

Simulacijska analiza utjecaja zračnosti prigonskog sklopa na dinamička svojstva električnog vozila

Ruškan, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:235:718982>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-24**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

RUŠKAN IVAN

ZAGREB, 2022. GODINA

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

Prof. dr.sc. Joško Deur

Student:

Ruškan Ivan

ZAGREB, 2022. GODINA

Izjavljujem da sam ovaj rad radio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. dr.sc. Jošku Deuru na prihvaćanju mentorstva te na korisnim savjetima i pomoći tijekom izrade ovog završnog rada.

Zahvaljujem se Juri Soldi mag. ing. mech. na brojnim savjetima i sugestijama te na odvajanju vlastitog vremena za pomoć oko ovog završnog rada.

Zahvaljujem se Krunoslavu Haramini mag.ing.mech. na pomoći i korisnim savjetima tijekom izrade završnog rada.

Zahvaljujem se prijateljima na vrlo bitnoj podršci tijekom izrade završnog rada, ali i tijekom cijelog studiranja.

Najviše se zahvaljujem roditeljima, majci Katarini i pokojnom ocu Ivici te ostaloj obitelji na podršci tijekom izrade ovog rada, studiranja i cijelog života.

Ivan Ruškan



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
 Povjerenstvo za završne i diplomske 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: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Ružkan** JMBAG: **0035220914**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Simulacijska analiza utjecaja zračnosti prigonskog sklopa na dinamička svojstva električnog vozila**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Simulation analysis of drivetrain backlash influence on electric vehicle transient performance**

Opis zadatka:

Zračnost u prigonskim elementima električnog vozila uzrokuje nagle dinamičke udare okretnog momenta pri prijelazu iz regenerativnog kočenja u izražene akceleracije i obratno. U sprezi s elastičnošću poluvratila, ovi udari izazivaju izražene torzijske vibracije pogona, koje se negativno odražavaju na udobnost vožnje te sveukupne vozne karakteristike. Izrada vjernog simulacijskog modela pogona električnog vozila omogućava kvantitativnu analizu utjecaja zračnosti, te predstavlja osnovu za razvoj i ispitivanje algoritama upravljanja pogonom radi smanjivanja negativnih učinaka zračnosti. U radu je potrebno:

- postaviti model pogonskog sustava električnog vozila u simulacijskom okruženju Simcenter Amesim, s naglaskom na detalje prigonskog sklopa vezane uz zračnosti i gubitke snage u reduktoru i diferencijalu te elastičnost poluvratila;
- simulacijski analizirati utjecaj zračnosti na vozne karakteristike u različitim radnim režimima, poput naglog pokretanja vozila i prijelaza iz umjerenog regenerativnog kočenja u naglo ubrzanje;
- za potrebe budućeg razvoja sustava upravljanja, izraditi pojednostavljeni model s koncentriranim elementima zračnosti, gubitaka i elastičnosti, te provesti provjeru valjanosti pojednostavljenog modela u odnosu na polazni, detaljni model;
- diskutirati i načelno ispitati mogućnosti primjene algoritama upravljanja namijenjenih smanjenju utjecaja zračnosti.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.
 2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
 3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.
 2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
 3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Joško Deur

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Opis pogona električnog vozila.....	2
2.1. Baterija.....	2
2.2. M/G stroj.....	3
2.3. Reduktor.....	4
2.4. Diferencijal.....	4
2.5. Vratila i poluvratila.....	5
3. Detaljni model pogona	6
3.1. Model baterije.....	7
3.2. Model M/G stroja.....	7
3.3. Model reduktora.....	8
3.4. Model diferencijala.....	9
3.5. Model vratila.....	10
3.6. Model uzdužne dinamike vozila.....	11
3.7. Model pneumatika.....	13
3.8. Model vozača.....	14
3.9. Kontrolna jedinica električnog vozila.....	16
4. Pojednostavljeni model pogona	17
4.1. Zračnost.....	17
4.2. Elastičnost i prigušenje.....	18
4.3. Inercija.....	18
4.4. Gubici.....	18
5. Rezultati simulacije.....	19
5.1. Pokretanje vozila iz mjesta.....	19
5.2. Prelazak iz regenerativnog kočenja u ubrzanje.....	22
5.3. Prelazak iz ubrzanja u regenerativno kočenje.....	24
6. Pregled sustava upravljanja za kompenzaciju utjecaja zračnosti.....	27
6.1. PID regulator.....	27
6.2. Virtualni fizikalni element prigušenja.....	29
6.3. LQR.....	31
6.4. LQRY.....	31
7. Zaključak.....	32

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Baterija vozila VW e-Golf (a), struktura baterijskog paketa (b).....	1
Slika 2.2. M/G stroj vozila VW e-Golf (a), shema konstrukcije sinkronog motora s permanentnim magnetima.....	3
Slika 2.3. Reduktor električnog vozila.....	4
Slika 2.4. Diferencijal vozila.....	5
Slika 2.5. M/G stroj s poluvratilima i reduktor te ovjes vozila Audi e-tron GT.....	5
Slika 3.1. Detaljni model pogona.....	6
Slika 3.2. Komponenta modela baterije (a), nadomjesni električni krug (b), ovisnost napona i otpora o stanju napunjenosti baterije.....	7
Slika 3.3. Komponenta M/G stroja.....	7
Slika 3.4. Mapa minimalnog i maksimalnog momenta M/G stroja te mapa korisnosti.....	8
Slika 3.5. Kinematska shema diferencijala.....	9
Slika 3.6. Komponenta elastičnost i prigušenje.....	10
Slika 3.7. Komponenta modela uzdužne dinamike vozila.....	11
Slika 3.8. Komponenta modela pneumatika.....	13
Slika 3.9. Paceykin model pneumatika.....	14
Slika 3.10. Komponenta modela vozača.....	15
Slika 3.11. Komponenta kontrolne jedinice električnog vozila.....	16
Slika 3.12. Serijsko regenerativno kočenje.....	17
Slika 4.1. Pojednostavljeni model pogona električnog vozila.....	18
Slika 5.1. Vozni ciklus.....	21
Slika 5.2. Simulacija usporedba modela prilikom pokretanja vozila; moment kotača (a), zračnost (b).....	22
Slika 5.3. Simulacija usporedba modela prilikom pokretanja vozila; brzina M/G stroja (a), moment M/G stroja (b), zračnost (c).....	23
Slika 5.4. Simulacijska usporedba odziva akceleracije vozila prilikom pokretanja vozila.....	24
Slika 5.5. Simulacija usporedba modela prilikom prelaska iz regenerativnog kočenja u ubrzanje; moment kotača (a), zračnost (b).....	25
Slika 5.6. Simulacija usporedba modela prilikom prelaska iz regenerativnog kočenja u ubrzanje; brzina M/G stroja (a), moment M/G stroja (b), zračnost (c).....	26

Slika 5.7. Simulacijska usporedba odziva akceleracije vozila prilikom prelaska iz regenerativnog kočenja u ubrzanje.....	27
Slika 5.8. Simulacija usporedba modela prilikom prelaska iz ubrzanja u regenerativno kočenje; moment kotača (a), zračnost (b).....	28
Slika 5.9. Simulacijska usporedba odziva akceleracije vozila prilikom pokretanja vozila.....	28
Slika 5.10. Simulacija usporedba modela prilikom prelaska iz ubrzanja u u regenerativno kočenje; brzina M/G stroja (a), moment M/G stroja (b), zračnost (c).....	29
Slika 6.1. Shema upravljanja PI regulatorom.....	30
Slika 6.2. Usporedba momenta kotača bez i sa PI regulatorom.....	31
Slika 6.3. Usporedba odziva M/G stroja bez i sa PI regulatorom.....	31
Slika 6.4. Struktura virtualnog fizikalnog prigušenja.....	32
Slika 6.5. Usporedba momenta kotača bez i sa P regulatorom te PI regulatorom.....	32
Slika 6.6. Usporedba odziva M/G stroja bez i sa P regulatorom te PI regulatorom.....	33
Slika 6.7. Greška praćenja brzine.....	33

POPIS TABLICA

Tablica 3.1. Parametri pogonskog zupčanika.....	9
Tablica 3.2. Parametri gonjenog zupčanika.....	9
Tablica 3.3. Parametri vozila.....	12
Tablica 3.4. Parametri vozača.....	16
Tablica 3.5. Parametri detaljnog modela.....	17

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
τ_1	Nm	Moment lijevog kotača
τ_2	Nm	Moment desnog kotača
τ_c	Nm	Moment tanjurastog zupčanika diferencijala
τ_i	Nm	Moment ulaznog vratila diferencijala
ω_1	rad/s	Brzina lijevog kotača
ω_2	rad/s	Brzina desnog kotača
ω_i	rad/s	Brzina tanjurastog zupčanika diferencijala
ω_c	rad/s	Brzina ulaznog vratila diferencijala
τ_{shaft}	Nm	Moment vratila
k	Nm/rad	Krutost vratila
c	Nm s/rad	Faktor prigušenja vratila
θ	rad	Kut zakreta vratila na pogonskoj strani
θ	rad	Kut zakreta vratila na strani tereta
F_{total}	N	Ukupna uzdužna sila na vozilo
F_{slope}	N	Sila uslijed nagiba ceste
F_{aero}	N	Sila aerodinamičkog otpora
M	kg	Masa vozila
g	m/s ²	Ubrzanje sile teže
α	°	Kut zračnosti
β	%	Kut nagiba ceste
ρ	kg/m ³	Gustoća zraka
S	m ²	Frontalna površina vozila
C_x	-	Koeficijent aerodinamičkog otpora
V	m/s	Relativna brzina vozila
$F_{z,tyre}$	N	Vertikalna sila na kotač
J_w	kgm ²	Inercija kotača
ω_w	rad/s	Brzina kotača
τ_{brk}	Nm	Moment kočenja
τ_{res}	Nm	Moment otpora kotrljanju
F_x	N	Uzdužna sila gume
R_{roll}	m	Radijus kotača
F_z	N	Vertikalna sila
K_{pv}	1/(m/s)	Proporcionalno pojačanje regulatora vozača
K_{iv}	1/(m/s ²)	Integralno pojačanje regulatora vozača
K_{pr}	Nm/(rad/s)	Proporcionalno pojačanje PI kompenzatora zračnosti
K_{ir}	Nm/rad	Integralno pojačanje PI kompenzatora zračnosti
a_{cc}	-	Signal ubrzanja
u	Nm	Referenca momenta
e_v	m/s	Greška regulacije vozača
e_r	rad/s	Greška regulacije PI kompenzatora zračnosti
η	-	Učinkovitost zupčastog para

SAŽETAK

Elektrifikacija vozila je u punom jeku. Veliki broj proizvođača automobila prelazi na proizvodnju hibridnih i baterijskih električnih vozila te je pitanje vremena kada će sva vozila biti električna. Električna vozila privlače svojom učinkovitošću, smanjenom potrošnjom energije, tihim radom, ali i visokim voznim performansima. Pogon električnog vozila je jednostavnije izvedbe s manje mehaničkih dijelova u odnosu na konvencionalna vozila, što omogućuje lakše i povoljnije održavanje. S ciljem daljnjeg poboljšanja učinkovitosti električnih vozila te udobnosti vožnje, potrebno je dobro poznavati dinamičko ponašanje vozila i pogonskog sklopa. Utjecaj zračnosti unutar zupčastih parova pogonskog sklopa često se zanemaruje u razmatranju uzdužne dinamike konvencionalnih vozila. No, pojavom električnih vozila s elektromotorom brze dinamike, zračnost ima primjetan utjecaj na uzdužnu dinamiku vozila i udobnost prilikom vožnje. Kako bi se analizirao utjecaj zračnosti, u ovom se radu pogonski sklop baterijskog električnog vozila detaljno modelira i simulira u Simcenter Amesim softverskom paketu. Na osnovi analize detaljnog modela predlaže se i pojednostavljeni model pogonskog sklopa za potrebe razvoja algoritama za kompenzaciju utjecaja zračnosti. Na temelju pojednostavljenog modela diskutiraju se postojeći načini kompenzacije te su načelno i ispitani. Model pogonskog sklopa je parametriran prema dostupnim podacima o električnim vozilima B kategorije trenutno dostupnima na tržištu.

Ključne riječi:

baterijsko električno vozilo, zračnost, pogonski sklop, modeliranje, simulacija, kompenzacija zračnosti.

SUMMARY

Vehicle electrification is in full swing. A large number of car manufacturers are switching to hybrid and battery electric vehicle production and it is only a matter of time when all vehicles will be electric. Electric cars are attractive because of their efficiency, low energy consumption, quiet operation and high driving performance. As the electric powertrain is more efficient, as well as simpler due to less mechanical parts when compared to conventional vehicles, the maintenance is easier and less. In order for electric vehicle technology to further evolve, the vehicle dynamics behaviour and the related parameter influences should be understood well. An example to which was given little attention in conventional vehicles would be gear backlash. However, with the coming of electric vehicles with electric motors of high dynamic performance, the backlash has a considerable influence on longitudinal vehicle dynamics and driving comfort. In this work, a detailed powertrain simulation model of battery electric vehicle is built up in the Simcenter Amesim software package in order to analyse the influence of backlash. The model is simplified for the development of backlash compensation algorithms. The powertrain model is parameterized based on the available data of a B-class electric vehicle.

Key words:

battery electric vehicle, backlash, powertrain, modelling, simulation, backlash compensation.

1. Uvod

Baterijska električna vozila nude mnoge prednosti u odnosu na konvencionalna vozila pogonjena motorima s unutarnjim izgaranjem (MSUI), kao što je čišći i tiši rad te povećana učinkovitost pogona. Uz sve to pružaju i bolje dinamičke vozne performanse te omogućuju učinkovitiju implementaciju tehnologija upravljanja dinamikom vozila kao što su usmjeravanje momenta (engl. „torque vectoring“), ABS i TCS. Pogonski sklop ima manje mehaničkih dijelova, jednostavniji je i lakši u odnosu na konvencionalna vozila te je pri tome i jednostavniji za održavanje. Trenutni nedostaci električnih vozila su njihov limitirani domet, relativno dugo vrijeme punjenja i visoka tržišna cijena. No, razvojem prvenstveno baterijskih tehnologija, navedeni nedostaci se potiskuju te električna vozila postaju sve zastupljenija na tržištu.

Zračnost u zupčanicima pogona konvencionalnih vozila te njen utjecaj na uzdužnu dinamiku vozila često se nije uzimala u obzir niti se pokušavala kompenzirati. Dolaskom električnih vozila koja imaju bržu dinamiku odziva okretnog momenta, utjecaj zračnosti je postao značajan. Zračnost izaziva udar momenta i popratne torzijske vibracije, koji se javljaju prilikom promjene predznaka momenta, a to se događa kod pokretanja vozila iz mjesta te prelaska s regenerativnog kočenja u ubrzanje i obrnuto. Jedan od mogućih načina kompenzacije zračnosti jest njeno minimiziranje putem vrlo precizne konstrukcije zupčaničkih parova, no taj bi način bio preskup. Drugi način za kompenzaciju zračnosti jest primjena posebnih upravljačkih algoritama uz primjenu postojećih aktuatora i senzora.

U ovom se radu provodi analiza utjecaja zračnosti na uzdužnu dinamiku baterijskog električnog vozila. U tu se svrhu detaljni fizikalni model pogonskog sklopa električnog vozila implementira u Simcenter Amesim programskom paketu. Ovaj programski paket izabran je zbog svoje jednostavnosti i učinkovitosti kod za modeliranje simulacije složenih više-fizikalnih sustava. Također je vrlo fleksibilan prilikom simulacije te omogućuje detaljnu analizu pojava. Usto se za potrebe razvoja algoritama za kompenzaciju utjecaja zračnosti predstavlja pojednostavljeni model pogonskog sklopa.

