

# Upravljanje umjereno-hibridiziranim vozilom paralelne konfiguracije P2

---

Hihlik, Mislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

*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:235:337598>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-19**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Mislav Hihlik**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Joško Deur, dipl. ing.

Student:

Mislav Hihlik

Zagreb, 2018.

## **IZJAVA**

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.*

*Mislav Hihlik*

## **ZAHVALA**

*Najsrdahnije se zahvaljujem voditelju rada prof. dr. sc. Jošku Deuru na prihvaćanju mentorstva za ovaj rad te što je svojim znanstvenim i stručnim savjetima oblikovao temeljnu ideju ovog rada i pomogao mi u njegovu usavršavanju.*

*Želim se također zahvaliti doktorandu Vanji Ranogajcu, mag. ing. mech. koji me nesebičnim odvajanjem svog vremena i svojim mnogim korisnim sugestijama vodio kroz rad i time značajno pomogao u njegovoj izradi.*

*Na kraju bih se još posebno želio zahvaliti svojoj obitelji, svim kolegama i prijateljima na povjerenju, strpljenju i moralnoj podršci koju su mi iskazali tijekom studija i izrade ovog završnog rada.*

*M.H.*



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Mislav Hihlik**

Mat. br.: 0035201140

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Upravljanje umjereno-hibridiziranim vozilom paralelne konfiguracije P2**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Control of a mild hybrid electric vehicle given in parallel configuration P2**

Opis zadatka:

Upravljačka strategija hibridnog električnog vozila (HEV) igra važnu ulogu u smanjenju potrošnje goriva i emisija štetnih plinova. Dodavanje električnog motora male snage, smještenog na ulazu u automatsku transmisiju (paralelna hibridna konfiguracija P2), omogućava ostvarenje niza novih funkcionalnosti poput električne vožnje (engl. e-Drive), sporohodne električne vožnje (engl. e-creep), regenerativnog kočenja, pasivnog električnog krstarenja (engl. e-coasting) i aktivnog električnog krstarenja (engl. e-sailing). U ovim se režimima rada isključuje motor s unutarnjim izgaranjem te uz koordinirano upravljanje automatskom transmisijom i ulaznom spojkom postiže smanjenje potrošnje goriva. U radu je potrebno:

- U AVL CRUISE okruženju implementirati model umjerenog HEV-a paralelne konfiguracije P2;
- razviti upravljačke strategije za spomenute funkcionalnosti električne vožnje, regenerativnog kočenja, te pasivnog i aktivnog električnog krstarenja;
- implementirati razvijene upravljačke strategije korištenjem C prevoditelja dostupnog unutar CRUISE okruženja;
- provesti simulacijsku provjeru upravljačkih strategija za karakteristične vozne cikluse, te analizirati glavne značajke odziva pogonskog sustava HEV-a s naglaskom na uštede goriva u odnosu na konvencionalno vozilo.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Joško Deur

Rok predaje rada:

1. rok: 23. veljače 2018.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

---

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
POPIS KRATICA .....	X
SAŽETAK.....	XI
SUMMARY .....	XII
1. UVOD.....	1
1.1. Osnovni pojmovi i povijest hibridnih vozila.....	1
1.2. Motivacija .....	2
1.3. Simulacijsko okruženje .....	3
1.4. Organizacija rada .....	4
2. KONFIGURACIJE HIBRIDNOG VOZILA .....	5
2.1. Serijska konfiguracija .....	5
2.2. Serijsko – paralelna konfiguracija.....	5
2.3. Paralelna konfiguracija .....	6
3. MODEL UMJERENOG HEV-a P2 KONFIGURACIJE.....	10
3.1. Motor s unutarnjim izgaranjem (MSUI) .....	10
3.2. Elektromotor (EM).....	12
3.3. Baterija .....	14
3.4. Transmisija i diferencijal .....	14
3.5. Mape upravljačkog sustava .....	14
4. RAZVOJ FUNKCIONALNOSTI UPRAVLJAČKE STRATEGIJE .....	18
4.1. Strategija izmjene funkcionalnosti.....	18
4.1. Funkcionalnost sporohodne vožnje – mod CR .....	19
4.2. Funkcionalnost aktivnog električnog krstarenja – mod SA.....	22
4.3. Funkcionalnost pasivnog električnog krstarenja – mod CO .....	23
4.3.1. Režim krstarenja 0 .....	25
4.3.2. Režimi krstarenja 1,2,3,4 .....	25
4.3.3. Režim krstarenja 5 .....	26
4.4. Regenerativno kočenje – mod REG.....	27
4.5. Konvencionalna vožnja – mod KON .....	30

---

5. SIMULACIJSKA PROVJERA UPRAVLJAČKE STRATEGIJE .....	31
5.1. Korekcija potrošnje goriva.....	33
5.2. Ispitivanje i analiza cjelokupne upravljačke strategije hibridnog vozila .....	34
5.2.1. NEDC vozni ciklus .....	35
5.2.2. WLTP vozni ciklus .....	41
5.2.3. HWFET vozni ciklus .....	43
5.2.4. UDDS vozni ciklus .....	44
5.3. Analiza simulacije funkcionalnosti pasivnog električnog krstarenja.....	46
ZAKLJUČAK .....	53
LITERATURA.....	55
PRILOZI.....	57

## POPIS SLIKA

Slika 1.1.	Lohner-Porsche Mixte Hybrid.....	2
Slika 1.2.	Eurostat izvješće o proizvodnji stakleničkih plinova 1990. i 2015. po sektorima ..	3
Slika 1.3.	AVL CRUISE okruženje na primjeru modela umjerenog hibridnog električnog vozila P2 konfiguracije.....	4
Slika 2.1.	Serijska konfiguracija hibridnog pogona [8].....	5
Slika 2.2.	Serijsko – paralelna konfiguracija hibridnog pogona [8].....	6
Slika 2.3.	Toyota Prius [10].....	6
Slika 2.4.	Paralelna konfiguracija hibridnog pogona [8].....	7
Slika 2.5.	Arhitekture paralelne konfiguracije.....	7
Slika 2.6.	Shematski prikaz P2 konfiguracije [11] .....	8
Slika 2.7.	Shema: a) P2 konfiguracija - s redukcijom b) P2 konfiguracija - direktno spojen EM .....	8
Slika 2.8.	Izvedba: a) P2 konfiguracija - s redukcijom [14] b) P2 konfiguracija - direktno spojen EM [15].....	9
Slika 3.1.	Krivulja maksimalnog momenta SUI motora kao funkcija brzine vrtnje motora.	10
Slika 3.2.	Kočni moment motora u funkciji brzine vrtnje motora.....	11
Slika 3.3.	Željeni iznos momenta u ovisnosti o brzini vrtnje SUI motora i signalu papučice akceleratora .....	11
Slika 3.4.	Maksimalni moment elektromotora u motornom načinu rada .....	12
Slika 3.5.	Maksimalni moment elektromotora u generatorskom načinu rada .....	13
Slika 3.6.	Mapa snage alternatora.....	13
Slika 3.7.	Mapa ovisnosti SoC-a o naponu.....	14
Slika 3.8.	Mapa raspoložive snage za funkcionalnost sporohodne električne vožnje.....	15
Slika 3.9.	Mapa raspoložive snage za funkcionalnost aktivnog električnog krstarenja .....	15
Slika 3.10.	Mapa maksimalne snage regenerativnog kočenja .....	16
Slika 3.11.	Mapa koeficijenta adaptivnog pasivnog električnog krstarenja .....	16
Slika 3.12.	Mapa koeficijenta postepenog smanjivanja momenta.....	17
Slika 4.1.	Prijelaz funkcionalnosti hibridnog vozila.....	18
Slika 4.2.	Dijagram toka funkcionalnosti sporohodne električne vožnje .....	20
Slika 4.3.	Dijagram toka funkcionalnosti aktivnog električnog krstarenja .....	22
Slika 4.4.	Dijagram toka funkcionalnosti pasivnog električnog krstarenja.....	24
Slika 4.5.	Funkcionalnost regenerativnog kočenja.....	28



Slika 4.6. Konvencionalna vožnja .....	30
Slika 5.1. Profil brzine NEDC voznog ciklusa .....	31
Slika 5.2. Profil brzine WLTP voznog ciklusa .....	31
Slika 5.3. Profil brzine HWFET voznog ciklusa .....	32
Slika 5.4. Profil brzine UDDS voznog ciklusa .....	32
Slika 5.5. Profil brzine modificiranog NEDC voznog ciklusa .....	32
Slika 5.6. Utjecaj variranja SoC-a baterije na potrošnju goriva .....	33
Slika 5.6. Utjecaj variranja SoC-a baterije na razliku potrošnje goriva .....	34
Slika 5.7. Provjera uvjeta za ulazak u funkcionalnost sporohodne električne vožnje iz pokretanja vozila .....	36
Slika 5.8. Provjera uvjeta za ulazak i izlazak iz funkcionalnosti aktivnog električnog krstarenja .....	36
Slika 5.9. Provjera uvjeta za ulazak u funkcionalnost regenerativnog kočenja i izlazak u funkcionalnost sporohodne vožnje .....	37
Slika 5.10. Provjera funkcioniranja zajedničkog rada mehaničkih kočnica i regenerativnog kočenja.....	38
Slika 5.11. Usporedba trajektorija SoC-a i potrošnje goriva na NEDC voznom ciklusu za tri konfiguracije: [1] Konvencionalna, [2] Hibridna bez SA, [3] Hibridna sa SA.....	39
Slika 5.12. Usporedba trajektorija SoC-a i potrošnje goriva na WLTP voznom ciklusu za tri konfiguracije: [1] Konvencionalna, [2] Hibridna bez SA, [3] Hibridna sa SA.....	41
Slika 5.13. Usporedba trajektorija SoC-a i potrošnje goriva na HWFET voznom ciklusu za tri konfiguracije: [1] Konvencionalna, [2] Hibridna bez SA, [3] Hibridna sa SA.....	43
Slika 5.14. Usporedba trajektorija SoC-a i potrošnje goriva na UDDS voznom ciklusu za tri konfiguracije: [1] Konvencionalna, [2] Hibridna bez SA, [3] Hibridna sa SA.....	45
Slika 5.15. Modificirani NEDC ciklus s intervalima krstarenja .....	47
Slika 5.16. Provjera uvjeta za ulazak i izlazak iz funkcionalnosti pasivnog električnog krstarenja .....	47
Slika 5.17. Prikaz različitih brzina usporavanja ovisno o režimu krstarenja.....	48
Slika 5.18. Prikaz različitih brzina punjenja baterije ovisno o režimu krstarenja .....	49
Slika 5.19. Dva mjerenja ovisnosti početne brzine i režima krstarenja na punjenje baterije ..	50
Slika 5.20. Prikaz ovisnosti početne brzine i režima krstarenja na punjenje baterije.....	50
Slika 5.21. Ovisnost početne brzine, režima krstarenja i početnog SoC-a na punjenje baterije .....	51

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 3.1.	Prijenosni omjeri DCT transmisije .....	14
Tablica 4.1.	Moment na elektromotoru u ovisnosti o režimu krstarenja .....	26
Tablica 5.1.	Potrošnja goriva i voznost na NEDC voznom ciklusu za različite početne vrijednosti SoC-a .....	40
Tablica 5.2.	Potrošnja goriva i voznost na WLTP voznom ciklusu za različite početne vrijednosti SoC-a .....	42
Tablica 5.3.	Potrošnja goriva i voznost na HWFET voznom ciklusu za različite početne vrijednosti SoC-a .....	44
Tablica 5.4.	Potrošnja goriva i voznost na UDDS voznom ciklusu za različite početne vrijednosti SoC-a .....	45
Tablica 5.5.	Rezultati ispitivanja na modificiranom NEDC ciklusu za različite početne SoC vrijednosti za režim krstarenja 2 (umjereno usporavanje).....	52
Tablica 6.1.	Smanjenje potrošnje goriva umjerenog hibridnog vozila u odnosu na konvencionalno vozilo za različite vozne cikluse uz početni SoC baterije hibridnog vozila iznosa 70% .....	53

---

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$A_p$	$m^2$	površina kočnih pločica
$C_{ICE}$	-	stanje dodatne spojke za odvajanje SUI motora (zatvorena – 0, otvorena - 1)
$CO_{mode}$	-	odabrani režim krstarenja unutar pasivnog električnog krstarenja
$d$	%	pokazatelj voznosti vozila
$F_{OFF}$	-	stanje dotoka goriva u motor
$G_{act}$	-	trenutni stupanj prijenosa
$i_{diff}$	-	prijenosni omjer diferencijala
$i_{DSG}$	-	trenutni prijenosni omjer transmisije s dvostrukom spojkom
$i_{TISG}$	-	prijenosni omjer reduktora elektromotora
$i_{UK}$	-	ukupni trenutni prijenos između kotača i elektromotora
$k$	$l/(\% \cdot 100km)$	faktor korekcije potrošnje goriva
$k_B$	$Pa \cdot m^3$	izvedeni koeficijent kočenja
$mode$	-	trenutno stanje funkcionalnosti odnosno moda vožnje u kojemu se vozilo nalazi
$n_{ICE}$	$min^{-1}$	brzina vrtnje SUI motora
$n_p$	-	broj kočnih pločica po kotaču
$n_w$	-	broj kotača vozila
$P_{alt}$	W	snaga alternatora
$P_{B,des}$	W	željena snaga kočenja
$P_{B,mod}$	W	potrebna modificirana snaga kočenja
$P_{EM}$	W	snaga koja se razvija na elektromotoru
$P_{EM,mot}$	W	maksimalna snaga elektromotora u motorskom režimu
$P_{EM,gen}$	W	maksimalna snaga elektromotora u generatorskom režimu
$P_{CR}$	W	snaga dostupna za funkcionalnost sporohodne vožnje
$P_{reg}$	W	snaga dostupna za funkcionalnost regenerativnog kočenja
$P_{SA}$	W	snaga dostupna za funkcionalnost aktivnog krstarenja
$p_B$	Pa	potreban tlak kočenja
$p_{B,mod}$	Pa	modificirani tlak kočenja

---

$r$	m	radijus trenja na površini diska
$SoC$	%	stanje napunjenosti baterije (engl. State of Charge)
$SoC_{final}$	%	krajnja vrijednost stanja napunjenosti baterije
$SoC_{initial}$	%	početna vrijednost stanja napunjenosti baterije
$SS_{cockpit}$	-	stanje rada automobila dobiveno iz kokpita (uključen ili isključen automobil)
$SS_{ICE}$	-	stanje rada SUI motora
$T_{ICE}$	°C	trenutna temperatura SUI motora
$T_{minICE}$	°C	minimalna temperatura SUI motora za Start-stop funkcionalnost
$t$	s	proteklo vrijeme od početka vožnje (simulacije)
$t_c$	s	vrijeme trajanja voznog ciklusa
$t_{firststart}$	s	vrijeme potrebno da ulje prođe kroz cijeli sustav pri prvom startu SUI motora
$t_{react}$	s	minimalno vrijeme rada motora prije idućeg gašenja
$t_{shutoff}$	s	vremenski interval kojim se odlučuje radi li se o startu hladnog ili zagrijanog SUI motora
$V_f$	l/100km	potrošnja goriva
$V_{f,corr}$	l/100km	korigirana potrošnja goriva
$V_{f,corr,HIB}$	l/100km	korigirana potrošnja goriva hibridnog vozila
$V_{f,KON}$	l/100km	potrošnja goriva konvencionalnog vozila
$v$	km/h	trenutna brzina vozila
$v_0$	km/h	početna brzina ulaska u pasivno električno krstarenje
$v_{maxCR}$	km/h	maksimalna dopuštena brzina vozila u funkcionalnosti sporohodne električne vožnje
$v_{maxCO}$	km/h	maksimalna dopuštena brzina vozila u funkcionalnosti pasivnog električnog krstarenja
$v_{maxSA}$	km/h	maksimalna dopuštena brzina vozila u funkcionalnosti aktivnog električnog krstarenja
$v_{maxSS}$	km/h	maksimalna dopuštena brzina vozila u Start-stop funkcionalnosti
$v_{minSA}$	km/h	minimalna dopuštena brzina vozila u funkcionalnosti aktivnog električnog krstarenja

---

$v_{minCO}$	km/h	minimalna dopuštena brzina vozila u funkcionalnosti pasivnog električnog krstarenja
$v_{reg}$	km/h	minimalna dopuštena brzina vozila pri regenerativnom kočenju
$\alpha$	-	pozicija pedale akceleratora
$\alpha_{REF}$	-	referentna pozicija pedale akceleratora
$\beta$	-	pozicija pedale kočnice
$\Delta SoC$	%	razlika konačnog i početnog SoC-a baterije
$\Delta t_{KCO}$	s	vremenska zadržka za prelazak iz konvencionalne vožnje u funkcionalnost pasivnog električnog krstarenja
$\Delta t_{KCR}$	s	vremenska zadržka za prelazak iz konvencionalne vožnje u funkcionalnost sporohodne električne vožnje
$\Delta t_{KSA}$	s	vremenska zadržka za prelazak iz konvencionalne vožnje u funkcionalnost aktivnog električnog krstarenja
$\Delta t_{RCO}$	s	vremenska zadržka za prelazak iz regenerativnog kočenja u funkcionalnost pasivnog električnog krstarenja
$\Delta t_{start}$	s	proteklo vrijeme od zadnjeg uključivanja SUI motora
$\Delta t_{stopswitch}$	s	proteklo vrijeme od zadnje aktivacije rada vozila
$\Delta V_f$	l/100km	razlika korigirane i stvarne potrošnje goriva
$\Delta v$	km/h	razlika trenutne brzine i brzine iz prošlog vremenskog intervala
$\Delta v_{REF}$	km/h	referentna razlika trenutne brzine i brzine iz prošlog vremenskog intervala za ulazak u funkcionalnost aktivnog električnog krstarenja
$\delta$	-	koeficijent ublažavanja momenta elektromotora
$\eta_B$	-	koeficijent korisnosti kočnica
$\kappa$	-	koeficijent adaptivnog pasivnog električnog krstarenja
$\mu_p$	-	koeficijent trenja između diska i pločice
$\Sigma E$	s	vrijeme koje je vozilo provelo izvan dopuštenih granica devijacije brzine na voznom ciklusu
$\tau_{alt}$	Nm	moment alternatora
$\tau_{B,des}$	Nm	željeni ukupni moment kočenja
$\tau_{B,mod}$	Nm	modificirani potrebni moment kočenja

---

$\tau_{des}$	Nm	željeni iznos momenta
$\tau_{EM,gen}$	Nm	maksimalni moment elektromotora u generatorskom načinu rada
$\tau_{EM,mot}$	Nm	maksimalni moment elektromotora u motornom načinu rada
$\tau_{eB}$	Nm	dostupan moment kočenja elektromotora sveden na kotače
$\tau_{fl}$	Nm	moment SUI motora pod punim opterećenjem
$\tau_{LST}$	Nm	željeni iznos momenta u ovisnosti o signali papučice akceleratora i brzine vrtnje SUI motora
$\tau_{motoring}$	Nm	kočni moment SUI motora (engl. motoring torque)
$\tau_{EM}$	Nm	moment elektromotora
$\omega_{DCT,in}$	rad/s	brzina vrtnje ulaznog vratila transmisije
$\omega_{EM}$	rad/s	brzina vrtnje elektromotora

---

**POPIS KRATICA**

CO	funkcionalnost pasivnog električnog krstarenja
CR	funkcionalnost sporohodne električne vožnje
DCT	automatska transmisija s dvostrukom spojkom
EM	elektromotor
FHEV	potpuno hibridno električno vozilo
e-CVT	električna kontinuirano varijabilna transmisija
HWFET	vozni ciklus (engl. Highway Fuel Economy Cycle Test)
ICE	motor s unutarnjim izgaranjem (engl. Internal Combustion Engine)
KON	konvencionalna vožnja
M/G	motor/generator, elektromotor
MHEV	umjereno-hibridno električno vozilo
mHEV	mikro-hibridno električno vozilo
MSUI, SUI	motor s unutarnjim izgaranjem
motor	
NEDC	vozni ciklus (engl. New European Driving Cycle)
PI regulator	regulator s proporcionalnim i integralnim djelovanjem
REG	funkcionalnost regenerativnog kočenja
UDDS	vozni ciklus (engl. Urban Dynamometer Driving Schedule)
WLTP	vozni ciklus (engl. Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure)

---

## SAŽETAK

U današnje vrijeme dolazi do sve veće svijesti očuvanju okoliša. Često je na udaru automobilska industrija jer se smatra jednim od najvećih zagađivača okoliša. Iz tih se razloga energetske sustavi sve više okreću prema obnovljivim izvorima energije a transport prema elektrifikaciji putem hibridnih i električnih vozila. Iako je većina komponenti koja sačinjava hibridni električni pogon vozila već odavno poznata te njihov razvoj dolazi do vrhunca, nije još točno određen i definiran pravac najboljeg i najefikasnijeg upravljanja hibridnim pogonima, posebno onima kod kojih je električni motor relativno male snage (tzv. umjerena hibridna vozila). Pod pojmom upravljanja u ovom kontekstu smatra se pojam nadređene strategije upravljanja koji se bavi time kako najbolje iskoristiti komponente hibridnog sustava u svrhu smanjenje potrošnje goriva. Iz tog razloga u ovom radu se obrađuje jedan od mogućih načina upravljanja umjerenim hibridnim električnim vozilom paralelne P2 konfiguracije. Razvija se strategija temeljena na bazi pravila (engl. rule-based), koja ovisno o zadanim pravilima definira stanje i parametre rada zadanih komponenti. Unutar upravljačke strategije definiraju se takozvane funkcionalnosti hibridnog vozila prema prethodno spomenutoj bazi pravila. Funkcionalnosti koje se razmatraju jesu: sporohodna električna vožnja, pasivno i aktivno električno krstarenje te regenerativno kočenje. Razvijena upravljačka strategija implementira se i ispituje unutar simulacijskog paketa AVL CRUISE, pri čemu je kod simulacijskog ispitivanja naglasak na analizi smanjenja potrošnje goriva te utjecaja voznost na vozila.

Ključne riječi: umjereno hibridno električno vozilo, P2 konfiguracija, upravljanje, simulacija, AVL CRUISE



## **SUMMARY**

In recent years, environmental awareness is growing. Automotive industry is often hit by criticism as it is considered as one of the largest environmental polluters. For these reasons energy systems are increasingly turning towards renewable energy sources, and transport systems towards electrification through hybrid and electric vehicles. Although most of the components which constitute the hybrid system have long been known and their development is at its climax, the best and most efficient control strategy design for such systems has not yet been defined and determined, especially for those with relatively low power electric motors (so-called mild hybrid electric vehicles). Here, the control strategy term refers to high-level control strategy for hybrid powertrain, which combines the hybrid system components with the aim of reducing the fuel consumption. For this reason, this paper deals with one of the possible approaches of high-level control strategy development for mild hybrid electric vehicle in P2 configuration. A rule-based control strategy is developed, which, depending on the given rules, defines the operation mode and parameters of the hybrid powertrain components. Within the control strategy, the so-called hybrid vehicle functionalities are defined according to the previously mentioned rule base. The functionalities to be considered are: eCreep, eCoasting, eSailing and regenerative braking. The developed control strategy is implemented and verified within the simulation package AVL CRUISE, whereby simulation testing focuses on analysis of fuel consumption reduction and the driveability of the vehicle.

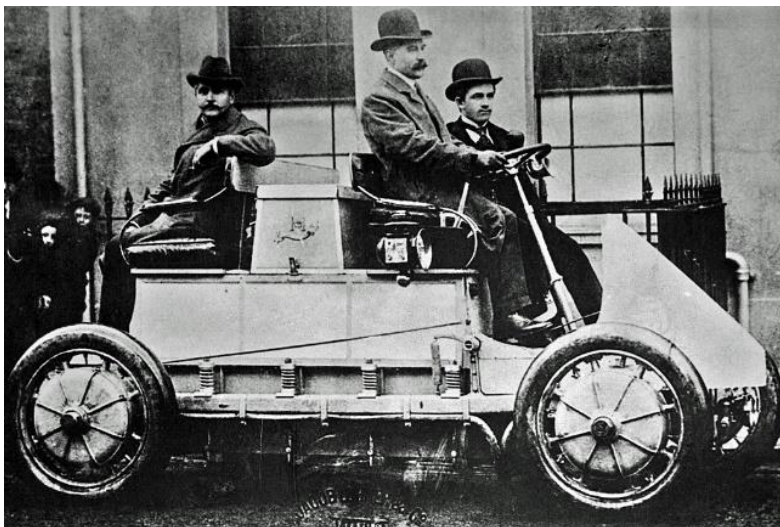
Key words: mild hybrid electric vehicle, P2 configuration, control, simulation, AVL CRUISE

# 1. UVOD

## 1.1. Osnovni pojmovi i povijest hibridnih vozila

Izraz hibrid (lat. hybrida; engl. hybrid) je riječ koja izvorno označava potomstvo dvije životinje ili biljke različitih rasa, pasmina, sorti, vrsta ili rodova u svrhu manipuliranja genima te se pojavila u kasnom 16. stoljeću [1]. No u novije doba taj izraz poprima dosta drugačije značenje. U tehničkom smislu najčešće označava stroj koji je pogonjen uglavnom pomoću dva, a moguće i više izvora snage unutar svojeg pogonskog lanca. Najčešći strojarski tehnički sustavi koji se hibridiziraju su vozila. Prema načinu hibridizacije hibridna vozila se mogu ugrubo podijeliti u tri glavne skupine. Prvu i najrašireniju skupinu čine hibridna električna vozila (HEV) kod kojih se pogonski sustav sastoji od motora s unutarnjim izgaranjem (MSUI, SUI motor; engl. ICE, Internal Combustion Engine) pogonjen dizelskim ili benzinskim gorivom te elektromotora (EM) pogonjenog baterijskim paketom ili ultrakondenzatorom. Sljedeća vrsta hibridnih vozila su hibridna hidraulična vozila u kojima je dodatni spremnik energije hidraulički akumulator. Treću skupinu hibridnih vozila čine takozvani mehanički hibridi, koji koriste zamašnjak za akumulaciju kinetičke energije. Podjela hibridnih električnih vozila se može izvršiti: prema stupnju hibridizacije [2] i prema vrsti pogonske konfiguracije [3]. Prvo je potrebno razjasniti podjelu hibridnih električnih vozila prema stupnju hibridizacije [2] da bi se dobio osjećaj o karakteristikama, mogućnostima i ograničenjima korištenog umjerenog hibridnog električnog vozila. Prema ovoj podjeli, hibridna vozila se mogu svrstati u nekoliko kategorija: mikro-hibridna električna vozila (mHEV), umjerenohibridna električna vozila (MHEV), potpuno hibridna električna vozila (FHEV) te utična hibridna električna vozila (PHEV) [4]. Mikro-hibridna električna vozila je naziv dan vozilima koja koriste start-stop sustav za gašenje SUI motora dok se on nalazi na brzini praznog hoda i dok se vozilo ne kreće. Umjerenohibridna vozila su uglavnom uobičajena vozila sa određenom razinom elektrifikacije pogonskog sustava, ali s limitiranim funkcijama hibrida. Tipično su u njima implementirane takozvane funkcionalnosti kao što su sporohodna električna vožnja, aktivno i pasivno električno krstarenje te regenerativno kočenje. Uobičajeno ne mogu pružiti isključivo električni pogon u svim režimima vožnje, primjerice pri naglim ubrzanjima. Potpuno-hibridna vozila su vozila koja mogu biti pogonjena samo SUI motorom, samo elektromotorom ili njihovom kombinacijom. Samim time ona pružaju velik broj načina upravljanja koji mogu dovesti do velikih ušteda energije i smanjenja emisija stakleničkih plinova. Utična hibridna vozila imaju gotovo identične karakteristike kao i FHEV, uz razliku što su njihove baterije punjive iz elektroenergetske mreže.

