



UNIVERZITET CRNE GORE
Elektrotehnički fakultet – Podgorica

Filip Janković

**RAZVOJ SIMULACIONOG MODELA ZA PREDIKCIJU
POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE ELEKTROMOBILA**

MASTER RAD

Podgorica, 2024. godine



UNIVERZITET CRNE GORE
Elektrotehnički fakultet – Podgorica

Filip Janković

**RAZVOJ SIMULACIONOG MODELA ZA PREDIKCIJU
POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE ELEKTROMOBILA**

MASTER RAD

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANTU:

Ime i prezime: Filip Janković

Datum i mjesto rođenja: 23.07.1990. godine, Cetinje, Crna Gora

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina diplomiranja: Osnovne studije - Elektronika, Telekomunikacije, Računari, 2013. godina

Naziv završenog specijalističkog studijskog programa i godina diplomiranja: Postdiplomske specijalističke studije, smjer Elektronika, Telekomunikacije i Računari - ELEKTRONIKA, 2014. godina

INFORMACIJE O MASTER RADU:

Naziv postdiplomskog studija: Postdiplomske magistarske akademske studije, Energetika i automatika – Energetika i automatika

Naslov rada: Razvoj simulacionog modela za predikciju potrošnje električne energije elektromobila

Fakultet na kojem je rad odbranjen: Elektrotehnički fakultet, Podgorica

UDK, OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA:

Datum prijave master rada: 16.05.2023. godine

Datum sjednice Vijeća univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema: 22.09.2023. godine

Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranda:

- prof. dr Vladan Radulović
- prof. dr Saša Mujović
- doc. dr Snežana Vujošević

Mentor: prof. dr Saša Mujović

Komisija za ocjenu rada:

- prof. dr Vladan Radulović
- prof. dr Saša Mujović,
- doc. dr Snežana Vujošević

Komisija za odbranu rada:

- prof. dr Vladan Radulović
- prof. dr Saša Mujović,
- doc. dr Snežana Vujošević

Datum odbrane: _____2024. Godine

Ime i prezime autora: Filip Janković, Spec. Sci

ETIČKA IZJAVA

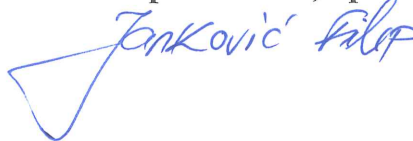
U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 24 Pravila studiranja na postdiplomskim studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je magistarski rad pod naslovom

**"Razvoj simulacionog modela za predikciju potrošnje električne energije
elektromobila"**

moje originalno djelo.

Podnosilac izjave,

Filip Janković, Spec. Sci



U Podgorici, dana 13.11.2023. godine

Ovaj projekat posvjećujem svojim roditeljima, čijom neumornom podrškom i neizmjernom ljubavlju su me ohrabivali da težim ka uspjehu. Njihova vjera u moje sposobnosti bila je neiscrpna inspiracija koja mi je pružala snagu i motivaciju tokom ovog puta!

Predgovor

U eri rastuće globalne svijesti o klimatskim promjenama i potrebi za smanjenjem emisije štetnih gasova, elektromobili postaju ključni akteri u transformaciji načina transporta. Istraživanja su usmjerena na unapređenje efikasnosti i praktičnosti elektromobila putem razvoja naprednih sistema za predikciju potrošnje baterije. Izazov predikcije upotrebe baterija elektromobila u različitim ciklusima vožnje, kao što su gradski ciklusi i ciklusi vožnje na otvorenim putevima, obrađen je u ovoj studiji.

Kombinirajući softverski alat Matlab/Simulink sa informacijama o rutama iz OpenStreetMap platforme na globalnom nivou, razvijen je napredni model za predikciju potrošnje baterije. Metodologija se oslanja na stvarne podatke o brzinama kretanja vozila, nagibima puteva i drugim faktorima koji utiču na potrošnju energije.

Dobijeni rezultati pokazuju da se potrošnja baterije može predvidjeti sa visokim stepenom tačnosti u različitim scenarijima vožnje, što je od suštinskog značaja za razvoj elektromobila. Takođe, ostavljena je mogućnost poređenja dobijenih rezultata sa rezultatima drugih istraživača i praktičara iz cijelog svijeta kako bi se istakao značaj njihovog doprinosa.

Osim naučnih doprinosa u oblasti elektromobilnosti, prikupljeni podaci imaju praktičnu primjenu u unapređenju vožnje elektromobila i smanjenju anksioznosti vozača. Takođe, doprinosi društvenoj koristi kroz smanjenje emisije štetnih gasova i promociju održive mobilnosti. U nadi da će ponuđeno istraživanje pomoći unapređenju ove ključne oblasti i promovisati prelazak na održivu budućnost u saobraćaju, ova studija nudi nove izglede za ekološki svjesniju upotrebu elektromobila.

