	V_f [L]	$SoC(t_f)$ [%]	
Vozni ciklus i stvarne karakteristike	4xDUB s NF nagibom $\bar{P}_d = 10.9\text{ kW}$ $\bar{v}_v = 6.21\text{ m/s}$	Offline	5.63 (+1.8%)	34.14	5.59 (+1.0%)	34.33	5.80 (+4.3%)	35.04
		Online	5.66 (+1.8%)	34.52	5.57 (+1.0%)	33.95	5.75 (+4.1%)	33.93
	4xDUB s SF nagibom $\bar{P}_d = 10.4\text{ kW}$ $\bar{v}_v = 6.13\text{ m/s}$	Offline	5.49 (+1.8%)	32.28	5.70 (+1.7%)	37.71	5.51 (+1.6%)	33.15
		Online	4.95 (+1.3%)	28.78	5.71 (+1.6%)	38.01	5.55 (+1.6%)	33.25
	4xDUB s VF nagibom	Offline	5.62 (+1.6%)	35.43	5.63 (+1.6%)	35.63	5.53 (+1.5%)	33.29

8. Planiranje reference stanja napunjenosti baterije za kombinirani način rada

\bar{P}_d = 6.14 kW	Online	5.57	34.27	5.61	35.11	5.51	33.25
\bar{v}_v = 10.3 m/s		(+1.4%)		(+1.5%)		(+1.1%)	

8.4.2. Utjecaj pogreške procjene pada SoC-a kroz LEZ

Robusnost metode planiranja SoC reference u prisustvu LEZ-a ispituje u scenarijima precizne (nominalne) procjene $\Delta\widehat{SoC}_{LEZ}$ prema izrazu (8-14), te pogreški iznosa -50% i $+100\%$ u odnosu na nominalnu procjenu. Rezultati analize prikazani su u tablici 8-6, a dobiveni su ponovno na EXT-BWD modelu koristeći RB+ECMS-EXT strategiju upravljanja i to u BLND i CS režimima preko repetitivnih DUB i HDUDDS ciklusa. Obje metode i ovdje pokazuju visok stupanj robusnosti s obzirom na pogrešku u procjeni promjene SoC-a kroz LEZ. Naime, prirast potrošnje goriva u odnosu na DP optimalno rješenje najčešće ostaje sličnog iznosa kao i u nominalnom slučaju. U nekoliko slučajeva (kod HDUDDS ciklusa) ovaj prirast raste za 2-3%, s tim da u tim najgorim slučajevima *online* pristup daje bolje rezultate, tj. prirast je bliži nominalnom slučaju. S druge strane, uočava se da slično kao kod tablice 8-3, koja se također odnosi na LEZ scenarij, konačni SoC može više odstupati od zadane vrijednosti $SoC_f = 30\%$ kod *online* u odnosu na *offline* postupak.

8. Planiranje reference stanja napunjenosti baterije za kombinirani način rada

Tablica 8-6. Rezultati analize robusnosti sustava upravljanja s obzirom na pogreške procjene ukupne promjene SoC-a unutar LEZ-ova.

Ciklus	Tip SoC reference	Precizna procjena $\Delta\widehat{SoC}_{LEZ}$		Podcijenjena $0.5\Delta\widehat{SoC}_{LEZ}$		Precijenjena $2\Delta\widehat{SoC}_{LEZ}$	
		V_f [L]	$SoC(t_f)$ [%]	V_f [L]	$SoC(t_f)$ [%]	V_f [L]	$SoC(t_f)$ [%]
3xDUB bez nagiba BLND	Offline	3.67 (+7.0%)	31.14	3.70 (+7.5%)	31.55	3.59 (+6.2%)	29.95
	Online	3.54 (+6.0%)	28.86	3.64 (+7.2%)	30.36	3.59 (+5.8%)	30.30
3xDUB bez nagiba CS	Offline	6.26 (+6.0%)	28.38	6.28 (+6.0%)	28.79	6.16 (+5.3%)	27.02
	Online	6.18 (+5.8%)	26.52	6.19 (+6.2%)	26.62	6.16 (+5.6%)	26.50
3xHDUDDS BLND	Offline	4.10 (+2.40%)	32.46	3.99 (+4.9%)	27.72	3.95 (+5.3%)	26.56
	Online	4.08 (+2.60%)	31.58	4.10 (+3.2%)	31.51	3.92 (+4.2%)	26.72
3xHDUDDS CS	Offline	6.63 (+3.1%)	24.35	6.65 (+6.7%)	19.44	6.49 (+3.2%)	23.42
	Online	6.44 (+3.4%)	20.47	6.17 (+5.1%)	13.47	6.28 (+4.1%)	17.23

9. Zaključak

U radu su predložene strategije optimalnog, adaptivnog i prediktivnog upravljanja utičnim hibridnim električnim vozilom (PHEV) danim u P2 paralelnoj konfiguraciji. Za potrebe sinteze strategija upravljanja razvijeno je nekoliko matematičkih i simulacijskih modela PHEV-tipa gradskog autobusa, koji se razlikuju u točnosti, kompleksnosti i računalnoj učinkovitosti. Kao osnova za precizne simulacije postavljen je unaprijedni (FWD) model, koji uzima u obzir dominantnu dinamiku komponenti pogonskog sklopa i implementiran je u *Amesim* simulacijskom okruženju. Kao dio FWD modela, razvijena je podređena strategija upravljanja, koja je zadužena za upravljanje dinamikom i koordiniranjem njegovih komponenti (motori, glavna spojka, automatizirana transmisija, kočnice) s ciljem ostvarivanja referentnih varijabli zadanih od nadređene strategije upravljanja tokovima snage pogona. S druge strane, postavljen je standardni unazadni (BWD) model PHEV-a, za kojeg je pokazano da značajno precjenjuje potrošnju goriva. Stoga je predložen prošireni unazadni (EXT-BWD) model, koji u odnosu na BWD model sadrži podmodele koji opisuju dinamičke gubitke snage pogona za vrijeme pokretanja MSUI-a i promjene stupnja prijenosa automatizirane manualne transmisije. Podmodeli dinamičkih gubitaka parametrirani su temeljem fizikalnih odnosa kao i rezultata simulacije preciznijeg FWD modela. Rezultati detaljne validacije EXT-BWD modela pokazali su da se model po točnosti vrlo približava FWD modelu, tj. da predviđa značajno preciznije potrošnje goriva od standardnog BWD modela. Kao takav, EXT-BWD model objedinjuje prednosti BWD model u vidu računalne učinkovitosti te FWD modela u vidu preciznosti.

S ciljem dobivanja uvida u optimalno ponašanje PHEV-a, provedeno je optimiranje upravljačkih varijabli pogona, koje uključuju okretni moment MSUI-a i stupanj prijenosa transmisije. Cilj optimiranja je minimizirati ukupnu potrošnju goriva te zadovoljiti konačni uvjet na stanje napunjenosti (SoC) baterije za dani vožni ciklus. Optimalni problem je riješen van realnog vremena uz primjenu algoritma dinamičkog programiranja (DP). Pritom se radi visoke točnosti i računalne učinkovitosti primijenio EXT-BWD model. Kako radi proračuna dinamičkih gubitaka ovaj model sadrži dodatna stanja u odnosu na BWD model, DP algoritam je prilagođen za takvu, proširenu formulaciju dinamičkog modela vozila. Analiza rezultata optimiranja pokazala je da optimalna rješenja preferiraju radne točke pogonskih strojeva i baterije koje su u područjima visoke učinkovitosti, što u konačnici vodi na minimalnu potrošnju

9. Zaključak

goriva. Optimiranja su provedena i u slučajevima prisutnosti varijabilnog nagiba ceste i zona niskih emisija. Uočeno je da u ovim uvjetima optimalne trajektorije SoC-a baterije mogu značajno odstupati od uobičajeno korištenih linearnih trajektorija s obzirom na prijedeni put vozila. Ustanovljeno je da se optimalne brzine promjene SoC-a za slučajeve čistog električnog načina rada i regenerativnog kočenja mogu aproksimirati kvadratnom funkcijom zahtijevane snage pogona, a da kad se izdvojeno prikažu po prijedenom putu, zajedno s onim vezanim uz hibridni način rada, formiraju linearne pod-trajektorije. Ovi nalazi iskorišteni su za sintezu referentne trajektorije SoC-a kao ulaza u nadređenu strategiju upravljanja PHEV-om.