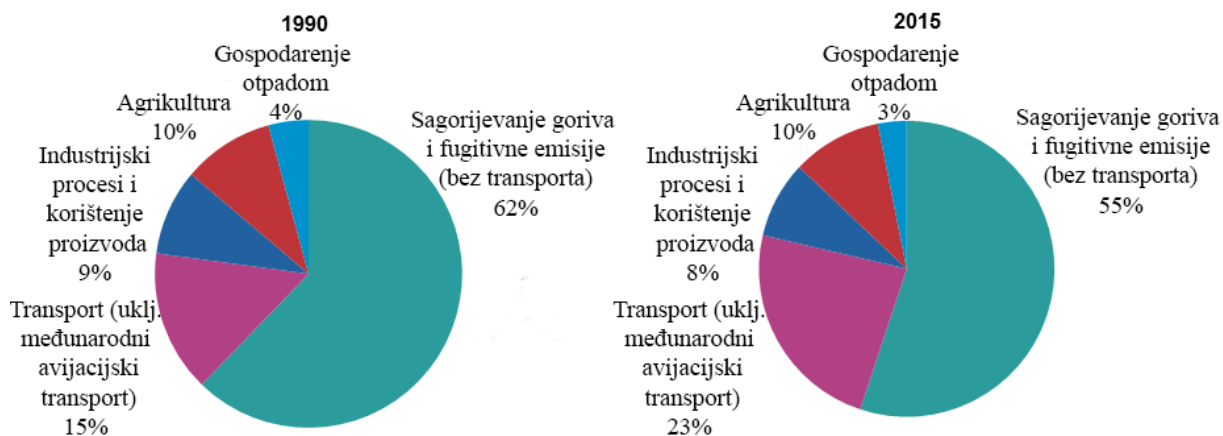
Hibridna električna vozila se prvi puta spominju 1889. godine kada je William H. Patton podnio patent za benzinsko-električni hibridni pogon željezničkog vozila. No tek nakon deset godina izrađen je Lohner-Porsche Mixte Hybrid [Slika 1.1.], prvi električni hibridni automobil [5]. Njegov pogonski sustav sastojao se od dva ili četiri elektromotora unutar glavčine kotača koji su se pogonili olovnim baterijama i benzinskim motorom koji je pogonio električni generator. Budući da su elektromotori i baterijski paket bili vrlo teški te komponente samog vozila skupe, odustalo se od razvoja za masovnu proizvodnju te se počela usavršavati tehnologija SUI motora. Time je razvoj hibridnih električnih automobila odgođen za narednih stotinu godina, kad su obznanjeni prvi znanstveno i tehnološko značajniji koncepti hibridnih električnih vozila.



**Slika 1.1. Lohner-Porsche Mixte Hybrid**

## 1.2. Motivacija

Motivacija za razvoj hibridnih vozila u novije vrijeme bila je u činjenici da je zagrijavanje Zemljine atmosfere u konstantnom porastu kroz posljednje stoljeće. Smatra se da su vozila, posredno kroz izgaranje fosilnih goriva i njihovu pretvorbu u stakleničke plinove (vodena para, ugljikov dioksid, metan, dušikov oksid i ozon), jedna od glavnih krivaca za zagrijavanje Zemljine atmosfere. To mišljenje je djelomično točno jer udio vozila, odnosno transporta, u proizvodnji stakleničkih plinova iznosi otprilike jednu četvrtinu ukupno proizvedenih stakleničkih plinova [6]. No, kako se iz [Slike 1.2.] može zaključiti, udio emisija stakleničkih plinova transportnih uređaja u ukupnim emisijama stakleničkih plinova u Europi je u porastu kroz proteklih dvadesetak godina.



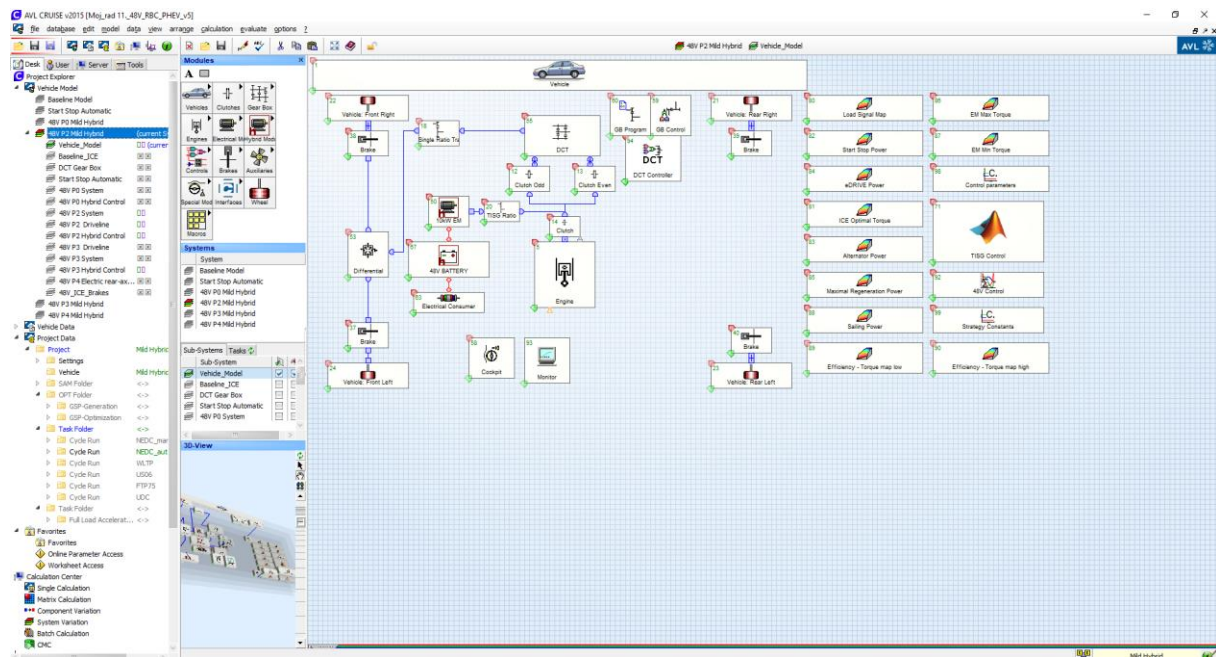
**Slika 1.2. Eurostat izvješće o proizvodnji stakleničkih plinova 1990. i 2015. po sektorima**

Također, poznato je da je preostala količina nafte geološki ograničena tako da bi se postupno trebalo započeti s prelaskom na alternativne i obnovljive izvore energije. Svi ti čimbenici ukazuju da je pogon na isključivo naftne derivate neodrživ te se hibridna vozila i općenito elektrifikacija nameće kao trenutno najbolji smjer razvoja pogona vozila. Ultimativno rješenje pogona isključivo na električnu struju je trenutno povezano s poteškoćama povezanim s ograničenim dometom [7], visokom cijenom vezanom uz cijenu baterija, te značajnim vremenom punjenja baterijskih paketa [8]. Osim navedenih razloga za uvođenje električnih vozila, postoji i globalna ideja o povezivanju elektroenergetskog i transportnog sustava, gdje električna vozila igraju ulogu prostorno raspodijeljenih skladišta električne energije za potrebe balansiranja opterećenja mreže, besprekidno napajanje lokalne mreže i sl.

### 1.3. Simulacijsko okruženje

Budući da je naglasak ovog rada na izradi upravljačkog algoritma hibridnog električnog vozila, u svrhu olakšanja modeliranja pogona vozila te povećanja modularnosti i preglednosti koristit će se namjensko simulacijsko okruženje AVL CRUISE u koje će se implementirati upravljački algoritam pomoću C prevoditelja. AVL CRUISE je proizvod tvrtke AVL GmbH (njem. Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List; hrv. Institut za motore s unutarnjim izgaranjem List), austrijske tvrtke za razvoj pogonskih sustava, softvera za simulacije različitih automobilskih sustava te razvoj opreme mjernih stanica [9]. AVL CRUISE je simulacijski paket koji podržava standardne analize pogonskog sklopa kroz sve faze razvoja, od planiranja koncepta do lansiranja proizvoda. Program se najčešće koristi kod razvoja motora i pogonskih sustava kako bi se optimirali sustavi osobnih vozila, autobusa te kamiona. Na [Slici 1.3.] je prikazano grafičko sučelje AVL CRUISE unutar kojega se razmještanjem i povezivanjem komponenti

gradi model vozila, u ovom slučaju umjereno hibridnog električnog vozila paralelne P2 konfiguracije.



**Slika 1.3.** AVL CRUISE okruženje na primjeru modela umjerenog hibridnog električnog vozila P2 konfiguracije

#### 1.4. Organizacija rada

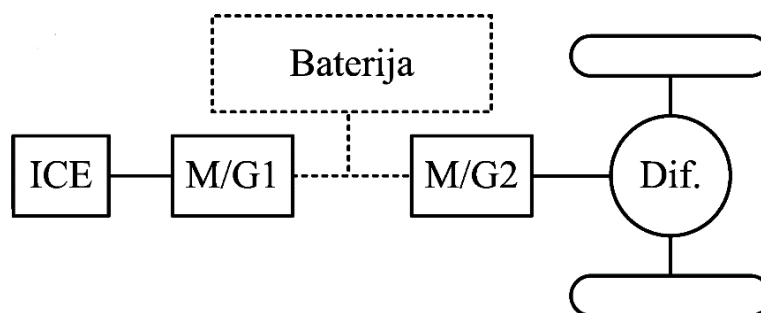
U drugom poglavlju će biti dana klasifikacija hibridnih vozila te će se detaljnije pojasniti prednosti i nedostaci umjerenih hibrida te njihove paralelne P2 konfiguracije. U trećem poglavlju bit će opisan model umjerenog hibridnog sustava pomoću kojeg će se provesti simulacije hibridnog vozila. U četvrtom poglavlju bit će detaljno prikazana razvijena nadređena strategija upravljanja koja uključuje funkcionalnosti sporohodne električne vožnje, pasivnog i aktivnog električnog krstarenja te regenerativnog kočenja. U petom poglavlju bit će dani simulacijski rezultati usporedbe konvencionalnog i hibridnog vozila s implementiranom strategijom napisanom u C kôdu unutar simulacijskog okruženja AVL CRUISE. Naglasak analize bit će na značajkama odziva pogonskog sustava hibridnog električnog vozila i prije svega smanjenje potrošnje goriva u odnosu na konvencionalno vozilo. Funkcioniranje upravljačke strategije s naglaskom na aktiviranje hibridnih funkcionalnosti će biti prikazani na NEDC ciklusu, dok će usporedna analiza potrošnje goriva biti provedena na ciklusima: NEDC, modificirani NEDC (razvijen za slučaj ispitivanja funkcionalnosti pasivnog krstarenja), WLTP, HWFET i UDDS. Naposljetku će iz svega toga biti izvedene zaključne napomene te opisani pravci mogućeg daljnjeg rada na ovom području.

## 2. KONFIGURACIJE HIBRIDNOG VOZILA

Iz veza mehaničkog i električnog dijela hibridnog pogonskog sustava možemo razlikovati tri temeljne konfiguracije: serijska, serijsko-paralelna i paralelna [3].

### 2.1. Serijska konfiguracija

Serijska konfiguracija [Slika 2.2] je najjednostavnija konfiguracija pogona hibridnog vozila. Ona se sastoji od SUI motora (ICE) koji je spojen mehanički s generatorom (M/G1) koji puni bateriju. Drugi elektromotor (M/G2) je mehanički spojen s kotačima i pogoni vozilo.



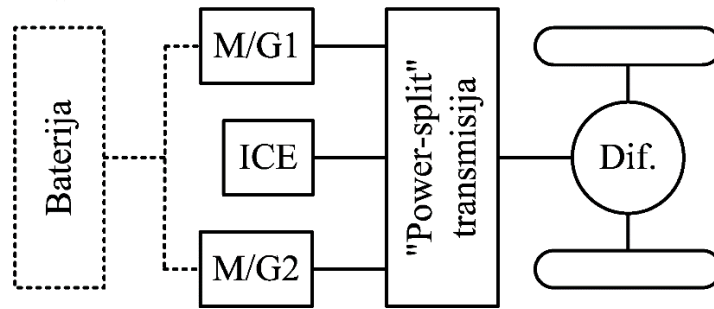
Slika 2.1. Serijska konfiguracija hibridnog pogona [4]

Prednost ove konfiguracije jest što je MSUI potpuno odvojen od ostatka pogona što mu omogućuje rad u optimalnom području najbolje specifične potrošnje goriva pomoću regulacije brzine generatora (M/G1). Također prednost ove konfiguracije jest što elektromotor (M/G2) ne zahtjeva pogonsku redukciju brzine za ostvarivanje momenta pri malim brzinama. Nadalje prednost ovakvog pogona jest jednostavno upravljanje, jer se upravljanje svodi samo na upravljanje elektromotorima (M/G1 i M/G2). Najveći nedostatak ove konfiguracije je taj što ostvaruje dvostruku pretvorbu energije odnosno kemijska energija iz goriva se pretvara u električnu energiju, koja se dalje pretvara u mehaničku energiju potrebnu za pogon vozila. Tim konverzijama se ostvaruju veliki gubici energije. Također jedan od nedostataka jest veličina pogona i visoka cijena. Serijska konfiguracija hibridnih vozila koristi se uglavnom za teška komercijalna vozila, lokomotive, vojna vozila i autobuse [4].

### 2.2. Serijsko – paralelna konfiguracija

Serijsko – paralelna konfiguracija od svih nabrojanih ima najkompliciraniju strukturu. Sastoji se od MSUI, generatora (M/G1) i pogonskog elektromotora (M/G2) spojenih preko djelatitelja snage (engl. power-split transmission) koji je zapravo planetarni prijenosnik.





**Slika 2.2. Serijsko – paralelna konfiguracija hibridnog pogona [4]**

Najveća prednost je ta što se kinematikom planetarnog prijenosnika i regulacijom brzine vrtnje elektromotora (M/G1 i M/G2) ostvaruje tzv. e-CVT odnosno električna kontinuirana varijabilna transmisija. To znači da se radne točke pogona mogu, preko namještanja brzine vrtnje elektromotora, postaviti na kontinuiran način odnosno postoji beskonačno mnogo prijenosnih omjera koje pogon može ostvariti, za razliku od konvencionalne transmisije koja ostvaruje diskretan stupanj prijenosa. Time se omogućuje postavljanje optimalne brzine vrtnje SUI motora. Zbog komplicirane strukture i velikog broja stupnjeva slobode upravljanja, serijsko – paralelna konfiguracija zahtjeva vrlo složeno upravljanje. Upravo je kompleksnost sustava upravljanja najveći nedostatak ovakve konfiguracije. Najpoznatije hibridno vozilo koje koristi serijsko - paralelnu konfiguraciju, a možda i najpoznatije hibridno vozilo jest Toyota Prius [Slika 2.4.].

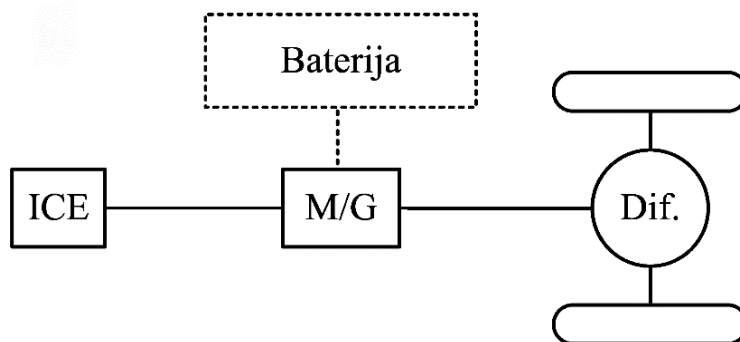


**Slika 2.3. Toyota Prius [10]**

### 2.3. Paralelna konfiguracija

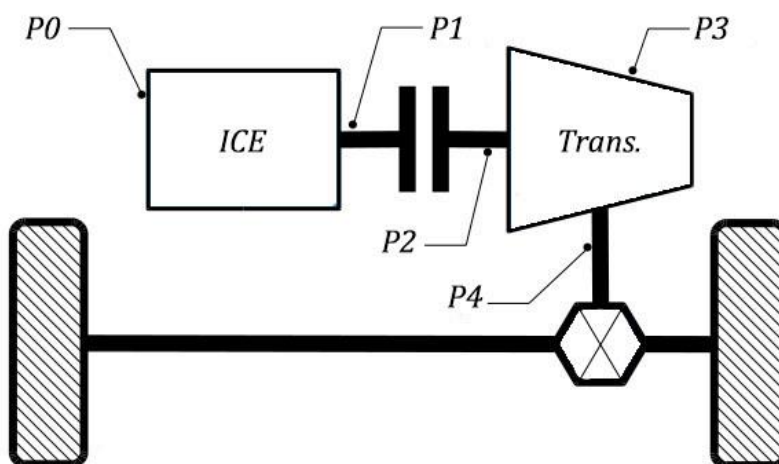
Unutar paralelne konfiguracije [Slika 2.5.] postoje MSUI i elektromotor (M/G) koji mogu odvojeno ili skupno pogoniti vozilo. Budući da se momenti oba pogona moraju na neki način zbrajati, to je moguće izvući pomoću lančanog i remenskog prijenosa, nekakve vrste

zupčaničkog prijenosa, ili rotor elektromotora može biti montiran direktno na zajedničko vratilo.



**Slika 2.4. Paralelna konfiguracija hibridnog pogona [4]**

Prednost ove konfiguracije je u tome što se izbjegava višestruka pretvorba energije te samim time paralelna konfiguracija ima veću iskoristivost i potreban je samo jedan elektromotor čime se smanjuje kompleksnost konstrukcije i cijena. Glavni nedostatak je što su elektromotor i MSUI fizički čvrsto povezani unutar pogonskog sustava, zbog čega nije moguće postaviti SUI motor da radi u optimalnom radnom području kao u dvije prethodno spomenute konfiguracije. Način upravljanja u ovoj konfiguraciji znatno teži budući da se još mora ukomponirati automatska transmisija zbog veće učinkovitosti i šireg raspona momenta SUI motora. Paralelna konfiguracija se dalje može dijeliti na arhitekture: P0, P1, P2, P3 i P4, ovisno o smještaju elektromotora u pogonskom sustavu [Slika 2.6.].

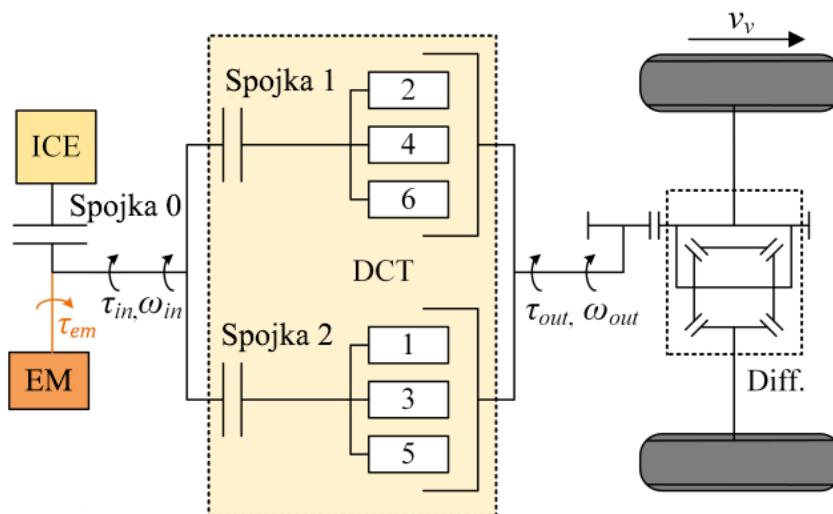


**Slika 2.5. Arhitekture paralelne konfiguracije**

Budući da je potrebno razviti upravljačku strategiju za paralelnu P2 konfiguraciju, samo će se ona pobliže objasniti. P2 konfiguracija [Slika 2.7.] sadrži motor s unutarnjih izgaranjem (ICE) i elektromotor (EM). Zbog prethodno navedenih nedostataka paralelne konfiguracije, potrebno

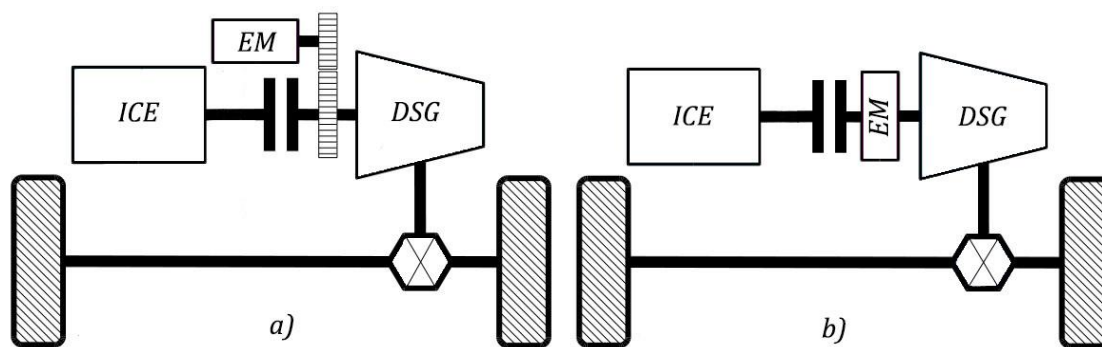


je imati neku vrstu transmisije, najčešće automatske, a u ovom slučaju će to biti automatska transmisija s dvostrukom spojkom (DCT).



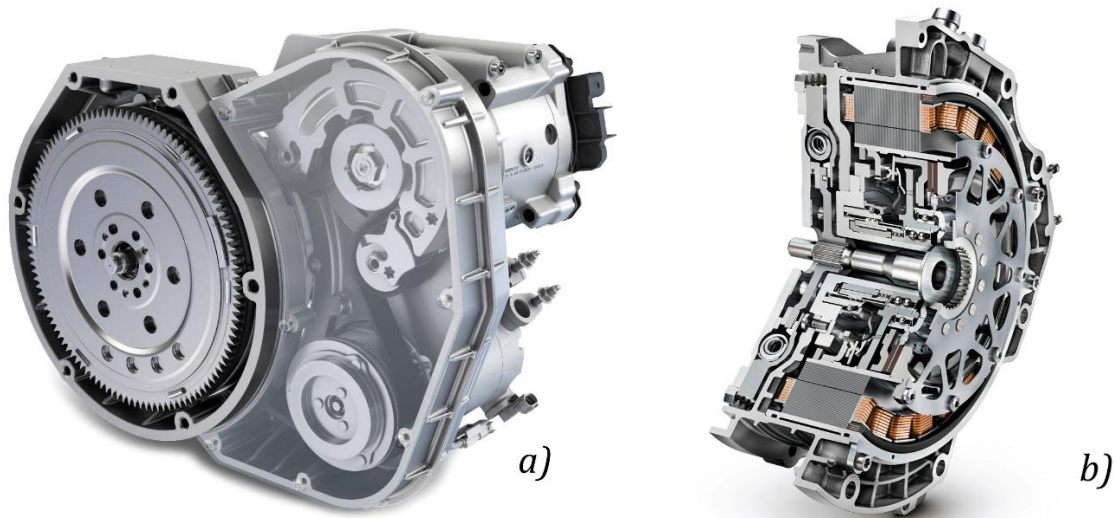
Slika 2.6. Shematski prikaz P2 konfiguracije [11]

Kao što se sa slike može vidjeti, u ovoj konfiguraciji elektromotor se nalazi između spojke SUI motora (Spojke 0) i ulaznog vratila transmisije. Moguće su dvije izvedbe, s elektromotorom vezanim preko dodatnog jedno-stupanjskog prijenosa (remenski ili zupčanički) [Slika 2.8. a)] [Slika 2.9. a)] i direktno vezanim na ulazno vratilo transmisije [Slika 2.8. b)] [Slika 2.9. b)].



Slika 2.7. Shema: a) P2 konfiguracija - s redukcijom b) P2 konfiguracija - direktno spojen EM

Korištenje dodatnog jedno-stupanjskog prijenosnika omogućava korištenje elektromotora s većom nazivnom brzinom i manjim momentom, što rezultira manjim dimenzijama elektromotora. Uglavnom se koristi remenski prijenos jer ima manju masu, a i nije potrebna potpuna sinkronost prijenosa.



**Slika 2.8. Izvedba: a) P2 konfiguracija - s redukcijom [14] b) P2 konfiguracija - direktno spojen EM [15]**

Režimi rada koje ova konfiguracija omogućava su vožnja sa samo MSUI tzv. konvencionalna vožnja, vožnja u čisto električnom režimu tj. funkcionalnosti sporohodne električne vožnje i aktivnog električnog krstarenja, regenerativno kočenje, te hibridni režimi punjenja baterije u pokretu ili pri stajanju (engl. propelling/standstill charging), i hibridni režim gdje se kombinira pogon SUI motorom i elektromotorom. Osim navedenih, pomoću P2 konfiguracije je moguće ostvariti Start-stop funkcionalnost i pasivno električno krstarenje. Implementirane funkcionalnosti u upravljačkoj strategiji su pobliže opisane u poglavlju 4.

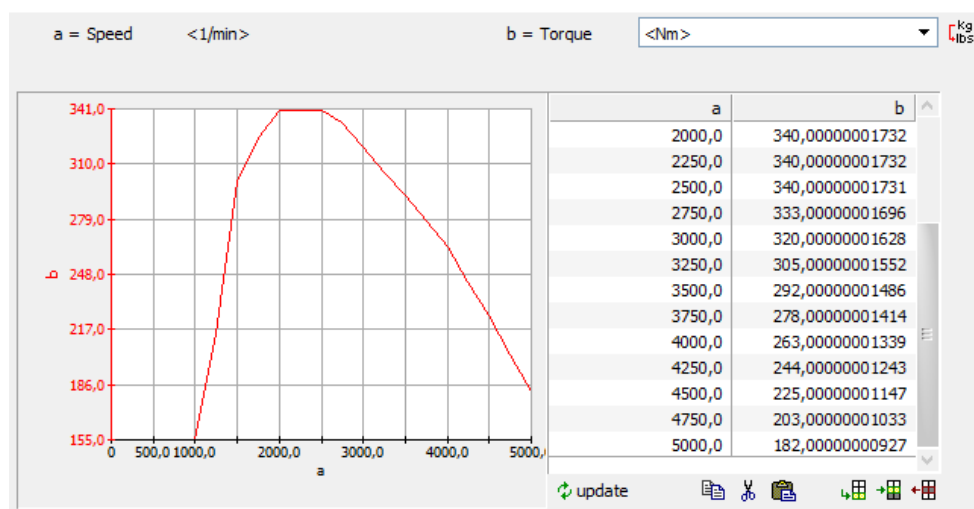
Sve navedene funkcionalnosti moguće je ostvariti samo u paralelnoj P2 konfiguraciji, što je jedna od prednosti te konfiguracije [12]. Još jedna prednost P2 konfiguracije jest u tome što ima povećanu učinkovitost u usporedbi s P0 i P1 konfiguracijom jer se pri rekuperaciji energije mogu eliminirati gubici nastali zbog momenta kočenja motora. Nedostatak ove konfiguracije u odnosu na P0 je nešto složenija izvedba jer nije moguće samo izvesti „umetni i radi“ (engl. plug-and-play) hibridnih komponenti već se cijeli pogonski sustav mora dizajnirati nanovo pa samim time raste i cijena. Još jedan nedostatak ove arhitekture je veća mogućnost rekuperacije energije u P3 i P4 konfiguraciji [12], no taj nedostatak se može nadomjestiti ako se uzme u obzir veći broj mogućih funkcionalnosti P2 konfiguracije i veći raspon načina upravljanja.