Izvod rada

Kroz javne kampanje i uz pomoć međunarodnih zajednica ljudi postaju sve svjesniji globalnih klimatskih promjena kao i drugih energetske i ekoloških problema koji imaju uticaj na životnu sredinu, što je dovelo do razvoja i primjene brojnih strategija u smanjivanju potrošnje energije i okretanju prema alternativnim izvorima energije. Negativni uticaj drumskog saobraćaja na životnu sredinu je izuzetno izražen zbog čega elektrifikacija drumskog transporta predstavlja jedan od bitnih faktora u cilju postizanja neutralnosti ugljenika. Prelazak na električna vozila se odvija skromnim, ali stabilnim tempom, uprkos činjenici da cijena elektromobila nastavlja da opada. Primarni faktori koji odlažu elektrifikaciju prevoza su ograničena dostupnost infrastrukture za punjenje, dugo vrijeme potrebno za punjenje elektromobila i fenomen poznat kao „anksioznost dometa“ koji se manifestuje u obliku nesigurnosti vozača u pogledu da li će vozilo moći uspješno da stigne do željenog odredišta. Dajući vozaču tačnu procjenu preostalog dometa, predviđanje potrošnje energije je ključna komponenta u procesu minimiziranja anksioznosti u dometu i igra ulogu u smanjenju ukupnog stresa. Praćenje preciznog stanja baterije jedna od stvari koje smo kroz ovaj rad uradili da bi doprinijeli sistemu upravljanja i skladištenja energije elektromobila. Koristeći softverski alat za modeliranje simulacije Matlab/Simulink ovaj rad predlaže model za predikciju količine energije koju elektromobil potroši kada putuju određenom rutom. Razvijeni model je fizički model koji se zasniva na uzdužnoj dinamici vozila. Ovaj model se jednostavno može prilagoditi tako da odgovara različitim modelima elektromobila. Takođe u ovom radu smo simulirali modele za nejednake dužine vremena koristeći podatke iz više izvora koji predstavljaju različite cikluse vožnje. Razvijeni model je testiran na tri komponente: 1) standardnom Matlab-ovom FTP75 ciklusu vožnje koristeći podatke koji su dostupni o Tesla Model S električnog vozila; 2) korišćenjem preciznih informacija o rutama koje se mogu dobiti korišćenjem različitih kontinuiranih platformi zasnovanih na predikciji globalnih rutiranja za potrebe krajnjih korisnika koristeći OpenStreetMap i topologije puta usko povezane sa tim; 3) testiranjem elektromobila na osnovu već pređene rute koristeći softverski alat GeoTracker za praćenje i analizu kretanja elektromobila u realnom vremenu. Podaci o kretanju vozila mogu se analizirati u Matlab-u pomoću GeoTracker-a da bi se otkrili obrasci, odstupanja i mnogi drugi uticaji koji se mogu koristiti u upravljanju i planiranju širokog spektra rutiranja. Kako različiti parametri utiču na performanse i efikasnost elektromobila, zaključuje se na različite načine kroz promjene grafikona i prikaza. Predložen je jednostavan kombinovani pristup procjeni stanja napunjenosti baterije i stanja

energije koju posjeduje elektromobil. Koristeći ove metode može se procijeniti predikcija potrošnje energije elektromobila bez računske složenosti i drugih procesa.

Ključne riječi: *elektromobil, predikcija energije baterije, informacije o ruti, Matlab/Simulink.*

Abstract

Through public campaigns and with the help of international communities, people are becoming increasingly aware of global climate change, as well as other energy and environmental issues that impact the environment. This has led to the development and implementation of numerous strategies aimed at reducing energy consumption and turning to alternative sources of energy. The negative impact of road traffic on the environment is particularly pronounced, which is why the electrification of road transport is one of the important factors in achieving carbon neutrality. The transition to electric vehicles is progressing at a modest but steady pace, despite the fact that the price of electric cars continues to decrease. The primary factors that delay the electrification of transportation are limited availability of charging infrastructure, long time required to charge electric vehicles, and the phenomenon known as "range anxiety" which manifests as driver uncertainty about whether the vehicle will be able to successfully reach the desired destination. Giving the driver an accurate estimate of the remaining range, predicting energy consumption is a key component in the process of minimizing range anxiety and plays a role in reducing overall stress. Monitoring the precise state of the battery is one of the things we have done through this work to contribute to the management and storage system of electric vehicle energy. Using the Matlab/Simulink simulation modeling software tool, this work proposes a model for predicting the amount of energy that an electric car consumes when traveling a specific route. The developed model is a physical model based on vehicle longitudinal dynamics. This model can be easily adapted to suit different electric vehicle models. Additionally, in this work, we simulated models for different time durations using data from multiple sources representing different driving cycles. The developed model was tested on three components: 1) the standard Matlab FTP75 driving cycle using data available for the Tesla Model S electric vehicle; 2) using precise route information that can be obtained using various continuous platforms based on the prediction of global routing for the needs of end users using OpenStreetMap and road topologies closely related to it; 3) testing the electric vehicle based on the route already traveled using the GeoTracker software tool for real-time tracking and analysis of electric vehicle movement. Vehicle movement data can be analyzed in Matlab using GeoTracker to discover patterns, deviations, and many other influences that can be used in managing and planning a wide range of routing. As different parameters affect the performance and efficiency of electric vehicles, they are concluded in different ways through changes in graphs and displays. A simple combined approach to estimating the state of battery

charge and the state of energy possessed by the electric vehicle has been proposed. Using these methods, the prediction of electric vehicle energy consumption can be estimated without computational complexity and other processes.