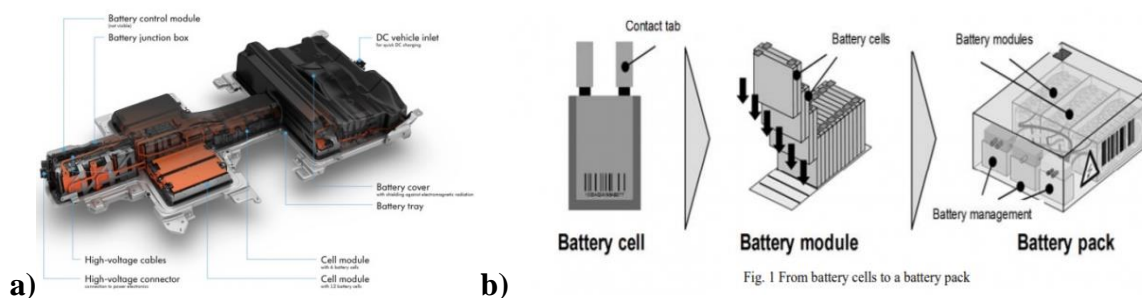
U drugom se poglavlju ovog rada funkcionalno opisuje pogon električnog vozila sa svojim dijelovima te kratkim opisima svake komponente. U trećem se poglavlju opisuje detaljni fizikalni model pogona električnog vozila u Amesim simulacijskom okruženju. U četvrtom se poglavlju prikazuje pojednostavljeni model pogonskog sklopa. U petom se poglavlju daju rezultati simulacije, odnosno simulira se detaljni model i uspoređuje s modelom bez zračnosti kako bi se analizirao utjecaj iste. Simulacijski se provodi validacija pojednostavljenog modela. U šestom poglavlju diskutiraju se i načelno ispituju postojeći načini kompenzacije utjecaja zračnosti.

2. Opis pogona električnog vozila

Pogon električnog vozila sastoji se od električnog stroja koji može raditi kao motor ili generator (M/G stroj) reduktora, vratila, diferencijala i poluvratila. Pogonski sklop električnog vozila jednostavniji je nego u konvencionalnim vozilima s MSUI jer su elektromotori stabilni, kako pri malim, tako i na velikim brzinama, što uklanja potrebu za transmisijom.

2.1. Baterija

Baterija služi za pohranjivanje energije potrebne za pogon električnog vozila. Za baterije električnog vozila karakterističan je velik omjer snage i mase, specifična energija te gustoća energije. [1] Baterije se sastoje od modula koji se sastoje od ćelija. Ćelije mogu biti cilindričnog, prizmatičnog i vrećastog oblika. Ćelije su spojene serijski ili paralelno kako bi se dobio potrebni napon, odnosno struja. Skup ćelija se naziva modul koji sadrži rashladnu jedinicu, jedinicu za nadzor temperature i često nadzor napona te šalje podatke u upravljački sustav baterije (engl. Battery management system) čija je zadaća održavati optimalan rad baterije. Korištenje modula omogućuje lakšu proizvodnju, instalaciju, kontrolu i održavanje baterija. Moduli sadrže i releje te slične komponente kako bi osigurali ravnomjernu distribuciju električne energije što znači da se svaka ćelija jednolično troši i puni te to dovodi do produljenja životnog vijeka baterije. Najvažniji parametar baterije je kapacitet, odnosno domet električnog vozila. Poželjan je što veći kapacitet uz što manju masu te cijenu proizvodnje. Kapaciteti baterija, koje su trenutno na tržištu, kreću se od 15 kWh do 200 kWh što vozilima daje domet od 100 km do 500 km. Također, na domet utječu razni faktori poput vremena, terena, sposobnosti vozača, mase vozila i sl. Usto, baterija se koristi ne samo za pogon vozila, već i za druge zadatke, npr. grijanje vozila, dok se kod konvencionalnih vozila kokpit vozila grije toplinom proizvedenom u MSUI-u. Kao jedna od najskupljih komponenti električnog vozila, važna je stavka i životni vijek baterije. No, trenutno stanje na tržištu je takvo da automobili mogu prijeći i 200 000 km i zadržati 90% prvobitnog kapaciteta baterije. Najčešće korišten tip baterija su Litij-ionske, a tu su još i Litij polimerske, olovne i druge. Baterija ima značajnu masu te konstrukcija baterija omogućuje njihovo stavljanje u podnicu automobila te se tako snižava težište automobila, što poboljšava performanse.

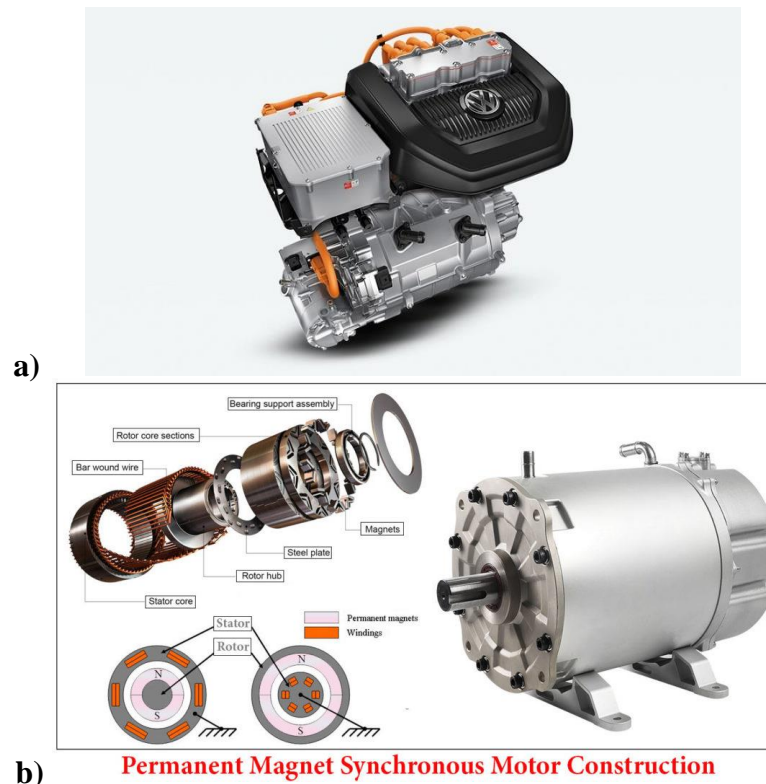


Slika 2.1. Baterija vozila e-Golf (a) [2], struktura baterijskog paketa (b).

2.2. M/G stroj

M/G stroj je uređaj koji može raditi u motorskom i generatorskom režimu rada. Generator je uređaj koji pretvara kinetičku energiju u električnu te je na taj način može pohraniti u bateriju dok je elektromotor uređaj koji pretvara električnu energiju u kinetičku. Najčešće korišteni elektromotori u električnim vozilima su sinkroni motori s permanentnim magnetima, asinkroni

indukcijski motori [3]. Kako oba navedena tipa elektromotora koriste izmjeničnu struju za rad, a baterija je spremnik istosmjerne, između motora i baterije dolazi pretvarač istosmjerne u izmjeničnu struju. Indukcijski motor je asinkroni stroj u kojem je struja rotora potrebna za razvoj momenta rezultat elektromagnetske indukcije elektromagnetskog polja koje stvaraju namotaji na statoru. Indukcijski motor je asinkroni što znači da brzine rotirajućeg magnetskog polja statora i rotora nisu iste. Sinkroni motor s permanentnim magnetima je sinkroni stroj što znači da se rotor kreće istom brzinom kao i rotirajuće magnetsko polje statora, a radi na način da su rotoru permanentni magneti koji stvaraju stalno magnetsko polje koje, zajedno s rotirajućim magnetskim poljem statora stvorenog namotajima, pokreću rotor. M/G strojevi imaju znatne prednosti u odnosu na MSUI. Korisnost je značajno veća, često iznad 80%, dok MSUI imaju korisnost do 40%. M/G strojevi imaju veći omjer snage i mase što omogućuje vozilima manju masu s istom snagom. Dinamika M/G stroja je brža u odnosu na MSUI za otprilike red veličine što omogućava električnim vozilima bržu dinamiku vožnje u odnosu na konvencionalna vozila.



Slika 2.2. M/G stroj te pretvarač vozila e-Golf (a) [2], shema konstrukcije sinkronog motora s permanentnim magnetima (b).

2.3. Reduktor

Reduktor se koristi za povećanje okretnog momenta na kotačima, a smanjenje brzine jer M/G strojevi mogu razviti brzine i do 10000 o/min što je, svakako, previše. Reduktori su izvedeni kao zupčasti parovi, a o proizvođaču vozila ovisi vrsta zupčastog para. Moguće su izvedbe cilindričnih zupčanika s ravnim ili kosim zubima te planetarni prijenosnici. U reduktoru imamo gubitke snage zbog kontakta zuba te gubitke bućkanja ulja. Gubici snage uslijed kontakta zubi nastaju zbog trenja između kontakta zubi. Gubici uslijed bućkanja ulja nastaju zbog uranjanja

zupčanika u ulje za podmazivanje te ovise o dubini uranjanja. Iako imamo te gubitke, uz kvalitetnu obradu zupčanika njihova je korisnost često iznad 90%. U reduktoru se javlja zračnost između zubi zupčastog para. Ta zračnost iznosi najčešće od 0.5° do 2° . Ako se zubi nalaze u području zračnosti, odnosno nema kontakta između zubi dvaju zupčanika, nema ni prijenosa snage. Do prijenosa snage dolazi tek kada se kontakt ostvari, a zbog brze dinamike M/G stroja to izaziva nagle udare momenta i oscilacije u elementima pogonskog sklopa.



Slika 2.3. Reduktor električnog vozila [2].

2.4. Diferencijal

Diferencijal je sklop zupčastih parova koji omogućuje ravnomjernu raspodjelu momenta na dva vratila pri čemu brzina dva izlazna vratila može biti ista, ali i različita. Kutne brzine dvaju izlaznih vratila su takve da njihov zbroj daje kutnu brzinu ulaznog vratila. Prilikom skretanja vozila, kotači se, zbog različitog radijusa kretanja, okreću različitim brzinama. Kako ne bi dolazilo do proklizavanja jednog kotača, koristi se diferencijal da bi se omogućila različita brzina lijevog i desnog kotača, i pritom zadržala ravnomjerna raspodjela momenta. Diferencijal ima i ulogu reduktora jer se na diferencijalu dodatno reducira kutna brzina. Kako je diferencijal sklop zupčastih parova, u njemu se također javljaju gubitci uslijed trenja kontakta između zubi te gubitci uslijed bučkanja ulja opisani u prethodnom poglavlju. Također se javlja i zračnost između pogonskog zupčanika ulaznog vratila i tanjurastog te se javlja zračnost i između zupčanika za izjednačavanje brzine i zupčanika na poluvratilima.



Slika 2.4. Diferencijal vozila.

2.5. Vratila i poluvratila

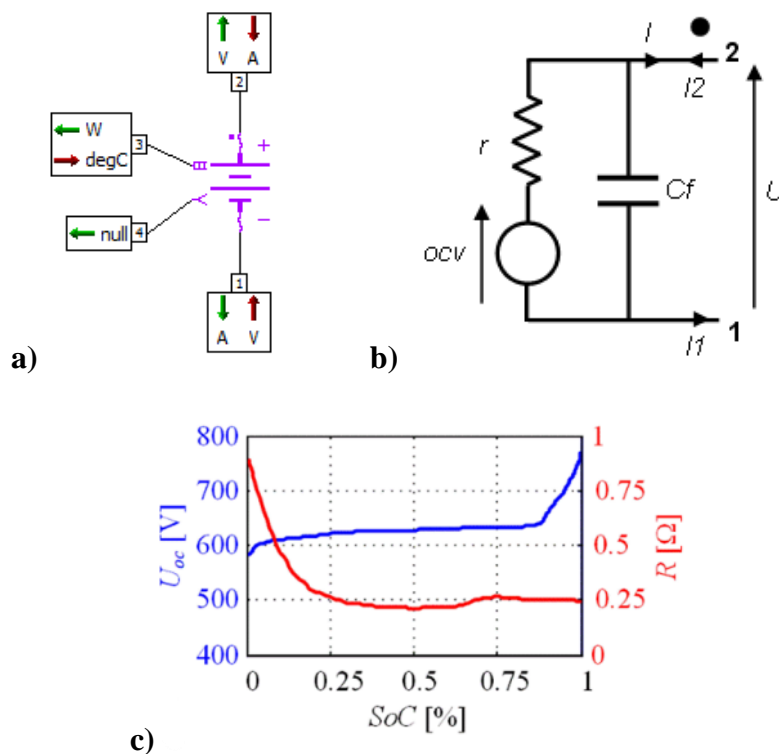
Vratila i poluvratila služe za prijenos snage od jednog elementa do drugog, npr. od M/G stroja do reduktora te od reduktora do diferencijala. Poluvratila prenose snagu od diferencijala do kotača vozila. Dimenzije vratila ovise o momentu koji moraju prenijeti te o konstrukciji i položaju ostalih komponenti. Često su vratila koja prenose snagu od motora do reduktora i od reduktora do diferencijala manje dužine u odnosu na poluvratila te su im krutosti značajno veće. Poluvratila su često duža te samim time manje kruta i, kao takva, glavni su izvor oscilacija u pogonskom sklopu.



Slika 2.5. M/G stroj s poluvratilima i reduktorom te ovjes električnog vozila Audi e-tron [4].

3.1. Baterija

Za model baterije se koristi upravljajući orijentirani kvazi-statički model baterije u obliku nadomjesnog električnog kruga preuzet iz AmeSim biblioteke [6]. Nadomjesni električni krug (prikazan na slici 3.2. b)) ima varijabilni izvor napona i varijabilan otpor. Oba parametra ovise o stanju napunjenosti baterije (SOC), a ovisnost je prikazana na slici 3.2.c) te kondenzator za filtriranje napona koji je postavljen na 0.05 F prema preporuci AmeSim-a. Komponenta je prikazana na 3.2.a). Vidimo da ima četiri porta od kojih su dva porta ona koja definiraju pozitivni i negativni pol baterije te se ta dva porta spajaju na M/G stroj. Preostala dva porta služe za praćenje stanja napunjenosti baterije i gubitke topline baterije. Kapacitet baterije je odabran 100 Ah prema podacima o trenutno dostupnim električnim vozilima na tržištu iste kategorije. Utjecaj temperature na bateriju je zanemaren u ovom modelu.

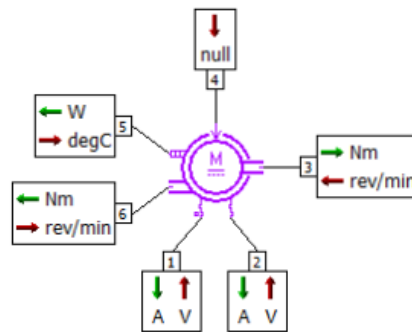


Slika 3.2. Komponenta modela baterije (a), Nadomjesni električni krug (b), Ovisnost napona i otpora baterije o stanju napunjenosti (c) [5].

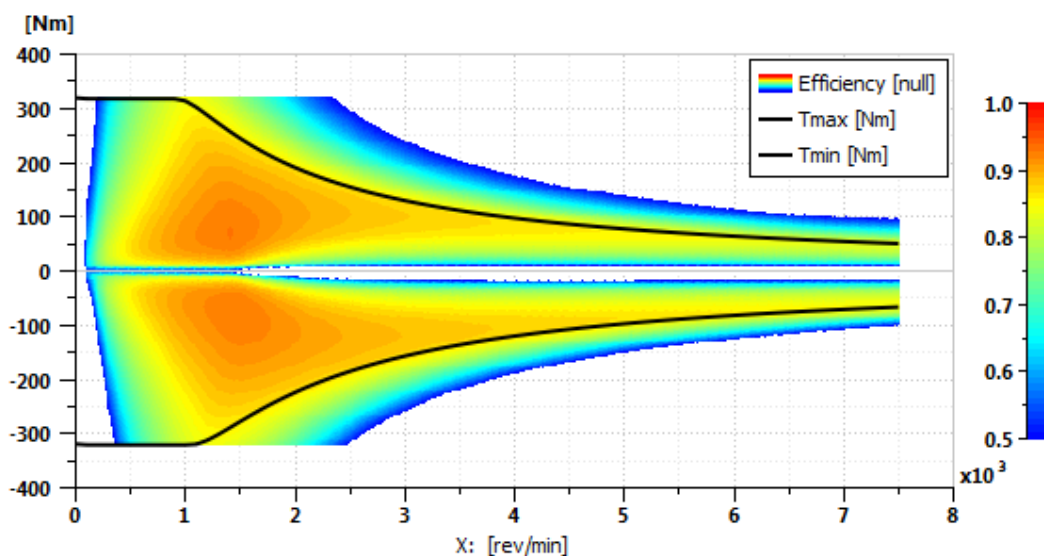
3.2. M/G stroj

Za model M/G stroja je korištena komponenta kvazi-statički stroj (engl. „quasi-static machine“) prikazana na slici 3.3 koja predstavlja elektromotor i inverter, a napajana je iz DC izvora [6]. Može biti korištena kao motor i generator. U slučaju istog predznaka momenta i brzine, radi u motornom režimu rada, a u slučaju različitih predznaka, radi u generatorskom režimu rada. Opisana je zadavanjem mape minimalnog i maksimalnog momenta motora te mape učinkovitosti (prikazane na slici 3.4.). Dinamika razvoja momenta opisana je dinamičkim P1 članom s fiksnom vremenskom konstantom koja je jednaka konstanta 0.01 s. Komponenta, prikazan na slici 3.3. ima šest portova. S prva dva porta se spaja na bateriju, treći port je mehanički rotacijski port koji se spaja na pogonski sklop, na četvrti port se šalje referenca momenta kojom se upravlja motorom, peti port je termalni port kojim se odvodi toplina

razvijena u M/G stroju, dok je šesti port mehanički rotacijski port koji predstavlja stator te se spaja na komponentu koja definira kutnu brzinu nula.