### 3. MODEL UMJERENOG HEV-a P2 KONFIGURACIJE

Kao što je već bilo spomenuto u uvodnom poglavlju, za implementaciju upravljačkih strategija koristit će se simulacijsko okruženje AVL CRUISE iz razloga što su u njemu implementirani svi potrebni matematički modeli pojedinih komponenti vozila te je potrebno samo poznavati parametre potrebne za simulaciju. Sa stanovišta upravljanja, najbitnije je poznavati mape pogonskih strojeva kao što su mape izlaznog momenta, mape učinkovitosti i mape upravljačke strategije. U nastavku će biti ukratko navedene karakteristike pogonskih komponenti P2 konfiguracije te prikazane i opisane navedene mape potrebne za nadređenu razinu upravljanja preuzete iz modela vozila. Ostali parametri modela vozila nisu ključni za upravljačku strategiju, pa niti neće ovdje biti navedeni.

#### 3.1. Motor s unutarnjim izgaranjem (MSUI)

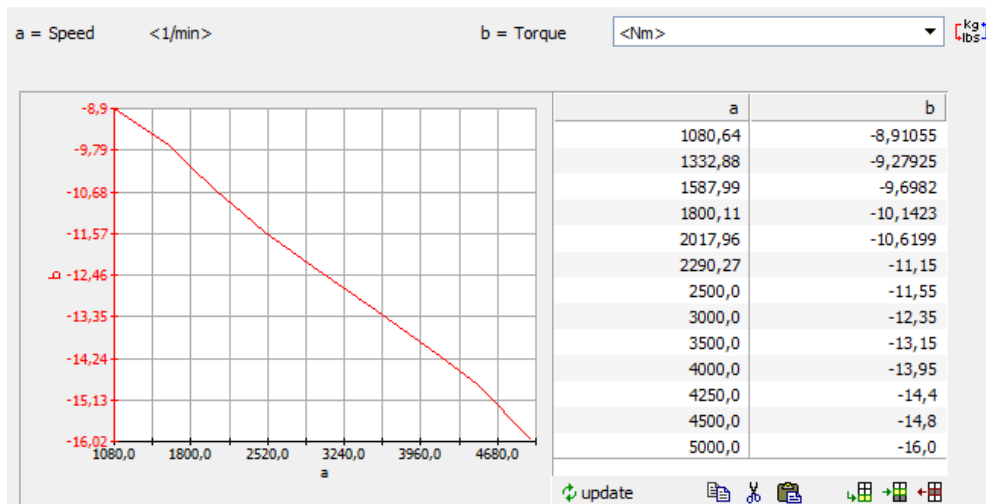
Hibridno vozilo P2 konfiguracije pogonjeno je četverotaktnim četverocilindričnim motorom s kompresijskim paljenjem, odnosno takozvanim Diesel motorom, radnog volumena 1995 cm<sup>3</sup>. Brzina vrtnje praznog hoda je 800 min<sup>-1</sup>, a maksimalna brzina vrtnje 5000 min<sup>-1</sup>. Maksimalna snaga motora je 110kW pri 4000 min<sup>-1</sup>, a maksimalni okretni moment iznosi 340 Nm pri 2500 min<sup>-1</sup>. Maksimalni moment SUI motora ( $\tau_{fl}$ ) [Slika 3.1.] (varijabla b) dan je u ovisnosti o brzini vrtnje motora (varijabla a).



Slika 3.1. Krivulja maksimalnog momenta SUI motora kao funkcija brzine vrtnje motora

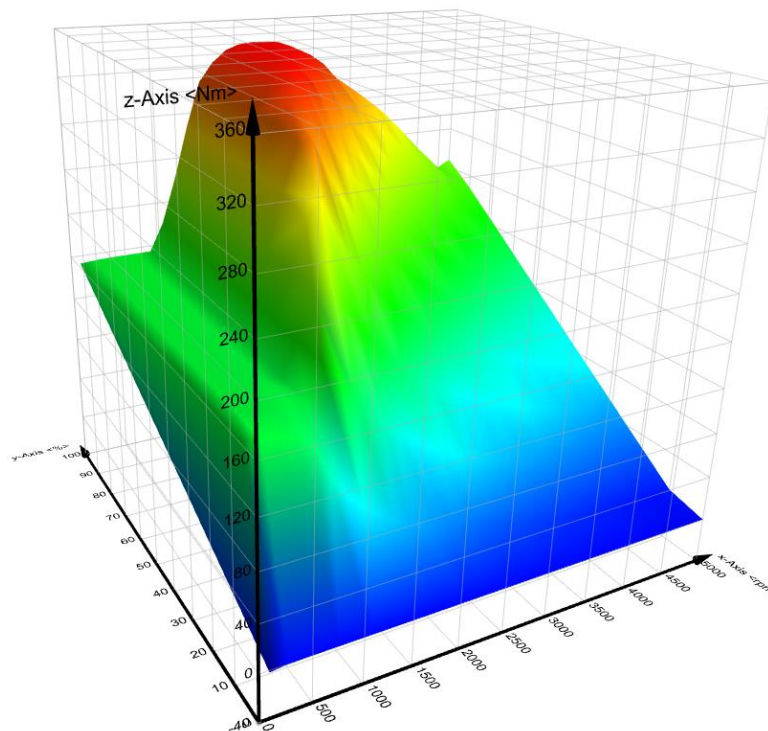
Također je potrebno poznavati i karakteristiku kočnog momenta (engl. motoring torque) SUI motora iz razloga što nam je iznos tog momenta potreban kasnije u poglavlju 4 za izradu funkcionalnosti pasivnog električnog krstarenja. Mapa kočnog momenta ( $\tau_{motoring}$ ) [Slika 3.2.]

motora je također dana u modelu vozila te je i moment (varijabla b) izražena u ovisnosti o brzini vrtnje motora (varijabla a).



**Slika 3.2. Kočni moment motora u funkciji brzine vrtnje motora**

Nadalje, budući da je upravljački signal prema bloku motora modela postavljen na željeni moment, a ne na signal papučice akceleratora, evaluacija izlaznog momenta motora je postavljena na drugačiji način [13].



**Slika 3.3. Željeni iznos momenta u ovisnosti o brzini vrtnje SUI motora i signalu papučice akceleratora**

U danom modelu vozila, varijabla po kojoj će se upravljati SUI motor jest ulazni željeni moment ( $\tau_{des}$ ) iz razloga što će taj isti upravljački signal momenta biti potreban pri izradi većine ostalih funkcionalnosti. Željeni moment ( $\tau_{LST}$ ) se dobiva iz pozicije pedale akceleratora i brzine vrtnje MSUI, te je ta ovisnost implementirana u formi mape [Slika 3.3.]:

$$\tau_{LST} = f(\alpha, n_{ICE}) \quad (3.2)$$

Kako se može zaključiti s prethodne slike, u danoj mapi nije sadržan negativni moment, odnosno kočni moment SUI motora. Budući da se moment SUI motora postavlja direktno na vrijednost ulazne varijable željenog momenta uz limitiranje maksimalnog i minimalnog momenta [13], u tu ulaznu varijablu moramo dodati i moment kočenja.

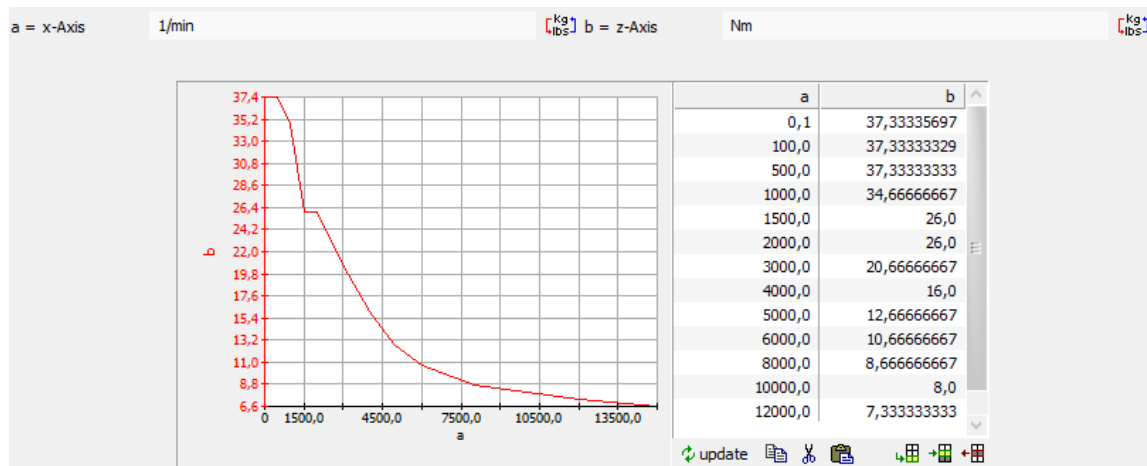
Slijedi, moment motora postavljen preko ulazne varijable željenog momenta moramo postaviti na sljedeći način:

$$\tau_{des} = \tau_{motoring} + \tau_{LST} - \tau_{motoring} * \alpha \quad (3.3)$$

U slučaju da ovako postavljen moment bude veći od maksimalnog momenta ( $\tau_{fl}$ ) on će se limitirati na tu vrijednost, ili u slučaju da bude manji od kočnog momenta SUI motora ( $\tau_{motoring}$ ) limitirat će se na tu vrijednost.

### 3.2. Elektromotor (EM)

Sekundarni pogon vozila čini asinkroni elektromotor nazivne snage 10 kW i nazivnog napona 48V. Maksimalna brzina elektromotora je  $20000 \text{ min}^{-1}$ . Elektromotor je povezan s ostatkom pogona preko jedno-stupanjskog reduktora prijenosnog omjera  $i_{TISG} = 4$ . Iznos maksimalnog momenta u motornom načinu rada ( $\tau_{EM,mot}$ ) [Slika 3.4.] (varijabla b) dan je u funkciji brzine vrtnje elektromotora (varijabla a).

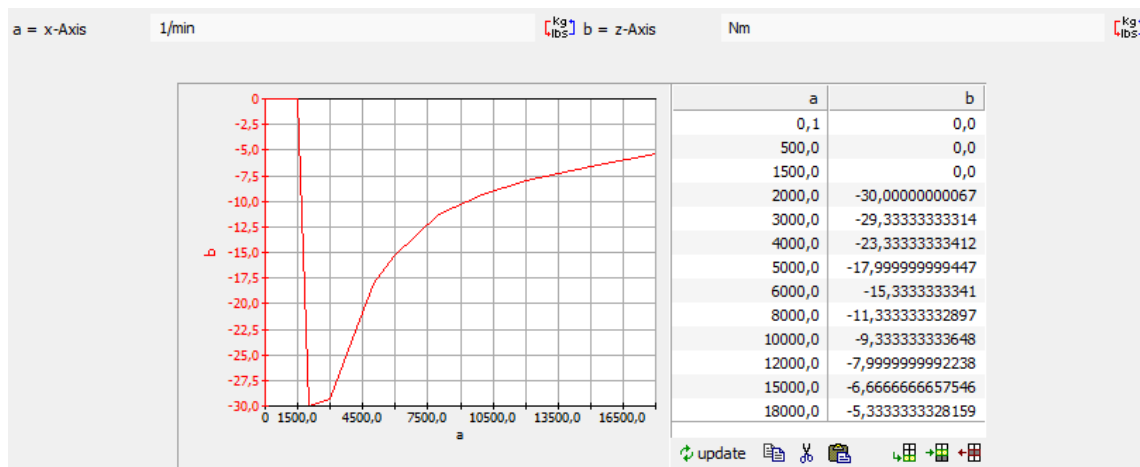


Slika 3.4. Maksimalni moment elektromotora u motornom načinu rada

Iznos maksimalne snage koja se može ostvariti u danom trenutku na elektromotoru:

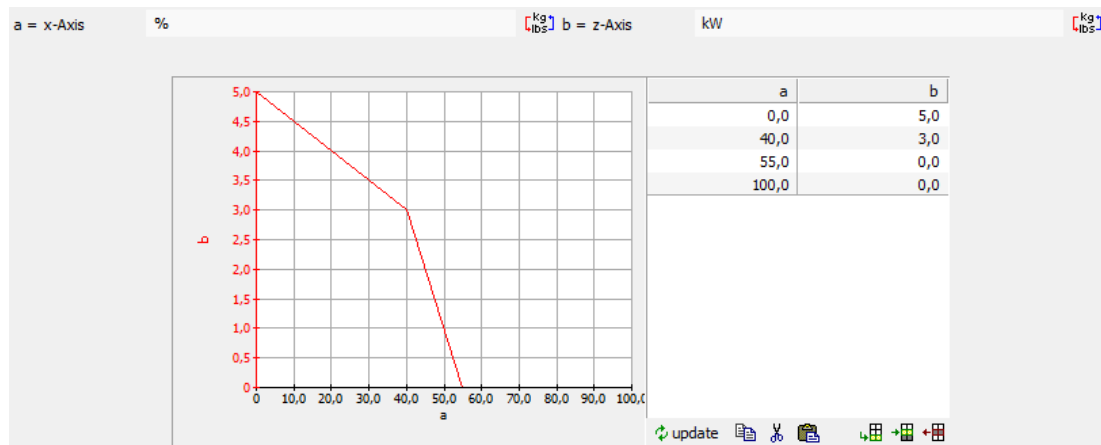
$$P_{EM,mot} = \tau_{EM,mot} \cdot \omega_{EM} \quad (3.4)$$

Iznos maksimalnog momenta u generatorskom načinu rada ( $\tau_{EM,gen}$ ) [Slika 3.5.] (varijabla b) dan je u funkciji brzine elektromotora (varijabla a).



**Slika 3.5. Maksimalni moment elektromotora u generatorskom načinu rada**

Također, u modelu vozila je dana mapa snage alternatora ( $P_{alt}$ ) [Slika 3.6.] koja na izlazu daje snagu elektromotora (varijabla b) u ovisnosti o SoC-u baterije (varijabla a). Budući da dani električni stroj može raditi u motornom i generatorskom načinu rada, nepotrebno je imati zasebni alternator.



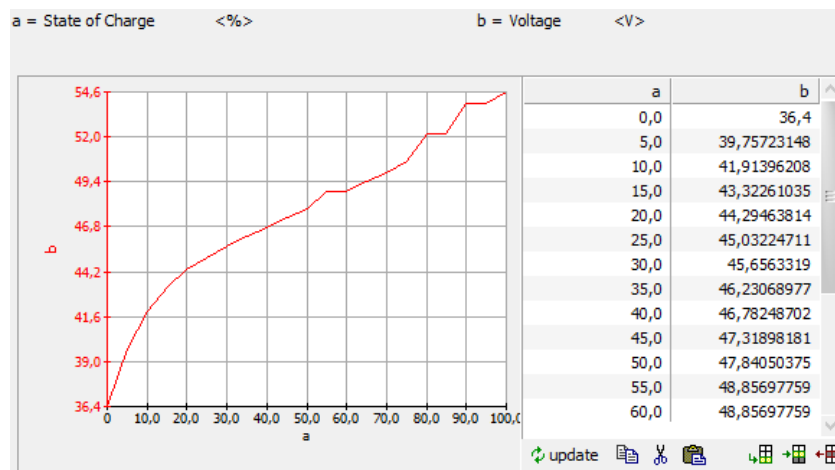
**Slika 3.6. Mapa snage alternatora**

Pri implementaciji funkcionalnosti bit će potrebno znati moment koji alternator stvara te se on može jednostavno izračunati na sljedeći način:

$$\tau_{alt} = \frac{P_{alt}}{\omega_{EM}} \quad (3.5)$$

### 3.3. Baterija

Korištena baterija je nazivnog napona 48V. Minimalni napon baterije je 37V, dok maksimalni napon iznosi 54V. Nazivni kapacitet baterije iznosi 10 Ah, odnosno 0,48 kWh. Ovisnost stanja napunjenosti baterije (engl. State of Charge, SoC) (varijabla a) o naponu (varijabla b) dana je je mapom [Slika 3.7.] u modelu vozila.



Slika 3.7. Mapa ovisnosti SoC-a o naponu

### 3.4. Transmisija i diferencijal

Oba izvora pogona vozila su preko istog vratila spojena na ulaz transmisije. Vrsta transmisije je šestero-stupanjaska automatska transmisija s dvostrukom spojkom. U modelu transmisije i spojke su zanemareni gubici. Prijenosni omjeri DCT transmisije ( $i_{DSG}$ ) dani su u [Tablici 3.2]. Prijenosni omjer diferencijala ( $i_{diff}$ ) iznosi 3,36842.

Tablica 3.1. Prijenosni omjeri DCT transmisije

Stupanj prijenosa	Broj zubi ulaza	Broj zubi izlaza	Prijenosni omjer
1	11	43	3,9091
2	19	40	2,1053
3	31	43	1,3871
4	43	44	1,0233
5	43	35	0,8140
6	46	31	0,6739

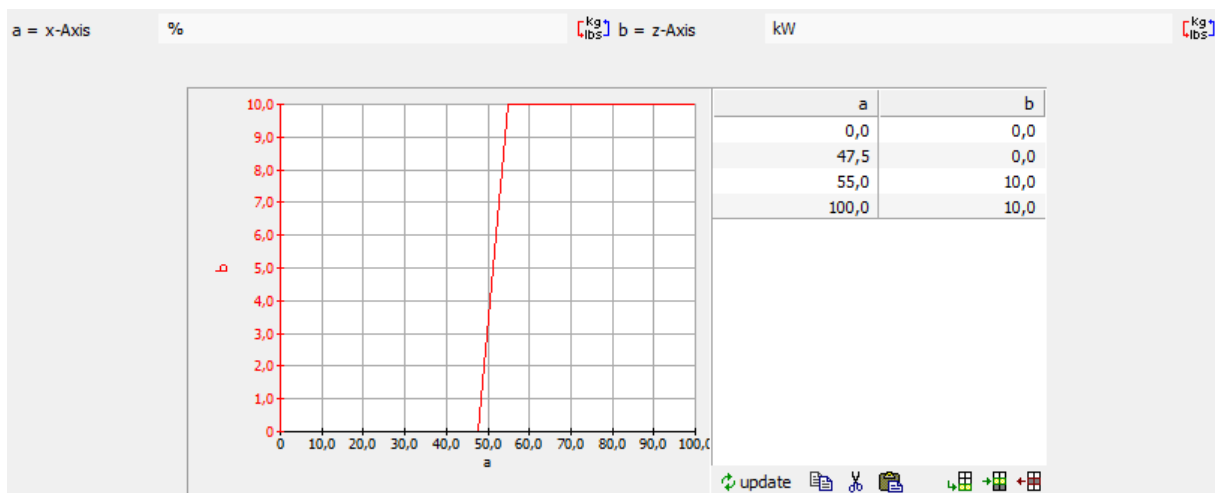
### 3.5. Mape upravljačkog sustava

Uz mape karakteristika pogonskog sustava, potrebno je opisati mape upravljačke strategije. One služe definiranju pragova uvjeta pojedine funkcionalnosti koje kasnije koristi upravljačka strategija da definira uvjete za ulazak u funkcionalnost.

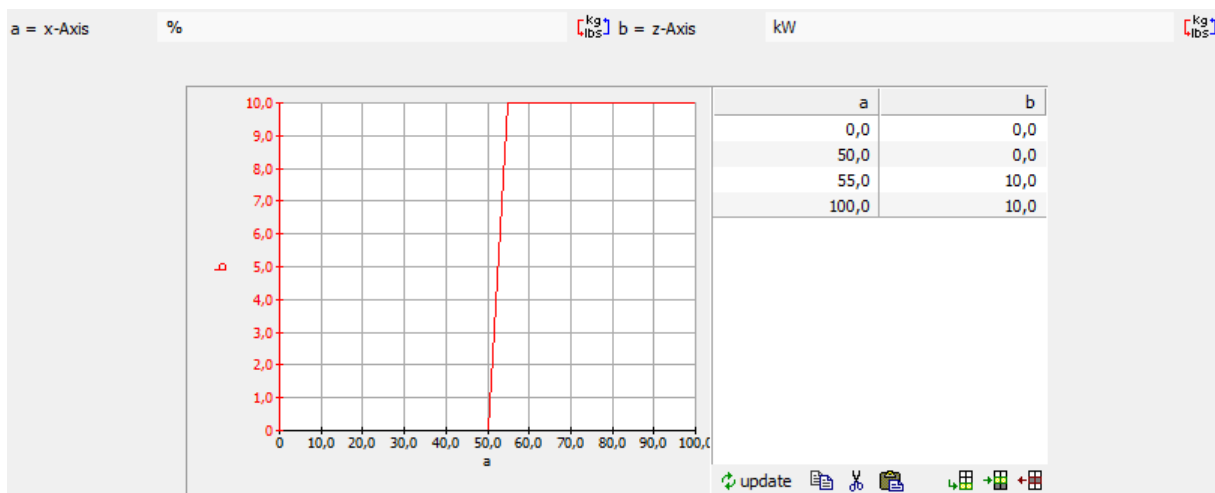


S obzirom na to da će u funkcionalnostima biti potrebno uspoređivati željenu snagu koju vozač potražuje ( $P_{des}$ ,  $P_{B,des}$ ) sa snagom koju elektromotor može isporučiti, potrebno je nazivnu snagu elektromotora limitirati sa SoC-om baterije ovisno o funkcionalnosti u kojoj se nalazimo. No, primarni razlog uvođenja ovih mapa je bio osiguranje održivosti SoC-a te ostvarivanje blažih prijelaza između pojedinih funkcionalnosti. Prednost ovakvog definiranja strategija preko mapa jest što je vrlo jednostavno izmjenjivati i podešavati parametre strategije, tj. ne mora se zalaziti u sam izvorni kôd funkcionalnosti i same strategije već se kôd može promatrati kao crna kutija koja izvršava to što mu se da kroz ulaz mape.

Prva mapa koju je potrebno opisati jest mapa raspoložive snage za funkcionalnost sporohodne električne vožnje ( $P_{CR}$ ) [Slika 3.8.]. Kao što je bilo prethodno spomenuto, to je mapa koja daje trenutno raspoloživu snagu elektromotora (varijabla b), u ovisnosti o SoC-u baterije (varijabla a).



Slika 3.8. Mapa raspoložive snage za funkcionalnost sporohodne električne vožnje



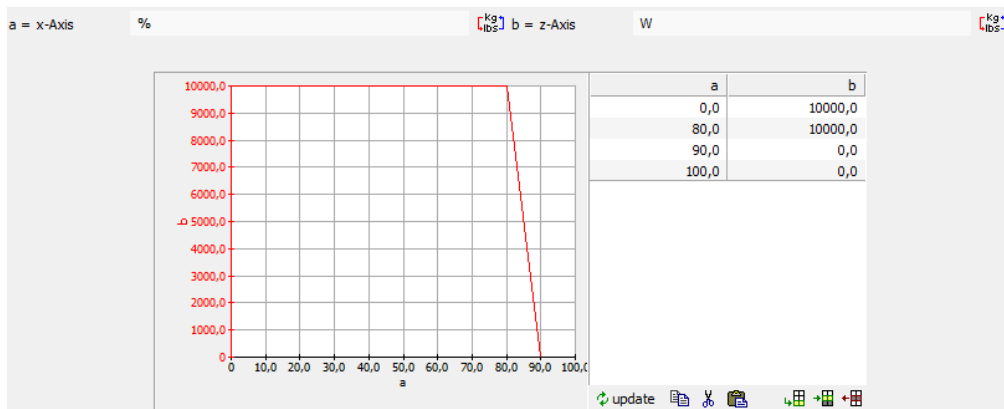
Slika 3.9. Mapa raspoložive snage za funkcionalnost aktivnog električnog krstarenja



Sljedeća mapa upravljačke strategije bila bi mapa raspoložive snage za funkcionalnost aktivnog električnog krstarenja ( $P_{SA}$ ) [Slika 3.9.]. Ona je definirana na isti način kao i mapa snage sporohodne vožnje, dakle daje trenutno raspoloživu snagu elektromotora (varijabla b), u ovisnosti o SoC-u baterije (varijabla a).

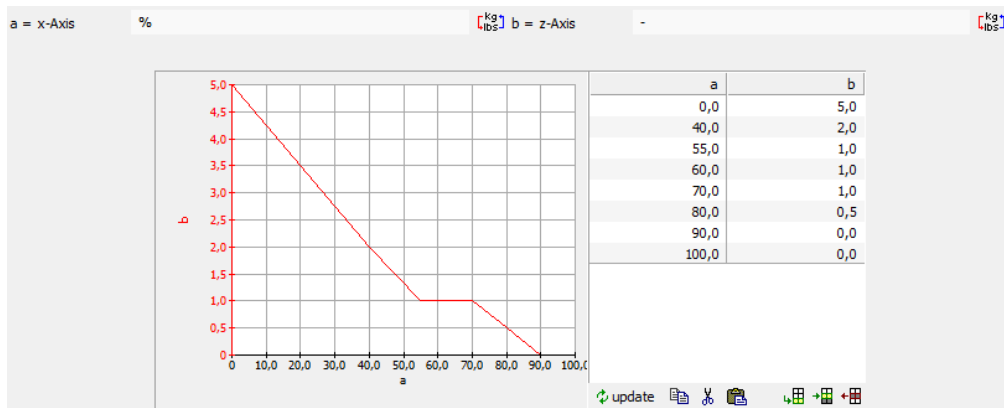
Mape potrebne za funkcionalnost pasivnog električnog krstarenja su mapa raspoložive snage za funkcionalnost regenerativnog kočenja ( $P_{reg}$ ) [Slika 3.10.], mapa koeficijenta adaptivnog pasivnog električnog krstarenja ( $\kappa$ ) [Slika 3.11.] i mapa postepenog smanjivanja momenta ( $\delta$ ) [Slika 3.12.].

Mapa raspoložive snage za funkcionalnost regenerativnog kočenja je definirana na isti način kao i mapa raspoložive snage za funkcionalnost sporohodne električne vožnje, dakle daje izlaz snage elektromotora (varijabla b), u ovisnosti o SoC-u baterije (varijabla a). Dakako, ova mapa će također biti korištena i pri izradi funkcionalnosti regenerativnog kočenja.