Predložena optimalna strategija upravljanja tokovima snage PHEV-a temelji se na kombiniranju regulatora zasnovanog na bazi pravila (RB regulator) i minimizacije ekvivalentne potrošnje goriva (ECMS). Pokazano je da zasnivanjem ECMS-a na EXT-BWD modelu (tzv. RB+ECMS-EXT strategija) umjesto na standardnom BWD modelu, značajno smanjuje potrošnju goriva, a bez osjetnog utjecaja na računalnu učinkovitost tj. vrijeme izvođenja strategije upravljanja. Ovo se objašnjava uzimanjem u obzir dinamičkih gubitaka pogona, uslijed čega upravljačka strategija uspijeva točnije postaviti stvarne radne točke vozila (reprezentiranog FWD modelom) u područje visoke učinkovitosti. Pritom se za razliku od polazne RB+ECMS formulacije ne zahtijeva ugradnja heurističkog algoritma odgode promjene stupnja prijenosa, jer se učestale promjene stupnja prijenosa implicitno penaliziraju kroz modelirane učinke dinamičkih gubitaka.

Nadalje, predložen je mehanizam adaptacije triju utjecajnih parametara RB+ECMS-EXT strategije upravljanja. Adaptacijski mehanizam zasniva se na regresijskim modelima linearnim u parametrima, koji na ulazu imaju značajke voznih ciklusa koje se izračunavaju iz raspoloživih varijabli sustava upravljanja na pomičnom horizontu u neposrednoj prošlosti. Regresijski model parametrira se temeljem DP optimalnih rezultata dobivenih za karakteristične mikrocikluse izdvojene iz certifikacijskih voznih ciklusa. Adaptivna strategija upravljanja simulacijski je provjerena na EXT-BWD i FWD modelima PHEV, te je pokazano da rezultira dosljedno i osjetno smanjenom potrošnjom goriva u odnosu na RB+ECMS-EXT strategiju, uz praktički nepromijenjen broj uključenja MSUI-a i promjena broja stupnja prijenosa. Pritom je zbog računalne nezahtjevnosti regresijskog modela, adaptivna strategija pogodna za primjenu u realnom vremenu u sličnoj mjeri kao RB+ECMS-EXT strategija. Poboljšanje kvalitete upravljanja objašnjava se prilagodbom strategije upravljanja na trenutne značajke voznih

9. Zaključak

ciklusa, zbog čega se radne točke pogonskih strojeva još preciznije smještaju u područja maksimalne korisnosti.

Konačno, predložena je modelsko prediktivna nadređena strategija upravljanja (MPC). MPC strategija optimira upravljačke varijable PHEV-a na pomičnom predikcijskom horizontu uz primjenu DP algoritma. Funkcija cilja formulira se kao zbroj potrošnje goriva na predikcijskom horizontu te predviđanja optimalne/minimalne preostale potrošnje goriva, tj. od kraja predikcijskog horizonta do kraja voznog ciklusa. Preostala potrošnja goriva predviđa se regresijskim modelom linearnim u parametrima, koji koristi podatke o SoC-u na kraju predikcijskog horizonta, preostaloj duljini puta te opcijski i o srednjoj vrijednosti i standardnoj devijaciji preostalog profila brzine vozila. Regresijski model parametriran je koristeći rezultate unazadne faze DP optimiranja van realnog vremena. Na ovaj način MPC ne koristi višekriterijsku funkciju cilja, pa time niti težinske koeficijente koji su općenito osjetljivi na unaprijed nepoznate značajke voznih ciklusa. U usporedbi sa regularnom i adaptivnom RB+ECMS-EXT strategijom, MPC strategija rezultira najnižim potrošnjama goriva uz samo 10 koraka (10 s) predikcijskog horizonta. Međutim, pokazano je da kada se idealizirana predikcija brzine na pomičnom horizontu zamijeni s realističnom zasnovanoj na neuronskoj mreži, te kada se izostave srednja vrijednost i standardna devijacije preostalog profila brzine iz skupa ulaza regresijskog modela preostale potrošnje goriva, performanse MPC sustava približavaju se onima dobivenim za adaptivni sustav. Uzimajući u obzir kompleksnost i računalnu neučinkovitost MPC strategije, vjerojatnije je da će u primjeni biti pogodnija adaptivna strategija.

Na osnovu saznanja dobivenih analizom DP optimalnih SoC trajektorija, predložene su dva postupka sinteze SoC referentne trajektorije po prijeđenom putu. Prva metoda izvodi se van realnog vremena (offline metoda) odnosno prije početka voznog ciklusa na osnovu predviđenih vrijednosti ili razumne pretpostavke srednje brzine i zahtijevane snage pogona vozila, ukupne duljine puta, profila nagiba ceste te, u slučaju LEZ-ova, i ukupnoj promjeni SoC-a te prijeđenog puta unutar LEZ-ova. Druga metoda namijenjena je izvođenju u realnom vremenu (online metoda), gdje se u svakom koraku uzorkovanja ažurira referenca SoC-a temeljem predviđanja ukupne promjene SoC-a i prijeđenoga puta u pojedinim načinima rada. U slučaju s nultim nagibom ceste, metoda planiranja reference SoC-a u realnom vremenu daje zanemariva poboljšanja u potrošnji goriva u odnosu na jednostavnu linearnu referencu po prijeđenom putu. U slučaju prisustva promjenjivog nagiba ceste te također LEZ-ova, obje metode rezultiraju

9. Zaključak

primjetno boljom potrošnjom goriva u odnosu na primjenu striktno linearne SoC reference ili CD-CS režim. Konačno, provedena je i analiza robusnosti za sve predložene metode planiranja SoC referenci s obzirom na pogreške u procjenama karakteristika voznog ciklusa. Greške u procjeni karakteristika voznog ciklusa blago povećavaju ukupnu potrošnju goriva i odstupanje SoC-a od ciljane vrijednosti na kraju voznog ciklusa. No, ukupne potrošnje goriva u odnosu na preciznu procjenu karakteristika voznog ciklusa u najgorim slučajevima ostaju unutar +5% od odgovarajuće optimalne potrošnje dobivene DP algoritmom. Online i offline metode rezultiraju vrlo sličnom potrošnjom goriva u odnosu na DP referentno mjerilo dok u isto vrijeme rezultiraju konačnom vrijednošću SoC-a blizu zadane vrijednosti na kraju ciklusa. No, online metoda se pokazala robusnijom s obzirom na greške procjene karakteristika voznog ciklusa i u vidu potrošnje goriva i održavanja SoC-a na kraju voznog ciklusa.

Odabir P2 paralelne strukture PHEV-a u ovom radu ne narušava općenitost predloženih strategija upravljanja, tj. one se u suštini mogu prilagoditi i primijeniti na druge konfiguracije HEV/PHEV-a. Istraživanje provedeno u okviru ovog rada rezultiralo je sljedećim znanstvenim doprinosima u području modeliranja te optimalnog, adaptivnog i prediktivnog upravljanja pogonom utičnog hibridnog električnog vozila (PHEV):

1. Računalno učinkoviti unazadni model PHEV-a paralelne konfiguracije koji uključuje učinke dinamičkih gubitaka pogona opisanih analitičkim modelima.
2. Optimalna strategija upravljanja tokovima snage PHEV-a, koja uzimajući u obzir dinamičke gubitke pogona postiže dodatne uštede goriva te poboljšanje voznosti i udobnosti vožnje.
3. Adaptivna strategija upravljanja tokovima snage PHEV-a, koja adaptira parametre optimalne strategije upravljanja s obzirom na značajke voznih ciklusa identificirane na pomičnom prozoru u neposrednoj prošlosti.
4. Modelska prediktivna strategija upravljanja tokovima snage PHEV-a, koja robusno realizira konačni uvjet na stanje napunjenosti baterije, putem regresijskog modela preostale potrošnje goriva od kraja predikcijskog horizonta do kraja voznog ciklusa.
5. Metoda za projektiranje optimalne referentne trajektorije stanja napunjenosti baterije u mješovitom načinu rada PHEV pogona, na osnovi unaprijed dostupnih značajki voznog ciklusa.