Keywords: *Electric vehicle, battery energy prediction, route information, Matlab/Simulink.*

Sadržaj

1. Uvod.....	11
2. Istorijski razvoj elektromobila	16
2.1. Početna era elektromobila	16
2.2. Savremena era elektrifikacije drumskog saobraćaja	20
2.3. Razvijanje svijesti elektrifikacije transporta	22
2.3.1. EV30@30 Kampanja	23
2.3.2. Pariski sporazum	23
2.3.3. Naftni derivati	24
3. Klasifikacija elektromobila.....	25
3.1. Hibridni elektromobili.....	25
3.2. Hibridni elektromobili sa mogućnošću punjenja	30
3.3. Elektromobili sa gorivim ćelijama	33
3.4. Baterijski elektromobil.....	34
4. Konfiguracioni sklop elektromobila	37
4.1. Elektrohemijske baterije.....	38
4.1.1. Osnovni parametri baterije.....	38
4.1.2. Konfiguracija baterije	41
4.1.3. Modelovanje baterije elektromobila	43
4.2. Koncept elektromotora.....	47
4.2.1. Kolektorski DC elektromotori: osobine i princip rada	48
4.2.2. Elektromotori bez četkica	54
4.2.2.3. Indukcioni motor	57
4.3. Karakteristike i efikasnosti elektromotora	60
4.4. Princip i primjena regulisanja načina zaustavljanja elektromotora.....	62
5. Analiza i primjena napona u elektromobilima.....	65
5.1. Regulacija napona pomoću preklopnih regultora.....	65
5.1.1. Tip Step-Down (Buck) regulator	65
5.1.2. Tip Step-Up (Boost) regulator	69
5.2. Optimizacija korišćenja energije u elektromobilima	74
6. Analiza dinamike karoserije elektromobila i Matlab/Simulink analiza dometa.....	78
6.1. Sile koje djeluju na karoseriju vozila	78

6.2. Ubrzanje vozila	83
6.3. Ciklusi vožnje za modelovanje opsega elektromobila	85
7. Predloženi simulink model predikcije energije.....	89
7.1. Napredna modelovanja performansi elektromobila kroz Simulink	90
7.2. Krićka analiza energetske efikasnosti baterije elektromobila kroz Simulink	103
8. Rezultati simulacije predikcije potrošnje elektrićne energije elektromobila	107
8.1. Simulink metodologija simulacije elektromobila	107
8.2. Test simulacije broj 1 – FTP75 gradski ciklus vožnje	111
8.3. Test simulacije broj 2 – Kontinuirana platforma zasnovana na predikciji globalnih ruta lokacija.....	115
8.4. Test simulacije broj 3 – Testiranje vozila na osnovu dokumentovane rute	124
9. Bazne punjive stanice elektromobila	128
9.1. Klasifikacija baznih punjivih stanica elektromobila	129
9.2. Tipovi baznih punjivih stanica elektromobila	129
9.3. Infrastruktura baznih punjivih stanica elektromobila.....	131
9.4. Standardi baznih stanica za punjenje	133
9.5. Dizajn punjaća elektromobila.....	135
9.6. OCPP protokol	137
Zaključna razmatranja.....	139
Literatura.....	142
Knjige i radovi	142
Web izvori.....	150
PRILOZI	152
PRILOG 1	153
Popis slika, grafika i tabela	153
PRILOG 2	158
Popis skraćenica.....	159