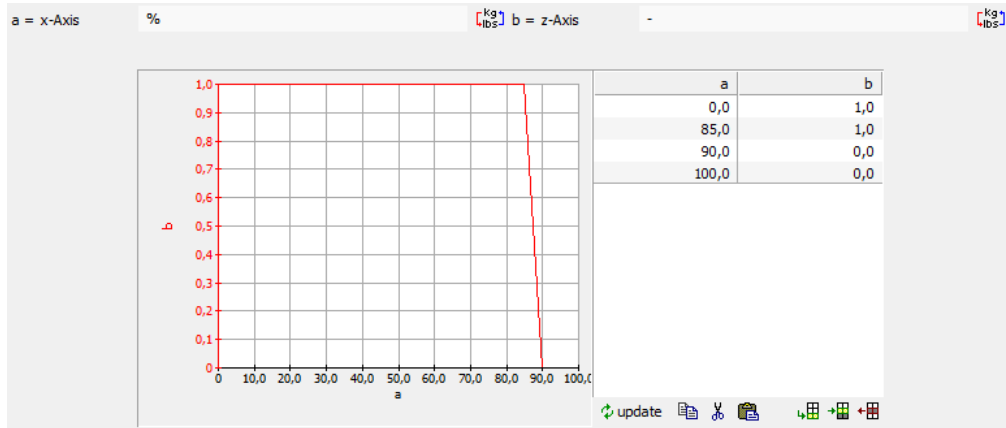
Slika 3.10. Mapa maksimalne snage regenerativnog kočenja

Mapa koeficijenta adaptivnog pasivnog električnog krstarenja služi za podešavanje koeficijenta  $\kappa$  (varijabla b) u ovisnosti o SoC-u baterije (varijabla a) kojim se kasnije množi moment koji odgovara kočnom momentu SUI motora. Detaljnije u poglavlju 4.3.3.



Slika 3.11. Mapa koeficijenta adaptivnog pasivnog električnog krstarenja

Mapa postepenog smanjivanja pojačanja momenta na izlazu daje koeficijent  $\delta$  (varijabla b) koji ovisi o SoC-u baterije (varijabla a) te se taj koeficijent množi s momentom koji odgovara kočnom momentu SUI motora da se dobije linearan prijelaz smanjenja željenog momenta elektromotora. Detaljnije u poglavlju 4.3.2.



**Slika 3.12. Mapa koeficijenta postepenog smanjivanja momenta**



Svakoj funkcionalnosti, odnosno načinu vožnje, je pridružen jedan mod (engl. mode) kojim se olakšava implementacija nadređenog upravljačkog algoritma. Također, kako bi se osigurao mirniji i ugodniji rad vozila, postoje točno definirani uvjeti pod kojima je moguć prelazak iz jedne u drugu funkcionalnost. Uvjeti prelaska će biti definirani pri pojašnjavanju djelovanja pojedine funkcionalnosti. Nadalje, sprječavanje preklapanja se moglo izvesti i uvođenjem prioriteta ulaska u neku funkcionalnost, no budući da u upravljačku strategiju nisu ukomponirane sve funkcionalnosti samim time je upravljački model i jednostavniji. Zato se odabrala strategija pažljivog postavljanja uvjeta umjesto postavljanja prioriteta na ulazak u funkcionalnost.

#### 4.1. Funkcionalnost sporohodne vožnje – mod CR

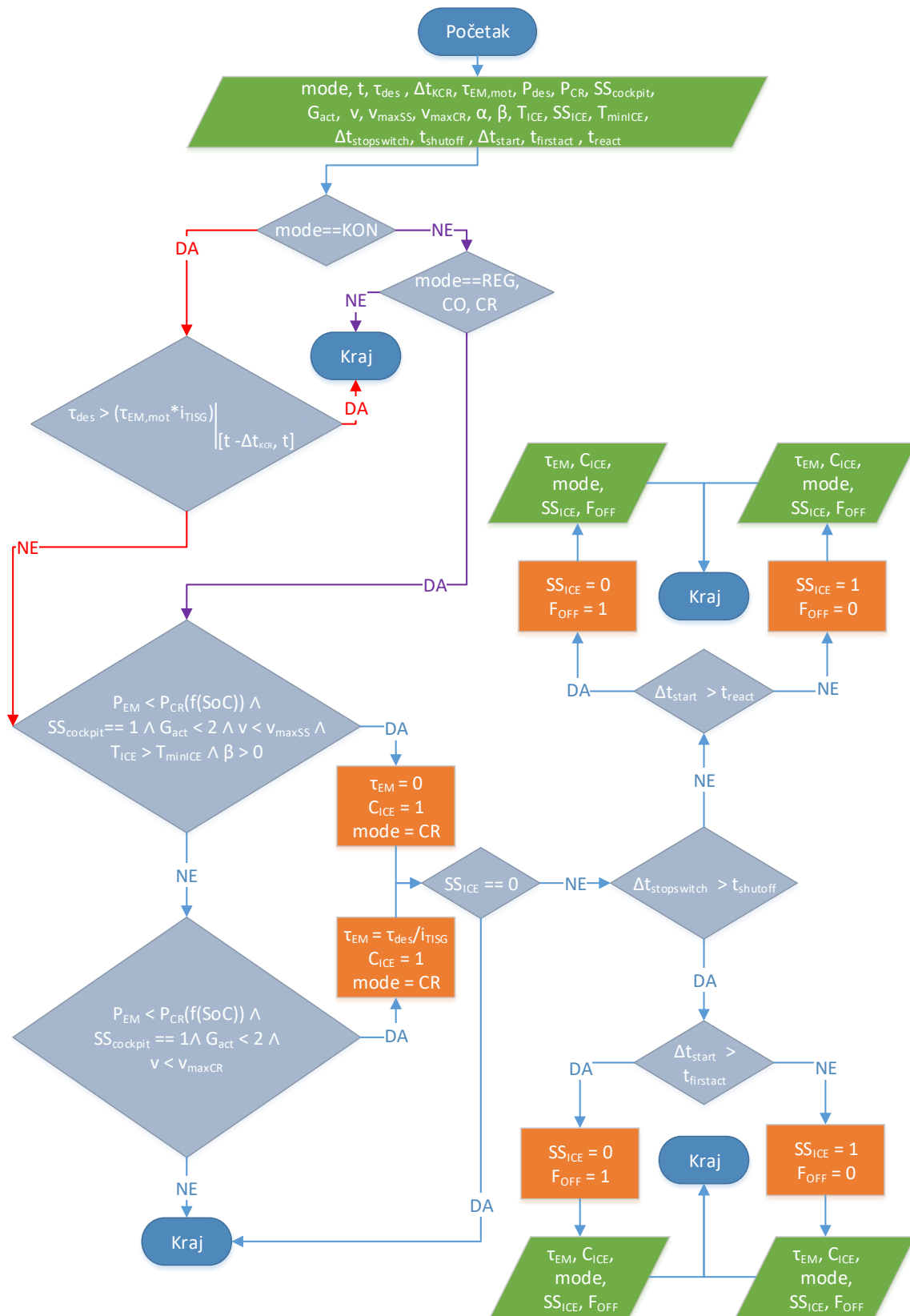
Sporohodna električna vožnja (engl. eCreep) je funkcionalnost koju AVL definira kao vožnju u električnom režimu pri niskim brzinama [12]. Navedena funkcionalnost je izrazito pogodna pri vožnji sa zastojevima jer su otpori i brzine mali pa je sukladno tomu i snaga elektromotora dovoljna.

Dijagram toka sporohodne električne funkcionalnosti [Slika 4.2] nam prikazuje način na koji djeluje spomenuta funkcionalnost. Prvo se provjerava u kojem modu je vozilo bilo u prethodnom vremenskom trenutku, tj. prethodnom koraku uzorkovanja. Ako je vozilo u bilo modu KON, potrebno je provjeriti je li željeni moment vozača unutar određenog vremenskog perioda (korisnički definiran parametar  $\Delta t_{KCR}$ ) manji od maksimalnog momenta koji elektromotor može isporučiti (označeno crvenim strelicama u algoritmu). Ako je taj uvjet zadovoljen, prelazi se na glavni uvjet za sporohodnu električnu vožnju. S druge strane, ako je mod u prošlom vremenskom trenutku bio REG, CO ili CR (označeno ljubičastim strelicama u algoritmu) može se direktno prijeći u glavni uvjet za sporohodnu električnu vožnju. U glavnim uvjetima za mod CR razlikujemo dvije glavne situacije: vozilo se zaustavlja i vozilo se kreće sporohodno.

Uvjeti koje je potrebno ispuniti pri zaustavljanju vozila (engl. Rolling Start-stop, RSS):

- Trenutna snaga na elektromotoru ( $P_{EM,mot}$ ) mora biti manja od snage koju može isporučiti elektromotor s obzirom na trenutni SoC baterije, mapa na [Slici 3.8.]
- Vozilo mora biti uključeno iz kokpita (preko ključa ili gumba) ( $SS_{cockpit}$ )
- Stupanj prijenosa ( $G_{act}$ ) mora biti niži od 2
- Brzina vozila mora biti manja od maksimalne dozvoljene brzine za RSS ( $v_{maxSS}$ )
- Signal pedale kočnice ( $\beta$ ) mora biti veći od nule

- Temperatura SUI motora mora biti viša od određene min. temperature (korisnički definiran parametar  $T_{minICE}$ )



Slika 4.2. Dijagram toka funkcionalnosti sporohodne električne vožnje

Ako su svi uvjeti zadovoljeni, moment elektromotora se postavlja na nulu,  $SS_{ICE}$  se otvara i mod se postavlja na vrijednost CR.

Uvjeti koje je potrebno ispuniti za ulazak u sporohodnu vožnju:

- Trenutna snaga na elektromotoru ( $P_{EM}$ ) mora biti manja od snage koju može isporučiti elektromotor s obzirom na trenutni SoC baterije, mapa na [Slici 3.8.]
- Vozilo mora biti uključeno iz kokpita (preko ključa ili gumba) ( $SS_{cockpit}$ )
- Stupanj prijenosa ( $G_{act}$ ) mora biti niži od 2
- Brzina vozila mora biti manja od maksimalne dopuštene brzine za funkcionalnost sporohodne električne vožnje ( $v_{maxCR}$ )

$v_{maxSS}$ ,  $v_{maxCR}$ ,  $T_{minICE}$  i  $\Delta t_{KCR}$  su parametri koje korisnik može proizvoljno zadavati. Ako su svi uvjeti zadovoljeni, moment elektromotora se postavlja na vrijednost željenog momenta,  $SS_{ICE}$  se otvara i mod se postavlja na vrijednost CR. Budući da je potrebno očuvati mehaničke komponente vozila od pretjeranog trošenja, osigurati sigurno uključivanje SUI motora i siguran rad popratnih uređaja, potrebno je osmisliti strategiju uključivanja i isključivanja SUI motora pri zaustavljanjima i sporoj vožnji. Iz tog razloga prilikom ulaska u mod CR postoji jednostavna logika upravljanja uključivanjem i isključivanjem SUI motora. Prvo se provjerava je li motor bio isključen u prethodnom trenutku. Ako je bio, prelazi se direktno na kraj algoritma. Nakon toga se razmatra koliko dugo je vozilo bilo isključeno iz kokpita. Ako je to vrijeme bilo manje od prethodno definiranog vremena (korisnički definiran parametar  $t_{shutoff}$ ) gleda se je li vrijeme od prošlog pokretanja SUI motora veće od minimalnog vremena rada motora prije idućeg gašenja<sup>1</sup>. Ako je veće onda se SUI motor isključuje i dotok goriva se onemogućava<sup>2</sup>, a ako je manje onda SUI motor ostaje uključen. Ako je vozilo bilo isključeno dulje od prethodno definiranog vremena (korisnički definiran parametar  $t_{firstact}$ ), opet se gleda vrijeme od prošlog pokretanja SUI motora i uspoređuje s vremenom prve aktivacije motora. Ako je vrijeme od posljednjeg pokretanja motora bilo dulje od vremena prve aktivacije SUI motora ( $t_{firstact}$ ), možemo ga isključiti i onemogućiti dotok goriva, a ako je vrijeme posljednje od posljednje aktivacije bilo kraće od vremena prve aktivacije, SUI motor ostaje uključen.

---

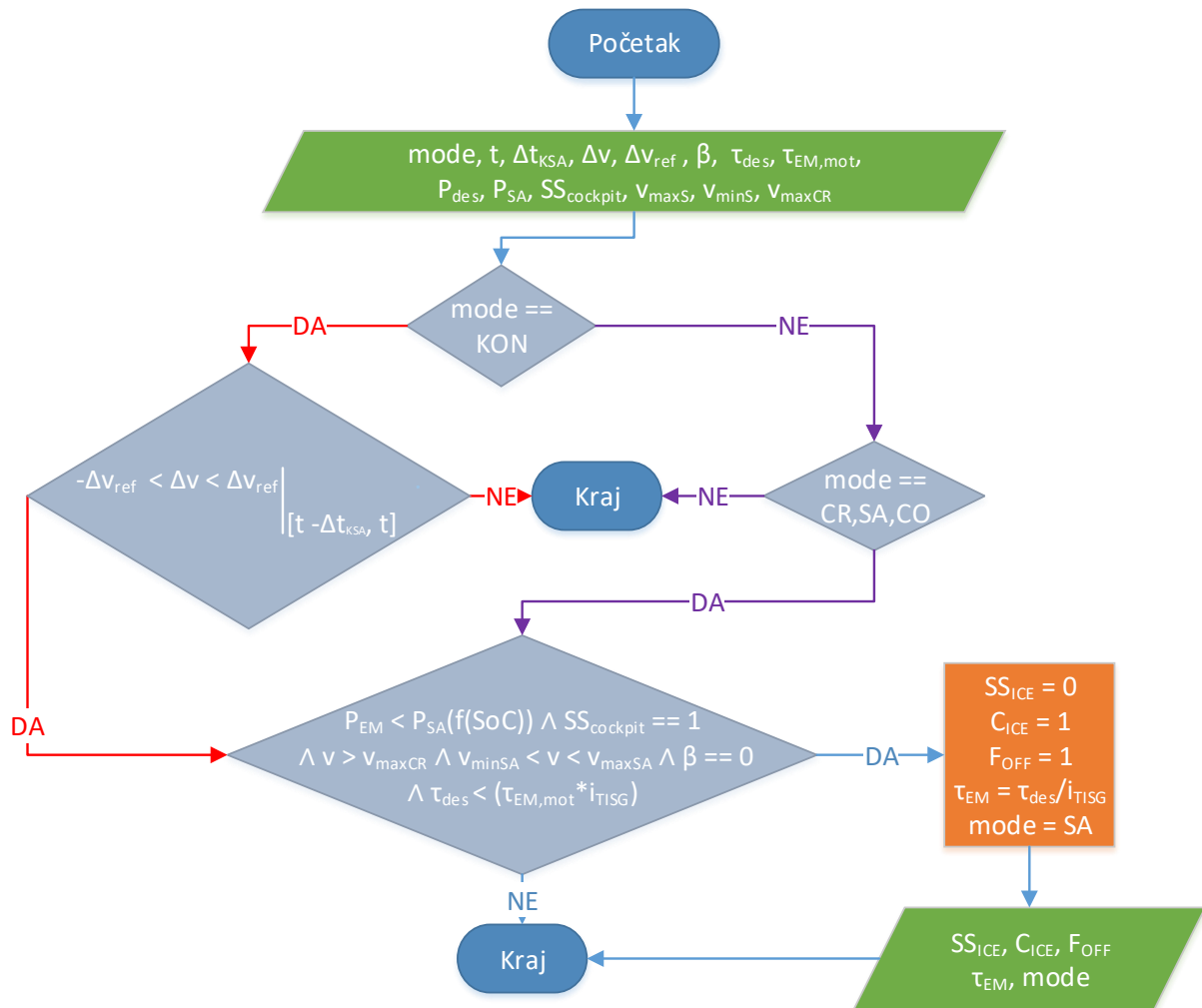
<sup>1</sup> Vrijeme minimalnog rada motora ( $t_{react}$ ) mora biti uvedeno jer sprječava prečesto uključivanje i isključivanje.

<sup>2</sup> Protok goriva padne na rezidualni protok goriva potreban za svladavanje otpora pomoćnih uređaja [13]

#### 4.2. Funkcionalnost aktivnog električnog krstarenja – mod SA

Aktivno električno krstarenje (engl. eSailing) podrazumijeva gašenje motora s unutarnjim izgaranjem na višim brzinama vozila, dok elektromotor održava brzinu vozila kroz kratak period i prazni bateriju.

Dijagram toka aktivnog električnog krstarenja [Slika 4.3.] prikazuje način na koji bi djeluje spomenuta funkcionalnost.



Slika 4.3. Dijagram toka funkcionalnosti aktivnog električnog krstarenja

Prvo je potrebno provjeriti mod iz prethodnog vremenskog trenutka. Ako je vozilo bilo u modu KON potrebno je provjeriti je li unutar određenog vremenskog intervala razlika između minimalne i maksimalne brzine bila unutar korisnički definirane referentne vrijednosti ( $\Delta v_{REF}$ ). Ako je taj uvjet zadovoljen, dolazi se do glavnog uvjeta za ulazak aktivno električno krstarenje (označeno crvenim strelicama u algoritmu). Ako taj uvjet nije zadovoljen onda se provjerava je li vozilo bilo u jednom od modova CR, SA ili CO. Ako je vozilo bilo u jednom od ta tri moda,

automatski se dolazi pred glavni uvjet za ulazak u pasivno električno krstarenje (označeno ljubičastim strelicama u algoritmu).

Uvjeti koje je potrebno ispuniti za ulazak u aktivno električno krstarenje:

- Trenutna snaga na elektromotoru ( $P_{EM}$ ) mora biti manja od snage koju može isporučiti elektromotor s obzirom na trenutni SoC baterije, mapa na [Slici 3.9.]
- Vozilo mora biti uključeno iz kokpita (preko ključa ili gumba) ( $SS_{cockpit}$ )
- Brzina vozila mora biti između maksimalne i minimalne brzine za vožnju u aktivnom električnom krstarenju ( $v_{maxSA}$ ,  $v_{minSA}$  – parametri koje zadaje korisnik)
- Brzina vozila mora biti veća od maksimalne brzine vožnje u modu CR ( $v_{maxCR}$ ), uvjet potreban za sprječavanje preklapanja funkcionalnosti CR i SA, odnosno da mod CR na neki način bude nadređen modu SA (u mod SA se ne ulazi dok se ne izađe iz moda CR)
- Pedala kočnice ( $\beta$ ) ne smije biti pritisnuta
- Željeni moment ( $\tau_{des}$ ) mora biti manji od maksimalnog momenta koji elektromotor može isporučiti ( $\tau_{EM,mot}$ ) [Slika 3.4.]

Ako su svi ti uvjeti zadovoljeni, SUI motor se isključuje, spojka pred SUI motorom se otvara, dotok goriva se onemogućava, moment elektromotora se postavlja na željeni moment i mod se postavlja u SA. Mora se napomenuti da ovdje nije bilo potrebno mjeriti vremena uključivanja i isključivanja SUI motora te mjeriti temperaturu jer se podrazumijeva da je motor dovoljno zagrijan ako se već vozi na većim brzinama u kojima je omogućen mod SA.

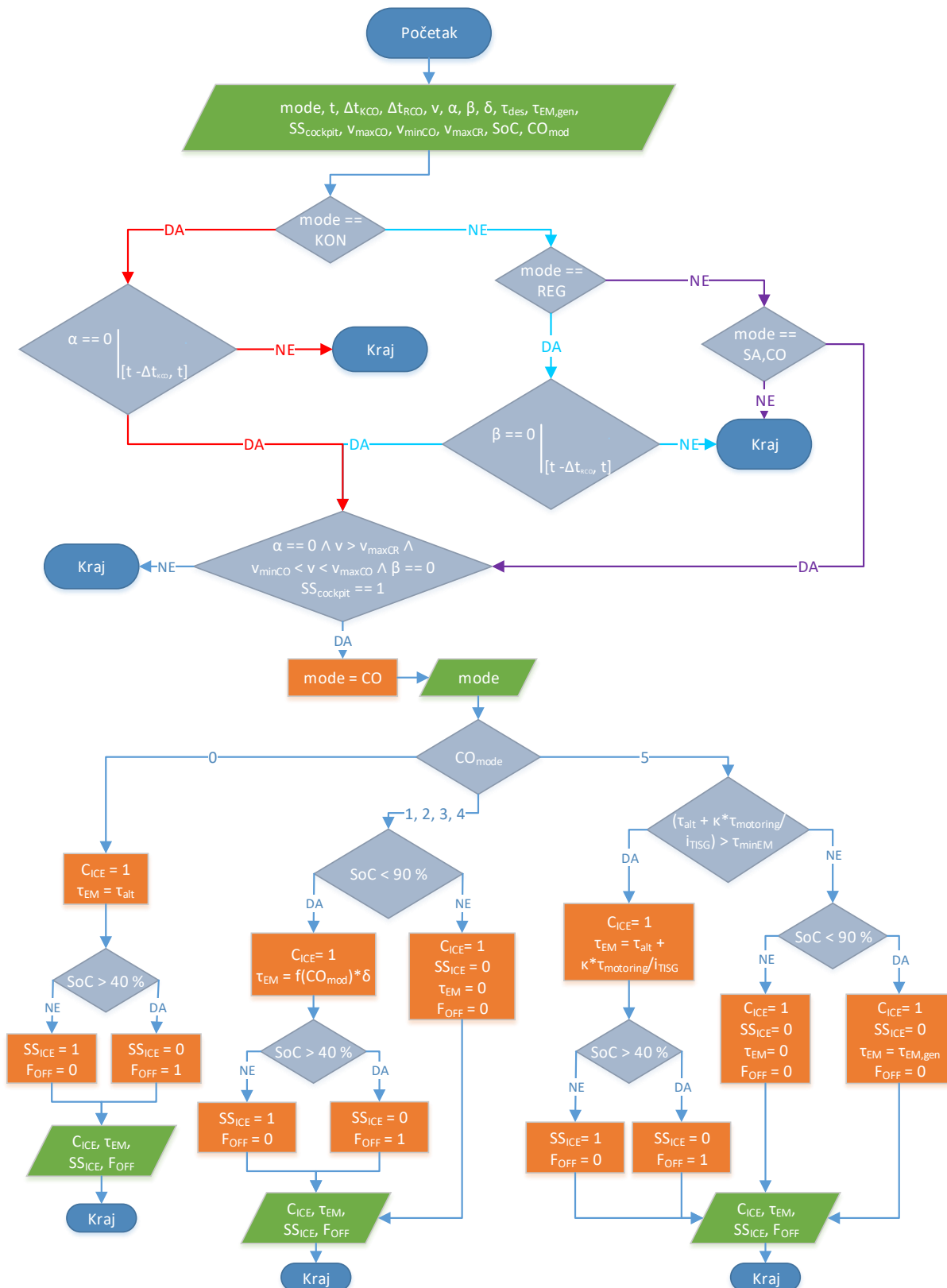
### 4.3. Funkcionalnost pasivnog električnog krstarenja – mod CO

Pasivno električno krstarenje (engl. eCoasting) podrazumijeva gašenje motora s unutarnjim izgaranjem na višim brzinama vozila kad vozač otpusti pedalu akceleratora, dok elektromotor regenerativno koči kako bi vozač dobio osjećaj vožnje konvencionalnog vozila [21].

Dijagram toka funkcionalnosti pasivnog električnog krstarenja [Slika 4.4.] nam prikazuje način na koji djeluje spomenuta funkcionalnost. Prvo se provjerava u kojem modu je vozilo bilo u prethodnom koraku uzorkovanja. Ako je vozilo bilo u modu KON potrebno je provjeriti je li vozačev signal papučice akceleratora određeni vremenski period ( $\Delta t_{KCO}$ ) jednak nuli. U slučaju da je taj uvjet zadovoljen, dolazi se do glavnog uvjeta za funkcionalnost pasivnog električnog krstarenja (označeno crvenim strelicama u algoritmu). Ako je vozilo bilo u modu REG potrebno je provjeriti da je vozačev signal papučice kočnice određeni vremenski period (korisnički definiran parametar  $\Delta t_{RCO}$ ) jednak nuli. U slučaju da je uvjet zadovoljen, dolazi se do glavnog uvjeta za pasivno električno krstarenje (označeno tirkiznim strelicama u algoritmu). Ako se



vozilo nalazilo u modovima SA ili CO, direktno se dolazi pred glavni uvjet za ulazak u funkcionalnost pasivnog električnog krstarenja (označeno ljubičastim strelicama u algoritmu).



Slika 4.4. Dijagram toka funkcionalnosti pasivnog električnog krstarenja

Uvjeti koje je potrebno ispuniti za ulazak u pasivno električno krstarenje:

- Pedala akceleratora ( $\alpha$ ) ne smije biti pritisnuta
- Brzina vozila mora biti između minimalne i maksimalne brzine za vožnju u pasivnom električnom krstarenju ( $v_{maxCO}$ ,  $v_{minCO}$  – parametri koje zadaje korisnik)
- Brzina vozila mora biti veća od maksimalne brzine vožnje u modu CR ( $v_{maxCR}$ ), uvjet potreban za sprječavanje preklapanja funkcionalnosti CR i CO, odnosno da mod CR na neki način bude nadređen modu CO (u mod CO se ne ulazi dok se ne izađe iz moda CR)
- Pedala kočnice ( $\beta$ ) ne smije biti pritisnuta
- Vozilo mora biti uključeno iz kokpita (preko ključa ili gumba) ( $SS_{cockpit}$ )

Ako su svi ti uvjeti zadovoljeni, mod se postavlja na vrijednost CO. Zatim, sukladno tomu koju vrijednost režima krstarenja smo postavili u taj režim krstarenja ulazimo. Režimi krstarenja su razvijeni iz razloga da bi se vozaču moglo omogućiti variranje različitih intenziteta usporavanja puštanjem papučice akceleratora pomoću elektromotora.

Značenje režima krstarenja:

- 0 – slobodno kotrljanje po (bez usporavanja)
- 1 – slabo usporavanje
- 2 – umjereno (normalno) usporavanje
- 3 – jako usporavanje
- 4 – maksimalno ostvarivo usporavanje
- 5 – adaptivni režim usporavanja

#### 4.3.1. Režim krstarenja 0

U slučaju da je režim krstarenja postavljen na nulu, to bi značilo da se u tom režimu vozilo slobodno kotrlja po cesti bez kočenja uzrokovanog SUI motorom ili elektromotorom.

Nakon ulaska u režim krstarenja 0, otvara se spojka SUI motora i moment elektromotora se postavlja na vrijednost momenta alternatora ( $\tau_{alt}$ ) (3.5).

Nakon toga je potrebno provjeriti je li SoC baterije ispod 40%, jer je u tom slučaju potrebno ostaviti SUI motor uključenim kako bi se osigurala održivost SoC-a baterije.