Slika 3.3. Komponenta M/G stroja.







Slika 3.4. Mapa minimalnog i maksimalnog momenta i mapa korisnosti M/G stroja.

3.3. Reduktor








Reduktor je modeliran podmodelom zupčastog para u kojem se definiraju parametri pogonskog i gonjenog zupčanika iz kojih proizlazi prijenosni omjer, kao i prisustvo mehaničkih gubitaka. Parametri pogonskog i gonjenog zupčanika su prikazani u tablicama 3.1. i 3.2. Gubitci se dijele na gubitke trenja između kontakta zubi i na gubitke bućkanja ulja. Gubitci trenja zbog kontakta zubi se zadaju na način da se definira faktor iskoristivosti kojim se množi ulazna snaga da bi se dobila izlazna. Faktor korisnosti ima vrijednosti između 0 i 1 gdje 1 predstavlja iskoristivost od 100%, u ovom slučaju je postavljen na vrijednost 0.95. Gubitci bućkanja ulja definiraju se zadavanjem parametra dubine uranjanja u ulje iz kojeg se pomoću brzine vrtnje računaju gubitci. Prijenosni omjer reduktora postavljen je na $h=2.7$, a određen je tako da s prijenosnim omjerom diferencijala i_0 te s obzirom na maksimalnu brzinu M/G stroja, vozilu omogućuje maksimalnu brzinu od 160 km/h. Maksimalna brzina vozila preuzeta je iz podataka o električnim vozilima iste kategorije trenutno dostupnim na tržištu. Zračnost u zupčanicima uzeta je u obzir podmodelom „Rotary clearance“ koji unosi čisto kašnjenje (mrtvu zonu) između kontakata zubi zupčanika, a parametrira se graničnim pozicijama (gornjom i donjom) definiranim u stupnjevima. Ako se zubi zupčanika nalaze između gornje i donje pozicije

odnosno u području zračnosti, prijenosa snage nema. Do prijenosa snage dolazi tek kada se ostvari kontakt.

Tablica 3.1. Parametri pogonskog zupčanika.

Title	Value	Tags	Unit
contact assumption	 losses		
paddling losses	 yes		
index of fluid (gear box oil)	1		
working pitch radius	30		mm
velocity threshold to apply torque losses	1		rev/min
coefficient of viscous friction	0		Nm/(rad/s)
 geometry data			
width of tooth face	10		mm
tip radius	38		mm
immersed gear height	15		mm
root radius	29		mm
 material properties			
Young's modulus	2.1e+11		N/m**2
Poisson's ratio	0.3		null

Tablica 3.2. Parametri gonjenog zupčanika.

Title	Value	Tags	Unit
contact stiffness	 no stiffness		
slipping and rolling losses	 user constant efficiency		
paddling losses	 yes		
index of fluid (gear box oil)	1		
working pitch radius	81		mm
velocity threshold to apply torque losses	1		rev/min
coefficient of viscous friction	0		Nm/(rad/s)
 user efficiency			
constant gear efficiency	0.95		null
 teeth angles			
working transverse pressure angle	20		degree
helix angle	0		degree
 geometry data			
teeth geometry	 computation		
number of teeth	17		
width of face of tooth	10		mm
immersed gear height	65		mm

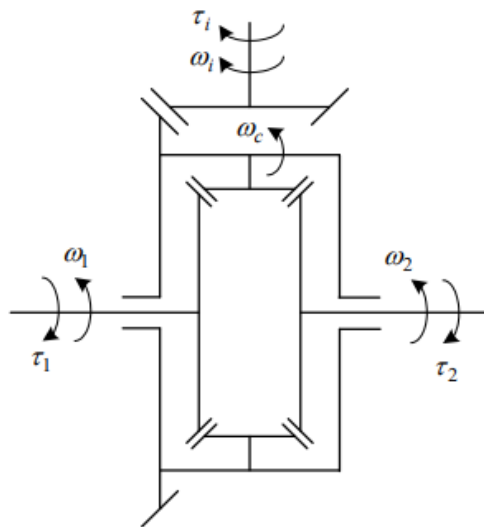
3.4. Model diferencijala

Diferencijal je element koji služi za podjelu snage na dva izlazna vratila. [7] Diferencijal dijeli moment ravnomjerno na lijevi i desni kotač, dok brzine vrtnje mogu biti različite. Brzine se dijele na način da zbroj brzine lijevog i desnog kotača podijeljen s dva daje brzinu vrtnje ulaznog vratila diferencijala. U Amesimu postoji gotov model diferencijala u kojem su definirane kinematske jednačbe. Kinematske jednačbe diferencijala glase:

$$\tau_1 = \tau_2 = \frac{1}{2} \tau_c = \frac{1}{2} \tau_i, \quad (1)$$

$$\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} = \omega_c = \frac{1}{i} \omega_i, \quad (2)$$

gdje je: $\tau_{1,2}$ moment kotača, τ_c moment tanjurastog zupčanika, τ_i moment ulaznog vratila.



Slika 3.5. Kinematska shema diferencijala.

Kako u ovom modelu diferencijala nema definiranog prijenosnog omjera niti gubitaka, ispred diferencijala dodan je jedan zupčasti par koji predstavlja prijenosni omjer diferencijala gdje su ujedno definirani i gubici diferencijala. Gubici u prvom zupčastom paru diferencijala su dominantni te su modelirani kako je objašnjeno u prethodnom poglavlju, dok su gubici kod prenošenja snage na poluvratila zanemarivi jer se uzima u obzir pravocrtno gibanje vozila. Prijenosni omjer diferencijala je postavljen na vrijednost $i_0=2$ zbog ranije objašnjenih razloga.

U diferencijalu postoji zračnost između pogonskog i tanjurastog zupčanika te između zupčanika za izjednačavanje brzine i zupčanika na poluvratilu. Prva komponenta zračnosti je dodana iza zupčastog para u modelu, a druga zračnost je dodana zasebno na svako poluvratilo.

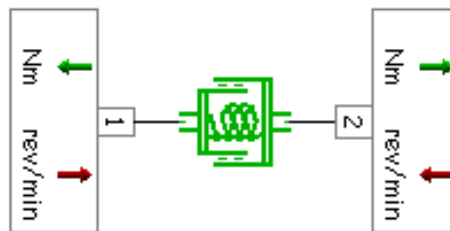
3.5. Model vratila

Vratila i poluvratila su modelirana kao elastično-prigušni elementi. U modelu imamo vratilo koje prenosi snagu od motora do reduktora, od reduktora do diferencijala te poluvratila. Moment koji vratilo prenosi može se izraziti pomoću elastičnosti vratila te faktora prigušenja kao:

$$T_{shaft} = k \cdot (\theta_m - \theta_l) + c \cdot (\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_l), \quad (3)$$

gdje je k elastičnost vratila, c je faktor prigušenja, θ_m je kut zakreta vratila na pogonskoj strani i θ_l je kut zakreta na strani tereta.

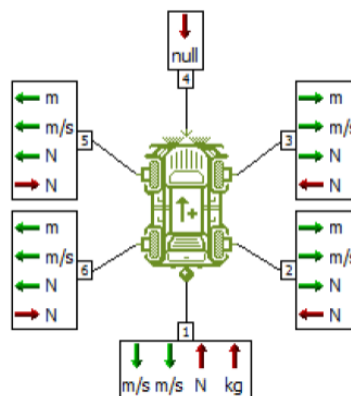
Elastičnost vratila ovisi o promjeru i duljini vratila. Vratila između motora i reduktora te između reduktora i diferencijala su kraća u odnosu na poluvratila te su krutosti puno veće. Odabrane vrijednosti krutosti vratila su $k_{1,2}=50\ 000$ Nm/rad. Poluvratila su elastičnija te imaju manju krutost. U ovom je slučaju odabrana vrijednost $k_{hs}=15\ 000$ Nm/rad. Ova vrijednost je dobivena frekvencijskom analizom odziva momenta na odskočnu pobudu. Faktori prigušenja vratila su određena na isti način. U AmeSimu postoji komponenta (prikazana na slici 3.6.) koja definira elastično-prigušni element. U njoj se definiraju parametri krutosti vratila te faktora prigušenja.



Slika 3.6. Komponenta koja opisuje elastičnost i prigušenje.

3.6. Model uzdužne dinamike vozila

Komponenta koja opisuje uzdužnu dinamiku vozila prikazana je na slici 3.7. Komponenta ima šest portova, od kojih se četiri porta spajaju na kotače, dok su preostala dva porta za definiranje nagiba ceste te priključak za prikolicu [6].



Slika 3.7. Komponenta modela uzdužne dinamike.

Iz modela uzdužne dinamike vozila dobiva se ubrzanje, brzina i prijeđeni put vozila. Iz II. Newtonovog zakona se dobiva akceleracija vozila, a integracijom se dobije brzina vozila.

Za računanje ubrzanja pomoću II. Newtonovog zakona potrebna nam je ukupna sila na vozilo koja iznosi:

$$F_{total} = -F_{front,wheel} - F_{rear,wheel} - F_{slope} + F_{aero}, \quad (4)$$

gdje F_{slope} predstavlja silu uslijed nagiba ceste, a F_{aero} predstavlja silu aerodinamičkog otpora. Sila uslijed nagiba ceste definirana je kao:

$$F_{slope} = M \cdot g \cdot \sin\left(\arctan\left(\frac{\beta}{100}\right)\right), \quad (5)$$

gdje je M ukupna masa vozila, a β nagib ceste u postocima. Sila aerodinamičkih otpora je definirana kao:

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot V^2, \quad (6)$$

gdje je ρ gustoća zraka, S frontalna površina, C_x koeficijent aerodinamičkog otpora i V relativna brzina vozila. Ovaj model uzdužne dinamike pretpostavlja da se vertikalna sila vozila raspodjeljuje ravnomjerno na svaki kotač. Vertikalna sila na jedan kotač iznosi:

$$F_{z,tyre} = \frac{1}{4} \cdot M \cdot g \cdot \cos\left(\arctan\left(\frac{\alpha}{100}\right)\right). \quad (7)$$

Parametri vozila prikazani su u tablici 3.3.

Tablica 3.3. Parametri vozila

Title	Value	Tags	Unit
Ⓜ vehicle longitudinal displacement	0		m
Ⓜ vehicle longitudinal velocity pojednostavljeni model	0		m/s
mass of vehicle	1800		kg
coefficient of viscous friction	0		N/(m/s)
drag coefficient (Cx)	0.34		null
frontal area	2		m**2
air density	1.226		kg/m**3
ambient wind velocity (relative to the ground)	0		m/s

3.7. Model pneumatika

Komponenta pneumatika prikazana je na slici 3.8. Sastoji se od pet portova. Prvi je port veza kotača s podlogom, drugi port se spaja s poluvratilom gdje se dovodi snaga s M/G stroja, na treći port se dovodi moment kočenja, četvrti je veza s vozilom gdje se dobiva informacija o vertikalnoj sili na pneumatik i port pet se spaja na slobodno rotirajući kraj vratila.

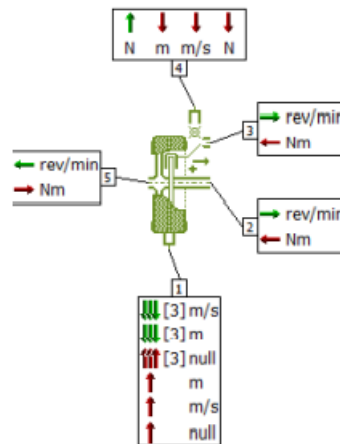
Dinamika kotača je opisana jednadžbom:

$$J_w \cdot \dot{\omega}_w = \tau_5 - \tau_2 - \tau_{brk} - \tau_{res} - F_x \cdot R_{roll}, \quad (8)$$

gdje je J moment inercije kotača, ω kutna brzina kotača, τ_2 i τ_5 primijenjeni moment na portovima dva i pet, τ_{brk} moment kočenja, F_x uzdužna sila koju guma prenosi na cestu, R_{roll} radijus kotača i τ_{res} moment otpora kotrljanja. Moment otpora kotrljanja je definiran kao:

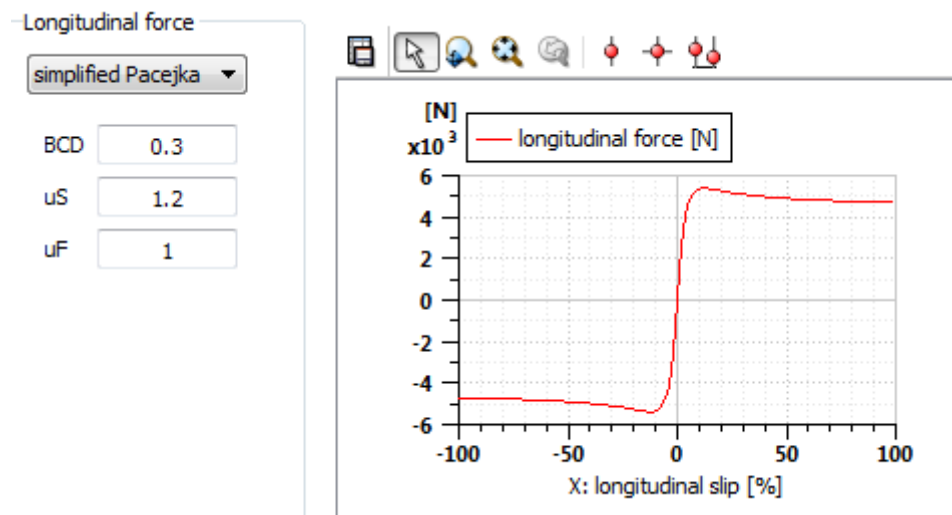
$$\tau_{res} = R_{roll} \cdot F_z \cdot R_c, \quad (9)$$

gdje je F_z vertikalna sila na kotač i R_c koeficijent otpora kotrljanja.



Slika 3.8. Komponenta modela pneumatika.

Odabrani je model za računanje uzdužne sile koju razvija pneumatik Pacejkin model [6]. Pacejkin model ili magična formula je formula razvijena za računanje uzdužne sile gume u odnosu na uzdužno klizanje gume koje je definirano kao razlika između brzine oboda gume kotača koji prenosi uzdužnu silu na cestu i neopterećenog kotača. Formula je razvijena na temelju eksperimentalnih podataka te nema fizikalnu podlogu, no zbog dobrog opisivanja ponašanja raznih vrsta guma često je korištena pri modeliranju pneumatika. U ovom je slučaju korišten pojednostavljeni Pacejkin model, zbog nedostatka poznavanja parametara određene gume, u kojem se zadaje faktor trenja pri maksimalnom klizanju, faktor trenja pri maksimalnoj uzdužnoj sili i nagib krivulje u ishodištu, kako prikazuje slika 3.9.