1. Uvod

Početak XXI vijeka pokazao je očiglednim da svijet prelazi na sveobuhvatnu upotrebu takozvane čiste tehnologije i izvora energije. U isto vrijeme, razvijaju se strateške osnove kako bi se eliminisala velika energetska postrojenja koja emituju CO₂ i druge štetne hemikalije u životnu sredinu, označavajući prvi korak ka ublažavanju klimatskih promjena i rešavanju kritičnog izazova sa kojim se čovečanstvo suočava. Istraživanja su pokazala da saobraćajna industrija je odgovorna za približno 23% svjetskih emisija gasova staklene bašte (*en. GreenHouse Gas-GHG*), a njena elektrifikacija je jedan od najvažnijih faktora u postizanju neutralnosti ugljenika. Mnoge studije su ispitivale izgled dekarbonizacije transporta, njen značaj u globalnoj politici za ublažavanje klimatskih promjena i mogući doprinos različitih tehnologija, uključujući vozila na električni pogon. Razne istraživačke studije su pokazale da globalne emisije CO₂ iz transporta nastavljaju da rastu [1]. Kao dio saobraćajnog sektora, korišćenje električne energije je identifikovano kao najveći potencijal za smanjenje upotrebe fosilnih goriva, a samim tim i emisije CO₂ i zagađenja vazduha, odnosno zagađenja životne sredine. Iz tog razloga, potraga za komercijalnim alternativnim tehnologijama koje mogu zamijeniti konvencionalne motore sa unutrašnjim sagorijevanjem se ubrzala tokom poslednje dvije decenije. Predviđa se da će se stotine novih modela pridružiti tržištu u narednih pet do deset godina, pošto su praktično svi veliki proizvođači automobila najavili značajna ulaganja u električne automobile kako bi zadovoljili ovu novu potražnju. To pokazuje veliki broj zemalja koje su ratifikovale Pariski sporazum i koje učestvuju u inicijativi EV30@30. Misija kampanje poznate kao EV30@30, koja ima za cilj da dobije tržišni udio od 30% za električne automobile (*en. Electrical Vehicle-EV*) do 2030. godine, je da se pronađe rešenje za problem opasnih gasova i da se postigne željeni cilj. Cilj Pariskog sporazuma je da podrži zemlje u njihovim naporima na ublažavanju klimatskih promjena i da poveća njihov kapacitet za suočavanje sa uticajima klimatskih promjena¹. Svetski poznata kriza COVID-19 takođe je pokazala značaj obnovljivih izvora energije. Tokom perioda izuzetnog pada opterećenja širom kontinenta i smanjenja snage nuklearnih elektrana i elektrana na uglj, obnovljivi izvori su preuzeli vodeću ulogu i pokazali svoju vrijednost bez izuzetnih smanjenja, što ukazuje da su oni sada suštinska i neizbježna komponenta električne distributivne mreže [2].

¹ Uključujući Republiku Crnu Goru.

Ovaj rad je rezultat dvogodišnjeg istraživanja električnih vozila u Crnoj Gori. Pored sveobuhvatne navedene literature, web linkova i slično, autor ima potrebu da navede svoja prisustva raznim organizacionim događajima^{2 3} i seminarima⁴ čije su tematike bile usmjerene ka elektrifikaciji drumskog saobraćaja i njene prateće infrastrukture i na taj način učestvuje u debatama na pomenutim temama. Sve te događaje omogućila je firma Electro Group D.O.O. iz Podgorice. Kao rezultat navedenog autorsko znanje sam prenio u ovaj projekat i tako predstavio tok najsavremenijih tehnoloških dostignuća u oblasti elektrifikacije transporta. Takođe, zahvalnost kompaniji Limit Prime iz Podgorice na altruističkoj pomoći, literaturi koju su ustupili i uslugama koje su ponudili u pogledu korišćenja električnog automobila Tesla Model S u svrhu testiranja i evaluacije vozila u pripremi za ovaj rad.

Primarni cilj ovog rada je da ponudi razvijeni model sa visokom preciznošću rezultata za predikciju potrošnje energije i energetske efikasnosti pravca elektromobila koristeći podatke iz realnog okruženja za potrebe krajnjeg korisnika. U ovoj knjizi ima ukupno devet poglavlja. Nakon uvodnog materijala predstavljenog u prvom poglavlju, drugo poglavlje je uključivalo opis istorijskog razvoja elektromobila kao i njihove brojne klasifikacije. Put koji je započeo prvim automobilom dizajniranim za upotrebu na javnim putevima, a završio se sa najsavremenijim inovacijama u automobilskoj industriji danas, jasan je pokazatelj razvoja elektromobila i njihovog potencijala u budućnosti. Ipak, pored svih svojih prednosti, elektromobili imaju i nedostatke, a jedan od osnovnih nedostataka je visoka cijena kupovine i održavanja. Ovim vozilima su potrebne i bazne stanice za punjenje baterija, što je jedna od pratećih poteškoća u oblasti energetike. Kao rezultat toga, inženjeri koji rade za automobilske kompanije bili su primorani da klasifikuju električne automobile prema zahtjevima tržišta. Cijelo treće poglavlje je posvećeno pružanju sveobuhvatne analize mnogih kategorija pod koje spadaju elektromobili. Opšti šematski prikazi pojedinačnih vozila dati su u skladu sa EV kategorizacijom na osnovu pojednostavljenih blokova koji odražavaju osnovnu komponentu istih. Naglasak je usredsređen na sklop konfiguracije elektromobila sa nultom emisijom koji je opisan u poglavlju 4. Podjelom na tri osnovna podsistema vozila koje isključivo radi na baterijskom pogonu dat je jasan opis parametara baterije, kao i

² „Electric Vehicle and EV charging fundamentals” u organizaciji Schneider Electric 15.04.2021.godine