#### 4.3.2. Režimi krstarenja 1,2,3,4

Za režime krstarenja 1-4 način upravljanja je gotovo identičan. Nakon ulaska u bilo koji od tih režima, potrebno je provjeriti je li razina SoC-a baterije manja od 90%. Ako je SoC baterije viši od 90% ne smije se više puniti baterija, odnosno SUI motor se isključuje,  $SS_{ICE}$  se otvara i moment elektromotora se postavlja na nulu te se vozilo slobodno kotrlja po cesti kao u režimu

krstarenja 0. Mogla bi se izvesti i verzija u kojoj bi se uključivao MSUI te preko njegovog kočnog momenta kočilo intenzitetom režima krstarenja 2 što odgovara kočnom momentu MSUI [Tablica 4.1], ali povoljnije je umjesto toga kočiti mehaničkim kočnicama da se smanji broj uključenja i isključenja MSUI te spajanja MSUI na transmisiju i smanjenje trzaja koji oni uzrokuju. U slučaju da je SoC niži od 90%,  $SS_{ICE}$  se otvara, a moment elektromotora se postavlja prema [Tablici 4.1.] i množi s koeficijentom  $\delta$  [Slika 3.12.]. Naime, da bi smo spriječili nagli propad momenta koristimo prije spomenuti koeficijent  $\delta$  da bismo linearno smanjili moment 85-90% prije prebacivanja u slobodno kotrljanje vozila. Nakon postavljanja momenta elektromotora, potrebno je postaviti stanje rada SUI motora, a ono se postavlja na identičan način kao što je bilo dano u prošlom poglavlju, odnosno isto kao i u režimu krstarenja 0.

**Tablica 4.1. Moment na elektromotoru u ovisnosti o režimu krstarenja**

Režim krstarenja	Moment na elektromotoru ( $\tau_{EM}$ )
1	$\tau_{alt} + \frac{\tau_{motoring}}{2 * i_{TISG}}$
2	$\tau_{alt} + \frac{\tau_{motoring}}{i_{TISG}}$
3	$\tau_{alt} + \frac{2 * \tau_{motoring}}{i_{TISG}}$
4	$\tau_{EM,gen}$

#### 4.3.3. Režim krstarenja 5

Za bolju regulaciju stanja napunjenosti baterije potrebno je osmisliti sustav adaptivnog pasivnog električnog krstarenja. Rješenje je zamišljeno tako da jedna mapa [Slika 3.11.] odlučuje s kojim koeficijentom ( $\kappa$ ) će se množiti kočni moment SUI motora ( $\tau_{motoring}$ ) [Slika 3.2.] da bi se dobio rezultirajući iznos kočnog momenta. Ulaz u tu mapu je trenutni SoC baterije, a izlaz je prije spomenuti koeficijent ( $\kappa$ ). Pri ulasku u režim krstarenja 5, potrebno je provjeriti može li maksimalno negativni moment elektromotora pokriti moment kočenja pomnožen s koeficijentom  $\kappa$ . Ako može pokriti taj moment, spojka SUI motora se otvara, a moment elektromotora se postavlja na način dan na [Slici 4.4.]. Nakon toga još je jednom potrebno postaviti stanje rada SUI motora kao u posljednja dva poglavlja. Suprotno, ako moment elektromotora ne može pokriti željeni iznos, potrebno ga je postaviti s obzirom na SoC baterije. Ako je SoC baterije manji od 90% moment elektromotora je potrebno postaviti na maksimalan

moment motora u generatorskom načinu rada ( $\tau_{EM,gen}$ ) [Slika 3.5.] koji elektromotor u tom trenutku može ostvariti. MSUI je potrebno isključiti i  $SS_{ICE}$  otvoriti. Ako je SoC baterije veći od 90%, moment elektromotora treba postaviti na nulu, isključiti MSUI te otvoriti  $SS_{ICE}$ .

#### 4.4. Regenerativno kočenje – mod REG

Regenerativno kočenje (engl. regenerative braking) jedna je od temeljnih funkcionalnosti hibridnih pogona uopće. Ideja regenerativnog kočenja jest da preko drugog spremnika energije u sustavu (kod električnih hibrida to je baterija) povрати kinetičku energiju vozila u sustav prilikom kočenja umjesto da ju potraži pretvaranjem u toplinu na mehaničkim kočnicama. Frekvencijski pretvarač koji upravlja elektromotorom omogućava rekuperaciju energije. Kinetička energija vozila se pretvara u električnu energiju baterije. Dijagram toka funkcionalnosti regenerativnog kočenja [Slika 4.5.] nam prikazuje način na koji djeluje spomenuta funkcionalnost.

U funkcionalnost regenerativnog kočenja se može prijeći direktno iz pasivnog i električnog krstarenja te konvencionalne vožnje ako su zadovoljeni sljedeći uvjeti.

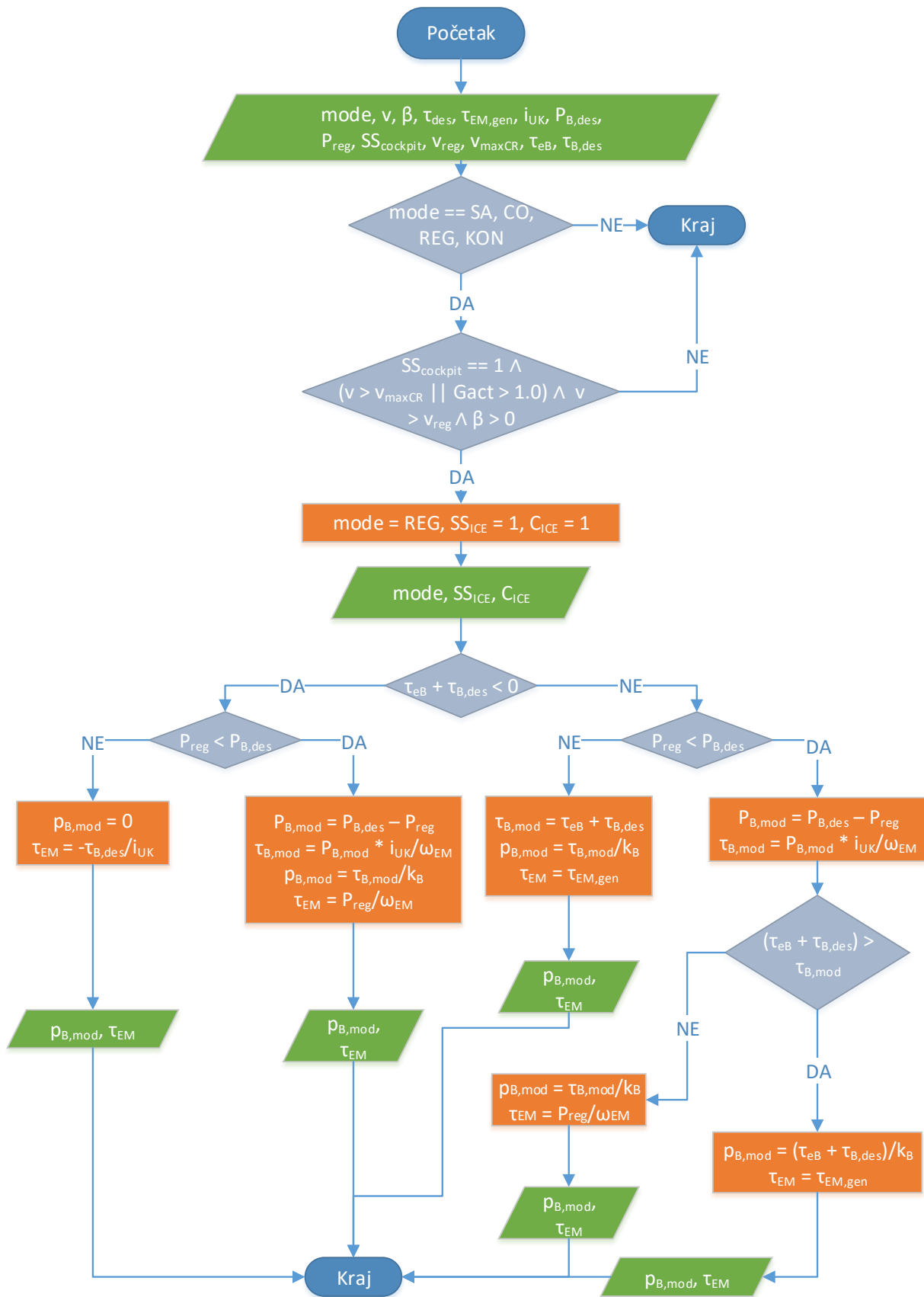
Uvjeti za ulazak u regenerativno kočenje:

- Vozilo mora biti uključeno iz kokpita (preko ključa ili gumba) ( $SS_{cockpit}$ )
- Brzina vozila mora biti više od minimalne brzine za regenerativno kočenje (korisnički definiran parametar  $v_{reg}$ )
- Brzina vozila mora biti veća od maksimalne brzine vožnje u modu CR (korisnički definiran parametar  $v_{maxCR}$ ), uvjet potreban za sprječavanje preklapanja funkcionalnosti CR i KON, odnosno da mod CR na neki način bude nadređen modu KON (u mod KON se ne ulazi dok se ne izađe iz moda CR) ili mora biti viši stupanj prijenosa od 1
- Papučica kočnice ( $\beta$ ) mora biti pritisnuta

Nakon što je vozilo ušlo funkcionalnost regenerativnog kočenja, mod se postavlja u vrijednost 4, MSUI ostaje u prethodnom stanju i  $SS_{ICE}$  se otvara. Nakon toga je potrebno izvršiti provjeru momenta kočenja. Kad se govori o provjeri momenta, provjerava se može li maksimalni moment elektromotora u generatorskom načinu rada ( $\tau_{EM,gen}$ ) [Slika 3.5.] pomnožen sa svim prijenosnim omjerima do kotača ( $\tau_{eB}$ ) pokriti željeni moment kočenja:

$$i_{uk} = i_{TISG} * i_{DSG} * i_{diff} \quad (4.2.)$$

$$\tau_{eB} = \tau_{EM,min} * i_{uk} \quad (4.3.)$$



Slika 4.5. Funkcionalnost regenerativnog kočnja

Željeni moment kočenja je moment što se stvara između kočnih pločica i diskova, a uzrokuje ga tlak u kočnom sustavu koji inicira vozač iz kokpita. Prema sljedećoj jednadžbi se računa ukupan moment kočenja ( $\tau_B$ ) (zbroj za sva četiri kotača):

$$k_B = n_w * n_p * A_p * \eta_B * \mu_p * r \quad (4.4.)$$

$$\tau_{B,des} = p_B * k_B \quad (4.5.)$$

Ako moment elektromotora može pokriti željeni moment kočenja, sljedeći korak je usporedba željene snage kočenja. Kad se govori o provjeri snage, zapravo se dana maksimalna snaga motora još limitira sa SoC-om baterije te se onda izlaz te mape ( $P_{reg}$ ) [Slika 3.10.] uspoređuje s željenom snagom kočenja ( $P_{B,des}$ ). Potrebna snaga kočenja se računa na sljedeći način:

$$P_{B,des} = \frac{\tau_B}{i_{uk}} * \omega_{EM} \quad (4.6.)$$

Ukoliko ne nedostaje ni momenta ni snage, modificirani tlak kočenja se postavlja na vrijednost nula jer se svo potrebno kočenje može izvesti elektromotorom na kojeg se narinjuje željeni moment kočenja.

Ukoliko ne nedostaje momenta kočenja, ali nedostaje snage kočenja, razlika željene snage kočenja i snage regenerativnog kočenja se pretvara u modificirani tlak kočenja preko modificiranog momenta kočenja i jednoliko raspoređuje na sve kotače vozila. Na elektromotor se narinjuje moment limitiran maksimalnom snagom regenerativnog kočenja.

U slučaju da nedostaje momenta, ali ne nedostaje snage kočenja, na elektromotor se postavlja maksimalno negativni ostvarivi moment, a razlika momenta koja nedostaje se namiruje preko mehaničkih kočnica postavljanjem modificiranog tlaka kočenja jednoliko na sve kotače.

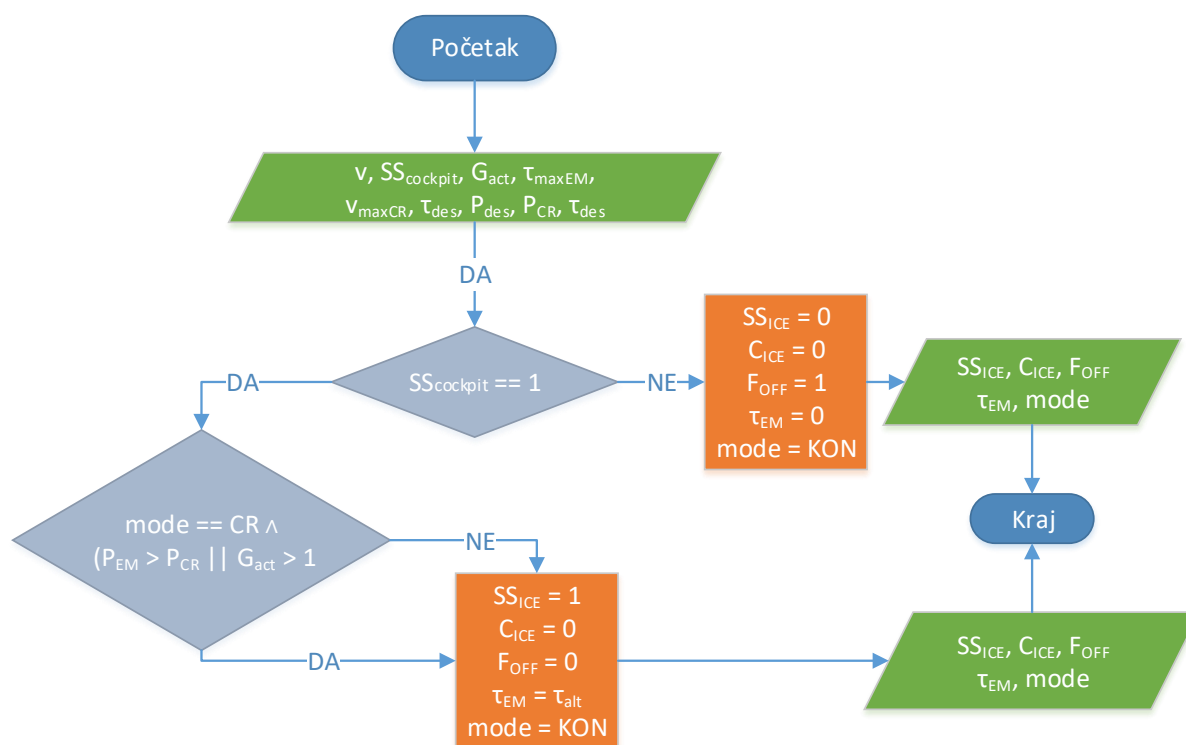
Naposljetku, ako nedostaje i momenta kočenja i snage kočenja, snaga kočenja se svede na modificirani moment i ovisno o tome čega više nedostaje (snage ili momenta kočenja) po tome se limitira regenerativno kočenje.

#### 4.5. Konvencionalna vožnja – mod KON

Konvencionalna vožnja se postavlja kao zadnji mod jer je to u teoriji mod vožnje u kojem želimo provesti najmanje vremena jer je najneučinkovitiji, ali će u realnoj situaciji biti najkorišteniji mod vožnje. Kako iz dijagrama toka [Slika 4.6.] možemo vidjeti, u konvencionalnu vožnju možemo ući direktno iz bilo koje druge funkcionalnosti. Pri ulasku u konvencionalnu vožnju, prvi uvjet koji se mora provjeriti jest je li vozilo uključeno iz kokpita. U slučaju da je vozilo uključeno, moraju se provjeriti uvjeti može li vozilo biti u modu CR. Ako ne može, mod se prebacuje u KON, ali bilo koji od sljedećih uvjeta pritom treba biti zadovoljen:

- Trenutna snaga na elektromotoru ( $P_{EM}$ ) mora biti manja od snage koju može isporučiti elektromotor s obzirom na trenutni SoC baterije, mapa na [Slici 3.8.]
- Trenutni stupanj prijenosa ( $G_{act}$ ) mora biti veći od 1

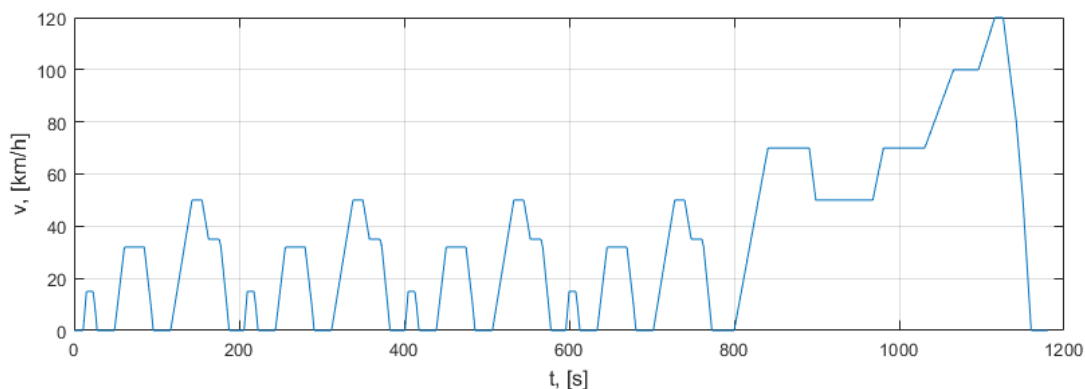
Ako je bilo koji od ovih uvjeta zadovoljen, vozilo ulazi u konvencionalnu vožnju tako da se MSUI uključuje,  $SS_{ICE}$  otvara, uključuje dotok goriva, mod se postavlja na vrijednost KON i na moment EM se postavlja moment alternatora ( $\tau_{alt}$ ) (3.5).



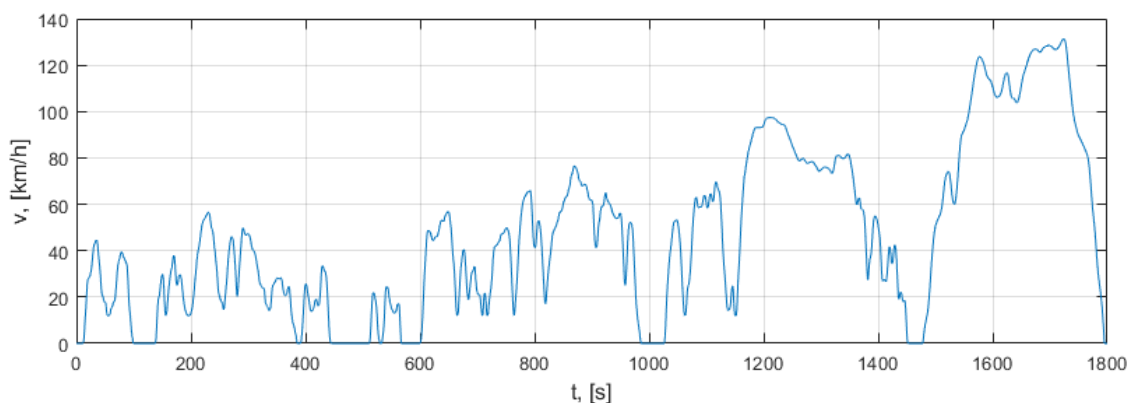
Slika 4.6. Konvencionalna vožnja

## 5. SIMULACIJSKA PROVJERA UPRAVLJAČKE STRATEGIJE

Nakon što je objašnjena upravljačka strategija u prethodnom poglavlju, potrebno je provjeriti rad te upravljačke strategije. Kao što je bilo ranije naglašeno, upravljačka strategija će se testirati u simulacijskom okruženju AVL CRUISE unutar kojeg je ista implementirana pomoću C kôd prevoditelja. Nakon što je izrađen C kôd upravljačke strategije, potrebno je odabrati ispitne procedure na kojima će se ispitivati upravljačka strategija. Odabrani ispitni ciklusi su: NEDC (engl. New European Driving Cycle) [Slika 5.1.], WLTP (engl. Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure) [Slika 5.2.], HWFET (engl. Highway Fuel Economy Cycle Test) [Slika 5.3.] i UDDS (engl. Urban Dynamometer Driving Schedule) [Slika 5.4.]. Svi ciklusi su definirani profilom referentne brzine u vremenu. Cjelokupna upravljačka strategija (uključujući i pasivno električno krstarenje) će se ispitati na NEDC, WLTP, HWFET i UDDS voznim ciklusima. Međutim, kako u tim certifikacijskim voznim ciklusima ne dolazi do aktivacije funkcionalnosti pasivnog električnog krstarenja, ona će se posebno ispitati kroz novi, modificirani NEDC ciklus [Slika 5.5.] sa intervalima krstarenja.

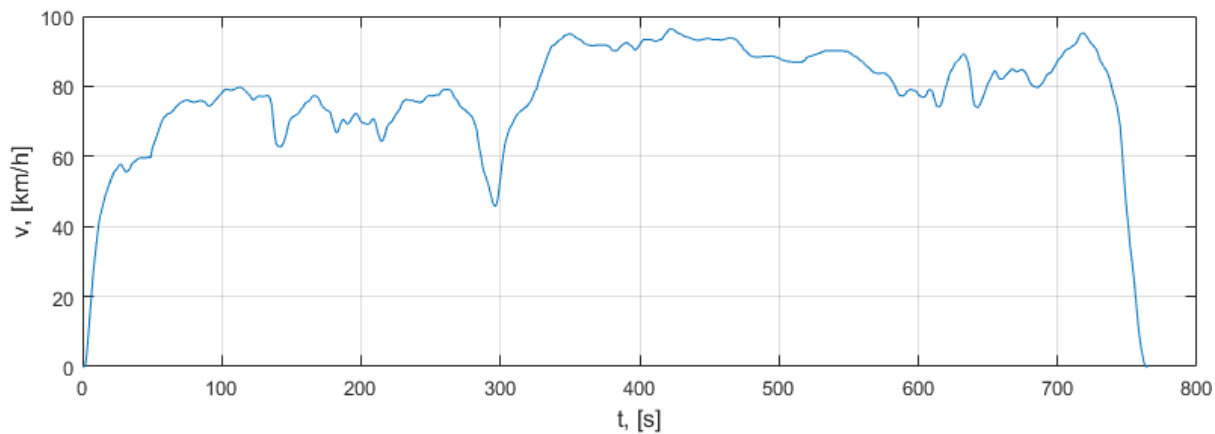


Slika 5.1. Profil brzine NEDC voznog ciklusa

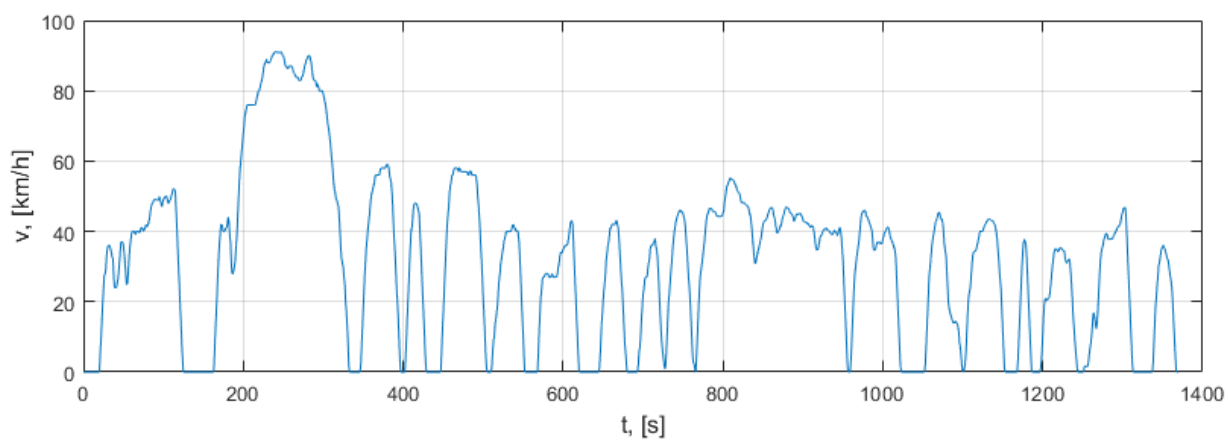


Slika 5.2. Profil brzine WLTP voznog ciklusa

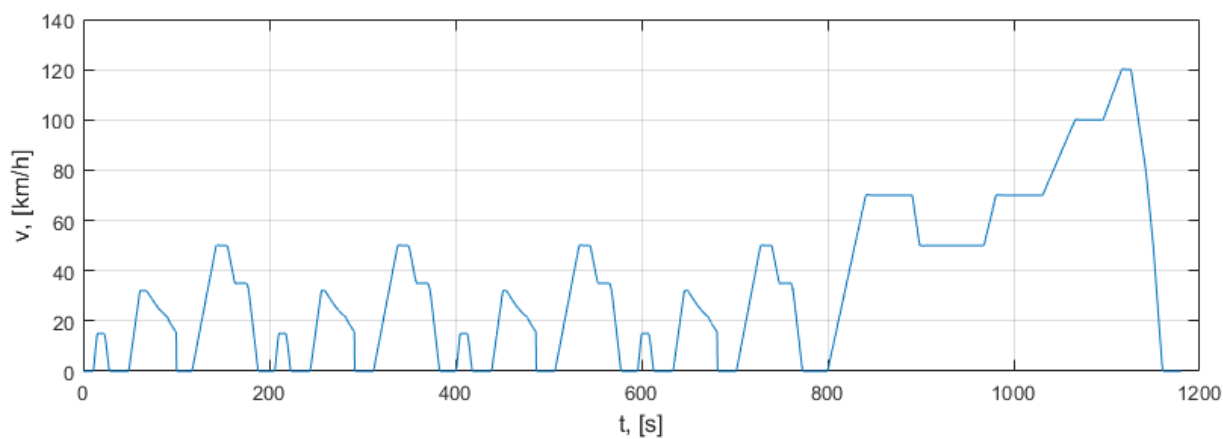




**Slika 5.3. Profil brzine HWFET voznog ciklusa**



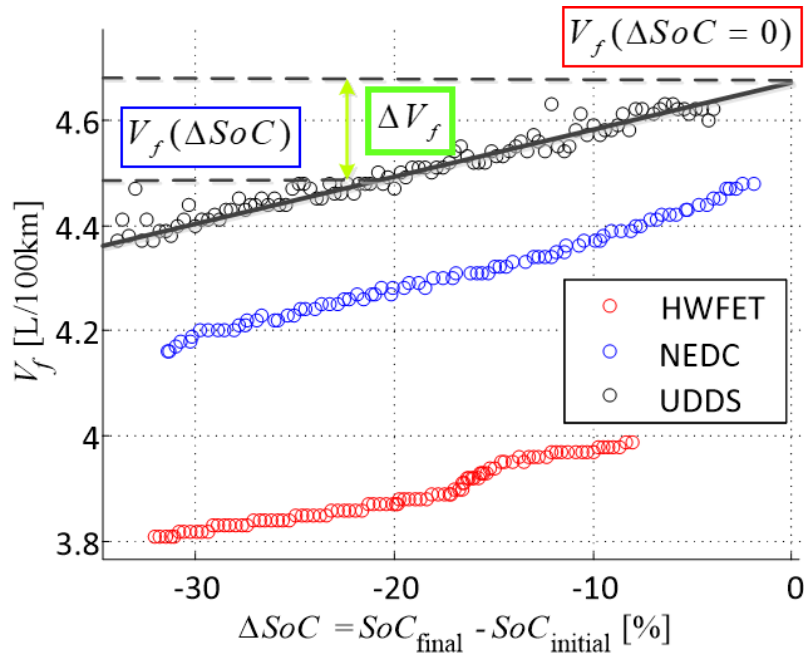
**Slika 5.4. Profil brzine UDSS voznog ciklusa**



**Slika 5.5. Profil brzine modificiranog NEDC voznog ciklusa**

### 5.1. Korekcija potrošnje goriva

Kako bi se u varijaciji potrošnje goriva uzele u obzir krajnje vrijednosti SoC-a baterije, potrebno je uvesti korekciju potrošnje goriva [16]. Takav način analize nam daje potpuno pravednu usporedbu potrošnje goriva hibridnog vozila i konvencionalnog vozila u raznim razmatranim scenarijima. Korekcija potrošnje goriva za dani model vozila se izvršila na način da su se varirale početne vrijednosti SoC-a baterije ( $SoC_{initial}$ ), te se promatrala vozila za rezultirajuće razlike krajnjeg i početnog SoC-a ( $\Delta SoC$ ) na ciklusima HWFET, NEDC i UDSS [Slika 5.6.].