Slika 3.9. Pacejkin model pneumatika.

3.8. Model vozača

Komponenta koja opisuje model vozača je prikazana na slici 3.10. Komponenta ima četiri porta. Prvi port je port za odabir stupnja prijenosa, a odabrani model se koristi za vozila s automatskom transmisijom pa položaj ručice može imati vrijednost 1 za vožnju unaprijed, - 1 za vožnju

unatrag te 0 kao neutralnu poziciju. Drugi port je port koji daje signal za ubrzanje vozila, a treći port je signal kočenja. Četvrti port je ulazni port na koji se dovodi trenutna brzina vozila koja se uspoređuje sa zadanom referencom te se računa greška praćenja reference brzine vozila.



Slika 3.10. Komponenta modela vozača.

Signali na portu za papučice akceleratora i kočnice a_{cc} se dobivaju kao izlazi iz PI regulatora. PI regulator opisan je jednačbom (prikazan je signal ubrzanja no na isti način se dobiva i signal kočenja):

$$a_{cc} = K_{Pv}e_v + K_{Iv} \int e_v dt, \quad (10)$$

gdje je e_v pogreška slijedenja referentne brzine voznog ciklusa ($v_{vR} - v_v$), K_P proporcionalno pojačanje regulatora, K_I integralno pojačanje regulatora, v_{vR} referenca brzine vozila, v_v stvarna brzina vozila, a_{cc} signal ubrzanja.

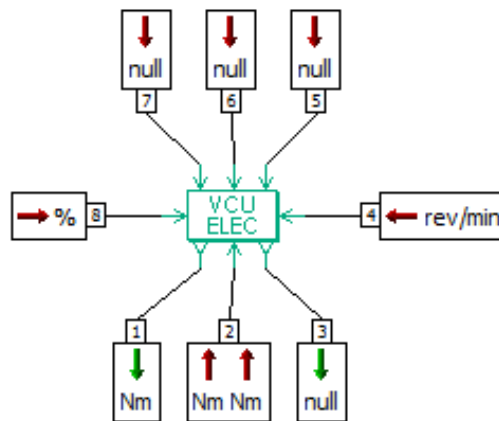
Za ovu komponentu zadaju se integralno i proporcionalno pojačanje u petlji ubrzanja i petlji kočenja koje određuju ponašanje vozača. Ovi parametri dobiveni su na heuristički način, odnosno, parametri su namješteni pogađanjem dok brzina vozila nije zadovoljavajuće odgovarala referenci brzine. Parametri vozača prikazani su u tablici 3.4.

Tablica 3.4. Parametri vozača.

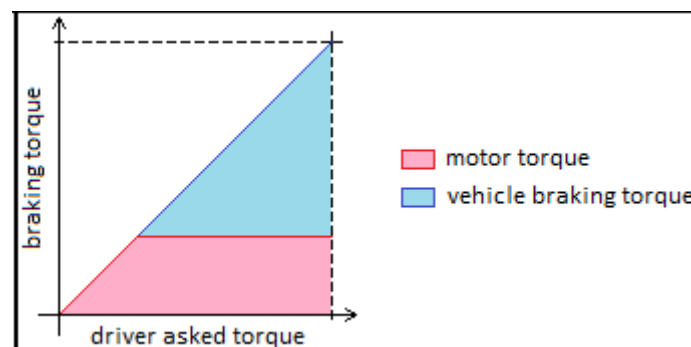
Title	Value	Tags	Unit
cycle type	cycle without slopes		
advance time for control anticipation	1		s
acceleration control			
integral part of the acceleration control loop	0		m
anticipative gain for acceleration control loop	0		1/(m/s/s)
proportional gain for acceleration control loop	1.5		1/(m/s)
integral gain for acceleration control loop	1		1/m
braking control			
integral part of the braking control loop	0		m
anticipative gain for braking control loop	0		1/(m/s/s)
proportional gain for braking control loop	1		1/(m/s)
integral gain for braking control loop	0.1		1/m
stops			
use braking pedal during stops	no		
brake value during vehicle stop	80		%

3.9. Kontrolna jedinica za električno vozilo

Kontrolna jedinica je komponenta u AmeSimu koja se koristi kako bi primala informacije od vozača, baterije i motora, analizirala ih te tako optimalno upravljala da bi se smanjila potrošnja baterije te kako bi se omogućilo regenerativno kočenje. Komponenta ima osam portova, prikazana je na slici 3.11. Prvi port služi za davanje reference momenta motoru, drugi port prima informaciju o maksimalnom i minimalnom momentu motora, treći port daje signal momenta kočenja, četvrti port prima informaciju o brzini vrtnje M/G stroja, portovi pet, šest i sedam su spojeni na vozača te primaju informacije o ubrzanju, kočenju te položaju ručice mjenjača koje generira vozač, a port osam prati stanje napunjenosti baterije. Ova komponenta nudi četiri mogućnosti izbora načina regenerativnog kočenja, a izabrani način je serijski. Serijski način prikazan je na slici 3.12. U serijskom načinu zahtijevani moment kočenja daje M/G stroj, a ako je zahtijevani moment veći od onog što M/G stroj može isporučiti, koriste se kočnice.



Slika 3.11. Komponenta kontrolne jedinice električnog vozila.



Slika 3.12. Serijsko regenerativno kočenje.

Tablica 3.5. prikazuje sve parametre korištene prilikom izrade detaljnog modela.

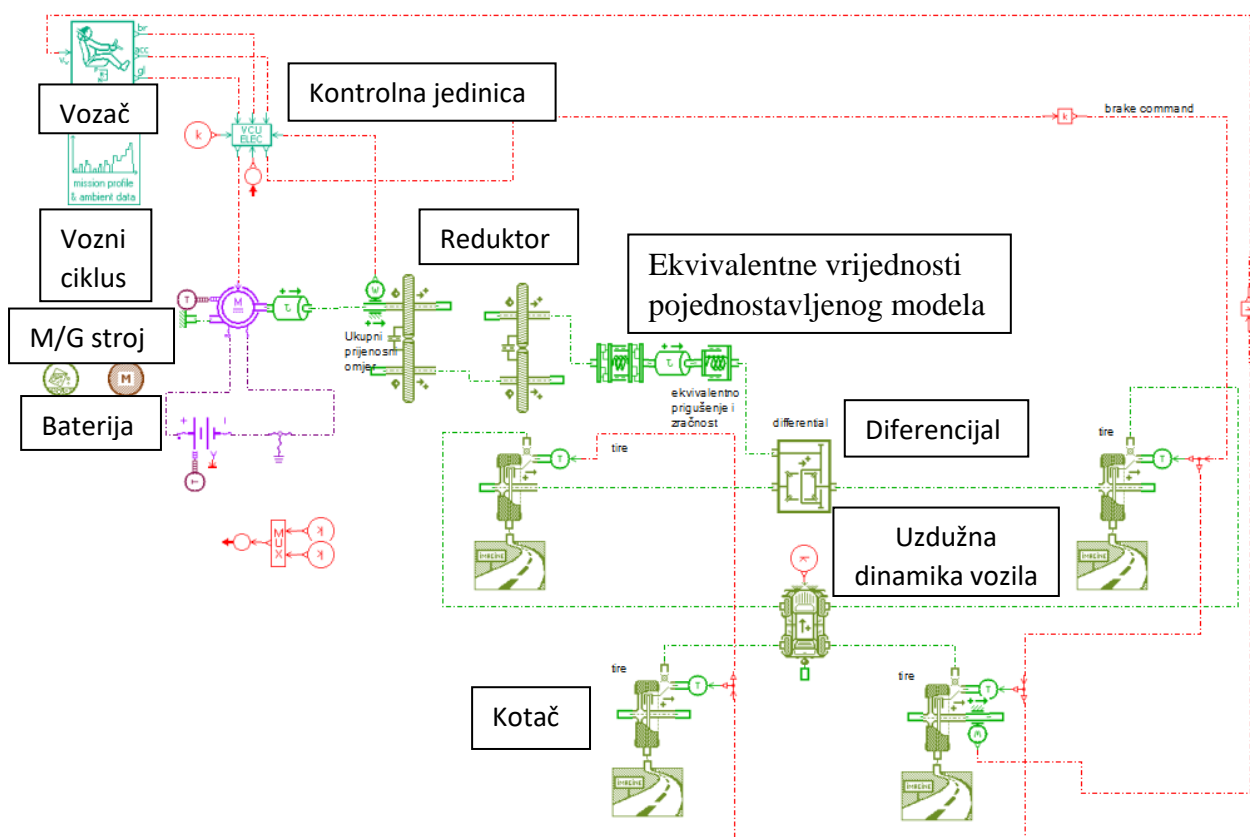
Tablica 3.5. Parametri detaljnog modela

Inercija M/G stroja	J_m	0.08 kgm ²
Krutost prvog vratila	k_1	50000 Nm/rad
Faktor prigušenja prvog vratila	c_1	25 Nm s/rad
Inercija prvog zupčanika u reduktoru	J_{z1}	0.0004 kgm ²
Zračnost reduktora	$2\alpha_r$	2°
Inercija drugog zupčanika zajedno s vratilom	J_{z2}	0.023 kgm ²
Krutost drugog vratila	k_2	500000 Nm/rad
Faktor prigušenja drugog vratila	c_2	25 Nm s/rad
Inercija pogonskog zupčanika diferencijala	J_{d1}	0.0002 kgm ²
Zračnost prvog zupčanog para diferencijala	$2\alpha_{d1}$	2°
Inercija kućišta diferencijala	J_{dk}	0.01 kgm ²
Zračnost drugog zupčanog para diferencijala	$2\alpha_{d2}$	2°
Inercija poluvratila	J_{hs}	0.006 kgm ²
Krutost poluvratila	k_{hf}	15000 Nm/rad
Faktor prigušenja poluvratila	c_{hf}	20 Nm s/rad
Inercija kotača	J_w	1 kgm ²
Koeficijent otpora kotrljanju kotača	R_c	0.01
Radius kotača	R_w	0.29 m
Masa vozila	M	1800 kg
Koeficijent aerodinamičkog otpora	C_d	0.34
Gustoća zraka	ρ	1.226 kg/m ³
Frontalna površina vozila	A	2 m ²

4. Pojednostavljeni model pogona

Kako bi se jednostavnije opisao model pogonskog sklopa za potrebe razvijanja algoritma za kompenzaciju utjecaja zračnosti, napravljen je pojednostavljeni model s koncentriranim zračnostima, elastičnostima i prigušenjima, prikazan na slici 4.1. Određivanje parametara pojednostavljenog modela vrši se matematičkim putem što će biti opisano dalje u tekstu. Nakon što je napravljen pojednostavljeni model, provodi se simulacija i analiza rezultata te se uspoređuju s detaljnim modelom kako bi se ustanovila točnost pojednostavljenog modela.

Prilikom modeliranja pojednostavljenog modela pogonskog sklopa, model vozača, model uzdužne dinamike, komponente pneumatika, elektromotora i baterije ostaju isti. Mijenjaju se samo elementi zračnosti, elastičnosti, prigušenja i inercije.



Slika 4.1. Pojednostavljeni model pogona električnog vozila.

4.1. Element zračnosti

Kao što se vidi iz prethodnog poglavlja, postoje tri elementa zračnosti u detaljnom modelu pogonskog sklopa. Da bismo pojednostavnili model, te tri zračnosti moramo koncentrirati u jedan element. Dva elementa zračnosti možemo spojiti u jedan na način da zbrojimo kut zračnosti dvaju elemenata. Moramo uzeti u obzir i prijenosni omjer. Kada element zračnosti prelazi preko reduktora, silazno po toku snage, zračnost se dijeli s prijenosnim omjerom da bismo dobili ekvivalentnu zračnost. Sva tri elementa svedemo preko prijenosnih omjera da bismo ih mogli zbrojiti i dobili jedan element zračnosti koji predstavlja ekvivalentnu zračnost modela.

$$\alpha' = \frac{\alpha}{i} \quad (11)$$

$$\alpha_{ekv} = \sum \alpha' \quad (12)$$

Dobivena ekvivalentna zračnost pojednostavljenog modela je $2\alpha=5^\circ$.

4.2. Element elastičnosti i prigušenja

Slično elementu zračnosti, elementi prigušenja i elastičnosti se prvo moraju reducirati preko reduktora, silazno po toku snage. Krutosti i koeficijente prigušenja množimo s kvadratom prijenosnog omjera.

$$k' = k \cdot i^2 \quad (13)$$

Nakon što smo reducirali krutosti i koeficijente prigušenja određuje se ekvivalentna krutost sustava prema formuli:

$$\frac{1}{k_{ekv}} = \sum \frac{1}{k'} \quad (14)$$

Dobivena ekvivalentna krutost pogonskog sklopa je $k_{ekv}=10986.7$ Nm/rad. Isto vrijedi i za koeficijent prigušenja:

$$c' = c \cdot i^2 \quad (15)$$

$$\frac{1}{c_{ekv}} = \sum \frac{1}{c'} \quad (16)$$

Ekvivalentni faktor prigušenja pogonskog sklopa je $c_{ekv}=18.8188$ Nm s/rad

4.3. Inercije

Prilikom reduciranja inercija na jednu ekvivalentnu inerciju, potrebno je svesti sve inercije preko prijenosnog omjera. To se čini tako da se svaka inercija množi s kvadratom prijenosnog omjera, silazno po toku snage. Zatim se sve inercije jednostavno zbroje da bi se dobila ekvivalentna inercija pojednostavljenog modela.

$$J' = J \cdot i^2 \quad (17)$$

$$J_{ekv} = \sum J' \quad (18)$$

Dobivena ekvivalentna inercija pogonskog sklopa je $J_{ekv} = 0.08$ kgm²

4.4. Gubitci u zupčastim parovima

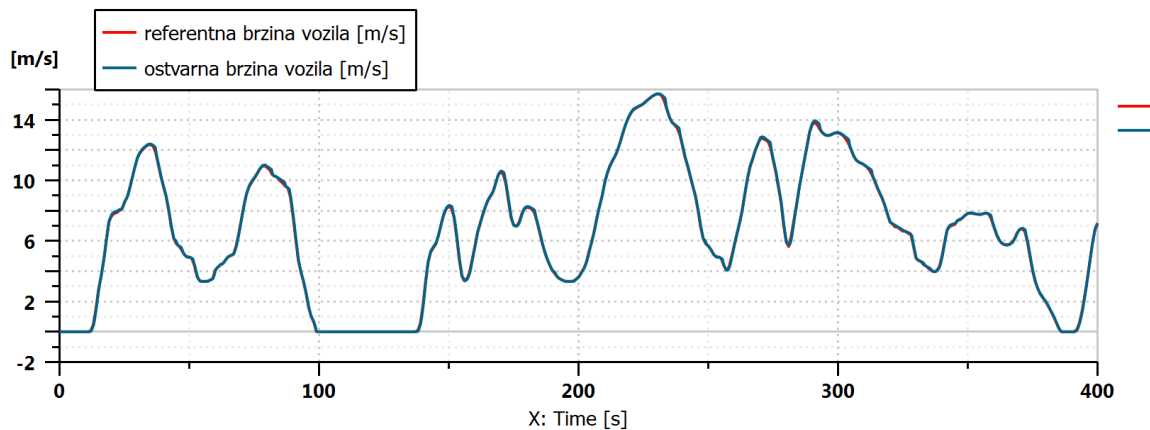
Već je spomenuto da se gubitci dijele na gubitke trenja i gubitke bućkanja ulja. Ukupni gubitci trenja dobiju se jednostavno množenjem faktora iskoristivosti svih pojedinih faktora iskoristivosti zupčastih parova.

$$\eta_{ekv} = \prod \eta_i \quad (19)$$

Dobiveni ekvivalentni gubitci zupčastih parova su $\eta_{ekv}=0.9025$.

5. Rezultati simulacije

Provođenje simulacije provodi se na način da se zadaje vozni ciklus vozaču koji zatim papučicom gasa ili kočnice definira zahtijevani moment kotača tako da vozilo prati vozni ciklus. Prilikom simulacije korišten je WLTC vozni ciklus od 6.6 minuta, odnosno 400 sekundi. Profil brzine vozila u vremenu definiran WLTC voznim ciklusom prikazan je na slici 5.1. Na istoj slici dana je i ostvarena brzina vozila dobivena simulacijskom provjerom modela vozača i pogonskog sklopa.