³ „E-mobility - Inspiring solutions for electric mobility - Best Practices“ u organizaciji firme Weidmuller iz Njemačke Maj.2022.godine u Rumuniji

⁴ „E-mobilnost- stanice za punjenje električnih vozila” webinar u realizaciji Inženjerske komore Crne Gore dana 23.02.2023. godine

osnovni kriterijumi baterije jednog elektromobila. Konfiguracija baterije je opisana kroz samo modelovanje baterije korišćenjem softverskog programa Matlab. Pored baterija elektromobila, ovo poglavlje ispituje najosnovnije tipove elektromotora kroz njihovu klasifikaciju. Na osnovu toga, brzom i tačnom reakcijom na elektromotor i kontinuiranim praćenjem struje kroz motor, dobijamo grafičku zavisnost obrtnog momenta motora u odnosu na ugaonu brzinu, koja je neophodna za naknadni tok simulacionog skupa koji se koristi za predviđanje potrošnje energije elektromobila.

Kada govorimo o električnim motorima u vozilima na električni pogon, važno je razmotriti odnos između elektromotora i regulacije kočionog svojstva. Koristeći kontrolu svojstva kočenja elektromotor vozila ostvaruje regenerativno kočenje. Regenerativno kočenje je tehnika koju koriste električna vozila koja omogućava da se energija vrati u bateriju. Elektromotori su takođe generatori, što znači da se proizvedena električna energija šalje nazad u bateriju za napajanje elektromotora. Ovo omogućava smanjenje potrošnje energije vozila i poboljšava njegovu efikasnost. U gradskom saobraćaju, gde vozači često moraju da koče i ubrzavaju, regenerativno kočenje može biti veoma korisno. Važno je naglasiti da regenerativno kočenje ima ograničenja i ne može u potpunosti da nadoknadi svu izgublenu energiju kočenja. Ovo se odnosi na kretanje vozila pri velikim brzinama, kada se većina energije troši da bi se savladao otpor vazduha.

Elektromotori koji se koriste u EV često koriste različite metode kontrole napona i konverzije kako bi garantovali optimalan rad i produžili vijek trajanja svojih baterija. Preklopni regulatori, koji mogu biti ili opadajući (u literaturi poznatiji pod nazivom "buck") ili pojačani ("boost"), neki su od oblika tehnologija koje se često koriste za kontrolu i pretvaranje napona električnih motora, upravo je to predmet poglavlja 5. Ova tehnika je posebno korisna kada su baterije vozila pune, a elektromotor ne zahtijeva maksimalni napon za rad, i obratno kada su baterije prazne, a elektromotor zahtijeva maksimalni napon. Podešavanje ovih regulatora u Simulink-u je predstavljeno u nastavku, zajedno sa pratećim slikama koje repliciraju ponašanje regulatora kada je prekidač otvoren i zatvoren u različitim stanjima. Moguće je izraziti regulatore korišćenjem Matlab koda koji je ilustrovan primjerima koji su priloženi. Pošto implementacija regulatora obično zahtijeva dodatni nivo složenosti pored niza odvojenih komponenti, cilj ovog koda je da pomogne u praćenju ponašanja napona i struja unutar regulatora. Ovo poglavlje završava se transformacijom napona elektromotora pomoću prekidačkog regulatora u nivo napona koji zadovoljava zahtjeve motora. Slijedi Matlab modeliranje električnog vozila.

Matlab modelovanje elektromobila je metoda za simulaciju i analizu ponašanja EV-a u različitim scenarijima vožnje. U brojnoj literaturi su predstavljeni različiti oblici modelovanja, od kojih su neki [3][4][5][6], a uobičajna procedura obuhvata matematičko modelovanje mnogih karakteristika EV, od kojih su najčešći uticaj sila koje na njega djeluju. Nekoliko sila, kao što su trenje, gravitacija, otpor vazduha, centrifugalna sila i slično, mogu značajno da utiču na kretanje elektromobila i povećaju proces pražnjenja baterije kao što je prikazano u poglavlju 6. Pošto svaki od ovih faktora ima potencijal da utiče na to kako se elektromobil ponaša, svi oni se moraju uzeti u obzir tokom procesa modelovanja. Ponašanje elektromobila može se simulirati korišćenjem Matlab-a, koji omogućava programiranje matematičkih jednačina za predstavljanje svih ovih sila.