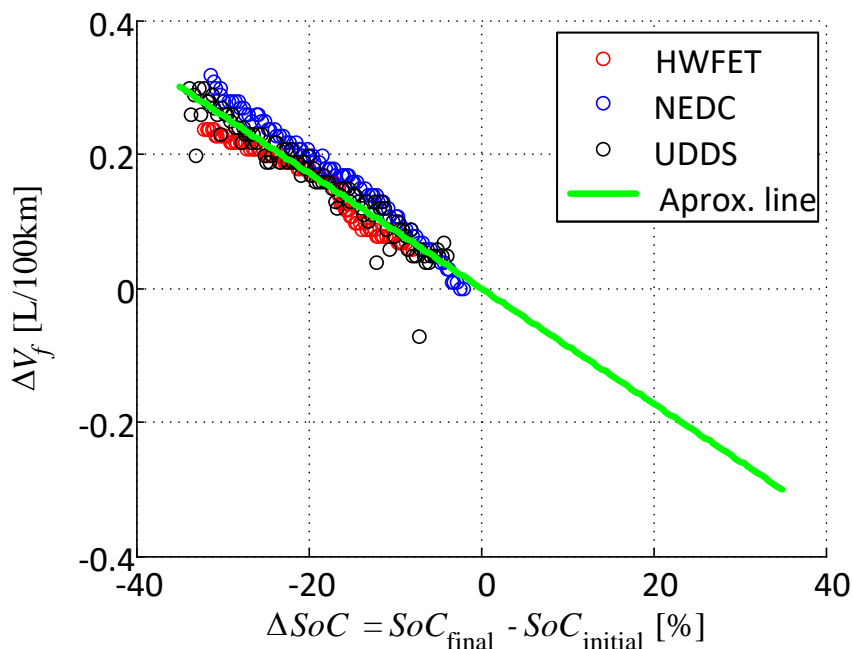


Slika 5.6. Utjecaj variranja SoC-a baterije na potrošnju goriva

$$\Delta SoC = SoC_{final} - SoC_{initial} \quad (5.1)$$

Nakon toga su se dobivene točke razlike potrošnje goriva ( $\Delta V_f$ ) aproksimirale pravcem [Slika 5.7.] čiji je nagib pravca ujedno i koeficijent korekcije potrošnje goriva ( $k$ ) koji iznosi:

$$k = \frac{\Delta V_f}{\Delta SoC} = -0,0087 \left[ \frac{l}{100km * \%} \right] \quad (5.2)$$



Slika 5.6. Utjecaj variranja SoC-a baterije na razliku potrošnje goriva

Pomoću koeficijenta korigirane potrošnje goriva se lako može izračunati korigirana potrošnja goriva:

$$\Delta V_f = k * \Delta SoC \quad (5.3)$$

$$V_{f,corr} = V_f + \Delta V_{f,corr} \quad (5.4)$$

## 5.2. Ispitivanje i analiza cjelokupne upravljačke strategije hibridnog vozila

Stavke koje će biti razmatrane su zadovoljenost uvjeta ulaska u funkcionalnost, usporedba SoC-a baterije vozila, usporedba potrošnje goriva te usporedba voznosti [17]. Izračun potrošnje goriva će se provoditi po prethodno objašnjenom korigiranoj potrošnji goriva. Voznost ( $d$ ) se računa na sljedeći način:

$$d = \frac{\Sigma E}{t_c} * 100 \quad (5.5)$$

Gdje je  $\Sigma E$  vrijeme koje je vozilo provelo izvan dopuštenih granica devijacije brzine na voznom ciklusu, a  $t_c$  je vrijeme trajanja voznog ciklusa.

Upravljačke konstante za potrebe testiranja postavljene su na sljedeći način:  $\Delta t_{KCO} = \Delta t_{KSA} = \Delta t_{KCR} = \Delta t_{RCO} = 2$  s,  $v_{maxCR} = 16$  km/h,  $v_{maxCO} = 150$  km/h,  $v_{maxSA} = 150$  km/h,  $v_{maxSS} = 5$  km/h,  $v_{minSA} = 40$  km/h,  $v_{minCO} = 40$  km/h,  $\Delta v_{ref} = 2$  km/h,  $t_{firstact} = 15$  s,  $t_{react} = 1$  s,  $t_{shutoff} = 1$  s.

Prije prikazivanja rezultata potrebno je razjasniti nazivanje modova pri prikazivanju rezultata. Naime, budući da nije moguće kvantificirano prikazati slova u dijagramima AVL CRUISE-a, potrebno je zamijeniti nazive modova u dijagramima toka u 4. poglavlju na sljedeći način:

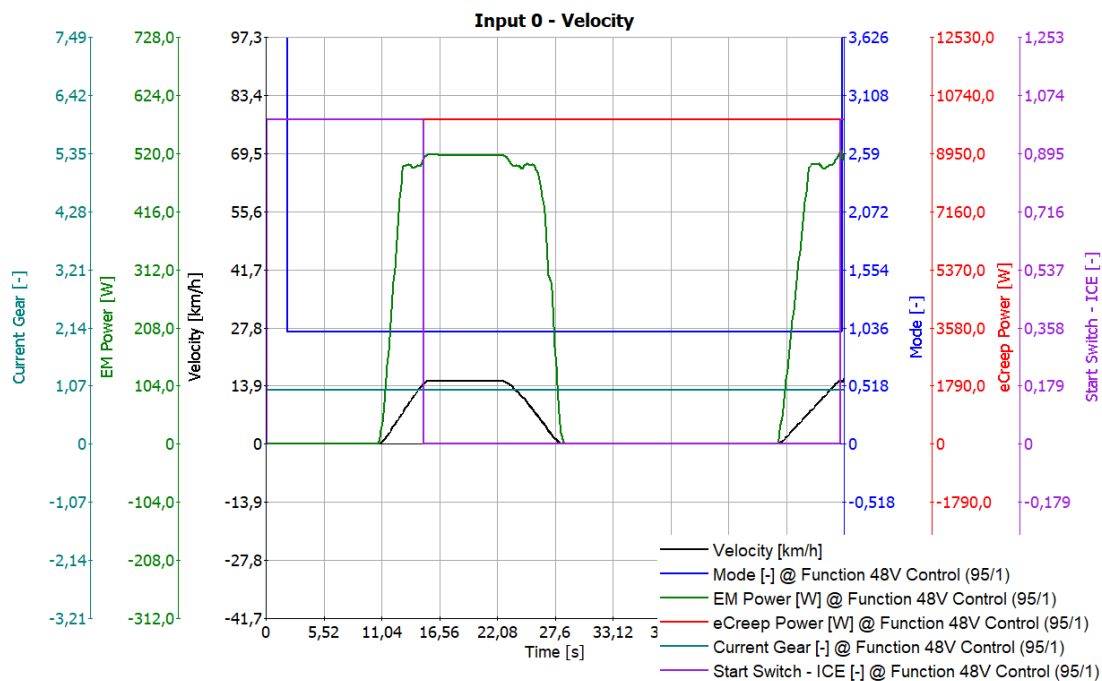
- mod CR – mod 1
- mod SA – mod 2
- mod CO – mod 3
- mod REG – mod 4
- mod KON – mod 5

### 5.2.1. NEDC vozni ciklus

Može se zamijetiti da je NEDC ciklus takoreći „najumjetniji“ od svih navedenih ciklusa. Sastoji se od nerealistično sporih ubrzanja, primjerice tipično ubrzanje od 0 km/h do 50 km/h koje se triput ponavlja unutar ciklusa traje 23s. Karakteriziraju ga linearne promjene brzine ili konstantne brzine vožnje, što bi značilo da nije izrazito dinamičan. No, samim time što nije dinamičan, lako je zamijetiti prelaske iz jedne funkcionalnosti u drugu i uvjete koji ih uzrokuju.

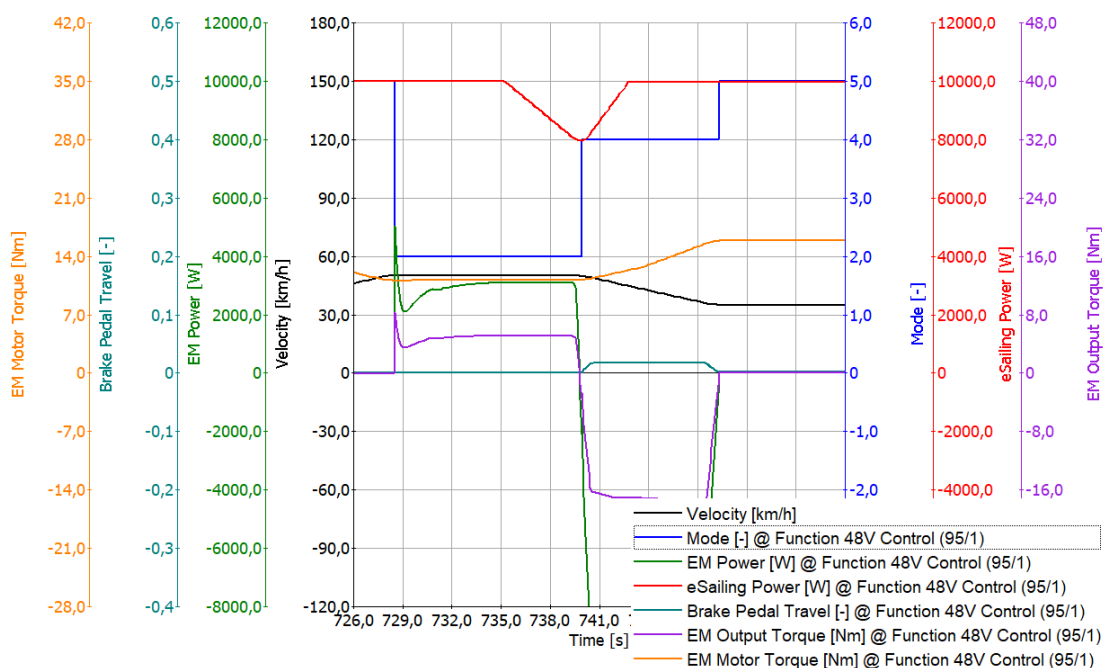
#### *Funkcionalnost sporohodne električne vožnje - CR*

Može se zamijetiti da su prilikom ulaska u funkcionalnost sporohodne električne vožnje [Slika 5.7.] zadovoljeni svi potrebni uvjeti za ulazak u spomenutu funkcionalnost. Stupanj prijenosa je kroz cijelo trajanje funkcionalnosti niži od dva (svijetloplava linija), snaga dostupna za funkcionalnost sporohodne električne vožnje (crvena linija) je kroz cijelo trajanje funkcionalnosti veća od trenutne snage na elektromotoru (zelena linija). SUI motor se isključuje tek nakon 15 s (ljubičasta linija), što bi odgovaralo vremenu prve aktivacije motora. Također, može se zamijetiti da se funkcionalnost isključuje kada vozilo dosegne brzinu od 16 km/h (crna linija), što je bilo ranije definirano u parametrima vozila. Mod (plava linija) prelazi iz vrijednosti pet u jedan pa opet u pet što bi značilo da se vozilo pokreće iz moda KON zatim prelazi u CR pa opet u KON kada nestanu uvjeti za CR.



**Slika 5.7. Provjera uvjeta za ulazak u funkcionalnost sporohodne električne vožnje iz pokretanja vozila**

Sljedeća funkcionalnost u koju vozilo može ući jest aktivno električno krstarenje. Iz dijagrama toka [Slika 4.3.] mogu se jasno vidjeti uvjeti ulaska u funkcionalnost aktivnog električnog krstarenja. Prilikom analize simulacije može se zaključiti da su uvjeti za ulazak u prije spomenutu funkcionalnost zadovoljeni ( $t = 728$  s) [Slika 5.9].

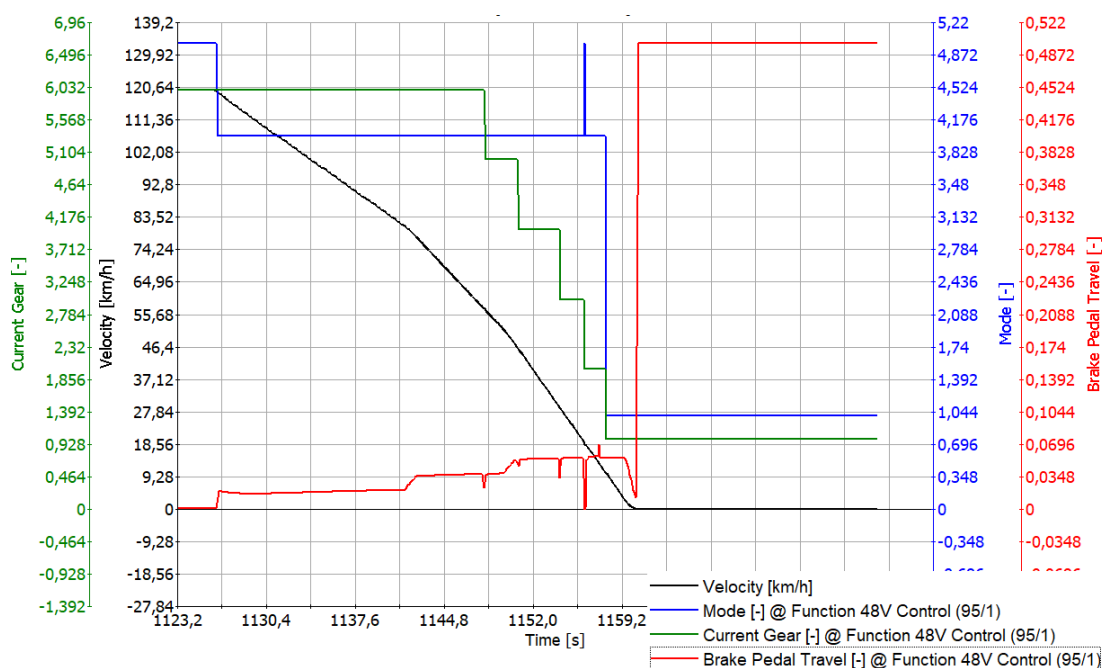


**Slika 5.8. Provjera uvjeta za ulazak i izlazak iz funkcionalnosti aktivnog električnog krstarenja**

Može se zamijetiti da se iz moda 5 (KON) prelazi u mod 2 (SA, plava linija kad se vozilo vozi duže od 2 s unutar raspona brzine od 2 km/h (crna linija) što je zadano u parametrima vozila. Također, željeni moment elektromotora (ljubičasta linija) mora biti manji od maksimalnog momenta što elektromotor može ponuditi (narančasta linija). Trenutna snaga elektromotora koju može ponuditi u tom trenutku (zelena linija) mora biti manja od trenutno dostupne snage za funkcionalnost aktivnog električnog kočenja (crvena linija). Nadalje, papučica pedale kočnice ne smije biti pritisnuta (svijetloplava linija). Kao što se sa [Slike 5.8.] može vidjeti, ovaj uvjet je prekršen ( $t = 740$  s) pa se time izlazi iz funkcionalnosti aktivnog električnog krstarenja.

### Regenerativno kočenje

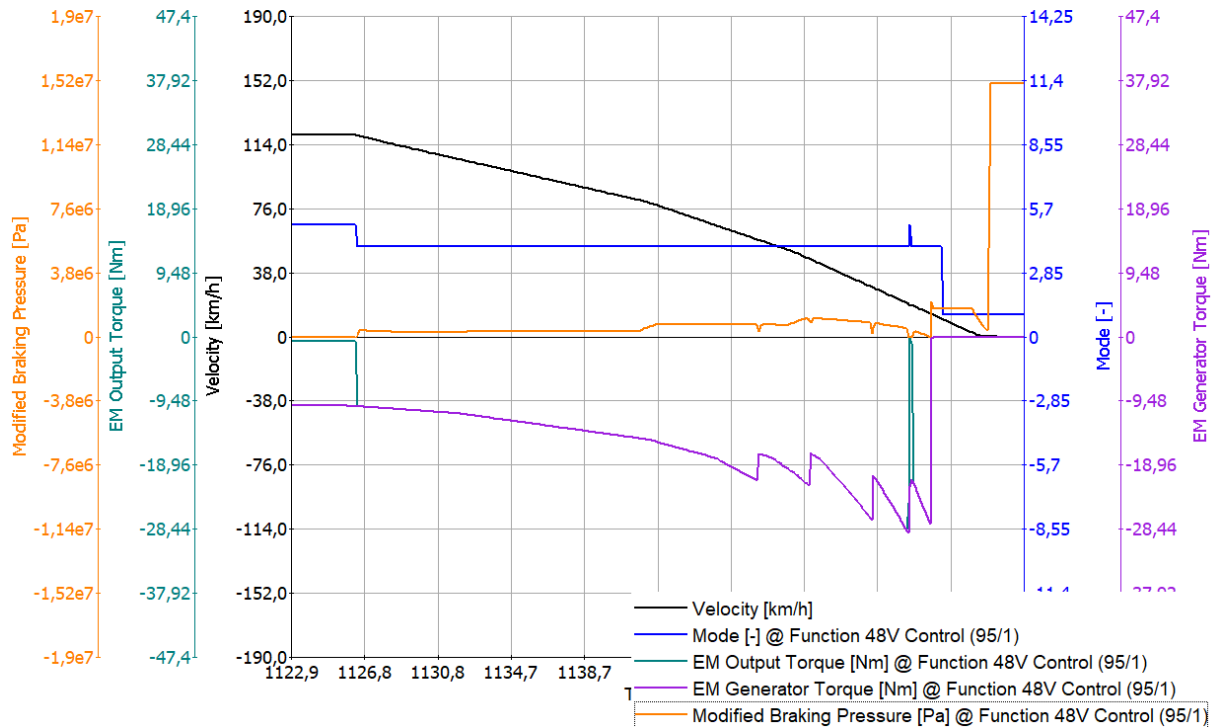
Zadnja funkcionalnost koja će se analizirati na ovom ciklusu jest regenerativno kočenje [Slika 5.9.].



**Slika 5.9. Provjera uvjeta za ulazak u funkcionalnost regenerativnog kočenja i izlazak u funkcionalnost sporohodne vožnje**

U funkcionalnost regenerativnog kočenja se u ovom primjeru ulazi iz moda 5 (KON) ( $t = 1127$  s), te se jednom nakratko prebacuje u mod KON ( $t = 1155$  s) opet prije nego što potpuno prijeđe u mod 1 (CR) ( $t = 1157$  s). To se događa jer model vozača nakratko pritisne papučicu akceleratora i odmah ju otpusti pri promjeni stupnja prijenosa i nastavi dalje kočiti. Ova pojava nema nikakvog utjecaja na udobnost vožnje iz razloga jer je SUI motor svejedno uvijek

uključen zbog potrebe rada popratnih uređaja kao što su pumpa kočnica i pumpa servo volana. Nadalje, može se vidjeti da pri usporavanju gotovo u svakom trenutku pritisnuta kočnica (crvena linija) te da se tek pri promjeni stupnja prijenosa u 1 (zeleno) vozilo prebacuje u mod 1 (CR) ( $t = 1157$  s) što odgovara upravljačkoj strategiji.



**Slika 5.10. Provjera funkcioniranja zajedničkog rada mehaničkih kočnica i regenerativnog kočenja**

Kao što se sa [Slike 5.10.] može vidjeti, na elektromotor (svijetloplava linija) je narinut maksimalni kočni moment elektromotora (ljubičasta linija) te se taj iznos još nadopunjuje modificiranim kočnim tlakom (narančasta linija) koji se jednoliko raspodjeljuje na sve mehaničke kočnice vozila.

Budući da načini prebacivanja funkcionalnosti i njihova rada funkcioniraju jednako pri svim voznim ciklusima, samo su se na NEDC voznom ciklusu prikazale te karakteristike zbog konciznog i jezgrovitog prikaza rada.

#### *Analiza potrošnje goriva*

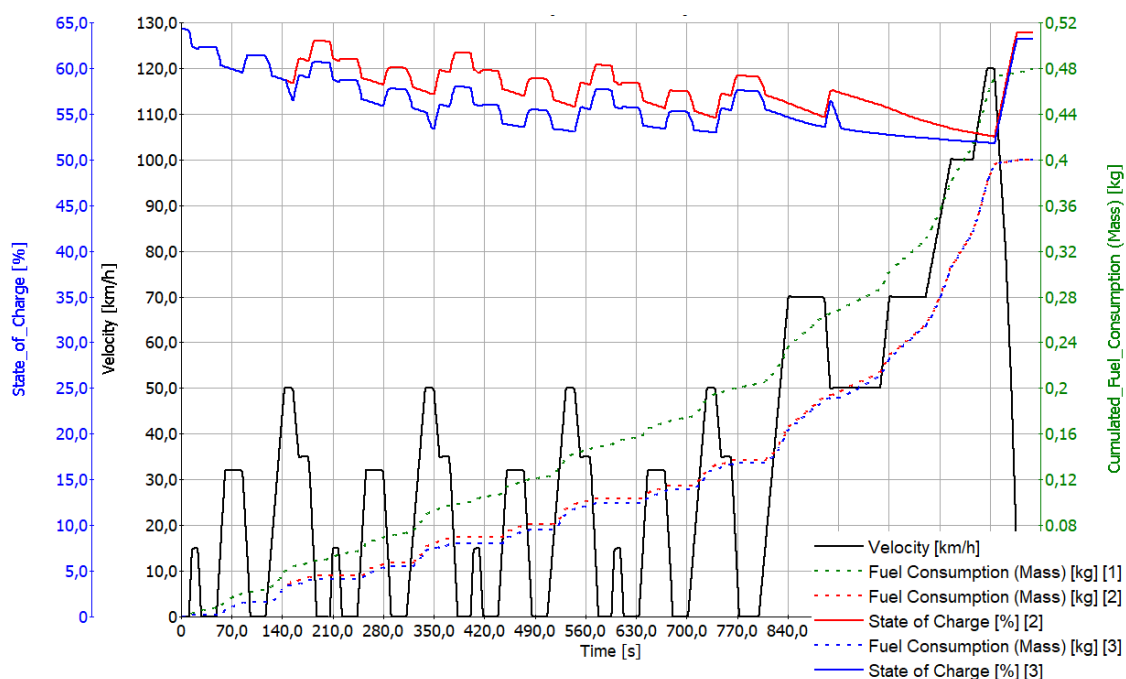
Za preostale vozne cikluse, kao u nastavku za NEDC ciklus, će se prikazati usporedba potrošnje goriva i analiza SoC-a baterije HEV-a s razvijenom upravljačkom strategijom sa konvencionalnim vozilom te će se još evaluirati voznost.

Pri usporedbi s konvencionalnim vozilom će se uspoređivati dvije verzije hibridnog vozila:

- sa uključenim funkcionalnostima sporohodne električne vožnje i regenerativnog kočenja
- sa uključenim funkcionalnostima sporohodne električne vožnje, aktivnog električnog krstarenja i regenerativnog kočenja

Unutar ovih dvaju verzija hibridnog vozila je uključena i funkcionalnost pasivnog električnog krstarenja, ali se ona neće aktivirati zbog razloga navedenih u [Poglavlju 5.3.]. Nadalje, razlog ovakvog grupiranja funkcionalnosti jest što su funkcionalnosti sporohodne električne vožnje i regenerativnog kočenja ključne i centralne funkcionalnosti hibridnog vozila i na neki način su neodvojive od samog funkcioniranja vozila. Dok s druge strane funkcionalnost aktivnog električnog krstarenja može biti uključena i isključena od strane vozača ovisno o njegovom raspoloženju i voznim navikama i nije presudna za samo funkcioniranje vozila.

Početna stanja napunjenosti baterije u svim simulacijama će se varirati, a vrijednosti će iznositi: 90%, 70%, 50% i 30%. Vozilo će imati masu od 1779,5 kg.



**Slika 5.11. Usporedba trajektorija SoC-a i potrošnje goriva na NEDC voznom ciklusu za tri konfiguracije: [1] Konvencionalna, [2] Hibridna bez SA, [3] Hibridna sa SA**

Na [Slici 5.11.] je prikazana trajektorija kumulativne potrošnje goriva i stanje SoC-a za početni SoC 63,4% kroz trajanje NEDC voznog ciklusa za sva tri navedene konfiguracije ([1] Konvencionalna, [2] Hibridna bez SA, [3] Hibridna sa SA):

- crtkana zelena linija – masena potrošnja goriva konvencionalnog vozila. Stanje SoC-a za konvencionalno vozilo nije dano jer SoC nije relevantan za konvencionalno vozilo,



odnosno ne mijenja se. Iz tog razloga je samo narinut moment alternatora da emulira opterećenje SUI motoru kako bi i pravi alternator pravio.

- crtkana crvena linija – masena potrošnja goriva hibridnog vozila bez aktivnog električnog krstarenja
- puna crvena linija – stanje SoC-a baterije hibridnog vozila bez aktivnog električnog krstarenja
- crtkana plava linija – masena potrošnja goriva hibridnog vozila s aktivnim električnim krstarenjem
- puna plava linija – stanje SoC-a baterije hibridnog vozila s aktivnim električnim krstarenjem

Ovakav način označavanja linija će se koristiti također pri analizi na ostalim ciklusima. Kao što se sa slike može zaključiti, potrošnje goriva obje verzije hibridnog vozila su podjednake, dok potrošnja goriva konvencionalnog vozila podosta odstupa. Prema stanju SoC-a se može zaključiti gdje se koristi aktivno električno krstarenje, no sama ta funkcionalnost ne donosi naročitu prednost u ovom slučaju jer su intervali te funkcionalnosti dosta kratki te se ne stigne dovoljno dugo voziti pomoću elektromotora. Na kraju iznosi SoC-a dosegnu iste vrijednosti zbog djelovanja alternatora koji puni bateriju i ujednačava iznose SoC-a. Također još jedan nedostatak kratkih intervala vožnje u toj funkcionalnosti jest da se ponovnim uključanjem motor opet mora zaletjeti na brzinu praznog hoda što također zahtjeva određenu količinu goriva. U sljedećoj tablici bit će dan pregled razlika u potrošnji goriva dan u ovisnosti o početnom SoC-u baterije i izračun voznosti [Tablica 5.1.].