Slika 5.1. Vremenski profili referentne i ostvarene brzine vozila dobivene simulacijskom provjerom modela vozača i pogonskog sklopa preko WLTC voznog ciklus.

Kako bi analizirali utjecaj zračnosti na uzdužnu dinamiku vozila, pogonski sklop je modeliran s i bez elemenata zračnosti te su simulacijski odzivi dobiveni na dva različita modela vozila uspoređena. Simulacija je provedena preko WLTC voznog ciklusa te su analizirani detalji u kojima imamo prolaz kroz zračnost, odnosno kretanje zupčanika od jedne granične točke do druge. Zatim je provedena simulacijska usporedba pojednostavljenog i detaljnog modela na istom voznom ciklusu.

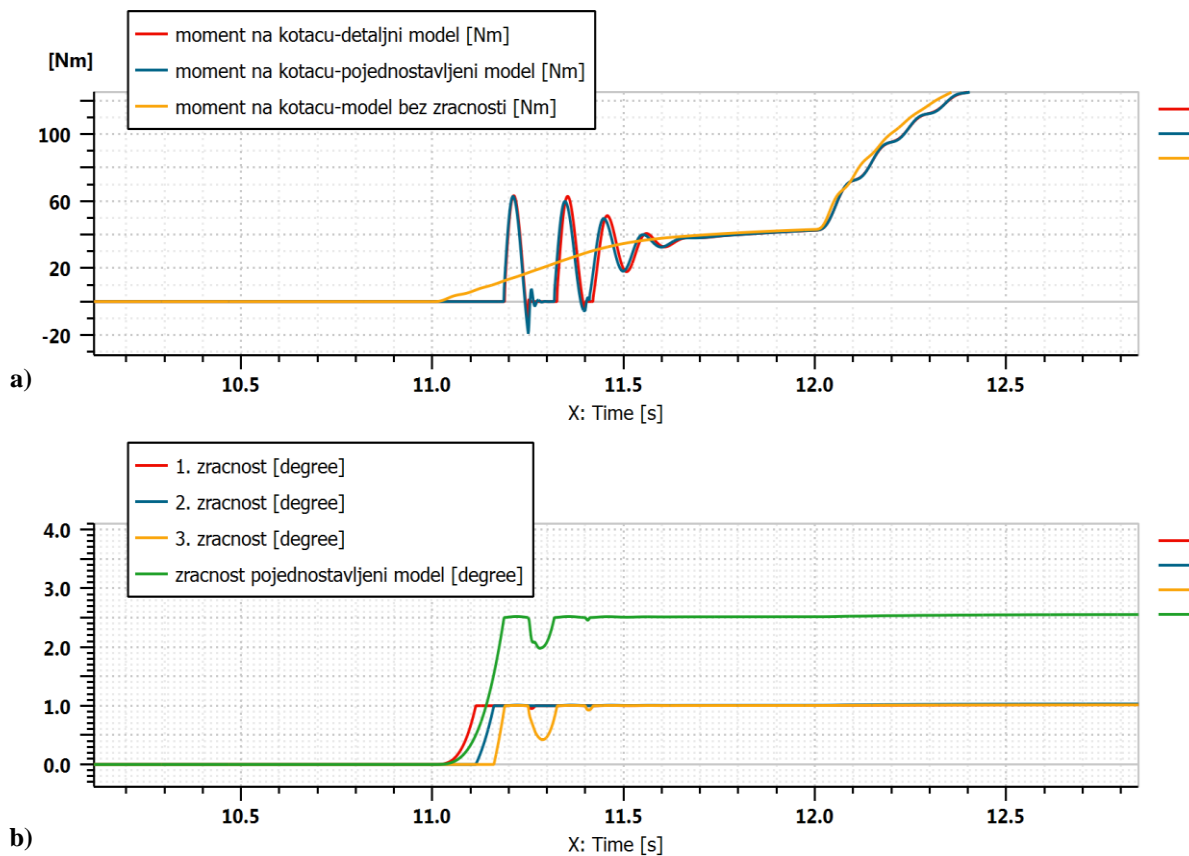
Iz analize odziva je vidljivo da svaki prolazak kroz zračnost uzrokuje udare momenta te oscilacije sustava. Također je vidljivo da je prolazak kroz zračnost prisutan prilikom pokretanja vozila iz mjesta, prelaska iz ubrzanja u regenerativno kočenje i kod prelaska s regenerativnog kočenja u ubrzanje. U tim slučajevima se javljaju udari momenta i vibracije pogona. Detaljnije su opisani u nastavku teksta.

5.1. Pokretanje vozila iz mjesta

Analiziran je slučaj pokretanja vozila iz mirovanja. Dok je vozilo u mirovanju, zračnost je u nultom položaju. Kada se motor pokrene, dolazi do prolaza kroz zonu zračnosti te zupčanik udara u granični položaj. Prilikom pokretanja vozila zračnost ne mora biti u nultom položaju, već može biti u svim drugim, osim u graničnoj poziciji kako bi došlo do udara i torzijskih vibracija. Kako u modelu imamo tri zračnosti, jedna u reduktoru i dvije u diferencijalu, tako se svaka zračnost kreće zatvarati tek nakon što prethodna dođe do graničnog položaja. Kada treća zračnost dođe do graničnog položaja, prenosi se moment na kotač i vozilo se pokreće.

Na slici 5.2. je prikazan moment kotača u odnosu na kut zračnosti. Kada zadnja zračnost dođe do graničnog položaja, dolazi do udara momenta na kotaču, te vibracija pogona. U modelu bez zračnosti vidimo da takvih vibracija i udara nema. Moment na kotaču u modelu bez zračnosti

kreće rasti ranije u odnosu na onaj sa zračnosti. Na slici 5.2. je uspoređen moment kotača pojednostavljenog modela s onim u detaljnom modelu. Moment pojednostavljenog modela se poklapa po amplitudi i oscilacijama s detaljnim modelom.

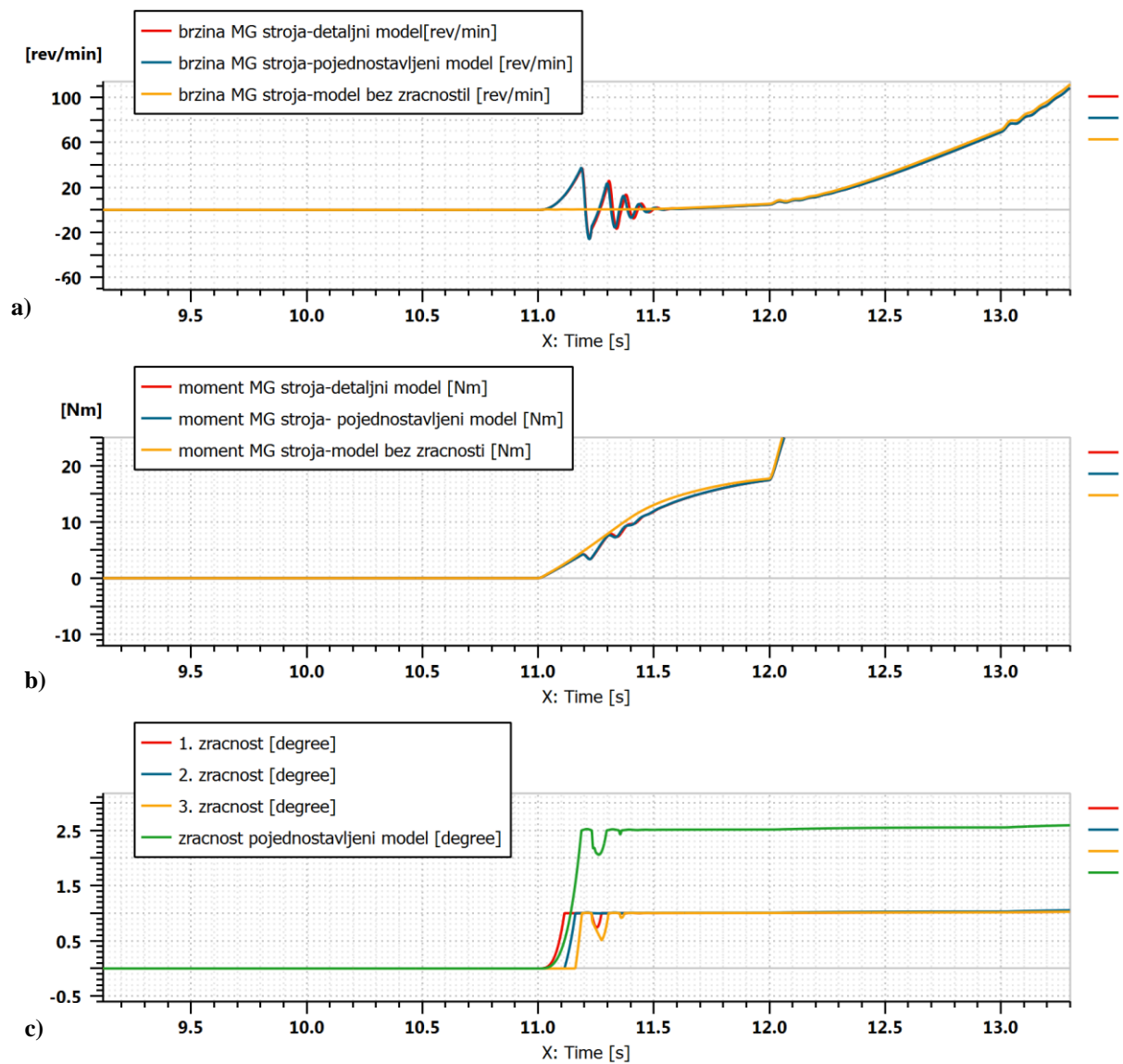


Slika 5.2. Simulacijska usporedba modela prilikom pokretanja vozila; moment na kotaču (a), zračnost (b).

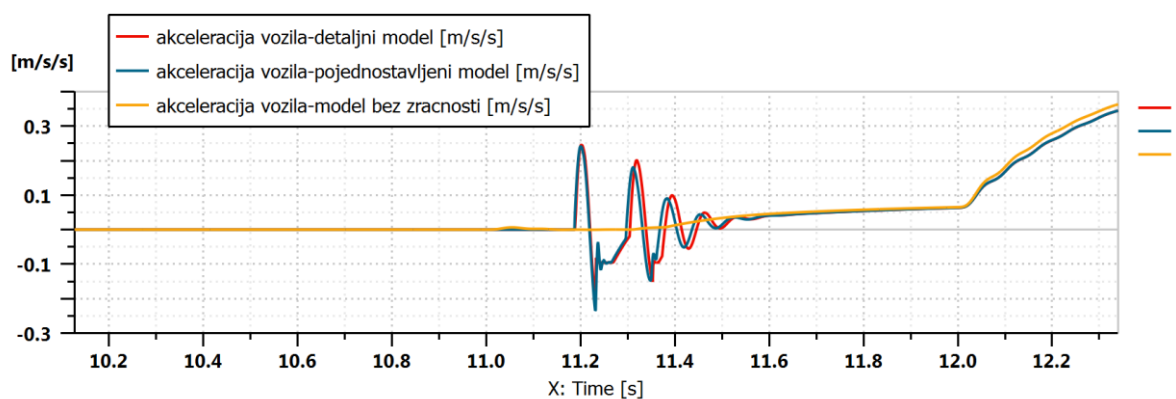
Prolaz kroz zonu zračnosti je jako sličan, odnosno kut zračnosti u pojednostavljenom modelu kreće rasti isto kada i kut prve zračnosti u detaljnom modelu, a do zatvaranja zračnosti, tj. udara u graničnu točku pojednostavljenog modela, dolazi isto kada i do zatvaranja treće zračnosti detaljnog modela.

Na slici 5.3. su prikazani moment i brzina M/G stroja u odnosu na zračnost. Moment M/G stroja detaljnog modela i modela bez zračnosti kreću rasti istovremeno, no u detaljnom modelu su vidljive oscilacije nastale nakon prolaska kroz zračnost. Brzina M/G stroja u modelu bez zračnosti kreće rasti ravnomjerno te nema propadanja niti značajnih oscilacija, dok u detaljnom modelu imamo značajan pad brzine te oscilacije brzine nakon prolaska kroz zonu zračnosti. Kako je vidljivo sa slike 5.3., pojednostavljeni model se poklapa s detaljnim jako dobro. Poklapaju se i brzina i moment M/G stroja, oscilacije i amplitude su gotovo iste.

Udar momenta izaziva skok akceleracije, odnosno trzaj što pogoršava udobnost vožnje. Na slici 5.4. je prikazana akceleracija vozila prilikom pokretanja vozila. Izražen je skok i oscilacije u detaljnom modelu. Pojednostavljeni model dobro opisuje i akceleraciju detaljnog modela. U modelu bez zračnosti vidimo da naglih promjena i oscilacija akceleracije nema.



Slika 5.3. Simulacijska usporedba modela prilikom pokretanja vozila; brzina M/G stroja (a), moment M/G stroja (b), zračnost (c).



Slika 5.4. Simulacijska usporedba odziva akceleracije vozila prilikom pokretanja vozila.

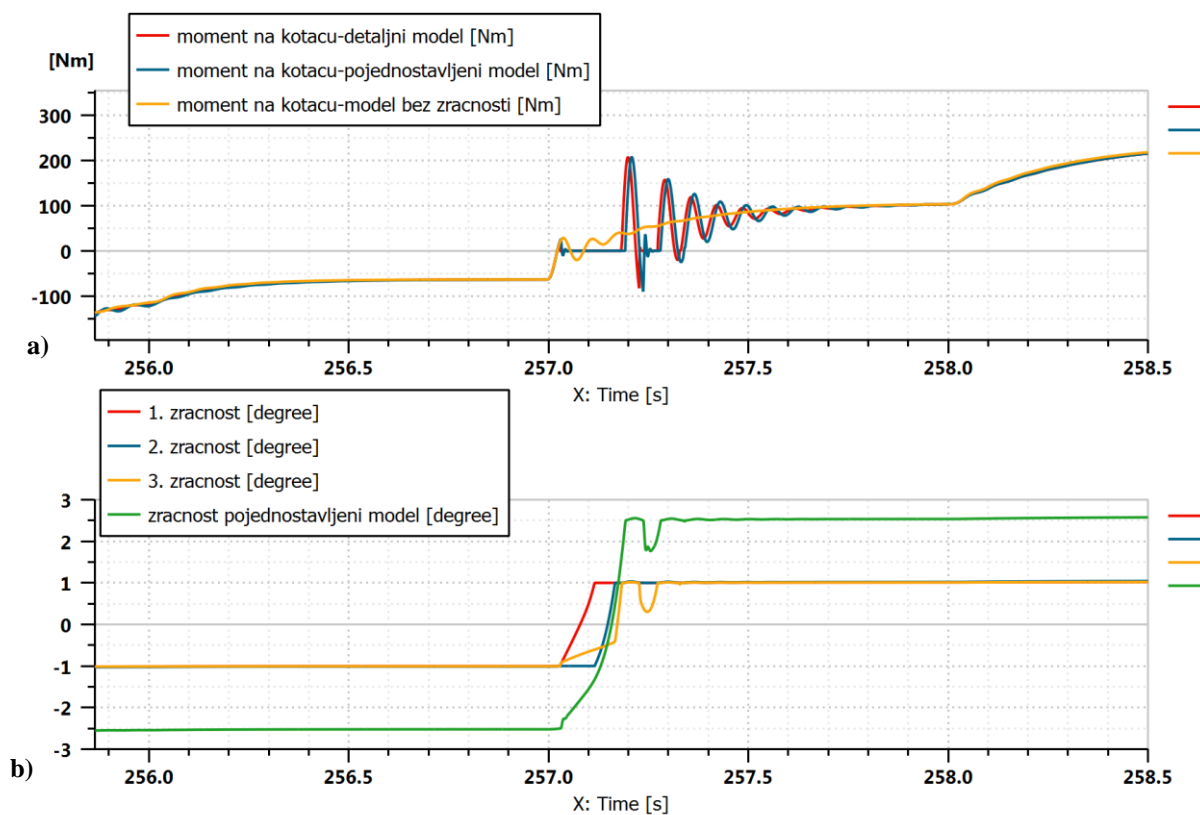
5.2. Prelazak s regenerativnog kočenja u ubrzanje

Električna vozila koriste regenerativno kočenje kako bi kinetičku energiju vozila pretvorili u električnu energiju te ju pohranili u bateriju i tako povećali domet vozila. Prilikom regenerativnog kočenja, M/G stroj radi u generatorskom režimu rada te je moment negativan. Prilikom prelaska iz regenerativnog kočenja u ubrzanje vozila, M/G stroj prelazi u motorski režim rada, odnosno mijenja se predznak momenta.