Literatura

- [1] Council of the European Union. Council Decision (EU) 2017/710 of 3 April 2017 on the position to be adopted, on behalf of the European Union, within the EEA Joint Committee concerning an amendment to Annex XX (Environment) to the EEA Agreement (CO2 Emissions). 2017. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dec/2017/710/oj> [cited 2020 June 23].
- [2] Guzzella L, Sciarretta A. *Vehicle Propulsion Systems*, 2nd ed. Springer, Germany, Berlin, 2007.
- [3] Salisa A. R, Zhang N, Zhu J. G. A comparative analysis of fuel economy and emissions between a conventional HEV and the UTS PHEV. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2011 Jan; 60(1), 44–54.
- [4] Raghavan S. S, Khaligh, A. Electrification potential factor: Energy- based value proposition analysis of plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2012 Mar; 61(3),1052–1059.
- [5] Feng T, Yang L, Gu Q, Hu Y, Yan T, Yan B. A supervisory control strategy for plug-in hybrid electric vehicles based on energy demand prediction and route preview. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2013 May; 64(5), 1691–1700.
- [6] Li L, Yang C, Zhang Y, Zhang L, Song J. Correctional DP-based energy management strategy of plug-in hybrid electric bus for city- bus-route. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2015 Jul; 64(7), 2792–2803.
- [7] Liu W. *Introduction to Hybrid Vehicle System Modeling and Control*. John Wiley & Sons, Inc., USA, NY, 2013.
- [8] Martinez C.M, Hu X, Cao D, Velenis E, Gao B, Wellers M. Energy Management in Plug-in Hybrid Electric Vehicles: Recent Progress and a Connected Vehicles Perspective. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2017; 66(1), 4534–4549.
- [9] Gonder J, Markel T. Energy management strategies for plug-in hybrid electric vehicles. *SAE Technical Paper* 2007 Apr;2007-01-0290.
- [10] Zhang B, Mi C, Zhang M. Charge-depleting control strategies and fuel optimization of blended-mode plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2012 May; 60(4), 1516–1525.
- [11] Gao Y, Ehsani M. Design and control methodology of plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Trans. Ind. Electron*. 2010 Feb, 57(2), 633–640.
- [12] Tribioli L, Barbieri M, Capata R, Sciubba E, Jannelli E, Bella G. A real time energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles based on optimal control theory. *Energy Procedia*. 2014; 45(3), 949–958.
- [13] Rousseau A, Pagerit S, Gao D. W. Plug-in hybrid electric vehicle control strategy parameter optimization. *J. Asian Elect. Veh.* 2008; 6(2), 1125–1133.
- [14] Ghorbani R, Bibeau E, Filizadeh S. On conversion of hybrid electric vehicles to plug-in. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2010 May, 59(4), 2016–2020.

Literatura

- [15] Sciarretta A. A control benchmark on the energy management of a plug-in hybrid electric vehicle. *Control Eng. Pract.* 2014 Aug, 29(3), 287–298.
- [16] Salmasi F. R. Control strategies for hybrid electric vehicles: Evolution, classification, comparison, and future trends. *IEEE Transactions on Vehicular Technology.* 2007 Sep; 56(5), 2393–2404.
- [17] Wang A, Yang W. Design of energy management strategy in hybrid vehicles by evolutionary fuzzy system part I: Fuzzy logic controller development. in *Proc. IEEE Intell. Control Autom.* 2006; 2(2), 8324–8328.
- [18] Poursamad A, Montazeri M. Design of genetic-fuzzy control strategy for parallel hybrid electric vehicles. *Control Eng. Pract.* 2008 Jul; 16(7), 861–873.
- [19] Onori S, Tribioli L. Adaptive Pontryagin's Minimum Principle supervisory controller design for the plug-in hybrid GM Chevrolet Volt. *Applied Energy.* 2015; 147, 224–234.
- [20] Paganelli G. General supervisory control policy for the energy optimization of charge-sustaining hybrid electric vehicles. *JSAE Rev.* 2001 Oct; 22(4), 511–518.
- [21] Paganelli G, Delprat S, Guerra T. M, Rimaux J, Santin J. J. Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains. in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.* 2002; 4, 2076–2081.
- [22] Mohsenian-Rad A. H, Wong V. W, Jatskevich J, Schober R, Leon-Garcia A. Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid. *IEEE Trans. Smart Grid.* 2010 Dec; 1(3), 320–331.
- [23] Khayyam H, Bab-Hadiashar A. Adaptive intelligent energy management system of plug-in hybrid electric vehicle. *Energy.* 2014; 69, 319–335.
- [24] Chen Z, Mi C, Xu J, Gong X, You C. Energy management for a power-split plug-in hybrid electric vehicle based on dynamic programming and neural networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology.* 2014 May; 63(4), 1567–1580.
- [25] Chen C, Mi C, Xiong R, Xu J, You C. Energy management of a power-split plug-in hybrid electric vehicle based on genetic algorithm and quadratic programming. *J. Power Sources.* 2014 Feb; 248, 416–426.
- [26] Wu L, Shi P, Su X. *Sliding Mode Control of Uncertain Parameter-Switching Hybrid Systems.* Wiley&Sons, Inc. USA, New York, , 2014.
- [27] Boyd S, Vandenberghe L. *Convex Optimization.* Univ. Press. USA Cambridge, MA, 2004.
- [28] Stockar S, Marano V, Canova M, Rizzoni G, Guzzella L. Energy-optimal control of plug-in hybrid electric vehicles for real-world driving cycles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology.* 2011 Sep; 60(7), 2949–2962.
- [29] Serrao L, Onori S, Rizzoni G. ECMS as a realization of Pontryagin's minimum principle for HEV control. *Proc. IEEE Amer. Control Conf.* 2009; 4, 3964–3969.
- [30] Borhan H. A, Vahidi A, Phillips A. M, Kuang M. L, Kolmanovsky I. V. Predictive energy management of a power-split hybrid electric vehicle. *Proc. IEEE Amer. Control Conf.* 2009, 4. 3970–3976.
- [31] Stockar S, Marano V, Rizzoni G, Guzzella L. Optimal control for plug-in hybrid electric vehicle applications. *Proc. IEEE Amer. Control Conf.* 2010, 4, 5024–5030.

Literatura

- [32] Li S. G, Sharkh S. M, Walsh F. C, Zhang C. N. Energy and battery management of a plug-in series hybrid electric vehicle using fuzzy logic. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2011 Oct; 60(9), 8, 3571–3585.
- [33] Musardo C, Rizzoni G, Guezennec Y, Staccia B. A-ECMS: an adaptive algorithm for hybrid electric vehicle energy management. *Eur. J. Control*. 2005 Dec; 11(5), 509–524.
- [34] Škugor B, Deur J, Cipek M, Pavković D. Design of a power-split hybrid electric vehicle control system utilizing a rule-based controller and an equivalent consumption minimization strategy. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.* 2014; 228(6), 631–648.
- [35] Lew A, Mauch H. *Dynamic Programming. A Computational Tool*. Springer-Verlag, USA New York, NY, 2007.
- [36] Larsson V, Johannesson L, Egardt B. Analytic solutions to the dynamic programming subproblem in hybrid vehicle energy management. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2014 Apr; 64(4), 1458–1467.
- [37] Zhang M, Yang Y, Mi C. Analytical approach for the power management of blended-mode plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2012 May; 61(4), 1554–1566.
- [38] Zhang C, Vahidi A, Pisu P, Li X, Tennant K. Role of terrain preview in energy management of hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2012 May; 59(3), 1139–1147.
- [39] Liu J, Peng H. Control optimization for a power-split hybrid vehicle. *Proc. IEEE Amer. Control Conf.* 2006; 2, 466–471.
- [40] Lee T.K, Filipi Z. Real-world driving pattern recognition for adaptive HEV supervisory control: Based on representative driving cycles in Midwestern US. *SAE Technical Paper* 2012 Mar; 2012-01-1020.
- [41] Zhang S, Xiong R. Adaptive energy management of a plug-in hybrid electric vehicle based on driving pattern recognition and dynamic programming. *Applied Energy*. 2015; 155(1), 68-78.
- [42] Li L, Yan B, Yang C, Zhang Y, Chen Z, Jiang G. Application-Oriented Stochastic Energy Management for Plug-in Hybrid Electric Bus with AMT. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2016; 65(6), 4459-4470.
- [43] Park J, Chen Z, Kiliaris L, Kuang M.L, Masrur M.A, Phillips A.M, Murphey Y.L. Intelligent vehicle power control based on machine learning of optimal control parameters and prediction of road type and traffic congestion. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019; 58(9) 4741-4756.
- [44] Hrovat D, Di Cairano S, Tseng H.E, Kolmanovsky I.V. The development of Model Predictive Control in automotive industry: A survey. *Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications*. 2012; 295-302.
- [45] Huang Y, Wang H, Khajepour A, He H, Ji J. Model predictive control power management strategies for HEVs: A review. *J. Power Sources*. 2017; 341, 91–106
- [46] Sun C, Hu X, Moura S.J, Sun F. Velocity Predictors for Predictive Energy Management in Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2015; 23(3), 1197-1204.