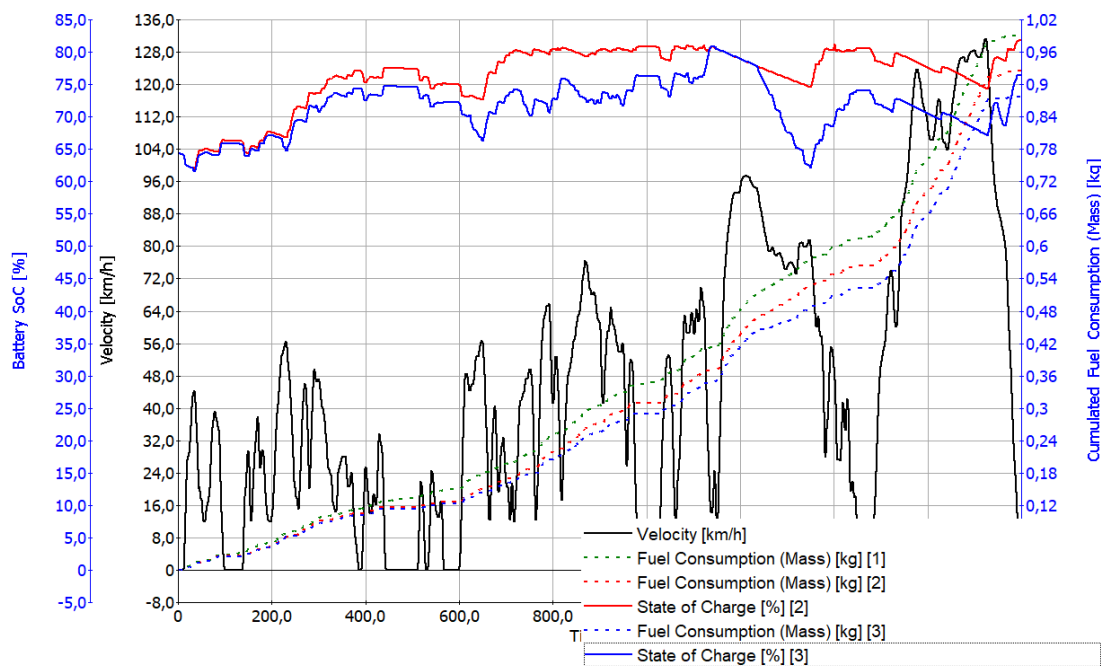
**Tablica 5.1. Potrošnja goriva i voznost na NEDC voznom ciklusu za različite početne vrijednosti SoC-a**

Konfiguracija	$V_f$ [l/100km]	SoC <sub>initial</sub> [%]	SoC <sub>final</sub> [%]	$V_{f,corr}$ [l/100km]	$\Delta V$ [%]	d [%]
Konvencionalna	5,34	-	-	-	-	0
Hibridna bez SA	4,38	90	80,33	4,46	-16,48	0,09
Hibridna sa SA	4,11	90	63,17	4,34	-18,73	0,09
Hibridna bez SA	4,36	70	67,85	4,41	-17,42	0,09
Hibridna sa SA	4,29	70	63,17	4,35	-18,51	0,09
Hibridna bez SA	4,59	50	63,55	4,47	-16,29	0,07
Hibridna sa SA	4,62	50	62,81	4,68	-12,34	0,07
Hibridna bez SA	4,90	30	63,59	4,60	-13,86	0,06
Hibridna sa SA	4,92	30	63,20	4,63	-13,30	0,06

Kao što se iz rezultata može zaključiti, hibridna konfiguracija s aktivnim električnim krstarenjem postiže bolje rezultate pri stanjima napunjenosti baterije od 90% i 70%, a to proizlazi iz činjenice da je baterija već dovoljno napunjena pa ostaje dovoljno energije za upotrebu aktivnog električnog krstarenja. Budući da se na nižim početnim stanjima napunjenosti baterije uključuje moment alternatora zbog održivosti SoC-a baterije, aktivno električno krstarenje samo dodatno opterećuje bateriju te zato polučuje lošije rezultate. Bolji rezultati bi se mogli ostvariti podešavanjem korisničkih parametara pragova ulaska u funkcionalnosti. Iz rezultata voznosti se može zaključiti da sve tri konfiguracije imaju vrlo male do nikakve greške praćenja brzine vožnje što znači da su sve konfiguracije izrazito vozljive.

### 5.2.2. WLTP vozni ciklus

WLTP je globalni standardizirani vozni ciklus koji je u uporabi od rujna 2017. godine. Trenutno je u tranzicijskom periodu što znači da nije još u stopostotnoj uporabi. Može bolje opisivati stvarnu vožnju od NEDC ciklusa iz razloga što mu je prosječna brzina veća, vrijeme ciklusa duže te mu je oblik općenito prirodni i bolje opisuje moderne uvjete vožnje [18]. No, iako ovaj ciklus predstavlja poboljšanje u usporedbi s NEDC ciklusom, WLTP ciklus je i dalje nerealistično spor. Na primjer, najbrže ubrzanje 0-50 km/h na cijelom ciklusu iznosi 15 s, a može se zamijetiti kako ubrzanja sa semafora do 50 kilometara na sat u realnoj situaciji iznose otprilike 5-10 s.



**Slika 5.12. Usporedba trajektorija SoC-a i potrošnje goriva na WLTP voznom ciklusu za tri konfiguracije: [1] Konvencionalna, [2] Hibridna bez SA, [3] Hibridna sa SA**

Budući da su se u prošlom poglavlju opisali uvjeti uključenja i isključenja funkcionalnosti, u ovom poglavlju će se direktno prijeći na analizu rezultata.

Kao i u prošlom potpoglavlju, korištene su identične postavke vozila, od parametara upravljačke strategije, preko početnih stanja napunjenosti baterije, do mase vozila.

Kao što se sa [Slike 5.12.] može zaključiti, potrošnja goriva se znatno razlikuje u sve tri konfiguracije. Prvo se razlikuje između konvencionalne vožnje i hibrida bez aktivnog električnog krstarenja jer je u ciklusu prisutno podosta stajanja, kretanja i naglih kočenja. No, također u ciklusu postoji mnogo dionica s poprilično konstantnom brzinom vožnje čime se omogućuje pokazivanje prednosti strategije s aktivnim električnim krstarenjem u smislu njenog doprinosa smanjenju potrošnje goriva. Također, možemo zamijetiti kako konačna stanja napunjenosti baterije oba hibridna vozila završavaju na razini većoj od početne. To se može smatrati kao pozitivna stavka no još bi bilo bolje kada bi se ta uskladištena energija mogla upotrijebiti kroz bolje podešene parametre upravljačke strategije ili eventualno čak kroz neku drugu dodanu funkcionalnost. U [Tablici 5.2.] dane su numeričke vrijednosti potrošnje goriva u ovisnosti o početnom SoC-u i voznosti između korištenih konfiguracija.

**Tablica 5.2. Potrošnja goriva i voznost na WLTP voznom ciklusu za različite početne vrijednosti SoC-a**

Konfiguracija	$V_f$ [l/100km]	SoC <sub>initial</sub> [%]	SoC <sub>final</sub> [%]	$V_{f,corr}$ [l/100km]	$\Delta V$ [%]	d [%]
Konvencionalna	5,11	-	-	-	-	0
Hibridna bez SA	4,77	90	81,74	4,84	-5,28	0
Hibridna sa SA	4,45	90	75,13	4,58	-10,37	0
Hibridna bez SA	4,77	70	81,74	4,60	-9,98	0
Hibridna sa SA	4,43	70	75,09	4,38	-14,29	0
Hibridna bez SA	4,78	50	81,74	4,50	-11,94	0
Hibridna sa SA	4,50	50	65,91	4,36	-14,68	0
Hibridna bez SA	4,91	30	81,76	4,46	-12,72	0
Hibridna sa SA	4,64	30	65,83	4,33	-15,26	0

Iz rezultata se može vidjeti da poboljšanja nisu toliko značajna u usporedbi s poboljšanjima na NEDC ciklusu. To se može pripisati činjenici da je ciklus ima više konstantne vožnje, a ne toliko stani-kreni načina vožnje što pogoduje konvencionalnoj konfiguraciji. Također se može zaključiti da generalno bolje rezultate ostvaruje konfiguracija s aktivnim električnim krstarenjem. Razlog tomu je da karakteristika ovog ciklusa da postoji mnogo prilika za

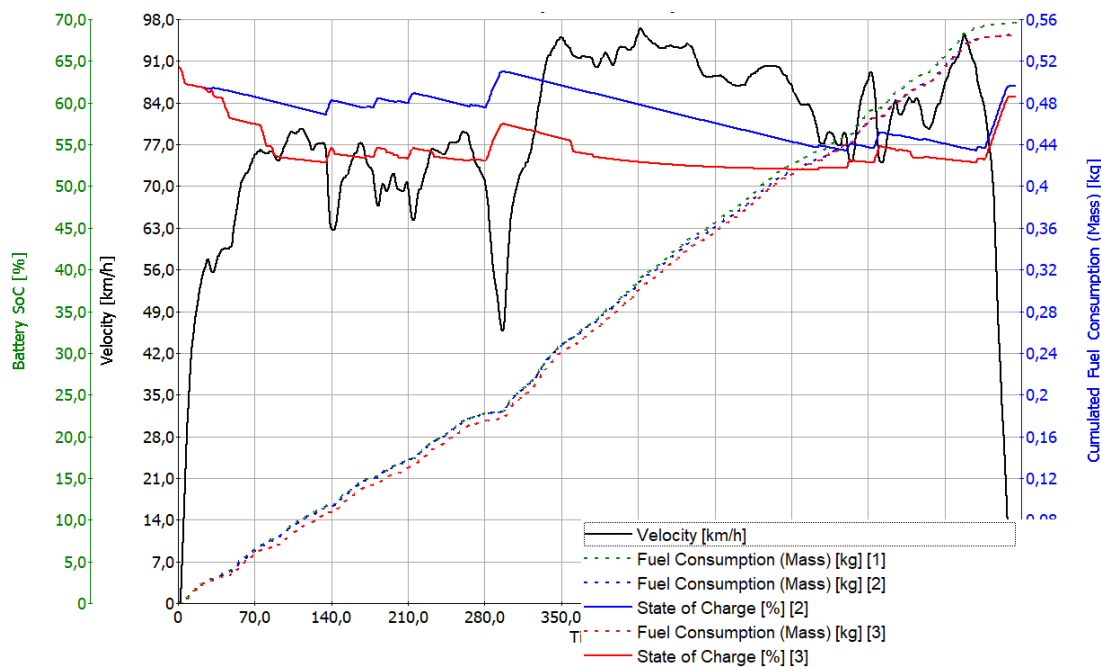
sakupljanje energije regenerativnim kočenjem pa je povoljnije svu tu energiju iskoristiti nego ju ostaviti u bateriji zbog manje potrošnje goriva i zbog samog „zdravlja“ baterije. Kao što se iz tablice može vidjeti, sva tri vozila imaju savršenu voznost.

### 5.2.3 HWFET vozni ciklus

HWFET vozni ciklus je vozni ciklus razvijen u SAD-u za potrebe određivanja potrošnje goriva osobnih vozila na autocesti. U ovom poglavlju će se isto direktno prijeći na analizu rezultata.

Kao i u prethodna dva poglavlja, korištene su identične postavke vozila, od parametara upravljačke strategije, preko početnih stanja napunjenosti baterije, do mase vozila.

Prilikom analize potrošnje goriva i punjenja i pražnjenja baterije [Slika 5.13.] korištene su tri testne konfiguracije kao i u zadnja dva potpoglavlja.



**Slika 5.13. Usporedba trajektorija SoC-a i potrošnje goriva na HWFET voznom ciklusu za tri konfiguracije: [1] Konvencionalna, [2] Hibridna bez SA, [3] Hibridna sa SA**

Sa slike se može zamijetiti kako su potrošnje goriva sve tri ispitne konfiguracije gotovo jednake. Razlog leži u tome što pri visokim brzinama vozila elektromotor ne može toliko pridonositi kretanju vozila jer mu ponestane raspoložive snage i momenta. Također još jedna karakteristika voznog ciklusa je što cijeli vozni ciklus ima samo jedno kretanje i zaustavljanje pa ovdje funkcionalnost sporohodne vožnje ne može puno pridonijeti. U [Tablici 5.3.] su dane vrijednosti voznosti i korigirane potrošnje goriva u ovisnosti o početnom SoC-u.

**Tablica 5.3. Potrošnja goriva i voznost na HWFET voznom ciklusu za različite početne vrijednosti SoC-a**

Konfiguracija	$V_f$ [l/100km]	SoC <sub>initial</sub> [%]	SoC <sub>final</sub> [%]	$V_{f,corr}$ [l/100km]	$\Delta V$ [%]	d [%]
Konvencionalna	4,04	-	-	-	-	0
Hibridna bez SA	3,95	90	78,80	4,05	0,25	0
Hibridna sa SA	3,71	90	60,56	3,97	-1,73	0
Hibridna bez SA	3,95	70	67,52	3,97	-1,73	0
Hibridna sa SA	3,90	70	60,14	3,92	-2,97	0
Hibridna bez SA	4,06	50	61,10	3,96	-1,98	0
Hibridna sa SA	4,06	50	60,57	3,97	-1,73	0
Hibridna bez SA	4,23	30	61,10	3,96	-1,98	0
Hibridna sa SA	4,23	30	60,60	3,96	-1,98	0

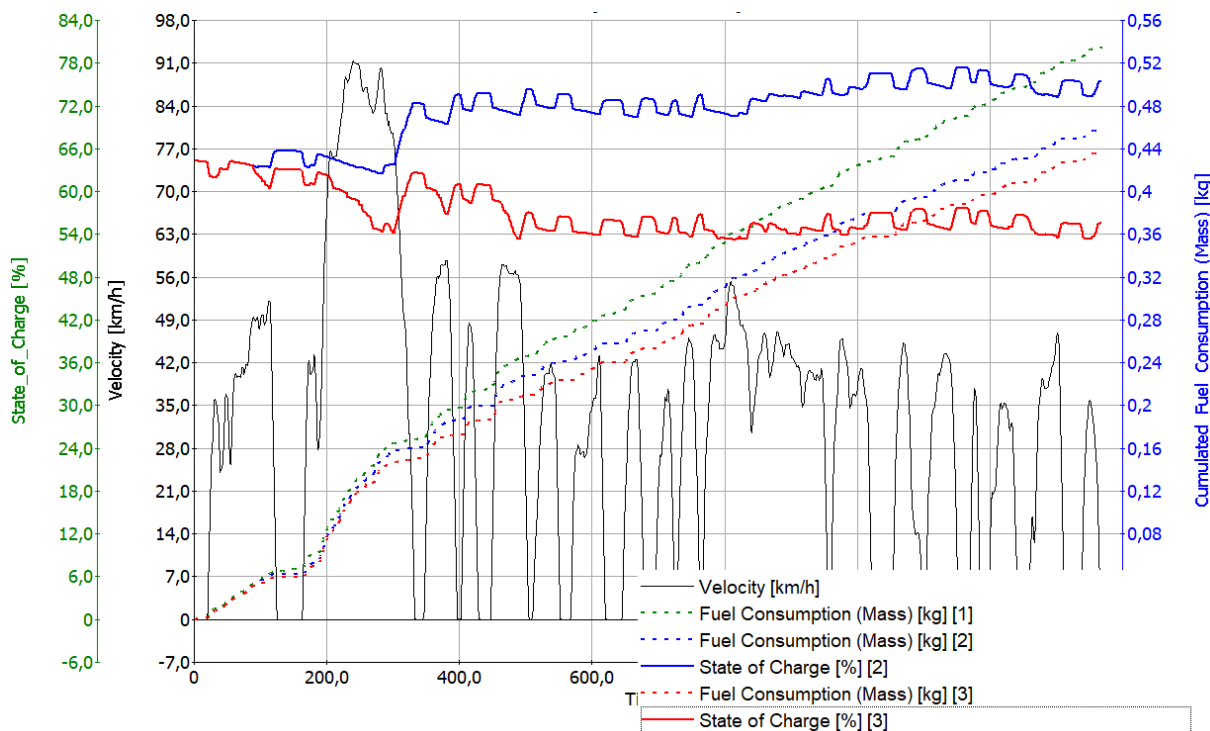
Kao što se iz tablice može zaključiti, hibridizacija pogona nije donijela nikakve značajne uštede u smislu potrošnje goriva na ovom voznom ciklusu. Kao što je prethodno spomenuto, to proizlazi iz činjenice da je hibridni sustav (baterija i elektromotor) poddimenzioniran te ne može podnijeti potrebna opterećenja vožnje na visokim brzinama. Također se može zamijetiti kako vozilo s funkcionalnošću aktivnog električnog krstarenja postiže bolje rezultate pri većini početnih vrijednosti SoC-a iako je razlika premala da bi se čvrsto moglo uhvatiti za taj zaključak. Kao i na prošlom voznom ciklusu, vozilo može savršeno pratiti željeni profil brzine pa je samim time i voznost odlična.

#### 5.2.4. UDDS vozni ciklus

UDDS vozni ciklus je vozni ciklus razvijen u SAD-u za potrebe određivanja potrošnje goriva osobnih vozila u gradskim uvjetima. Također, iako je originalno osmišljen kao referentni vozni ciklus za vozila pogonjena fosilnim gorivima, koristi se i za estimaciju dometa električnog vozila sa jednim punjenjem baterije [19]. Prilikom analize potrošnje goriva i punjenja i pražnjenja baterije [Slika 5.14.] korištene su tri testne konfiguracije kao i u zadnja tri potpoglavlja.

Kao što se sa slike može zaključiti, potrošnja goriva konvencionalnog vozila je mnogo veća od potrošnje goriva hibridnog vozila. To proizlazi iz razloga kojeg smo vidjeli i u prošlim voznim ciklusima, a to je da hibridnom vozilu najviše odgovara gradska vožnja zbog čestih stajanja i kretanja te se time može uštedjeti znatna količina goriva. Također prisutna je znatna razlika u konačnom SoC-u baterije između hibridnog vozila s aktivnim električnim krstarenjem i bez

aktivnog električnog krstarenja. Kakav to utjecaj ima na potrošnju goriva uz variranje početnog SoC-a će se moći bolje razaznati nakon tablične analize rezultata [Tablica 5.4.].



**Slika 5.14. Usporedba trajektorija SoC-a i potrošnje goriva na UDDS voznom ciklusu za tri konfiguracije: [1] Konvencionalna, [2] Hibridna bez SA, [3] Hibridna sa SA**

**Tablica 5.4. Potrošnja goriva i voznost na UDDS voznom ciklusu za različite početne vrijednosti SoC-a**

Konfiguracija	$V_f$ [l/100km]	SoC <sub>initial</sub> [%]	SoC <sub>final</sub> [%]	$V_{f,corr}$ [l/100km]	$\Delta V$ [%]	d [%]
Konvencionalna	5,34	-	-	-	-	0
Hibridna bez SA	4,61	90	78,43	4,71	-11,80	0
Hibridna sa SA	4,29	90	69,13	4,47	-16,29	0
Hibridna bez SA	4,59	70	78,48	4,52	-15,36	0
Hibridna sa SA	4,32	70	55,83	4,44	-16,85	0
Hibridna bez SA	4,65	50	66,33	4,51	-15,54	0
Hibridna sa SA	4,53	50	55,75	4,48	-16,10	0
Hibridna bez SA	4,91	30	64,29	4,61	-13,67	0
Hibridna sa SA	4,80	30	55,38	4,58	-14,23	0

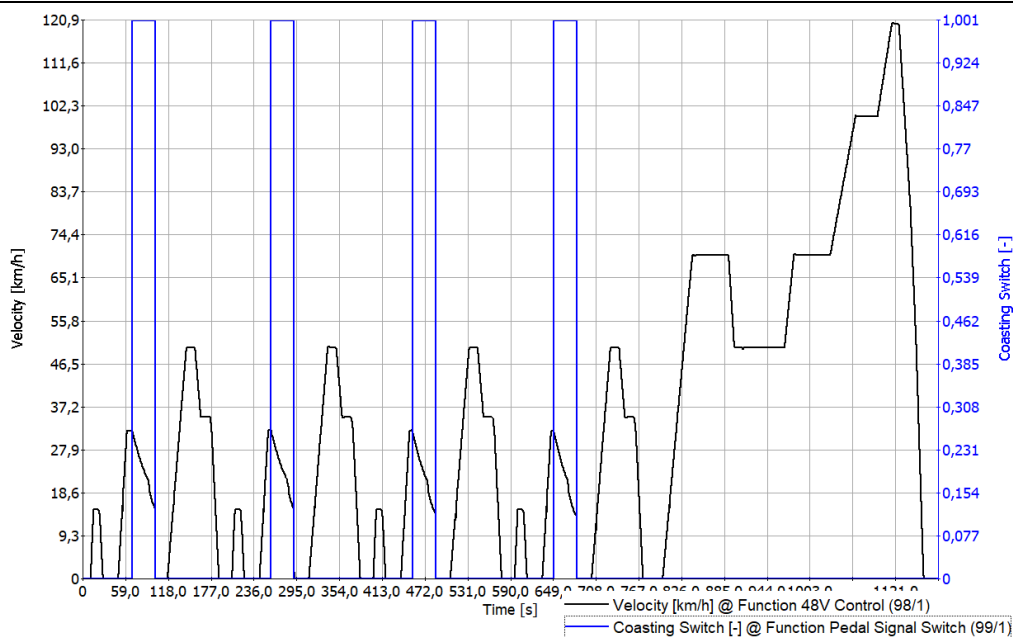
Iz tablice možemo zaključiti kako je korigirana potrošnja goriva hibridnog vozila značajno smanjena u odnosu na konvencionalno vozilo. Budući da unutar ovog ciklusa dolazi do čestih usporavanja, brzo se može rekuperirati energija i skladištiti u bateriju. Kako dolazi do tako brzog punjenja baterije, hibridno vozilo bez aktivnog električnog krstarenja nema gdje potrošiti energiju, dok vozilo s aktivnim električnim krstarenjem može energiju potrošiti na kratkim dionicama konstantne brzine vožnje. U tim slučajevima može trošiti energiju jer su brzine konstantne vožnje u gradskim uvjetima niže nego na autocesti te samim time elektromotor i baterija mogu podnijeti takva opterećenja. Sve to vodi do zaključka da pri svim početnim vrijednostima SoC-a konfiguracija s aktivnim električnim krstarenjem postiže veće uštede u potrošnji goriva. Naposljetku, možemo zamijetiti kako je voznost u sva tri slučaja odlična, odnosno vozilo savršeno prati željeni profil brzine.

### 5.3. Analiza simulacije funkcionalnosti pasivnog električnog krstarenja

Kao što je bilo prethodno naglašeno, funkcionalnost pasivnog električnog krstarenja se ne može simulirati na standardnim voznim ciklusima koji su ranije spomenuti. Nemogućnost simulacije proizlazi iz same definicije voznog ciklusa i vozača. Naime, budući da je vozni ciklus definiran kao profil brzine u vremenu, a vozač kao PI regulator brzine vozila, zbog integracijskog djelovanja vozača vozilo će u svakom trenutku imati pritisnutu pedal akceleratora ili kočnice da može savršeno pratiti danu brzinu ciklusa. Ako se prisjetimo uvjeta za ulazak u funkcionalnost pasivnog električnog krstarenja [Slika 4.4.], tamo je definirano ako vozilo želi ući u funkcionalnost mora imati otpuštene pedale akceleratora i kočnice. Iz tog razloga je bilo potrebno modificirati jedan ciklus da ti uvjeti budu zadovoljeni. Odabrani ciklus za modifikaciju je NEDC ciklus jer je u njemu najlakše implementirati djelovanje funkcionalnosti te se u njemu može dati usporedba s konvencionalnim vozilom da se dobije osjećaj uštede goriva. Na [Slici 5.15.] prikazan je profil brzine (crna linija) modificiranog NEDC ciklusa s takozvanim intervalima krstarenja (plava linija).

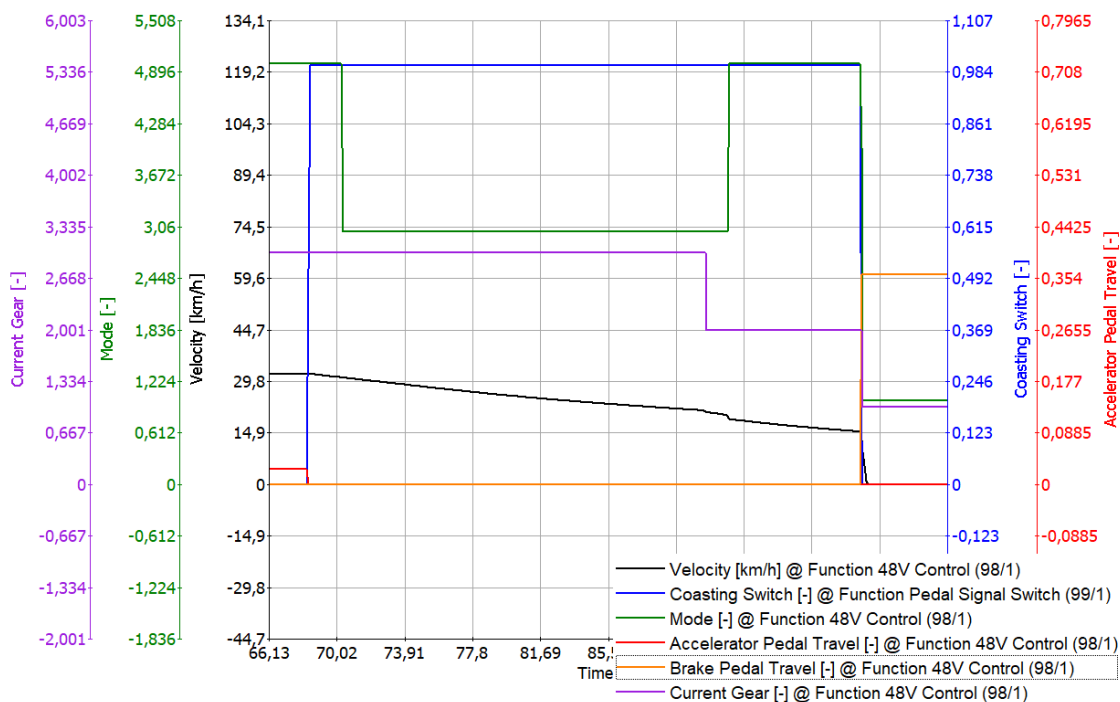
Upravljačke konstante za potrebe testiranja postavljene su na sljedeći način:  $\Delta t_{KCO} = \Delta t_{KSA} = \Delta t_{KCR} = \Delta t_{RCO} = 2$  s,  $v_{maxCR} = 16$  km/h,  $v_{maxCO} = 110$  km/h,  $v_{maxSA} = 100$  km/h,  $v_{maxSS} = 5$  km/h,  $v_{minSA} = 40$  km/h,  $v_{minCO} = 20$  km/h,  $\Delta v_{ref} = 2$  km/h,  $t_{firstact} = 15$  s,  $t_{react} = 1$  s,  $t_{shutoff} = 1$  s.