Prilikom promjene predznaka momenta dolazi do prolaska kroz punu zračnost. Prolazak kroz punu zračnost znači da zupčanik prolazi od donje do gornje granične pozicije. Dok su zupčanici u području zračnosti, nema prijenosa snage. Kada zupčanik prođe kroz zračnost i udari u graničnu točku, dolazi do udara momenta i vibracija pogona.

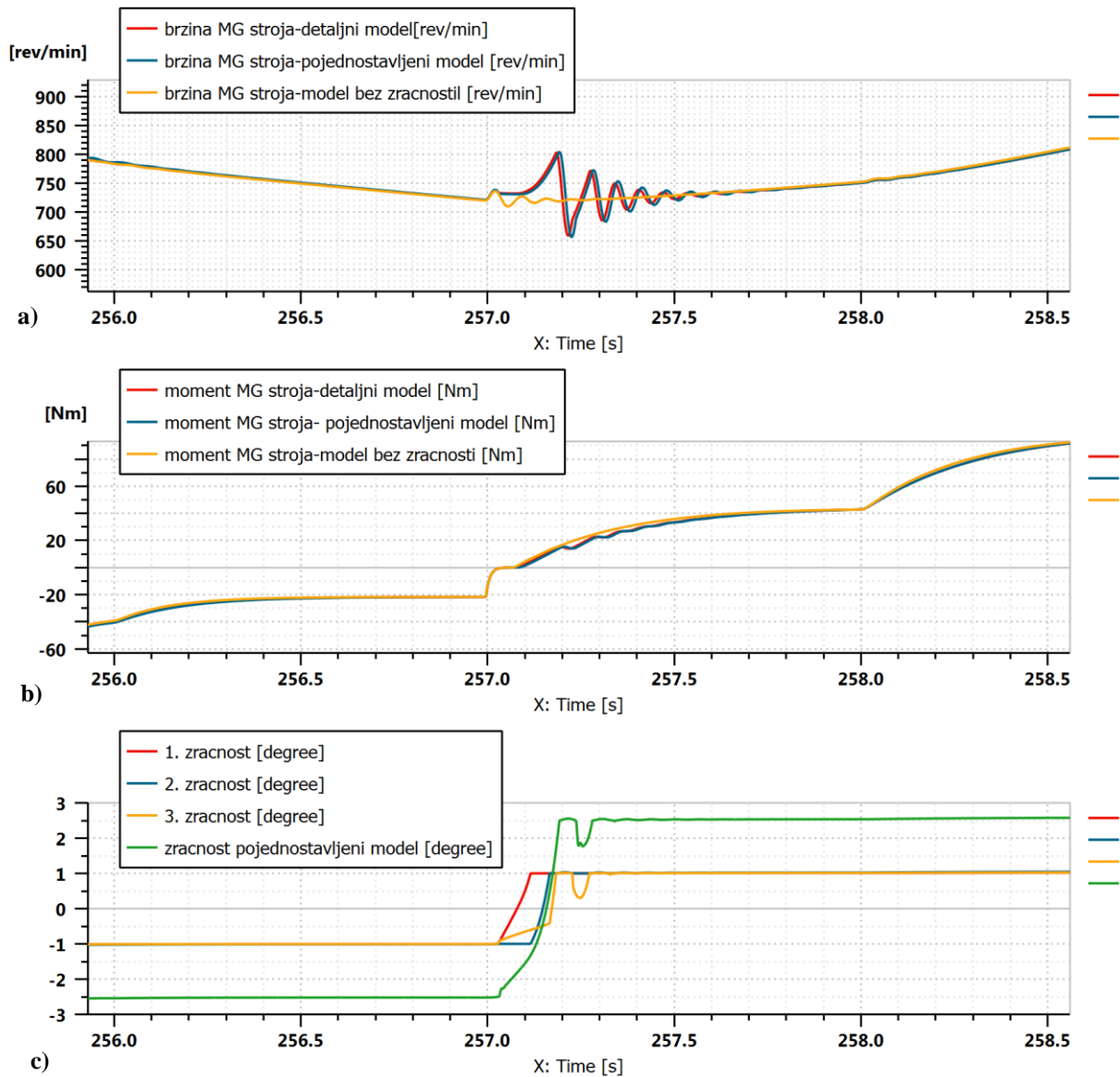
Za ovaj je slučaj zanimljivo da prolazak kroz zračnost ne ide na način da svaka iduća kreće kada se zračnost prije nje zatvori. Vidimo da u ovom slučaju treća i prva zračnost u modelu kreću u istom trenutku, a da se druga i treća zračnost u istom trenutku zatvore.

Na slici 5.5. je prikazan moment na kotaču prilikom prelaska iz ubrzanja u regenerativno kočenje. Prilikom prolaska kroz zračnosti dolazi do udara momenta i vibracija pogona. Također, moment je na nuli dok su zupčanici u području zračnosti. I u ovom slučaju pojednostavljeni model se poklapa s detaljnim. U modelu bez zračnosti su nastale zanemarive vibracije zbog elastičnosti vratila, značajno manje u odnosu na modele sa zračnosti.



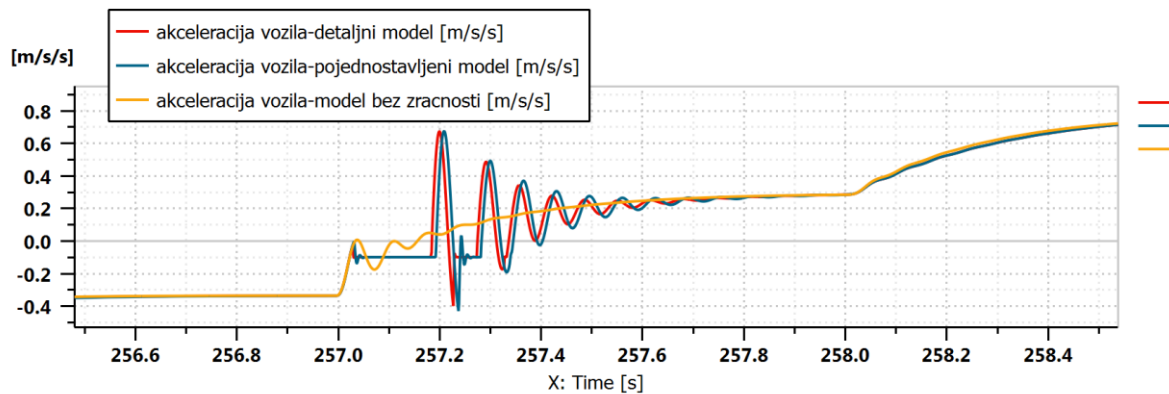
Slika 5.5. Simulacijska usporedba modela prilikom prelaska vozila iz regenerativnog kočenja u ubrzanje; moment na kotaču (a), zračnost (b).

Na slici 5.6. su prikazani odzivi brzine i momenta M/G stroja tijekom prelaska s regenerativnog kočenja u ubrzanje. U odnosu na model bez zračnosti, u kojem nemamo udara ni značajnih oscilacija, u detaljnom modelu je izražen pad brzine M/G stroja te oscilacije brzine uzrokovane prolaskom kroz zračnost. Pojednostavljeni model dobro opisuje brzinu i moment M/G stroja detaljnog modela.



Slika 5.6. Simulacijska usporedba modela prilikom prelaska vozila iz regenerativnog kočenja u ubrzanje; brzina M/G stroja (a), moment M/G stroja (b), zračnost (c).

Na slici 5.7. je prikazan odziv akceleracije tijekom prelaska s regenerativnog kočenja u ubrzanje. U modelu sa zračnosti imamo izraženi skok akceleracije koji nastaje nakon prolaska kroz zračnost. Također se u modelu sa zračnosti javljaju oscilacije u odzivu akceleracije, dok u modelu bez zračnosti niti skoka, niti oscilacija nema. Pojednostavljeni model dobro opisuje akceleraciju detaljnog modela uz zanemarivu grešku.



Slika 5.7. Simulacijska usporedba odziva akceleracije vozila prilikom prelaska iz regenerativnog kočenja u ubrzanje.

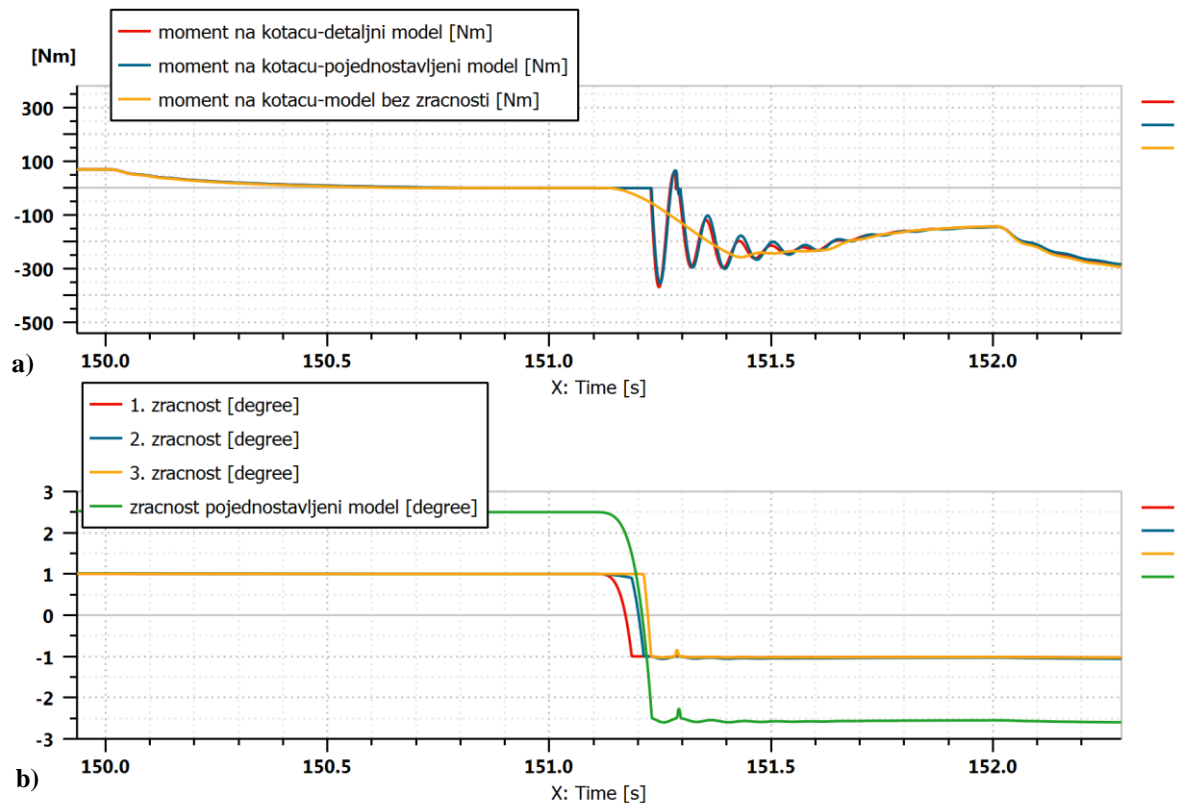
5.3. Prelazak iz ubrzanja u regenerativno kočenje

Slično je regenerativnom kočenju prelazak iz ubrzanja u regenerativno kočenje gdje imamo promjenu predznaka momenta iz pozitivnih u negativne vrijednosti, odnosno prelazak M/G stroja iz motorskog režima rada u generatorski. Prilikom toga ponovno imamo prolazak kroz punu zonu zračnosti koji izaziva udar momenta te vibracije pogona.

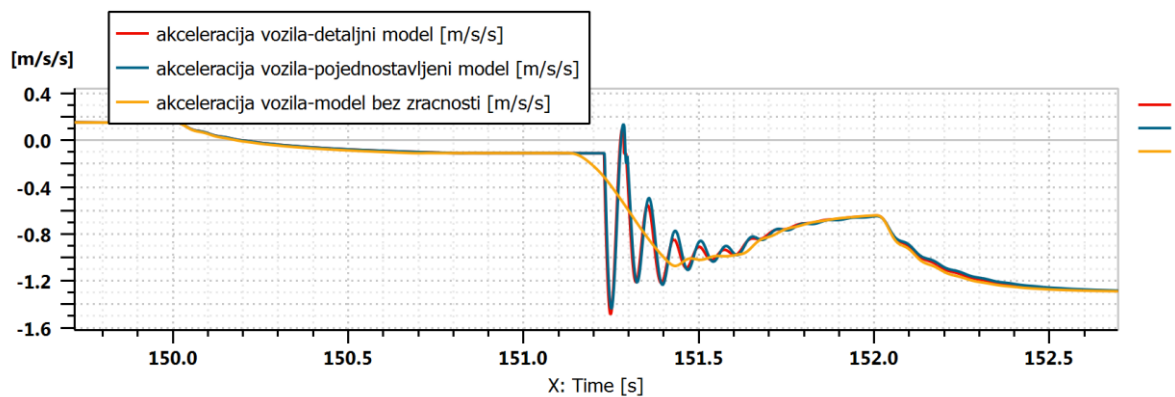
Na slici 5.8. je prikazan moment kotača prilikom ove tranzicije. Moment u detaljnom modelu pada do nule te se zadrži na nuli dok su zupčanici u području zračnosti. Nakon što zupčanici prođu kroz zonu zračnosti, dolazi do naglog udara momenta i vibracija pogona. U modelu bez zračnosti nema takvih vibracija i udara, već moment ravnomjerno pada, odnosno mijenja predznak.

I tijekom ove tranzicije se pojednostavljeni model poklapa s detaljnim. Amplitude i oscilacije odziva momenta odgovaraju onima u detaljnom modelu. Zračnost u pojednostavljenom modelu se otvara u isto vrijeme kada i prva zračnost detaljnog, a zatvara se kada se zatvori posljednja zračnost detaljnog modela.

Na slici 5.9. je prikazan odziv akceleracije u kojem se vide značajni skokovi i oscilacije odziva. Skok izaziva trzaj vozila, što pogoršava udobnost vožnje. U modelu bez zračnosti vidimo da takvih skokova i oscilacija nema, odnosno nema trzaja.