Literatura

- [47] Gaikwad T. D, Asher Z. D, Liu K, Huang M, Kolmanovsky I. Vehicle velocity prediction and energy management strategy Part 2: Integration of machine learning vehicle velocity prediction with optimal energy management to improve fuel economy. SAE Technical Paper 2019 Mar; 2019-01-1212.
- [48] Chen D, Kim Y, Stefanopoulou A. G. Predictive Equivalent Consumption Minimization Strategy with Segmented Traffic Information. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2020; 69(12), 14377–14390.
- [49] Li L, You S, Yang C. Multi-Objective Stochastic MPC-Based System Control Architecture for Plug-In Hybrid Electric Buses. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016; 63(8), 4752-4763
- [50] Vadamalu R.S, Beidl C. Explicit MPC PHEV energy management using Markov chain based predictor: Development and validation at Engine-In-The-Loop testbed. European Control Conference, ECC. 2016; 453-458.
- [51] Xie S, Hu X, Xin Z, Brighton J. Pontryagin’s Minimum Principle based model predictive control of energy management for a plug-in hybrid electric bus. Applied Energy. 2019; 236, 893–905.
- [52] Taghavipour A, Moghadasi S. A Real-Time Nonlinear CRPE Predictive PHEV Energy Management System Design and HIL Evaluation. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2021; 70(1), 49–58, 2021.
- [53] Di Cairano S, Bernardini D, Bemporad A, Kolmanovsky I.V. Stochastic MPC with learning for driver-predictive vehicle control and its application to HEV energy management. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2014; 22(3), 1018-1031.
- [54] Schmid R, Buerger J, Bajcinca N. Energy Management Strategy for Plug-in-Hybrid Electric Vehicles Based on Predictive PMP. IEEE Trans. Control Syst. Technol. 2021 Nov; 29(6), 2548 - 2560.
- [55] Ritter A, Widmer F, Duhr P, Onder C.H. Long-term stochastic model predictive control for the energy management of hybrid electric vehicles using Pontryagin’s minimum principle and scenario-based optimization. Applied Energy, 2022; 322, 119192, 2022.
- [56] Opila D. F, Wang X, McGee R, Gillespie R. B, Cook J. A, Grizzle J. W. Real-world robustness for hybrid vehicle optimal energy management strategies incorporating drivability metrics. J. Dyn. Syst. Meas. Control. Trans. ASME. 2014; 136(6), 1548 - 1560.
- [57] Soldo J, Cvok I, Deur J, Haramina K. Bond Graph-Based Energy Balance Analysis of Forward and Backward Looking Models of Parallel Plug-In Hybrid Electric Vehicle. SAE Technical Paper 2022 Apr: 2022-01-0743.
- [58] Škugor B, Ranogajec V, Deur J. On smoothing HEV/EREV supervisory control action using an extended ECMS approach. World Electric Vehicle Symposium and Exhibition, EVS27. 2013.
- [59] Arata J, Leamy M, Cunefare K. Power-split HEV control strategy development with refined engine transients. SAE International Journal of Alternative Powertrains. 2012; 1(1), 119-133.
- [60] Jauch C, Tamilarasan S, Bovee K, Güvenc L, Rizzoni G. Modeling for drivability and drivability improving control of HEV. Control Engineering Practice. 2018; 70, 50-62.

Literatura

- [61] Zeng X, Yang N, Wang J, Song D, Zhang N, Shang M, Liu J. Predictive-model-based dynamic coordination control strategy for power-split hybrid electric bus. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015; 60, 785-798
- [62] Yakhshilikova G, Ruzimov S, Ezemobi E, Tonoli A, Amati N. Development of Optimization Based Control Strategy for P2 Hybrid Electric Vehicle including Transient Characteristics of Engine. *Applied Sciences*. 2022; 12(6), 2852.
- [63] Bidarvatan M, Shahbakhti M. Analysis and control of torque split in hybrid electric vehicles by incorporating powertrain dynamics. *J. Dyn. Syst. Meas. Control. Trans. ASME*, 2018; 140(11), 1–11.
- [64] Yan F, Wang J, Huang K. Hybrid electric vehicle model predictive control torque-split strategy incorporating engine transient characteristics. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2012; 61(6), 2458–2467.
- [65] Ganesan A, Gros S, Murgovski N, Lee C. F, Sivertsson M. Effect of engine dynamics on optimal power-split control strategies in hybrid electric vehicles. *IEEE Veh. Power Propuls. Conf. Proc. VPPC*. 2020.
- [66] Chen R, Zou Y, Hou S. Heuristic Dynamic Programming Based Online Energy Management Strategy for Plug-In Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019; 68(5), 843–851.
- [67] Guercioni G. R, Galvagno E, Tota A, Vigliani A. Adaptive equivalent consumption minimization strategy with rule-based gear selection for the energy management of hybrid electric vehicles equipped with dual clutch transmissions. *IEEE Access*. 2020 Oct; 8, 190017–190038.
- [68] Škugor B, Cipek M, Deur J. Control variables optimization and feedback control strategy design for the blended operating regime of an extended range electric vehicle. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*. 2015; 3(1),152-162.
- [69] Yu H, Kuang M, McGee R. Trip-oriented energy management control strategy for plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2014; 22(4), 1323-1336.
- [70] Tulpule P, Marano V, Rizzoni G. Effects of different PHEV control strategies on vehicle performance. in *Proc. Amer. Control Conf.* 2009, 3950–3955.
- [71] Sun C, Moura S. J, Hu X, Hedrick J. K, Sun F. Dynamic traffic feedback data enabled energy management in plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2014 May; 23(3), 1075–1086.
- [72] Kristinsson J, McGee R, Yu H, Syed F, Tseng F, Filev D, Phillips A. GreenZone driving for plug in Hybrid Electric Vehicles. *SAE Technical Paper* 2012 Apr: 2012-01-1004.
- [73] Soldo J, Skugor B, Deur J. Optimal Energy Management Control of a Parallel Plug-In Hybrid Electric Vehicle in the Presence of Low Emission Zones. *SAE Technical Paper* 2019: 2019-01-1215, 2019
- [74] Gong Q, Li Y, Peng Z. R. Trip-based optimal power management of plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2008 Nov; 57(6), pp. 3393–3401.
- [75] Zhang C, Vahidi A. Route preview in energy management of plug- in hybrid vehicles. *IEEE Trans. Control Systems Technology*. 2012 Mar; 20(2), 546–553.

Literatura

- [76] Wirasingha S. G, Emadi A. Classification and review of control strategies for plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2011 Jan; 60(1), 111–122.
- [77] Larsson V, Johannesson L, Egardt B, Larsson A. Benefit of route recognition in energy management of plug-in hybrid electric vehicles. in *Proc. IEEE Amer. Control Conf.* 2012; 1314–1320.
- [78] Xie S, Li H, Xin Z, Liu T, Wei L. A Pontryagin minimum principle-based adaptive equivalent consumption minimum strategy for a plug-in hybrid electric bus on a fixed route. *Energies*. 2017; 10, 1379.
- [79] Soldo J, Škugor B, Deur J. Online Synthesis of an Optimal Battery State-of-Charge Reference Trajectory for a Plug-in Hybrid Electric City Bus. *Energies*. 2021; 14, 3168.
- [80] Bouwman K.R, Pham T.H, Wilkins S, Hofman T. Predictive Energy Management Strategy Including Traffic Flow Data for Hybrid Electric Vehicles. *IFAC-PapersOnLine*. 2017; 50, 10046–10051
- [81] Liu Y, Li J, Qin D, Lei Z. Energy management of plug-in hybrid electric vehicles using road grade preview. In *Proceedings of the IET International Conference on Intelligent and Connected Vehicles (ICV)*; 2016 Sep.
- [82] Ambuhl D, Guzzella L. Predictive reference signal generator for hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2009; 58, 4730–4740.
- [83] Volvo 7900 Electric Hybrid Specification Sheet. Dostupno na: <https://www.volvobuses.co.uk/content/dam/volvo/volvo-buses/markets/uk/our-offering/buses/7900-electric/document/7900-Electric-spec.pdf> (pristupljeno: 16.10.2022.)
- [84] Yuan Z, Hou S.H, Li D, Gao W, Hu X. Optimal Energy Control Strategy Design for a Hybrid Electric Vehicle. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2013; 2013, 132064.
- [85] EVO Electric Ltd Catalogue, AF-230 Motor/Generator. Dostupno na: <http://fordmax.in.ua/wp-content/uploads/2014/12/AF-230-Spec-Sheet-V1.pdf> (pristupljeno: 16.10.2022.)
- [86] Pourabdollah M, Murgovski N, Grauers A, Egardt B. Optimal Sizing of a Parallel PHEV powertrain. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2013; 62(6), 2469-2480.
- [87] ZeEUS, “eBus Report: An overview of electric buses in Europe,” *ZeEUS*, p. 118, 2016. Dostupno na: <http://zeeus.eu/uploads/publications/documents/zeeus-ebus-report-internet.pdf> , (pristupljeno 25.8.2022.)
- [88] SAFT Ion’Drive 630 V battery system datasheet. Dostupno na: <https://www.saftbatteries.com/products-solutions/products>, (pristupljeno 18.7.2022.)
- [89] Andre D, Meiler M, Steiner K, Wimmer C, Soczka-Guth T, Sauer D. U. Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. I. Experimental investigation. *J. Power Sources*. 2011; 196(12), 5334–5341.
- [90] VOLVO i-shift PRODUCT GUIDE. Dostupno na: <https://www.volvo Trucks.us/-/media/vtna/files/shared/powertrain/2017-i-shift-product-guide.pdf>, (pristupljeno: 16.10.2019.)