Nakon testiranja upravljačke strategije pasivnog električnog krstarenja [Slika 5.16.] možemo vidjeti da su svi uvjeti za ulazak u funkcionalnost zadovoljeni, tj. kroz trajanje cijelog intervala signali pedala akceleratora (crvena linija) i kočnice (narančasta linija) su postavljeni na vrijednost nula.



**Slika 5.15. Modificirani NEDC ciklus s intervalima krstarenja**

No, sa slike se može vidjeti da je potrebno pričekati 2 s prije nego što mod (plava linija) prijeđe sa vrijednosti 5 (KON) u 3 (CO), što je vrijednost vremenske zadržke definirane upravljačkom konstantom. Nadalje, sa slike se može vidjeti da čim brzina vozila padne ispod 20 km/h (crna linija), vozilo izlazi iz funkcionalnosti pasivnog električnog krstarenja i ulazi u konvencionalnu vožnju što je također bio parametar definiran upravljačkom strategijom ( $v_{minCO}$ ).



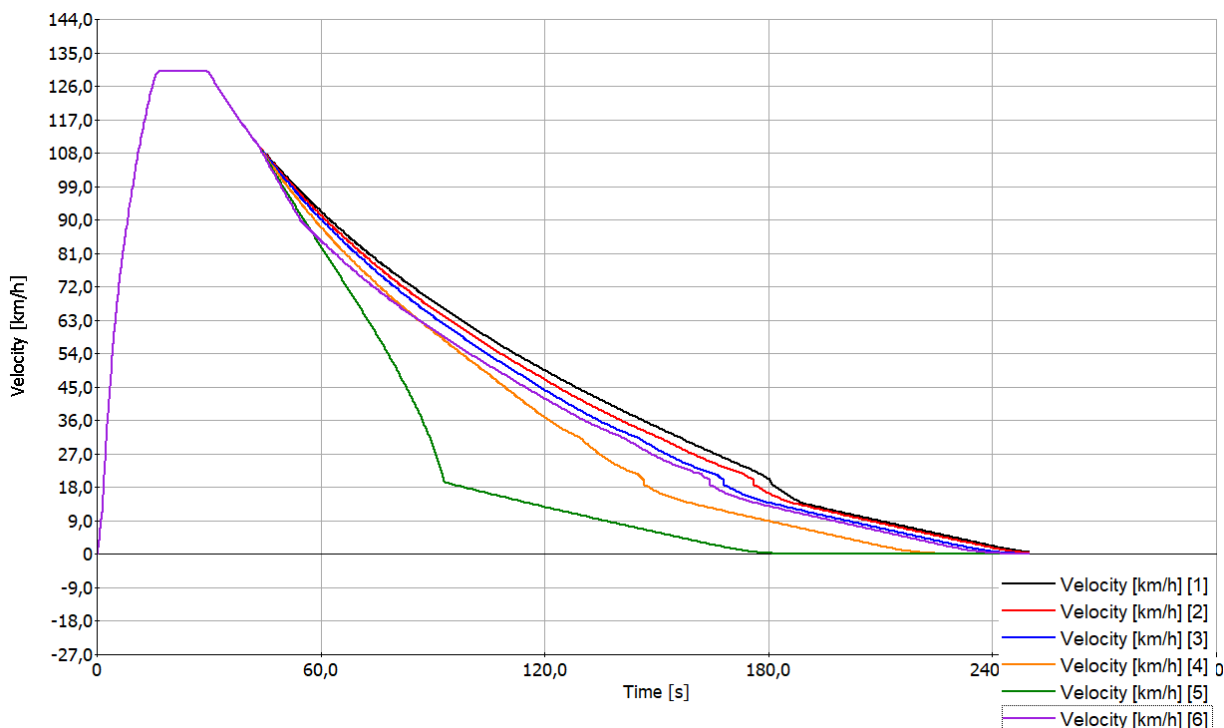
**Slika 5.16. Provjera uvjeta za ulazak i izlazak iz funkcionalnosti pasivnog električnog krstarenja**



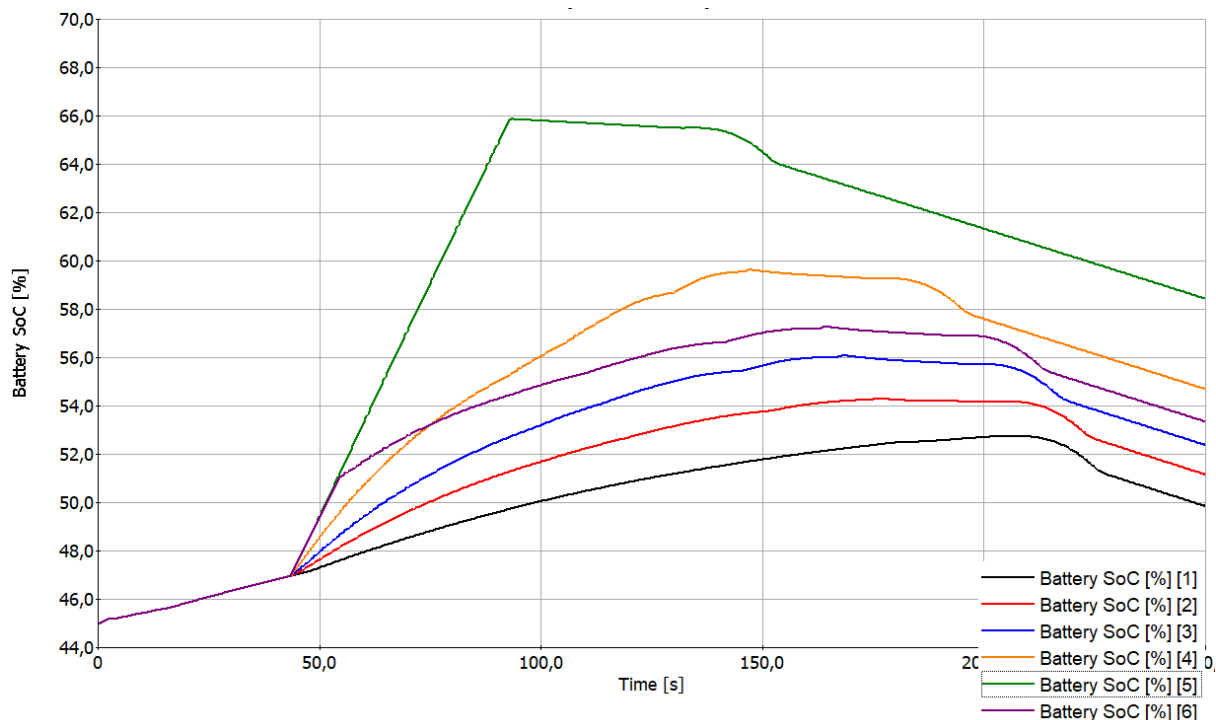
Da bi se vidjela ispravnost funkcioniranja definiranih režima krstarenja, na [Slici 5.17.] su prikazana usporavanja vozila sa brzine 130 km/h pomoću pasivnog električnog krstarenja u odabranom režimu krstarenja. Također je prikazano rezultirajuće punjenje baterije [Slika 5.18.]. Kao što se može vidjeti sa [Slike 5.17.], naglije usporavanje tek kreće od brzine 110 km/h. Razlog tomu je taj što se tek onda uključuje pasivno električno krstarenje jer je tako definirano upravljačkom konstantom. Početna vrijednost SoC-a baterije u ovom slučaju [Slika 5.18.] [Slika 5.17.] je iznosila 45%.

Parovi režima krstarenja i odgovarajućih linija na sljedeće dvije slike:

- Režim krstarenja 0 – crna boja
- Režim krstarenja 1 – crvena boja
- Režim krstarenja 2 – plava boja
- Režim krstarenja 3 – narančasta boja
- Režim krstarenja 4 – zelena boja
- Režim krstarenja 5 – ljubičasta boja



**Slika 5.17. Prikaz različitih brzina usporavanja ovisno o režimu krstarenja**

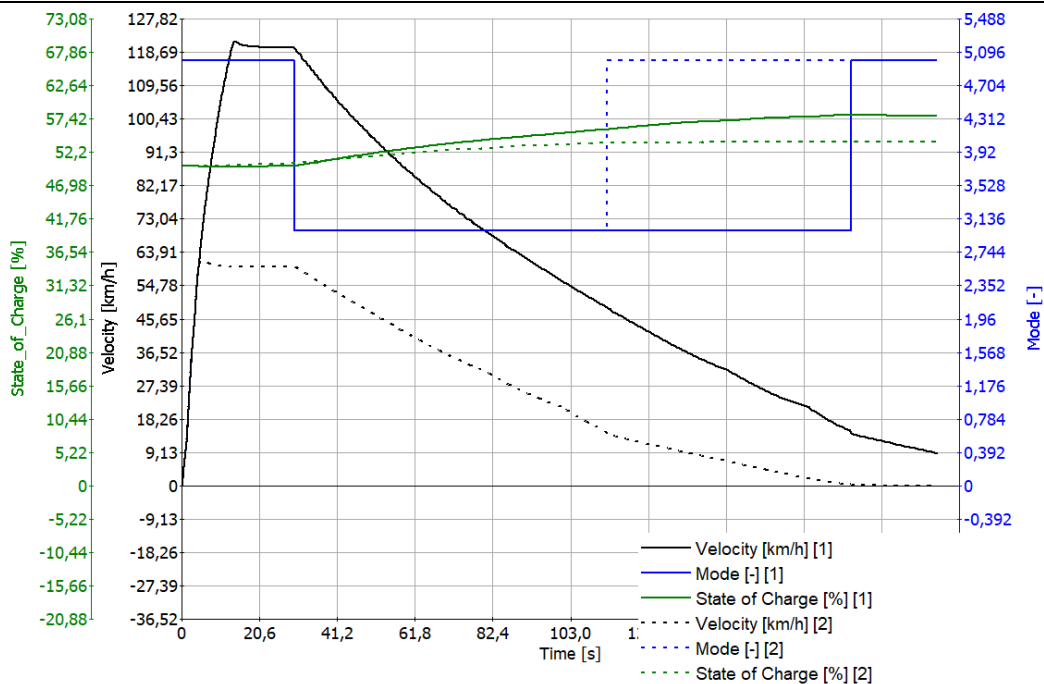


**Slika 5.18. Prikaz različitih brzina punjenja baterije ovisno o režimu krstarenja**

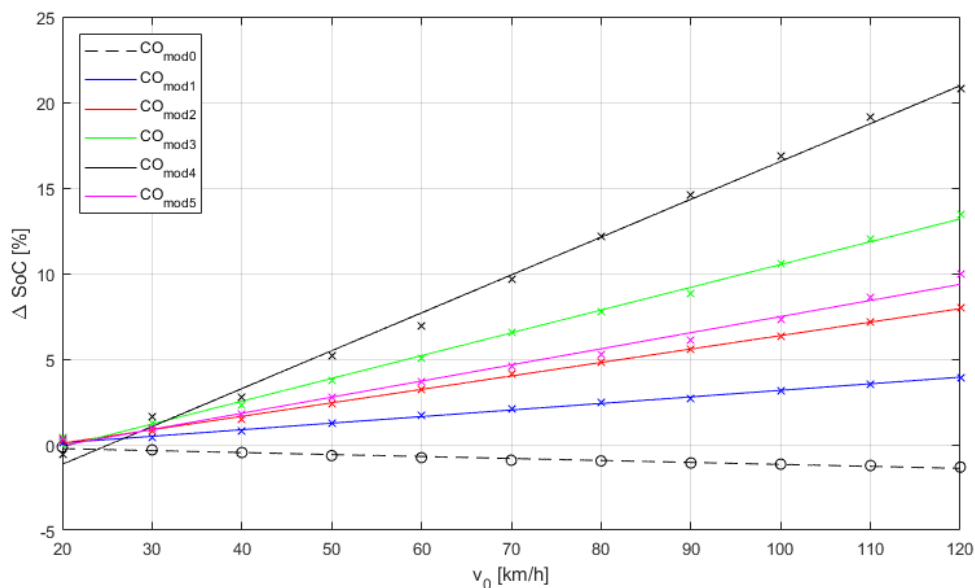
Sljedeća stvar koju je potrebno analizirati jest punjenje baterije u ovisnosti o režimu krstarenja u kojem se vozilo nalazi i u ovisnosti o brzini s koje usporava. Analiza je provedena tako da se vozilo u različitim režimima sa početnim SoC-om baterije od 50% ubrzavalo na brzinu od 20 do 120 km/h te se usporavalo na brzinu od 15 km/h. Bilježile su se vrijednosti na ulasku i izlasku iz pasivnog električnog krstarenja. Također, test se odvijao bez ostalih funkcionalnosti i vremenskih zadržki da bi se vidjelo kakav utjecaj na punjenje ima isključivo promjena režima i početne brzine.

Na [Slici 5.19.] su prikazana dva primjera ispitivanja punjenja baterije, oba primjera usporavaju intenzitetom kočenja režima krstarenja 2, jedan sa 120 km/h (pune linije), a drugi s 60 km/h (crtkane linije). Crne linije pokazuju brzinu vozila. Prelazak vrijednosti mod (plave linije) iz 5 (KON) u 3 (CO) pa opet u 5 (KON) indicira vrijeme koje se vozilo nalazilo u pasivnom električnom krstarenju. Zelene linije prikazuju stanje napunjenosti baterije.

Nakon obavljenih mjerenja, dobiveni su sljedeći rezultati [Slika 5.20.] za početnu vrijednost SoC-a od 50%. Kao što se s dijagrama može zaključiti, primjenom različitih režima krstarenja ostvaruje se različito punjenje baterija. Također, dobivene vrijednosti se mogu vrlo lijepo aproksimirati pravcem kao što se može vidjeti sa slike.



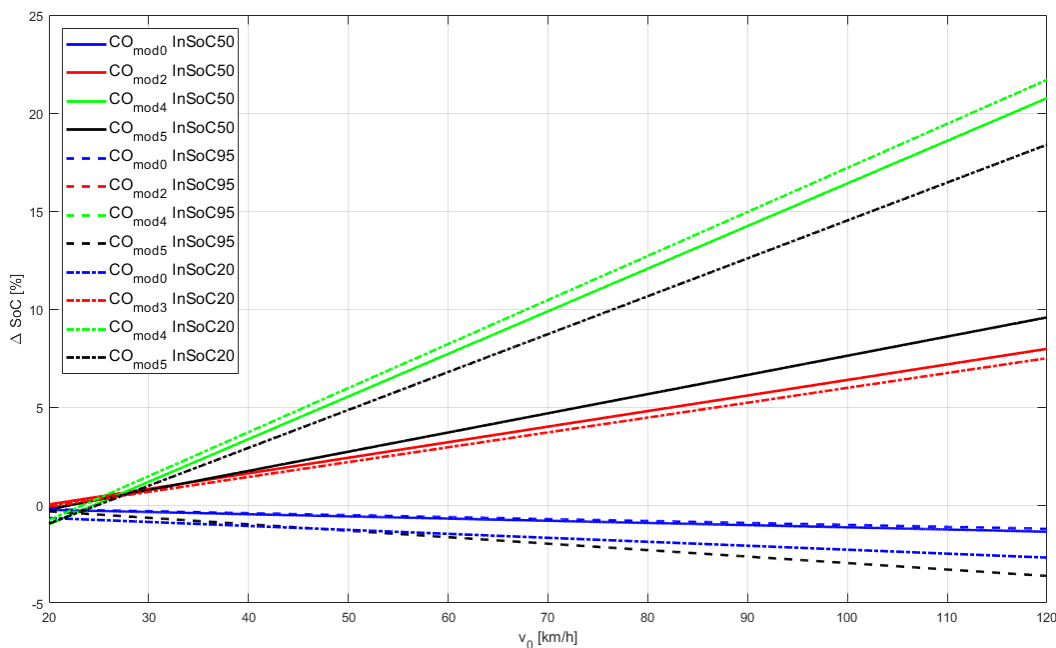
Slika 5.19. Dva mjerenja ovisnosti početne brzine i režima krstarenja na punjenje baterije



Slika 5.20. Prikaz ovisnosti početne brzine i režima krstarenja na punjenje baterije

Nadalje, analiza je proširena variranjem početnog SoC-a baterije da se prikaže kakav on utjecaj ima na brzinu punjenja baterije [Slika 5.21.]. Početne SoC vrijednosti su iznosile 20%, 50% i 90%. Kao što se moglo i pretpostaviti, jedini režim krstarenja na kojem promjena početnog SoC-a ima utjecaj jest 5, odnosno adaptivni režim. Ostale brzine punjenja tek se malo razlikuju što bi značilo da su grupirane svaka po svojem režimu krstarenja. Jedino odstupanje koje se može

zapaziti jest za početni SoC baterije od 20% jer je u tom slučaju uključen SUI motor (SoC < 40%) pa on dodatno još opterećuje bateriju.



**Slika 5.21. Ovisnost početne brzine, režima krstarenja i početnog SoC-a na punjenje baterije**

Naposljetku, potrebno je izraditi analizu potrošnje goriva u usporedbi s konvencionalnim vozilom. Analiza će se u ovom slučaju izvršiti tako da će se uspoređivati tri konfiguracije vozila:

- konvencionalna
- hibridno vozilo s funkcionalnostima sporohodne električne vožnje, aktivnog električnog krstarenja i regenerativnog kočenja
- hibridno vozilo sa svim funkcionalnostima iz upravljačkog algoritma

Također, uz ove tri konfiguracije, varirat će se i iznos početnog SoC-a baterije (90%, 70%, 50%, 30%) zbog analize njihovog utjecaja na potrošnju goriva. Potrebno je naglasiti da se mogu samo uspoređivati potrošnje goriva konvencionalnog vozila i hibridnog vozila koje je opremljeno s pasivnim električnim krstarenjem u režimu krstarenja 2 jer taj režim emulira kočenje SUI motora, kako je objašnjeno u [Poglavlju 4.3.]. Hibridna konfiguracija bez pasivnog električnog krstarenja će jednostavno otići u konvencionalni mod vožnje te će brzina vožnje na tom intervalu biti identična konvencionalnom vozilu.

**Tablica 5.5. Rezultati ispitivanja na modificiranom NEDC ciklusu za različite početne SoC vrijednosti za režim krstarenja 2 (umjereno usporavanje)**

Konfiguracija	$V_f$ [l/100km]	SoC <sub>initial</sub> [%]	SoC <sub>final</sub> [%]	$V_{f,corr}$ [l/100km]	$\Delta V$ [%]
Konvencionalna	5,20	-	-	-	-
CR, REG, SA	4,07	90	63,19	4,30	-17,30
CR, REG, SA, CO	3,92	90	63,20	4,15	-20,19
CR, REG, SA	4,30	70	63,20	4,36	-16,15
CR, REG, SA, CO	4,13	70	63,19	4,19	-19,42
CR, REG, SA	4,65	50	63,19	4,54	-12,69
CR, REG, SA, CO	4,48	50	63,19	4,37	-15,96
CR, REG, SA	4,95	30	62,79	4,66	-10,38
CR, REG, SA, CO	4,80	30	63,18	4,51	-13,27

Kao što se iz rezultata [Tablica 5.5.] može vidjeti, funkcionalnost pasivnog električnog krstarenja (CO) može značajno pridonijeti smanjenju potrošnje goriva. Taj zaključak proizlazi iz činjenice da uz to što vozilo regenerativno koči, dajući osjećaj vožnje konvencionalnog vozila, još je uz to i SUI motor isključen što bi značilo da umjesto trošenja goriva još pretvaramo kinetičku energiju u električnu, koja bi se inače rasipala u toplinsku energiju zagrijavanjem mehaničkih kočnica. Također, u ovim rezultatima se može vidjeti kako raste potrošnja goriva smanjenjem SoC-a. Budući da zbog „zdravlja“ baterije ne smijemo dopustiti da SoC baterije padne ispod 40%, potrebno je na elektromotor narinuti moment alternatora da stvara struju kojom punimo bateriju, a samim time dodatno opterećujemo SUI motor čime se diže potrošnja goriva. Uz to SUI motor mora raditi ispod 40% SoC-a baterije da se ne bi ugrozio njegov siguran start u slučaju da vozač odluči ugaziti automobil, te također mora raditi da bi osigurao nesmetan rad perifernih uređaja.

Naposljetku, potrebno se osvrnuti na činjenicu da iako funkcionalnost pasivnog električnog krstarenja teško može biti simulirana i ukomponirana u vozni ciklus, ona je izrazito potrebna jer u prometu često dolazi do situacija u kojima je potrebno i poželjno polako se usporavati bez kočenja.

## ZAKLJUČAK

Nakon što je razvijena nadređena strategija upravljanja umjerenim hibridnim električnim vozilom P2 konfiguracije (za funkcionalnosti sporohodne električne vožnje, aktivnog i pasivnog električnog krstarenja te regenerativnog kočenja), ista je implementirana pomoću C kôd prevoditelja u simulacijsko okruženje AVL CRUISE. Nakon provedenih simulacija, očigledno je da je hibridno vozilo u usporedbi s konvencionalnim postiglo značajne uštede goriva, koje dosežu gotovo 20% posebno kod dinamičnijih voznih ciklusa [Tablica 6.1.].

**Tablica 6.1. Smanjenje potrošnje goriva umjerenog hibridnog vozila u odnosu na konvencionalno vozilo za različite vozne cikluse uz početni SoC baterije hibridnog vozila iznosa 70%**

	NEDC	Modificirani NEDC	WLTP	HWFET	UDDS
$V_{f,KON}$ [l/100km]	5,34	5,20	5,11	4,04	5,34
$V_{f,corr,HIB}$ [l/100km]	4,35	4,19	4,38	3,92	4,44
$\Delta V$ [%]	-18,51	-19,42	-14,92	-2,97	-16,85

Čak i uz značajno smanjenje potrošnje goriva, nastojalo se ne izgubiti na udobnosti i sigurnosti konvencionalnog vozila koje je u svakom trenutku spremno isporučiti moment. Kao pokazatelj povoljne udobnosti i sigurnosti upućuje činjenica da je izračunata voznost jednaka kao i za konvencionalno vozilo, odnosno da nema greške u praćenju željene brzine.

Prednost ovog modela je u tome što je modularno građen, odnosno svaka hibridna funkcionalnost može funkcionirati neovisno o ostalim (tj. ako jednu ili više njih isključimo iz upravljačke strategije). Također, potrebno je naglasiti da je cijela upravljačka strategija parametrizirana preko korisničkog sučelja, što znači da ne treba ulaziti u izvorni kôd upravljačke strategije u slučaju da je potrebno mijenjati parametre strategije. Ovo značajno olakšava posao kalibratoru koji treba postaviti sve parametre upravljačke strategije da bi se omogućio ugodan i efikasan rad vozila, makar se radilo samo i o modelu vozila.

Moguća unaprjeđenja ove strategije mogu ići u nekoliko pravaca. Prvi od njih je implementacija dodatnih, često složenijih funkcionalnosti hibridnog vozila, poput električnog pojačanja snage (engl. e-boost) te pomicanja radne točke SUI motora u osima brzine vrtnje i momenta (engl. load point moving i load point shifting). Nadalje, daljnja poboljšanja u smislu smanjenja potrošnje goriva bi se mogla očekivati promjenom danih komponenti P2 sustava. Ovdje

korišteni EM snage 10 kW i baterija kapaciteta energije 0,48 kWh u nekim situacijama jednostavno nisu dostatni za pogon vozila u nekim funkcionalnostima. Primjerice u P2 konfiguracijama se uobičajeno koriste motori od 25 kW [15] i baterije kapaciteta 1,5 kWh [20]. Konačno, od interesa je prilagoditi, proširiti i ispitati razvijenu strategiju upravljanja za druge paralelne konfiguracije umjerenog hibridnog električnog vozila (P1, P3 i P4).

---

**LITERATURA**

- [1] Pojam riječi hibrid, preuzeto s <http://www.dictionary.com/browse/hybrid> (17.2.2018.)
- [2] T. Pels, C. Kaup, „Encyclopedia of Automotive Engineering – Micro, Mild, and Full Hybrids“, John Wiley & Sons, Ltd. All, 2014.
- [3] Y. Gao, M. Ehsani, JM. Miller, „Hybrid Electric Vehicle: Overview and state of the Art“, Proc. of IEEE Int. Symp. On Industrial Electronics, p. 307-315, Dubrovnik, Croatia, 2005.
- [4] M. Cipek, „Modeliranje, analiza i optimalno upravljanje pogonima hibridnih električnih vozila“, Zagreb, 2016.
- [5] Lohner-Porsche Hibridno vozilo, preuzeto s:  
<http://www.ultimatecarpage.com/car/3456/Lohner-Porsche-Mixte-Voiturette.html>  
(17.2.2018.)
- [6] Statistika stakleničkih plinova, preuzeto s: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Greenhouse\\_gas\\_emission\\_statistics](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Greenhouse_gas_emission_statistics) (17.2.2018.)
- [7] Potrošnja energije električnog vozila Tesla Model S, preuzeto s:  
<https://www.fueleconomy.gov/feg/Find.do?action=sbs&id=38640> (17.2.2018.)
- [8] Brzina punjenja baterija električnih vozila, preuzeto s:  
<https://www.tesla.com/support/supercharging> (17.2.2018.)
- [9] AVL, preuzeto s: <https://www.avl.com/> (17.2.2018.)
- [10] Fotografija Toyote Prius, preuzeto s: <https://images.toyota-europe.com/gb/prius/width/1200/exterior-3.jpg>
- [11] V. Ranogajec, J. Deur, „Bond graph analysis and optimal control of the hybrid dual clutch transmission shift process“, 2017.
- [12] „48V Mild Hybrid Functions“, AVL, Graz, 2016.
- [13] „AVL Cruise Users Guide“, AVL, 2015.
- [14] Fotografija i informacije o Continentalovom 48V MHEV hibridnom sustavu, preuzeto s:  
<https://www.continental-corporation.com/en/press/press-releases/2016-04-24-gtc2-99060> (17.2.2018.)
- [15] Fotografija i informacije o Schaefflerovom EM za P2 konfiguraciju, preuzeto s:  
[https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/shared\\_media/08\\_media\\_library/01\\_publications/schaeffler\\_2/api/downloads\\_13/oph\\_de\\_en.pdf](https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/api/downloads_13/oph_de_en.pdf) (17.2.2018.)
- [16] J. Soldo, V. Ranogajec, B. Škugor, J. Deur, „AVL CRUISE Model-based Optimisation of Shift Scheduling Maps for a Parallel Hybrid Electric Vehicle“, Graz, 2017.



- 
- [17] J. McGehee, H. Yoon, „An optimal powertrain control strategy for a mild hybrid electric vehicle“, 2013.
- [18] WLTP informacije, preuzeto s: <http://wltpfacts.eu/from-nedc-to-wltp-change/> (17.2.2018.)
- [19] UDDS informacije, preuzeto s: <https://www.epa.gov/fueleconomy/fuel-economy-testing-and-data> (17.2.2018.)
- [20] Benefits of a 48V P2 Mild Hybrid Presentation, Continental Automotive, 2016
- [21] V. Ranogajec, J. Soldo, B. Škugor, J. Deur, „Razvoj upravljačke strategije HEV-a za različite konfiguracije pogonskog sklopa i razine hibridizacije“, radna prezentacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.

## **PRILOZI**

### **I. CD-R**