Matlab i Simulink daju korisnicima širok spektar opcija za testiranje i modelovanje performansi elektromobila. Neki od testova koje možemo da koristimo u Matlabu i Simulink-u uključuju: simulacioni test preko standardnih američkih i evropskih ciklusa vožnje koji se odnose i na otvorene dionice puta i na gradske cikluse vožnje; GPS u realnom vremenu koji omogućava precizno testiranje i analizu ponašanja elektromobila u različitim uslovima; testiranje vozila na osnovu podataka sa dokumentovane rute čiji se podaci o brzini, ubrzanju, kočenju i drugim parametrima prikupljaju od vozila; i analizu ponašanja elektromobila na osnovu prikupljenih podataka. Pored toga, Matlab i Simulink omogućavaju simulaciju elektromobila korišćenjem stvarnih senzora i aktuatora čime se omogućava precizna simulacija ponašanja elektromobila u stvarnom okruženju, što bi moglo biti od koristi u razvoju autonomnih vozila jer omogućava precizniji prikaz ponašanja u realnom okruženju. Ovim radom smo kroz poglavlja 7 i 8 koristeći računarski softver Matlab i jedan od glavnih dodataka Simulink omogućili detaljnu analizu performansi elektromobila u različitim uslovima vožnje, što može pomoći u razvoju boljih algoritama za vožnju EV-a i poboljšati ukupnu efikasnost u cjelini. Ovi simulacioni testovi su samo jedan primjer onoga što su Matlab i Simulink sposobni da postignu.

Rezultati Matlab/Simulink simulacija elektromobila mogu se razlikovati u zavisnosti od vrste testiranja i odabranih parametara. Simulacije EV-a se prvenstveno koriste u svrhu predikcije i analize performansi vozila u različitim scenarijima, što uključuje karakteristike o kojima je ranije bilo riječi. Simulacija se fokusira na predikciju dometa elektromobila, odnosno broja kilometara koje vozilo može preći sa jednim punjenjem baterije. Ovi podaci su od pomoći za analizu performansi baterija kao i autonomije vozila. Njima iskazujemo SoC (*en. State of Charge*) i SoH (*en. State of Health*) za analizu performansi baterije EV-a koji se mogu koristiti za praćenje i

procjenu ovih podataka kako bi se utvrdilo koliko dugo baterija može da izdrži pod različitim uslovima korišćenja.

Predloženi model je jednostavan i efikasan metod za predikciju potrošnje energije elektromobila, kao što pokazuju rezultati predstavljeni u odeljcima poglavlja 8. Pored toga, predloženi model dozvoljava uključivanje uticaja karakteristika rute i vremenskih uslova na korišćenje energije. Primarna mana predloženog modela je da zanemaruje efikasnost regenerativnog kočenja. U praksi, količina energije koja se povraća regenerativnim kočenjem zavisi od brzine vozila odnosno stila vožnje. Nasuprot tome, predloženi model pretpostavlja da se sva energija kočenja povraća u sistem. Pored toga, predloženi model ne uzima u obzir pomoćnu potrošnju vozila, što se može lako uračunati tako što se struja pomoćnog opterećenja preklapa sa strujom motora. Bez obzira na gore navedene nedostatke, predloženi model je računski efikasan i pouzdan metod za predikciju potrošnje energije u unapred definisanom ciklusu vožnje što je potvrđeno rezultatima dobijenim u poglavlju 8.

Elektronska oprema poznata kao "punjači" za EV se koristi za snabdijevanje električnih i hibridnih vozila električnom energijom neophodnom za funkcionisanje. Na trenutnom tržištu postoji ozbiljan broj proizvođača punjača za elektromobile; ipak, vladine institucije moraju pružiti još veću pomoć i stimulans za proširenje infrastrukture za punjenje EV-a. Poglavlje 9 svjedoči brojkama baznih punjivih stanica za elektromobile, dostupnih punjača i vrste konektora koje se mogu primijeniti u zavisnosti od toga gde u svijetu idete. Pored toga, poglavlje 9 nudi jasnu kategorizaciju baznih stanica za punjače EV-a, kao i zahtjeve koje treba ispuniti kako bi se osiguralo da korisnici i njihova vozila ostanu bezbjedni. Opisani su i neki savremeni protokoli daljinskog upravljanja električnim punionicama koje krajnjem korisniku omogućavaju lakši pristup i upravljanje.

Završno poglavlje predstavlja retrospektivu cjelokupnog rada, i trend koji se očekuje da će se nastaviti i u budućnosti. Klimatske promjene, tehnološki napredak, regulative mnogih zemalja i naravno svijest potrošača su faktori koji se uzimaju u obzir u nadi da će se prodaja elektromobila i dalje povećavati u budućnosti. Slijedi popis literature, slika i tabela kao i skraćenice koje su korišćene u radu.

2. Istorijski razvoj elektromobila

Elektrifikacija drumskog saobraćaja predstavlja pravi trend u svijetu. Sama pomisao na elektromobile korisnike drumskih vozila, kako u komercijalnom tako i u transportnom sektoru, asocira na vozila čiji pogon je prouzrokovan energijom koja potiče iz baterije. Današnji dizajn, jednostavnost i komfor koji automobilske kompanije predstavljaju svoje proizvode na tržištu auto industrije su izuzetno atraktivne i privlačne korisnicima. Ako bi se vratili vijek ili dva unazad vidjeli bi da se vozila čiji je pogon zasnovan na energiji koja proističe iz baterije pojavljuju krajem XIX i početkom XX vijeka.