Literatura

- [91] Haramina K. Modeliranje i simulacija dinamike pogona utičnog hibridnog električnog autobusa paralelne konfiguracije. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet Strojarsva i Brodogradnje, 2019.
- [92] Staunton R.H, Ayers C.W, Marlino L.D. Evaluation of 2004 Toyota Prius hybrid electric drive system. Report ORNL/TM-2006/423. USA Oak Ridge, Ten, 2005.
- [93] Cipek M. Modeling, Analysis and Optimal Control of Hybrid Electric Vehicle Powertrains. Doktorska disertacija. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet Strojarsva i Brodogradnje, 2015.
- [94] Volvo: Design and Function, I-Shift Transmission, Service Bulletin Trucks, Volvo Trucks North America, 2008.
- [95] Installation Instructions for Bus Axles. Dostupno na: http://shop.pwt.ca/DRT/Vendors%20Manuals/04000%20Axles%20-%20ZF/Bus%20Axle%20Installation%20Instructions%204472_700_026.pdf (pristupljeno:18.10.2022.)
- [96] GNK Driveline: Constant Velocity Driveshafts for Industry, Commercial- and Special-Type Vehicles, 20061.
- [97] Škugor B, Hrgetić M, Deur J. GPS measurement-based road grade reconstruction with application to electric vehicle simulation and analysis. In Proceedings of the 11th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES), Dubrovnik, Croatia. 27 September–2 October 2015., Dubrovnik, Croatia.
- [98] 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.
- [99] 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(3). 405–405.
- [100] Soldo J, Škugor B, Deur J Optimal energy management and shift scheduling control of a parallel plug-in hybrid electric vehicle. Int. J. Powertrains. 2022; 9(3), 325-348.
- [101] Siemens (2020), Simcenter Amesim 2020.1, Integration Algorithms used in Simcenter Amesim, Technical bulletin no. 102.
- [102] Deur J, Pavković D. Fundamentals of electrical drive controls. In Electrical Engineering—Fundamentals of Electrical Drive Controls; EOLSS Publishers: Oxford, UK, 2011; 1–59.
- [103] Ngo V. D, Colin Navarrete J. A, Hofman T, Steinbuch M, Serrarens A. Optimal gear shift strategies for fuel economy and driveability. Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng. 2013; 227(10), 1398–1413.
- [104] Bellman R.E, Dreyfus S.E. Applied Dynamic Programming. Princeton University Press. USA, Princeton, NJ, 1962.
- [105] Soldo J, Škugor B, Deur J. Analysis of optimal battery state-of-charge trajectory patterns for blended mode of a parallel plug-in hybrid electric vehicle and a wide range of driving conditions. Optim Eng. 2021; 22, 1955–1977.

Literatura

- [106] Cipek M, Škugor B, Čorić M, Kasać J, Deur J. Control variable optimisation for an extended range electric vehicle. *Int. J. Powertrains*, 2016; 5(1), 30.
- [107] Tibshirani R. Regression Shrinkage and Selection via the Lasso. *J. R. Stat. Soc. Ser. B*, 1996; 85(1), 267–288.
- [108] Topić J. Modeliranje voznih ciklusa uključujući vremenski promijenjive značajke nagiba ceste, mase vozila i zagušenja prometa. Doktorska disertacija. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet Strojarsstva i Brodogradnje, 2022.
- [109] Topić J, Škugor B, Deur J. Receding-Horizon Prediction of Vehicle Velocity Profile Using Deterministic and Stochastic Deep Neural Network Models. *Sustainability*. 2022; 14, 10674.

Prilozi

Prilog A – Parametri modela pogonskog sklopa te strategije upravljanja

Prilog A.1. Prijenosni omjeri redukcijskih razina transmisije

U FWD modelu pogona (poglavlje 3), normirane pozicije sinkrona s, m i r (s_{ps} , s_{pm} i s_{pr} na slici 2.5 odnosno u tablici 2.3) definiraju prijenosni omjer transmisije h . Naime, ove pozicije definiraju koji će zupčanički par redukcijske razine transmisije biti uključen prema tablici A-1. Za normirane pozicije sinkrona vrijedi $s_{ps} \in [1, 2]$, $s_{pm} \in [0, 3]$ i $s_{pr} \in [1, 2]$ (slika 2.5).

Tablica A-1. Odnos normiranih pozicija sinkrona i aktivnih zupčaničkih parova [91].

Zupčanički par	Normirane pozicije sinkrona		
	s_{ps}	s_{pm}	s_{pr}
s1	1	-	-
s2	2	-	-
m1	-	1	-
m2	-	2	-
m3	-	3	-
r1	-	-	1
r2	-	-	2

Brojevi zuba zupčanika na pojedinim razinama transmisije dani su u tablici A-2. Iz njih se izvode prijenosni omjeri pojedinih zupčaničkih parova danih u tablici A-3. Prijenosni omjer na razdjelnoj, glavnoj te planetarnoj redukcijskoj razini (h_s , h_m te h_r) ovise o prijenosnim omjerima trenutno ukopčanih zupčaničkih parova na odgovarajućoj razini, a njihovim umnoškom definira se ukupni prijenosni omjer transmisije h :

$$h = h_s h_m h_r \quad (\text{A-1})$$

Prilozi

Tablica A-2. Brojevi zubi pojedinih zupčanika [91].

	s₁	s₂ (m₁)	m₂	m₃
Ulazno/glavno vratila	31	35	41	46
Međuvratilo	44	39	28	19
	Sunčanik	Planet	Prsten	
Planetarni prijenosnik	23	26	77	

Tablica A-3. Prijenosni omjeri zupčaničkih parova [91].

Razdjelna razina		Glavna razina			Planetarni prijenosnik	
s₁	s₂	m₁	m₂	m₃	r₁	r₂
1.419	1.114	2.421	1.464	0.897	4.348	1.000

Prilog A.2. Parametri modela pogonskog sklopa

Vrijednosti parametara modela PHEV iznose: masa vozila $M_v = 12635$ kg, faktor otpora kotrljanja $R_0 = 0.012$, prijenosni omjer diferencijala $i_o = 4.72$, efektivni radijus gume $r_w = 0.481$ m, faktor aerodinamičkog otpora vozila $C_d = 0.7$, gustoća zraka $\rho_{air} = 1.225$ g /m³, čeaona površina vozila $A_f = 7.52$ m², kapacitet baterije $Q_{max} = 30$ Ah.

Prilog A.3. Parametri strategije upravljanja

Parametri ne-adaptivne strategije upravljanja (RB+ECMS-EXT) iznose: prag snage uključanja motora (SUI) $P_{on} = 80$ kW, prag snage isključenja motora $P_{off} = 30$ kW, srednja specifična potrošnja goriva za izračun ekvivalentne potrošnje goriva tijekom pražnjenja baterije $\bar{A}_{ek} = 185$ g /kWh, pojačanje SoC regulatora $K_{SoC} = 736000$ W, mrtva zona SoC regulatora $\Delta_{SoC} = 0.02$.

Prilog B – Izvod vezani uz razvoj EXT-BWD modela PHEV-a

Prilog B.1. Izvod za proračun reference kapaciteta momenta glavne spojke prilikom njenog zatvaranja

Kombinirajući jednačbe (3-11) i (3-14), dinamika brzine klizanja glavne spojke može se zapisati kao:

$$\dot{\omega}_{mcl} = -\frac{\tau_{mcl}}{I_e} = -\frac{\tau_{mcl,max}c_{mcl}}{I_e} = -\frac{\tau_{mcl,max}c_{mclR}}{I_e} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{mcl}}}\right). \quad (B-1)$$

Integrirajući (B-1) u vremenskom rasponu od $t = 0$ s do $t = \Delta t_{mcl}$ te uzimajući u obzir rubne uvjete $\omega_{mcl}(\Delta t_{mcl})$ i $\omega_{mcl}(0) = \omega_{mcl,start}$ dobiva se slijedeća jednačba

$$\omega_{mcl,start} = \frac{c_{mclR}\tau_{mcl,max}}{I_e} \left(T_{mcl} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_{mcl}}{T_{mcl}}}\right) - \Delta t_{mcl} \right), \quad (B-2)$$

iz koje se direktno izvodi izraz za referencu kapaciteta momenta glavne spojke c_{mclR} , koji je dan jednačbom (3-3).