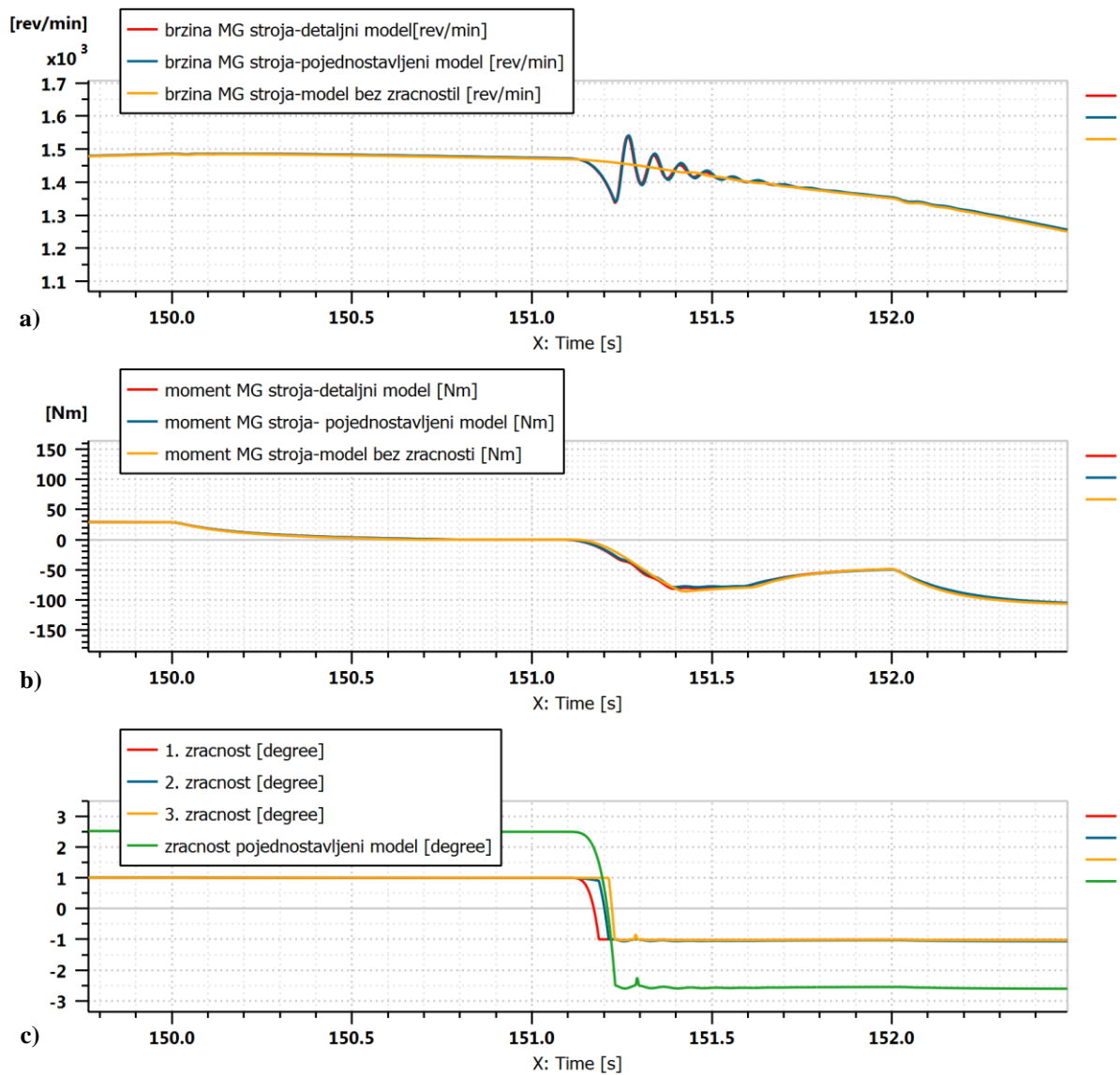


Slika 5.8. Simulacijska usporedba modela prilikom prelaska vozila iz ubrzanja u regenerativno kočenje; moment na kotaču (a), zračnost (b).



Slika 5.9. Simulacijska usporedba odziva akceleracije vozila prilikom prelaska iz ubrzanja u regenerativno kočenje.

Na slici 5.10. su prikazani odzivi brzine i momenta M/G stroja. U detaljnom se modelu, u odnosu na model bez zračnosti, javljaju značajne oscilacije i pad brzine izazvani prolaskom kroz zračnost. Ove oscilacije i pad brzina su dobro opisani i pojednostavljenim modelom. U modelu bez zračnosti nema oscilacija, niti pada brzine.



Slika 5.10. Simulacijska usporedba modela prilikom prelaska vozila iz ubrzanja regenerativno kočenje; brzina M/G stroja (a), moment M/G stroja (b), zračnost (c).

6. Pregled sustava upravljanja za kompenzacija utjecaja zračnosti

6.1. PID regulator

U radu [8] opisano je kako bi se PID regulator mogao koristiti za kompenzaciju utjecaja zračnosti. PID regulatori su često korišteni zbog svoje robusnosti i jednostavnosti. PID regulator je linearni regulator, dok zračnost u sustavu predstavlja nelinearnost. Da bi linearni PID regulator mogao kompenzirati utjecaj zračnosti, mora biti podešen robusno kako bi mogao svladati nelinearnost. U ovom radu načelno je ispitan način kompenzacije utjecaja zračnosti pomoću PI regulatora koji je sličan PID, ali bez derivacijskog djelovanja. PI regulator za kompenzaciju zračnosti je opisan jednažbom:

$$u(t) = K_{pr} \cdot e(t) + K_{ir} \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt, \quad (20)$$

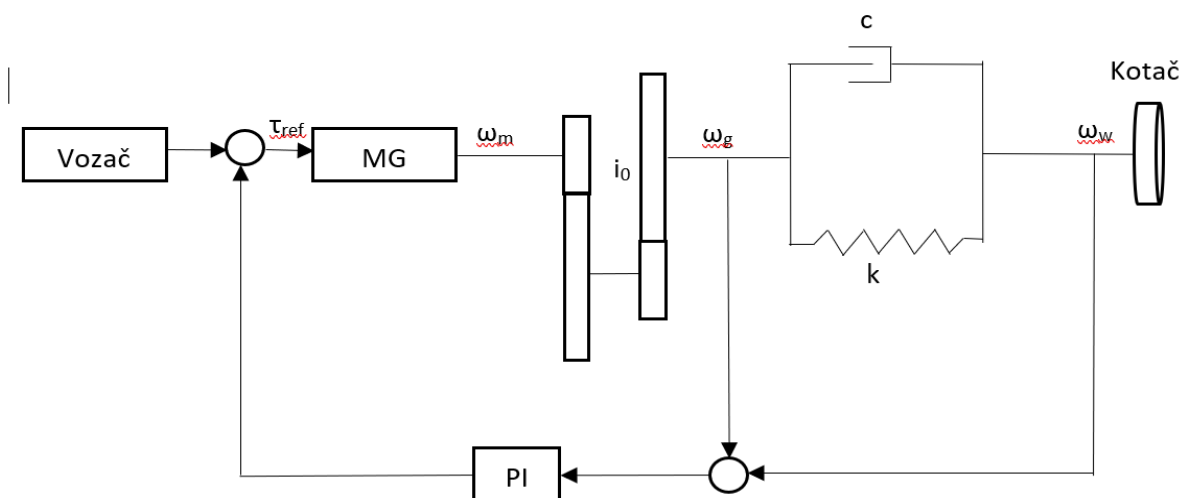
gdje je $u(t)$ izlaz iz regulatora (moment), $e_r(t)$ greška regulacije definirana kao:

$$e_r(t) = r(t) - y(t),$$

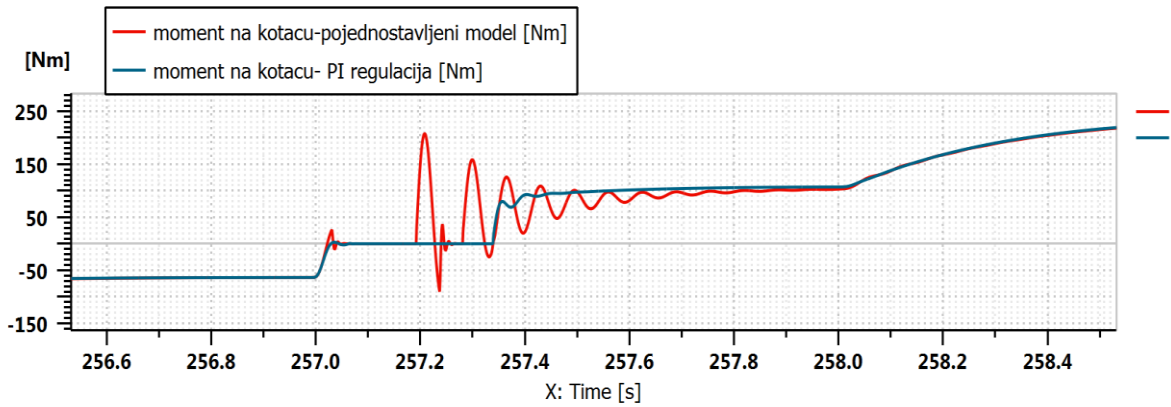
a $r(t)$ je brzina kotača i $y(t)$ je brzina vratila na pogonskom kraju. K_{pr} je proporcionalno pojačanje i K_{ir} je integralno pojačanje

Grešku regulacije u ovom slučaju predstavlja razlika brzina kraja vratila spojenog na kotač te kraja vratila spojenog na pogonsku stranu. Ta greška ulazi u PI kompenzator zračnosti koji daje referencu momenta. Ta referenca momenta se zbraja s referencom koju šalje vozač. Na taj način regulator poništava oscilatorno djelovanje te zupčanike provodi kroz zračnost tako da ne izazove udar.

Na slici 6.2. je prikazana usporedba odziva momenta kotača u modelu bez regulacije te s PI kompenzatorom zračnosti. Vidimo da PI kompenzator zračnosti nije u potpunosti izgadio oscilacije, ali je poboljšanje značajno u odnosu na model bez regulacije.

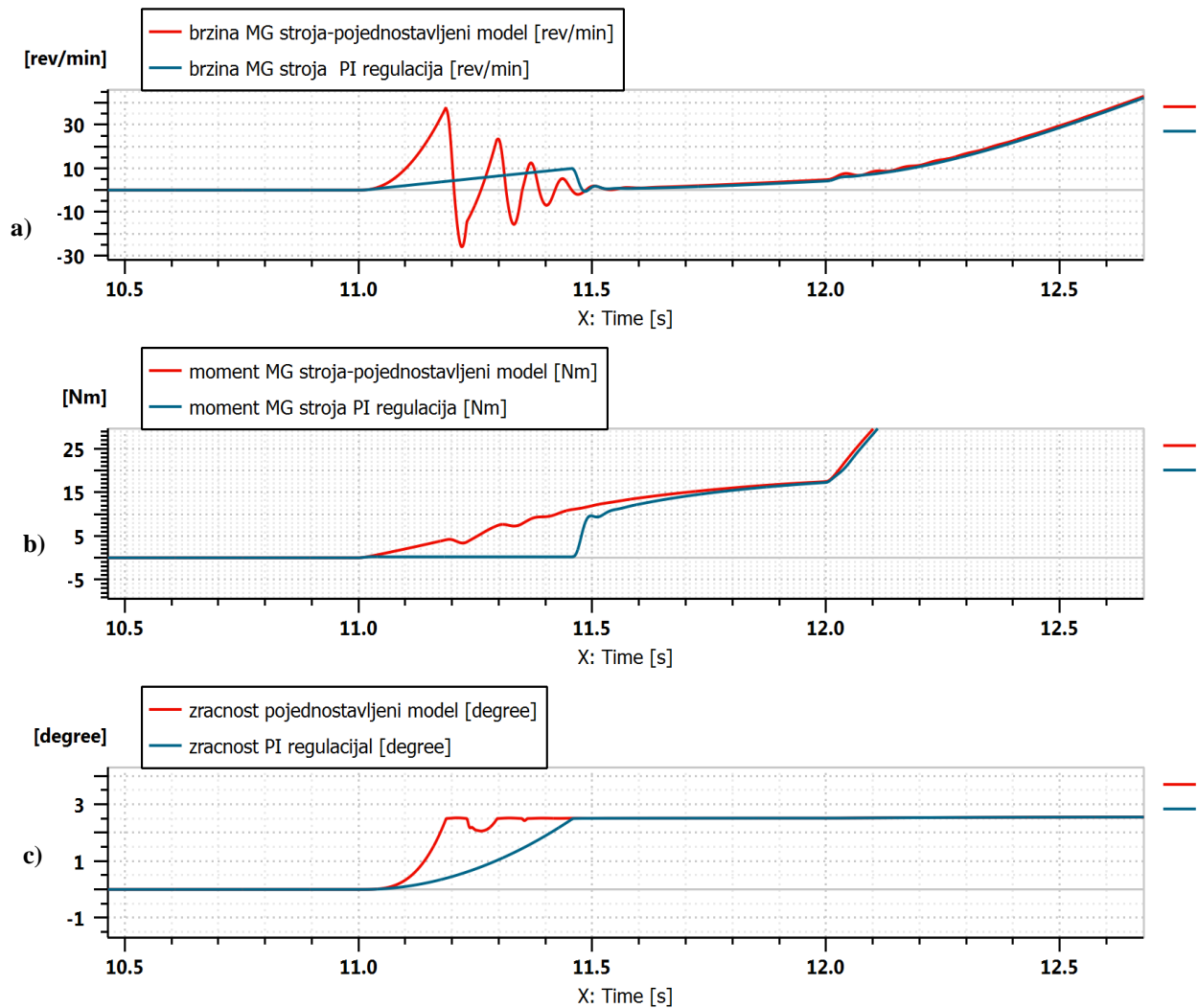


Slika 6.1. Shema upravljanja PI kompenzatorom zračnosti.



Slika 6.2. Usporedba momenta kotača bez regulacije te s PI regulacijom.

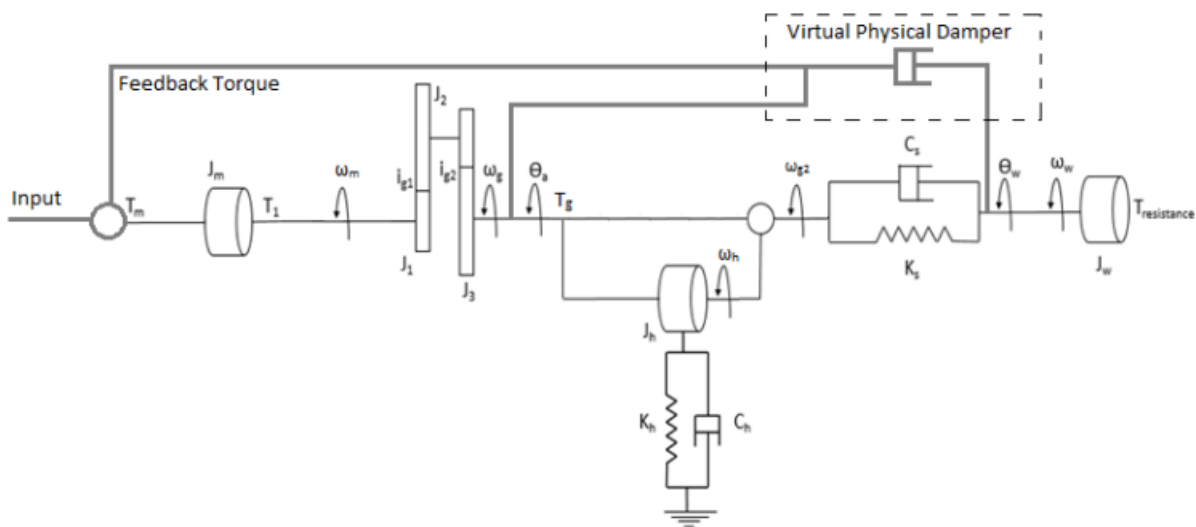
Na slici 6.3. su prikazani odzivi momenta i brzine M/G stroja u modelu bez regulacije te s PI kompenzacijom zračnosti. PI kompenzator zračnosti uspješno uspijeva otkloniti oscilacije iz sustava. Također je prikazan prolaz kroz zračnost. U modelu s PI kompenzacijom zračnosti vidimo kako se kroz zračnost prolazi sporije da se ne bi izazvali udari.



Slika 6.3. Usporedba odziva M/G stroja s PI i bez regulacije, brzina (a), moment (b), zračnost (c).