2.1. Početna era elektromobila

Istorija bilježi razne periode u napretku motornih vozila, njihove uspone i padove u proizvodnji kao i put razvoja prativši tok razvijanja potreba čovječanstva [7]. Prva drumska vozila sa mehaničkim pogonom bila su pokretana električnom energijom. Elektromobili su se pojavila znatno prije vozila sa unutrašnjim sagorijevanjem (*en.Internal Combustion Vehicle- ICV*), tako da su tokom cijelog XIX vijeka EV-a bila dominantna na drumovima.

Sami začeci dotiraju još iz 1821. godine kada je Britanski naučnik Majk Faradej (*Michael Faraday* 22.09.1791-25.08.1867) patentirao električni motor. Razvojem elektromotora kreću inovacije u sferama nauke i industrije, pa je dvadesetak godina kasnije izložena je prva električna lokomotiva, a tek osamdesetih godina XIX vijeka krenuli su u pogon prvi električni tramvaji. Prva EV na cestama su se pojavila tek nakon pola vijeka zbog nedovoljne razvijenosti baterija. Nakon toga EV su se mogla koristiti i u komercijalne svrhe. Smatra se da je prvi elektromobil prikazan na slici 2.1 proizveden u SAD-u od kompanije *Baker Motor Vehicle Company*⁵ u saradnji sa najstarijom kompanijom u automobilskoj istoriji *Rauch and Lang Carriage Company* u Klivlendu. Nakon njihove saradnje postali su najveći proizvođači EV na svijetu. Kroz istoriju je zabilježeno da je čak i u prvoj trci motornih vozila, elektromobil pobijedio ostale vrste automobila sa parnim i motorima sa unutrašnjim sagorijevanjem (*en.Internal Combustion Engine-ICE*) [8].

⁵ Više o tome na: http://www.historic-structures.com/oh/cleveland/rauch_lang_carriage.php.



Slika 2.1.⁶ Električno vozilo Backer Electric u Crawford muzeju

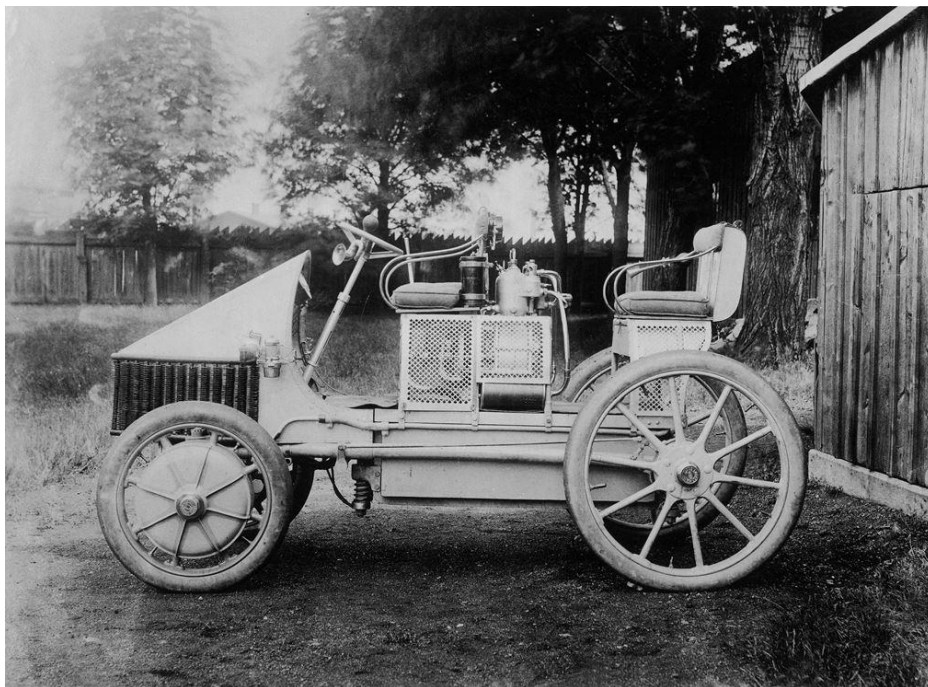
Kraj XIX i početak XX vijeka obilježila je proizvodnja punjivih baterija pa su elektromobili postali prilično rasprostranjeni na tržištu auto industrije i najviše se upotrebljavala u transportnom sektoru, taksi uslugama, dostavama i slično. Iako su vozila na parni pogon zahtijevala određena zaustavljanja za dopunu vode u sistemu bilo im je potrebno znatno više vremena da se zagriju i pokrenu u odnosu na ICE vozila (i do 30 minuta)[86] Prednost im je bila u jeftinijoj cijeni i “zahvalna” brzini kretanja u odnosu na EV-a i ICE vozila. Dužina putovanja bez zaustavljanja nije predstavljala problem ICE vozilima ali su takva vozila predstavljala veliki ekološki problem svojim izduvnim gasovima. Tiha u vožnji i ekološki prihvatljiva za okolinu isticali su EV-a u XX vijeku, sa manom u brzini kretanja koja je poprilično bila sporija u odnosu na ostala vozila drumskog saobraćaja i skupljom cijenom na tržištu.