Prilog B.2. Izvod za proračun gubitaka energije uslijed klizanja glavne spojke

Ovisnost brzine klizanja glavne spojke o vremenu izvodi se integriranjem izraza (B-1):

$$\omega_{mcl}(t) = -\frac{\tau_{mcl,max}c_{mclR}}{I_e} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{mcl}}}\right) t + \omega_{mcl,start}. \quad (B-3)$$

Izraz za gubitke energije klizanja glavne spojke dan je jednačbom (3-13):

$$E_{mcl,loss} = \int_0^{\Delta t_{mcl}} \tau_{mcl} \omega_{mcl} dt \quad (B-4)$$

gdje je moment spojke τ_{mcl} dan jednačbom (3-14). Uvrštavanjem (3-14) i (B-3) u (B-4) i sređivanjem izraza dobiva se

$$E_{mcl,loss} \cong \int_0^{\Delta t_{mcl}} \left(-\frac{\tau_{mcl,max}^2 c_{mclR}^2}{I_e} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{mcl}}}\right)^2 t + \tau_{mcl,max} c_{mclR} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{mcl}}}\right) \omega_{mcl,start} \right) dt \quad (B-5)$$

Uvrštavanjem jednačbe (B-2) u (B-5) te integriranjem od $t = 0$ s do $t = \Delta t_{mcl}$ te sređivanjem izraza dobiva se konačan izvod za gubitke energije klizanja spojke:

Prilozi

$$E_{mcl,loss} = \omega_{mcl,start} I_e \left(-\frac{1}{2d_{mcl}^2} (T_{mcl}^2 b_{mcl} + T_{sync}^2 + 4T_{mcl}^2 a_{mcl} - 2T_{mcl} T_{sync} a_{mcl}) - 1 \right), \quad (B-6)$$

$$E_{mcl,loss,k} = \begin{cases} k_{mcl} \omega_{mcl,start}^2, & \text{ako } (EN_{st,k} = 1 \text{ i } EN_{st,k-1} = 0) \\ & \text{ili } (EN_{st,k} = 1 \text{ i } h_k \neq h_{k-1}), \\ 0, & \text{u suprotnom,} \end{cases} \quad (B-7)$$

gdje je koeficijent k_{mcl} jednak:

$$k_{mcl} = I_e \left(-\frac{1}{2d_{mcl}^2} (T_{mcl}^2 b_{mcl} + T_{sync}^2 + 4T_{mcl}^2 a_{mcl} - 2T_{mcl} T_{sync} a_{mcl}) - 1 \right), \quad (B-8)$$

gdje su koeficijenti u izrazu (B-6), kao i u odgovarajućem izrazu (3-16), dani kao

$$a_{mcl} = 1 - e^{-\frac{\Delta t_{mcl}}{T_{mcl}}}, \quad (B-9)$$

$$b_{mcl} = 1 - e^{-\frac{2\Delta t_{mcl}}{T_{mcl}}}, \quad (B-10)$$

$$d_{mcl} = T_{mcl} a_{mcl} - \Delta t_{mcl}. \quad (B-11)$$

Prilog B.3. Izvod za proračun gubitaka energije uslijed klizanja sinkrona

Uz pretpostavke da je dinamika brzine međuvratila zanemariva ($\dot{\omega}_{cs} = 0$), glavna spojka otvorena, moment M/G stroja prilikom sinkronizacije sinkrona jednak nuli ($\tau_{MG} = 0$) te zanemarivu dinamiku aktuatora sinkrona s, dinamika brzine klizanja sinkrona s može se zapisati kao

$$\dot{\omega}_{ss} = \dot{\omega}_{MG} - \underbrace{\dot{\omega}_{cs}}_{=0} = \frac{1}{I_{MG1}} \left(\underbrace{\tau_{MG}}_{=0} - \tau_{ss} \right) = -\frac{\tau_{ss}}{I_{MG1}} \quad (B-12)$$

Integrirajući (B-12) od $t = 0$ s do $t = \Delta t_{sync}$ te uzimajući u obzir rubne uvjete $\omega_{ss}(\Delta t_{sync}) = 0$ i $\omega_{ss}(0)$ dobiva se izraz

$$\underbrace{\omega_{ss}(\Delta t_{sync})}_{=0} = -\frac{\tau_{ss}}{I_{MG1}} \Delta t_{sync} + \omega_{ss}(0) \quad (B-13)$$

iz kojeg se određuje trajanje sinkronizacije sinkrona

$$\Delta t_{sync} = \frac{I_{MG1} \omega_{ss}(0)}{\tau_{ss}}. \quad (B-14)$$

Gubitak energije uslijed klizanja s-sinkrona $E_{s,s,j,loss}$ tada je jednak

$$\begin{aligned}
 E_{s,s,j,loss} &= \int_0^{\Delta t_{sync}} \tau_{ss} \omega_{ss} dt = \int_0^{\Delta t_{sync}} -\frac{\tau_{ss}^2}{I_{MG1}} t + \tau_{ss} \omega_{ss}(0) dt = \\
 &= -\frac{\tau_{ss}^2}{2I_{MG1}} \Delta t_{sync}^2 + \tau_{ss} \omega_{ss}(0) \Delta t_{sync}.
 \end{aligned} \tag{B-15}$$

Konačno, uvrštavanjem izraza (B-13) u jednadžbu (B-15) dobiva se izraz za gubitak energije:

$$E_{s,s,j,loss} = -\frac{I_{MG1} \omega_{ss}(0)^2}{2} + I_{MG1} \omega_{ss}(0)^2 = \frac{I_{MG1} \omega_{ss}(0)^2}{2} \tag{B-16}$$

U vremenski uzorkovanoj domeni BWD modela, početna vrijednost brzine klizanja s-sinkrona $\omega_{s,j}$ određuje se pod slijedećim pretpostavkama

$$\omega_{s,s,j,k} = \omega_{MG,k} - \omega_{cs,k} = 0 \text{ rad/s}, \tag{B-17}$$

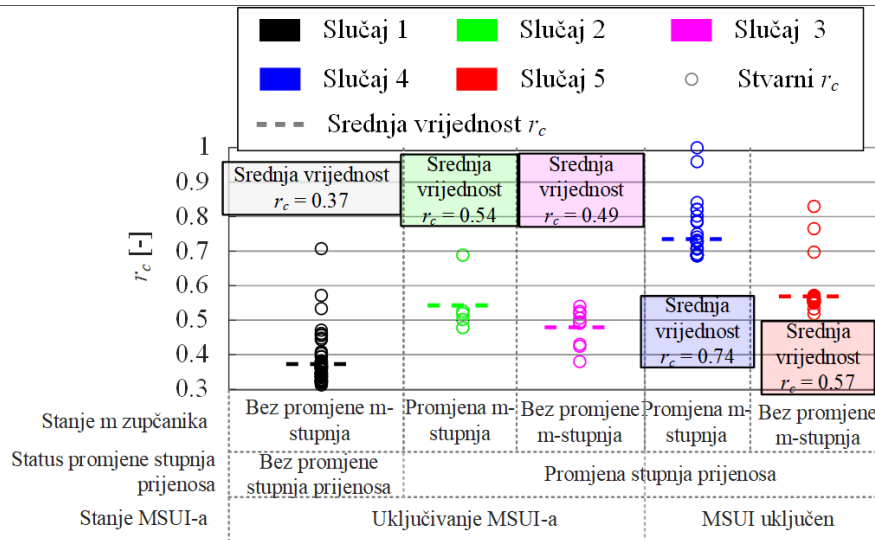
$$\omega_{s,s,j,k-1} = \omega_{MG,k-1} - \omega_{cs,k-1}. \tag{B-18}$$

Uz pretpostavku da je $\omega_{cs,k} \approx \omega_{cs,k-1}$ izraz za početnu vrijednost klizanja sinkrona s u vremenskoj uzorkovanoj domeni postaje

$$\omega_{s,s,j,k} = i_o h_{k-1} \omega_{w,k-1} - i_o h_k \omega_{w,k}. \tag{B-19}$$

Prilog B.4. Određivanje koeficijenta smanjenja momenta MSUI-a prilikom promjene stanja pogonskog sklopa

Koeficijent smanjenja momenta MSUI-a r_c identificiran je za pet različitih vrsta promjene stanja pogonskog sklopa, koje uključuju: a) uključivanje MSUI-a bez mijenjanja stupnja prijenosa; b) i c) promjenu stupnja prijenosa dok je MSUI uključen uz odnosno bez promjene stanja kandžaste spojke m; te d) i e) promjenu stupnja prijenosa dok je MSUI isključen uz odnosno bez mijenjanja stanja kandžaste spojke m. Vrsta promjene stanja pogona određena je na osnovu stupnja prijenosa te stanja MSUI-a u trenutnom (k -tom) te prošlom ($(k-1)$ -tom) koraku simulacije.