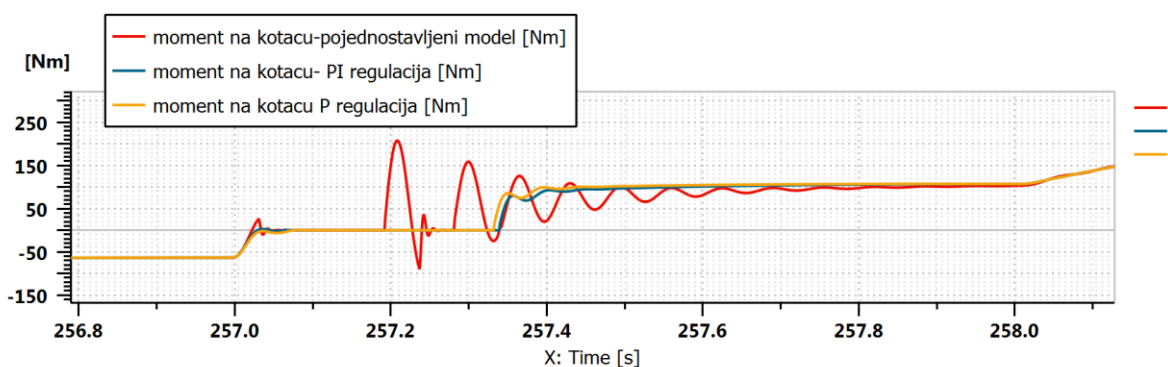
6.2. Virtualni fizikalni prigušni element

U ovoj metodi opisanoj u [9] koristi se virtualno prigušenje. Proporcionalno se djelovanje ekvivalentno faktoru prigušenja vratila koristi kako bi generirao signal momenta u povratnoj vezi koji je rezultat umnoška proporcionalnog djelovanja i razlike u brzini dvaju krajeva vratila. Povratni signal momenta se koristi kako bi se smanjila razlika u brzini i samim time prigušilo oscilacije. Proporcionalno pojačanje se gleda kao prigušni element spojen paralelno s vratilom. Proporcionalno pojačanje je birano tako da daje najbolji odziv prilikom simulacija, odnosno kao kompromis između brzine odziva i dobrog prigušenja oscilacija. Uz dobro postavljene parametre, ova metoda uspješno otklanja udar i oscilacije momenta. Zaključeno je da povećanjem ekvivalentnog faktora prigušenja imamo usporavanje odziva dok se smanjivanjem ubrzava odziv, no oscilacije su slabije prigušene.



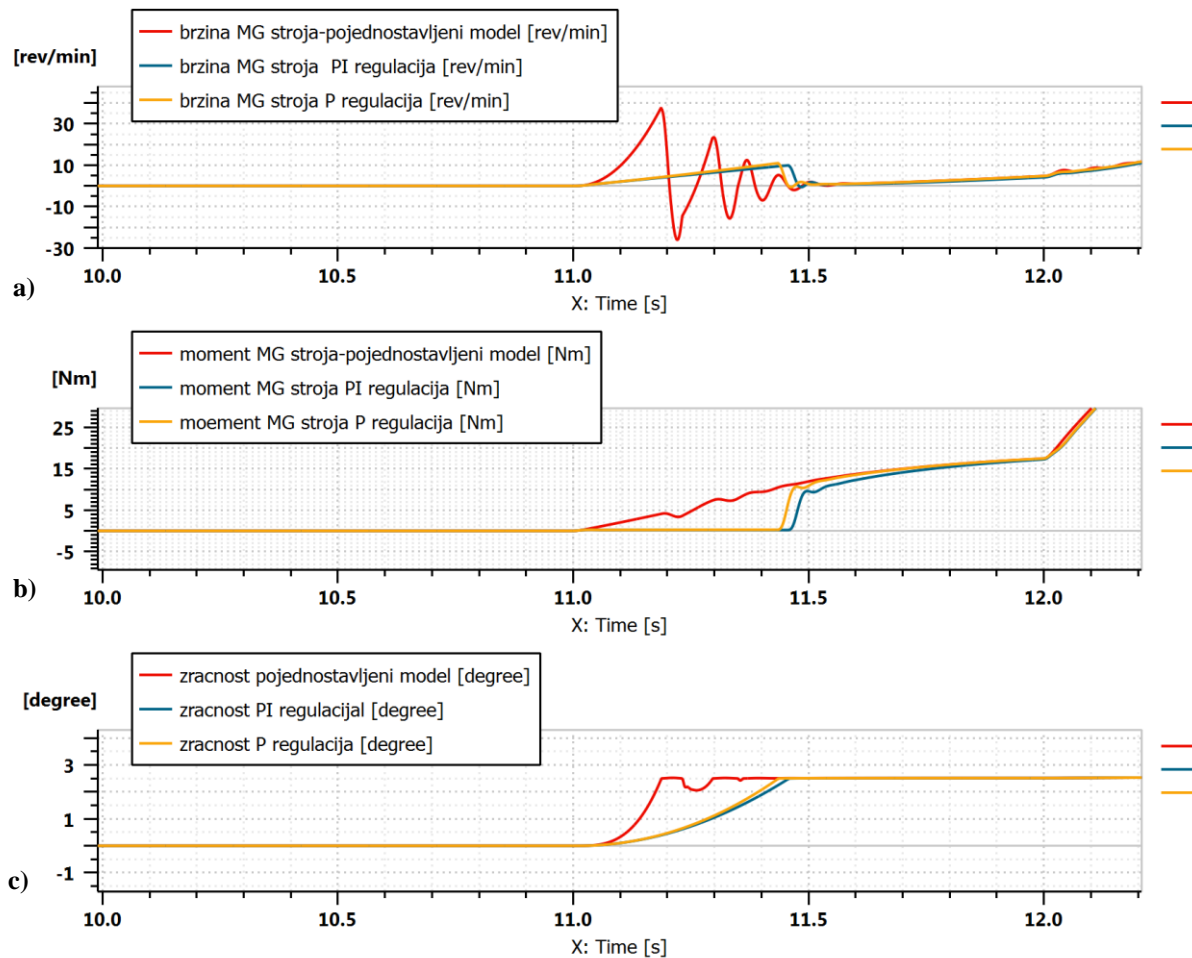
Slika 6.4. Struktura virtualnog fizikalnog prigušenja [9].

U ovom je radu ispitana ova metoda. Na slici 6.3. je prikazan odziv momenta kotača modela bez regulacije, modela s virtualnim fizikalnim prigušenjem te je za usporedbu dan i odziv modela s PI kompenzacijom zračnosti. Virtualno fizikalno prigušenje nešto prije djeluje na referencu momenta te moment na kotaču kreće prije rasti u odnosu na onaj s PI kompenzacijom. Prigušenost oscilacija ista je kao i u slučaju s PI kompenzacijom.



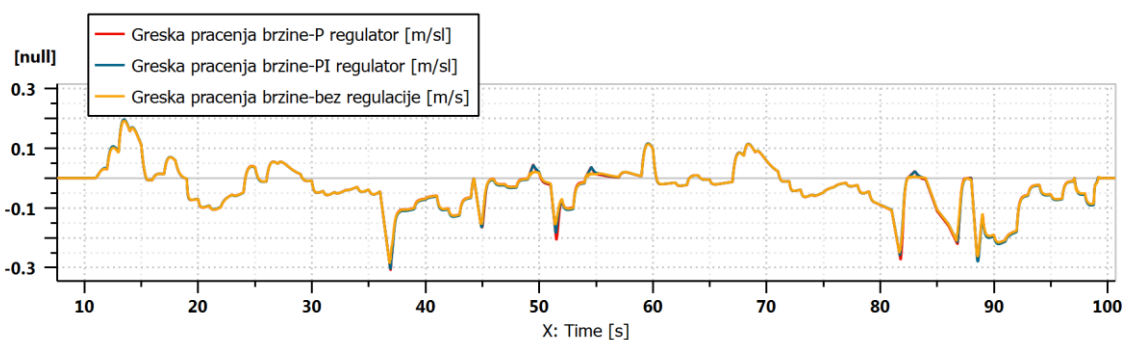
Slika 6.5. Usporedba odziva moment na kotaču.

Na slici 6.4. su prikazani odzivi momenta i brzine kotača. Vidljivo je kako virtualno fizikalno prigušenje brže daje referencu te da motor brže razvije moment, a da se kroz zračnost prođe nešto brže nego u odnosu na PI kompenzatoru zračnosti. Isto tako, oscilacije su prigušene, slično kao i kod kompenzacije.



Slika 6.6. Usporedba odziva M/G stroja bez regulacije te s P i PI regulatorima; brzina M/G stroja (a), moment (b), zračnost (c).

Na slici 6.7. je prikazano koliku grešku praćenja brzine uvodi regulacija. Greška je izračunata na način da je od reference brzine vozila oduzeta stvarna brzina. Uspoređeni su modeli s P i PI regulatorima te model bez regulacije. I virtualno fizikalno prigušenje i PI kompenzator zračnosti unose zanemarivu grešku praćenja brzine te je ona približno ista onom u modelu bez regulacije.



Slika 6.7. Greška praćenja brzine.

Kako je objašnjeno u [9], u realnim uvjetima regulator ne uzima simulirane signale, već signale sa senzora brzine kotača. Signal sa senzora brzine kotača nije dobar kao onaj u simulaciji jer ima neko vremensko kašnjenje i diskretan je u vremenu.

U radu [9] je u model dodan senzor brzine kotača te je za regulator korišten taj signal. Kako je objašnjeno u radu [9], korištenjem senzora brzine kotača odziv momenta nije dobar te se javljaju oscilacije koje se nisu primijetile u modelu kada je korišten signal iz simulacije. Isto tako, vidljivo je da se dodatnim popravljajanjem parametara regulatora ne postiže bolji odziv, već je razlika zanemariva. Kako bi se poboljšalo djelovanje ovog načina regulacije, koristi se estimator brzine kotača umjesto senzora. Koristi se LQ estimator koji estimira brzinu kotača pomoću brzine motora jer je senzor brzine motora visoke rezolucije te ne unosi grešku u regulator. Kako je opisano, ovaj način regulacije jako dobro prigušuje oscilacije te smanjuje udar momenta. Pokazano je da ovaj način daje znatno brži odziv u odnosu kada je korišten senzor brzine kotača.

6.3. LQR regulator

Uz linearni model te korištenje svih stanja iz estimatora stanja, isproban je LQR regulator koji daje signal momenta u povratnoj vezi baziran na penalizaciji stanja u modelu prostora stanja. Nakon simulacije, u radu [9] je vidljivo da je regulator prigušio oscilacije, ali ih nije u potpunosti uklonio. Također vidljivo je da je stacionarno stanje niže u odnosu na model bez regulatora te u odnosu na virtualno fizikalno prigušenje.

6.4. LQRY regulator

Kako bi se otklonili nedostaci LQR regulatora, u radu [9] je isproban LQRY regulator koji predstavlja nadogradnju na LQR koji minimizira izlaze iz modela prostora stanja. Ova metoda daje rezultate slične virtualno fizikalno prigušenje metodi. Oscilacije su prigušene te je stacionarno stanje zadovoljeno. Usporedbom ove metode s prethodne dvije, vidljivo je da je LQRY regulator nešto brži u odnosu na virtualno fizikalno prigušenje, ali sporiji u odnosu na LQR, no LQR ima stacionarnu pogrešku te nije uspio skroz prigušiti oscilacije.

7. Zaključak

Cilj ovog rada je bio simulacijski analizirati utjecaj zračnosti pogonskog sklopa na dinamička svojstva uzdužne dinamike baterijskog električnog vozila. Električna vozila postaju sve zastupljenija na cestama te se razvoj tehnologija automobilske industrije usmjerava na električna i hibridna vozila. Električna vozila karakterizira visoka učinkovitost, tihi rad, jednostavno održavanje i visoke performanse. Električna vozila imaju bržu dinamiku zbog vrlo brzog odziva okretnog momenta M/G stroja te utjecaj zračnosti postaje značajan jer izaziva udare momenta i popratne torzijske vibracije pogona, umanjujući tako udobnost vožnje.

Kako bi se računalnom simulacijom analizirao utjecaj zračnosti, razvijen je detaljni fizikalni model pogona baterijskog električnog vozila. Model je izrađen u programskom paketu Simcenter Amesim. Baterija je modelirana nadomjesnim električnim krugom, a motor/generator (M/G) stroj kao kvazi-statički element definiran mapom korisnosti te minimalnim i maksimalnim momentom, pri čemu je razvoj momenta M/G stroja opisan PI članom. Pogonski sklop je modeliran detaljno, uzevši u obzir zračnosti u reduktoru i diferencijalu, gubitke u zupčastim parovima te elastičnosti vratila i poluvratila. Gubici su modelirani kao gubici bućkanja ulja te gubici kontakta zubi. Zračnost je modelirana modelom mrtve zone. Pneumatici su modelirani pojednostavljenim Pacjekinim modelom, tj. magičnom formulom koja određuje krivulju ovisnosti uzdužne sile pneumatika o uzdužnom faktoru klizanja. Dodan je model uzdužne dinamike vozila kako bi se analizirale brzina i akceleracija vozila. Ovaj model uzima u obzir uzdužne sile na kotačima, silu otpora kotrljanju, silu aerodinamičkog otpora te otpor nagiba ceste. Za praćenje zadane brzine odgovoran je model vozača koji je predstavljen PI regulatorom.

Simulacijskom analizom utvrđene su kritične pojave, odnosno one u kojima se javlja prolazak kroz zonu zračnosti, posebno kod naglih promjena momenta motora. To su pokretanje vozila iz mjesta, te prelazak iz regenerativnog kočenja u ubrzanje i obrnuto. Prilikom pokretanja vozila iz mjesta, ako zračnost nije u graničnom položaju zahvata, gornjem za vožnju unaprijed ili donjem za vožnju unatrag, dolazi do barem djelomičnog prolaza kroz zračnost koji izaziva udar momenta tj. akceleracije te torzijske vibracije uslijed elastičnosti poluvratila. Prilikom prelaska vozila iz regenerativnog kočenja u ubrzanje i obrnuto, M/G stroj prelazi iz motorskog u generatorski režim rada i obratno, tj. predznak momenta M/G stroja se mijenja. Prilikom promjene predznaka momenta dolazi do prolaza kroz punu zračnost, odnosno zubi zupčanika prolaze od kontakta u gornjoj graničnoj točki do kontakta u donjoj. Dok su zupčanici u području zračnosti, nema prijenosa snage na kotače, što uzrokuje rapidan prolazak kroz zonu zračnosti te udar u graničnu točku, uslijed ponovno dolazi do udara momenta i torzijskih vibracija, što umanjuje udobnost vožnje.

Za potrebe razvoja algoritama kompenzacije utjecaja zračnosti, izrađen je pojednostavljeni model pogona s koncentriranim zračnostima, gubiticima, inercijama te krutostima i prigušenjima. Pojednostavljeni model izveden je matematički, tj. ekvivalentne vrijednosti inercije, zračnosti, krutosti i prigušenja su određene formulama. Temeljem usporedne simulacijske analize, zaključeno je da pojednostavljeni model dobro odgovara detaljnom modelu, tj. odstupanja su zanemariva.

Diskutirani su načini kompenzacije utjecaja dostupni u literaturi. Opisani su načini regulacije okretnog momenta s PID regulatorom odnosno, PI kompenzacija zračnosti te regulacija s

virtualnim fizikalnim prigušenjem i regulacija s LQR i LQRY regulatorima. Načelno su ispitani načini kompenzacije s PI regulatorom te virtualnim fizikalnim prigušenjem. Oba načina ne otklanjaju u potpunosti oscilacije odziva tj. vibracije, no one se znatno smanjuju u odnosu na slučaj kada regulacije nema. Znatno su smanjeni i skokovi akceleracije tj. trzaji što poboljšava udobnost vožnje. Oba su načina regulacije vrlo slična po performansama te ne unose grešku praćenja brzine.

Nastavak na ovaj rad bi prije svega mogao sadržavati detaljno razvijanje i nadogradnju spomenutih algoritama kompenzacije zračnosti te razvijanje naprednijih algoritama zasnovanih primjerice na regulaciji stanja.

LITERATURA

- [1] Predavanja kolegija Elektromobilnost; J. Deur
- [2] [Battery | Volkswagen Newsroom \(volkswagen-newsroom.com\)](https://www.volkswagen-newsroom.com)
- [3] [Different types of electric motors used in EVs - ArenaEV](#)
- [4] [Audi introduces 2022 e-tron GT and RS e-tron GT; US pricing starts at \\$99,900 - Green Car Congress](#)
- [5] Soldo, J., Skugor, B., and Deur, J., "Optimal Energy Management Control of a Parallel Plug-In Hybrid Electric Vehicle in the Presence of Low Emission Zones," SAE Technical Paper 2019-01-1215, 2019, doi:10.4271/2019-01-1215
- [6] LMS Imagine.Lab Amesim 15.2 Help
- [7] Predavanja kolegija Automobilski mehatronički sustavi; J. Deur
- [8] PID Based Control of Electric Vehicle Drive Line with Backlash; H. Ullah, A. Saeed
- [9] Control of an Electric Vehicle Powertrain to Mitigate Shunt and Shuffle; V. Hermansson, K.Moparthy