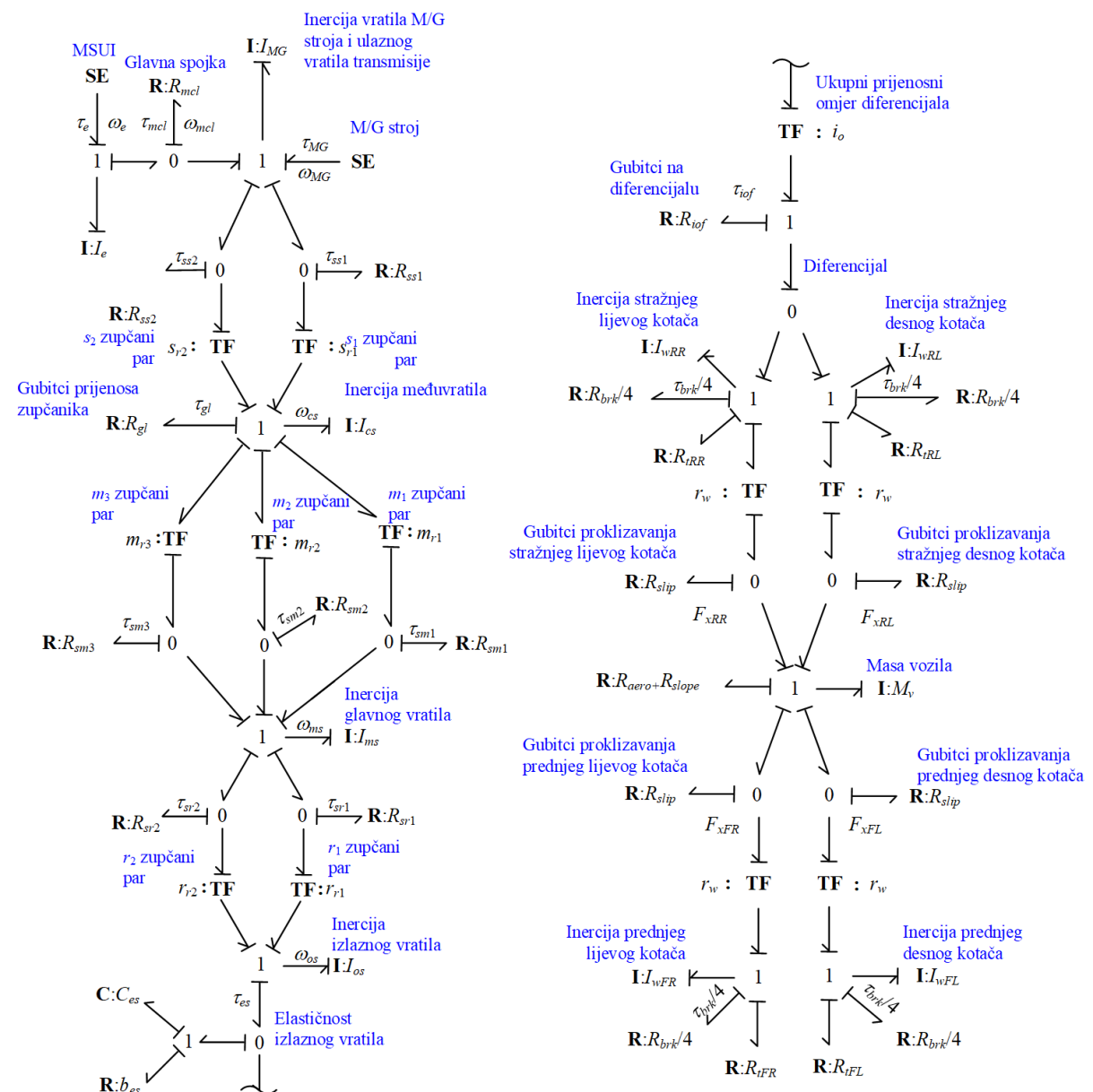


Slika B-1. Koeficijent smanjenja momenta MSUI-a za pet karakterističnih kategorija promjene stanja pogona.

Vrijednosti koeficijenta smanjenja momenta za pet različitih vrsta promjena stanja određene su temeljem odziva pogona dobivenih primjenom FWD modela koristeći upravljačke varijable dobivene DP algoritmom preko DUB, WHVC, JE05 i HDUDDS voznih ciklusa. Rezultati su prikazani na slici B1, te su iz njih izračunate srednje vrijednosti koeficijenta r_c za svaku kategoriju promjene stanja, koji se potom pohranjuje u mapu $r_c(EN_{st,k}, EN_{st,k-1}, h_k, h_{k-1})$ ovisno o vrsti promjene stanja pogona koja se određuje na osnovu četiri ulaza u mapu.

Prilog C – Vezni dijagram pogonskog sklopa i odgovarajući izrazi korišteni u analizi bilance energije

Na osnovu FWD simulacijskog modela izvedenog u Amesim simulacijskom okruženju izrađen je vezni dijagram prikazan na slici C-1, koji se nadalje koristi za izvod izraza korištenih u analizi bilance energije u potpoglavlju 3.4. Izrazi se daju u vremenski uzorkovanom obliku gdje vrijeme uzorkovanja T_d iznosi 1 s za BWD i EXT-BWD modele te 10 ms za FWD model.



Slika C-2. Vezni dijagram FWD modela PHEV-a.

Energija otvorenog kruga baterije E_{oc} računa se kao (v. sliku 2-4a i izraz (2-10)):

Prilozi

$$E_{oc} = \sum_{k=1}^N U_{oc}(SoC_k) \underbrace{\left(\frac{\sqrt{U_{oc}^2(SoC_k) - 4R(SoC_k)P_{batt,k}} - U_{oc}(SoC_k)}{2R(SoC_k)} \right)}_{I_{batt,k}} T_d. \quad (C-1)$$

S druge strane, mehanička energija MSUI-a jednaka je

$$E_e = \sum_{k=1}^N \tau_{e,k} \omega_{e,k} T_d. \quad (C-2)$$

Ukupni gubitci baterije odnosno M/G stroja računaju se kao

$$E_{batt,loss} = \sum_{k=1}^N P_{batt,loss,k} T_d = \sum_{k=1}^N \underbrace{I_{batt,k}^2 R(SoC_k)}_{P_{batt,loss,k}} T_d, \quad (C-3)$$

$$E_{MG,loss} = \sum_{k=1}^N P_{MG,loss,k} T_d = \sum_{k=1}^N \underbrace{\left(1 - \eta_{MG}^{k_b}(\tau_{MG,k}, \omega_{MG,k})\right) \tau_{MG,k} \omega_{MG,k}}_{P_{MG,loss,k}} T_d, \quad (C-4)$$

te se odjeljuju u one u stacionarnom stanju ($E_{batt,loss,s}$ i $E_{MG,loss,s}$) i prijelaznim stanjima ($E_{batt,loss,t}$ i $E_{MG,loss,t}$), pri čemu se stacionarno stanje detektira pomoću signala kapaciteta momenta spojke c_{mcl} te pozicija sinkrona s, m i r (s_{ps} , s_{pm} te s_{pr}). Gubitci energije na zupčastim parovima s, m i r jednaki su:

$$E_{tr,loss,g} = \sum_{k=1}^N \left(\left(1 - \eta_s(|\tau_{ss,k}|)\right) |\tau_{ss,k}| \omega_{MG,k} + \left(1 - \eta_m(|\tau_{sm,k}|)\right) |\tau_{sm,k}| \omega_{ms,k} \right. \\ \left. + \left(1 - \eta_r(|\tau_{sr,k}|)\right) |\tau_{sr,k}| \omega_{ms,k} \right) T_d. \quad (C-5)$$

gdje su učinkovitosti zupčastih parova s, m i r (η_s , η_m odnosno η_r) izračunate koristeći ugrađeni Amesim-ov alat [101].

Gubitci energije uslijed proklizavanja glavne spojke i sinkrona dobivaju se prema

$$E_{tr,loss,sl} = \sum_{k=1}^N (\tau_{mcl,k} \omega_{mcl,k} + \tau_{ss,k} \omega_{ss,k} + \tau_{sm,k} \omega_{sm,k} + \tau_{sr,k} \omega_{s,k}) T_d \quad (C-6)$$

Gubitci energije uslijed aerodinamičkog otpora odnosno otpora kotrljanja guma računaju se kao

Prilozi

$$E_{aero} = \sum_{k=1}^N \frac{0.5 A_f C_d \rho_{air} \omega_{w,k}^3}{r_w} T_d \quad (C-7)$$

$$E_{roll} = \sum_{k=1}^N \frac{R_0 M_v g \cos(\delta_{r,k}) \omega_{w,k}}{r_w} T_d \quad (C-8)$$

Energija potrošna na mehaničkim kočnicama proporcionalna je kočnom momentu τ_{brk} :

$$E_{brake} = \sum_{k=1}^N \tau_{brk,k} \omega_{w,k} T_d \quad (C-9)$$

Energija pohranjena u inercijama i elastičnom vratilu jednaka je:

$$E_i = \sum_{k=1}^N \frac{1}{2} (I_e \dot{\omega}_e \omega_e + I_{MG+is} \dot{\omega}_{MG} \omega_{MG} + I_{cs} \dot{\omega}_{cs} \omega_{cs} + I_{ms} \dot{\omega}_{ms} \omega_{ms} + I_{os} \dot{\omega}_{os} \omega_{os} + I_{v+w} \dot{\omega}_{ds} \omega_{ds} + \tau_{es} \omega_{es}) T_d \quad (C-10)$$

Životopis

Jure Soldo rođen je 22. rujna 1991. u Požegi. Po završetku matematičke gimnazije u Požegi, 2010. godine upisuje Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Titulu magistra inženjera strojarstva stekao je u srpnju 2015. godine na istom Fakultetu. Od listopada 2015. godine pa do travnja 2017. godine radi na radnom mjestu robot programera u tvrtki Atinel sa sjedištem u Varaždinu, gdje sudjeluje u aktivnostima vezanim za programiranje i puštanje u pogon industrijskih robota. Od travnja 2017. godine radi na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu kao asistent na Interreg CE projektu „*Smart Solutions supporting Low Emission Zones and other low-carbon mobility policies in EU cities – SOLEZ*“, a od prosinca 2020. godine uposlen je na istom fakultetu u okviru projekta razvoja karijere mladih istraživača Hrvatske zaklade za znanost, te istovremeno pohađa doktorski studij. U svojstvu suradnika, sudjelovao je na istraživačkom projektu „*Adaptivno i prediktivno upravljanje utičnim hibridnim električnim vozilima- ACHIEVE*“ podržanom od strane Hrvatske zaklade za znanost te na bilateralnom istraživačkom projektu „*Powertrain Control Optimization for Fast Automatic Gear Shifting*“ podržanom od strane Ford Motor Company kroz University Research Program. Njegovi istraživački interesi uključuju modeliranje i upravljanje hibridnim električnim vozilima, pogonskim sustavima vozila poput automatskih transmisija, uzdužnom dinamikom vozilom te općenito mehatroničkim sustavima. Autor je ili koautor pet radova u časopisima indeksiranim u CC/SCI bazama, dva rada u ostalim međunarodnim časopisima, deset radova publiciranih na međunarodnim kongresima i konferencijama, te niza studija i tehničkih izvještaja.

Popis javno objavljenih radova:

1. Soldo, J., Škugor, B., Deur, J., 2022, Optimal Control of a PHEV Based on Backward-Looking Model Extended with Powertrain Transient Effects. *Energies*, Vol. 15: 8152. doi. 10.3390/en15218152.
2. Soldo, J., Škugor, B., Deur, J., 2021, Analysis of Optimal Battery State-of-Charge Trajectory Patterns for Blended Mode of a Parallel Plug-in Hybrid Electric Vehicle and a Wide Range of Driving Conditions. *Optimization and Engineering*, Vol. 24, No. 1, pp. 1-23. doi. 10.1007/s11081-021-09656-6.
3. Soldo, J., Škugor, B., Deur, J., 2021, Online Synthesis of Optimal Battery State-of-Charge Reference Trajectory for a Plug-in Hybrid Electric City Bus. *Energies*, Vol. 14, No. 11, pp. 1-23. doi. 10.3390/en14113168.

4. Topić, J., Soldo, J., Maletić, F., Škugor, B., Deur, J., 2020, Virtual Simulation of Electric Bus Fleets for City Bus Transport Electrification Planning", *Energies*. *Energies*, Vol. 13, No. 13, pp. 1-23. doi. 10.3390/en13133410.
5. Soldo, J., Škugor, B., Deur, J., 2022, Synthesis of Optimal Battery State-of-Charge Trajectory for Blended Regime of Plug-in Hybrid Electric Vehicles in the Presence of Low-Emission Zones and Varying Road Grades. *Energies*, Vol. 12. No. 22. doi. 10.3390/en12224296.
6. Soldo, J., Škugor, B., Deur, J., 2022, Optimal energy management and shift scheduling control of a parallel plug-in hybrid electric vehicle. *International Journal of Powertrains*, Vol. 9, No. 3. doi. 10.1504/IJPT.2020.109666.
7. Škugor, B., Soldo, J., Deur, J., 2019, Analysis of Optimal Battery State-of-Charge Trajectory for Blended Regime of Plug-in Hybrid Electric Vehicle. *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 10, No. 4, pp. 1-16. doi. 10.3390/wevj10040075.
8. Soldo, J., Cvok, I., Škugor, B., Deur, J., 2022, An Adaptive Power Flow Control Strategy of a Parallel Plug-in Hybrid Electric Vehicle. *17th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES), Paphos, Cyprus*.
9. Soldo, J., Škugor, B., Deur, J., 2022, Model Predictive Control Strategy of a Parallel Plug-in Hybrid Electric Vehicle Relying on Dynamic Programming Optimization and Extended Backward-looking Powertrain Model. *Powertrain Modelling and Control Conference (PMC), Loughborough, UK*.
10. Soldo, J., Cvok, I., Deur, J., 2022, Bond Graph-Based Energy Balance Analysis of Forward and Backward Looking Models of Parallel Plug-In Hybrid Electric Vehicle. *SAE paper #2022-01-0743, SAE World Congress, Detroit, MI*.
11. Soldo, J., Cvok, I., Deur, J., Ivanović, V., Zhang, Y., Fujii, Y., 2021, Automatic Transmission Upshift Control Using a Linearized Reduced-Order Model-Based LQR Approach. *SAE Technical Paper #2021-01-0697, SAE World Congress, Detroit, MI*.
12. Soldo, J., Škugor, B., Deur, J., 2020, Analysis of Patterns of Optimal Battery State-of-Charge Trajectories for Blended Regime of a Parallel Plug-in Hybrid Electric Vehicle and a Wide Range of Driving Conditions. *15th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES), Cologne, Germany*.
13. Soldo, J., Škugor, B., Deur, J., 2020, An Extended Range Electric Vehicle Backward-looking Model Accounting for Powertrain Transient Effects. *SAE paper #2020-01-1442, SAE World Congress, Detroit, MI*.
14. Soldo, J., Škugor, B., Deur, J., 2019, Synthesis of Optimal Battery State of Charge Trajectory in the Presence of Varying Road Grade for a Parallel Plug-in Hybrid Electric Vehicle. *14th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES), Dubrovnik, Croatia*.

Životopis

15. Soldo, J., Škugor, B., Deur, J., 2019, Optimal Energy Management Control of a Parallel Plug-in Hybrid Electric Vehicle in the Presence of Low Emission Zones. *SAE paper #2019-01-1215, SAE World Congress, Detroit, MI.*
16. Škugor, B., Soldo, J., Deur, J., 2019, Analysis of Optimal Battery State-of-Charge Trajectory for Blended Regime of Plug-in Hybrid Electric Vehicle. *32nd International Electric Vehicle Symposium & Exhibition (EVS32), Lyon, France.*
17. Soldo, J., Škugor, B., Deur, J., 2018, Optimal Energy Management and Shift Scheduling Control of a Parallel Plug-in Hybrid Electric Vehicle. *Powertrain Modelling and Control Conference (PMC), Loughborough, UK.*
18. Soldo, J., Ranogajec, V., Škugor, B., Deur, J., 2017, Model-based Optimisation of Shift Scheduling Maps for a Parallel Hybrid Electric Vehicle. *AVL International Simulation Conference, Graz, Austria.*

Curriculum vitae

Jure Soldo was born on September 22, 1991 in town of Požega. After graduating from the mathematics high school in Požega, in 2010 he enrolled in the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture at the University of Zagreb. He obtained his master's degree in mechanical engineering in July 2015 at the same Faculty. From October 2015 until April 2017, he worked as a robot programmer in the company Atinel, based in Varaždin, where he participated in activities related to programming and commissioning of industrial robots. Since April 2017 he has been employed at the Faculty of Mechanical Engineering and Shipbuilding of the University of Zagreb, as an assistant on the Interreg CE project "Smart Solutions supporting Low Emission Zones and other low-carbon mobility policies in EU cities - SOLEZ, and since December 2020 he has been employed at the same faculty as part of the Croatian Science Foundation's career development project for young researchers, and at the same time attended doctoral studies. As an research assistant, he participated in the research project "Adaptive and predictive control of plug-in hybrid electric vehicles - ACHIEVE" supported by the Croatian Science Foundation and in the bilateral research project "Powertrain Control Optimization for Fast Automatic Gear Shifting" supported by Ford Motor Company through University Research Program.

His research interests include modelling and control of hybrid electric vehicles, vehicle drive systems such as automatic transmissions, vehicle dynamics and mechatronic systems in general. He is the author or co-author of five papers in journals indexed in CC/SCI databases, two papers in other international journals, ten papers published at international congresses and conferences, and a number of studies and technical reports.