EV su tih godina XX vijeka obećavala mnogo, sve do pojave samopokretačkog ključa za ICE vozila. Sistem električnih pokretača (en.Starter System-SS) za IC motore izumljen je 1912. godine kada je prvi put ugrađen u vozilo Cadillac, a patentiran je tri godine kasnije od strane Američkog inženjera kompanije General Motors Čarlsa Keteringa (Charles Franklin Kettering) [87]. Ovaj izum učinio je vozila mnogo lakšim i sigurnijim za rad, za razliku od ranije kada je process paljenja vozila obavljan uz pomoć gvozdene ručne poluge. Nije samo to jedini razlog prelaska sa EV na ICE vozila. Jedan od većih problema kojim korisnici elektromobila nisu bili zadovoljni je vrijeme koje je potrebno za punjenje baterija. Minimalno vrijeme punjenja tadašnjih olovnih baterija

⁶ Preuzeto sa: <https://www.wrhs.org/crawford/autos/>.

električnom energijom iznosilo je nekoliko sati, dok je vrijeme punjenja rezervoara ICE vozila u prosjeku iznosila minut ili dva. Osim dugotrajnog punjenja baterija, same baterije kod elektromobila su bile skupe i imale su ograničen vijek trajanja (u prosjeku oko 5 godina) što je je jasan razlog prelaska sa vozila sa električnim pogonom na vozila koja koriste naftne derivate. Do 1930. godine elektromobili polako stagniraju sa proizvodnjom.

Početakom XX vijeka dok su elektromobili izgrađivali svoj publicitet, pojavljuje se i koncept vozila u kojima se ICE koristi u spoju sa još jednim ili više električnih motora. To su bila vozila mješovitog pokretačkog izvota energije potrebna za sopstveno kretanje, a prvi koji je moglo da radi na struju proizvedenu iz baterije ili iz Daimler motora (Daimler Motor Company) [82] od 2,5KS razvio je Ferdinand Porsche (slika 2.2). Ovakvom tipu vozila bila je potrebna manja baterija u odnosu na tadašnju bateriju elektromobila [9].

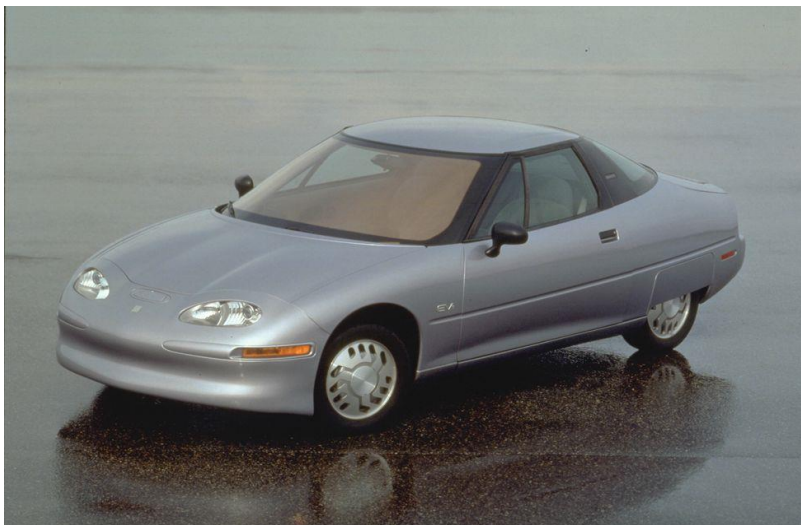


Slika 2.2 The Lohner-Porsche Semper Vivus proizveden 1900 [89]

Osim nekih modela mini automobila, industrijska istraživanja nisu rezultirala nikakvim značajnijim izumima u drugoj polovini XX vijeka, niti su napravljene neki značajniji komercijalni poduhvati. Bilo je jednostavno doći do zaključka da je osnovni problem slab energetska kapacitet baterija. Međutim, potražnja za ICV raste zbog napretka u smanjivanju emisije izduvnih gasova i potrošnje goriva. Svijest o tome da elektrifikacija drumskih vozila ponovno gubi trku sa

komercijalnim ICV-om podstaklo je pojačan tehnološki napredak koji je doveo do poboljšanja dizajna baterija elektromobila kojim se povećala specifična energija i skratilo vrijeme punjenja.

Kada bi „životno doba“ elektromobila dijelili po cjelinama od njihovog nastanka do današnjice, prva era u elektrifikaciji drumskog saobraćaja bi se smatrala njegovim nastanak i početak korišćenja 1900-tih godina, dok bi sami kraj XX i početak XXI vijeka mogli klasifikovati kao drugu eru u napretku elektromobila. Tih godina počela je dominacija giganta u automobilskoj industriji, kompanije General Motors sa svojim prvim modelima namijenjenim za komercijalno tržište, model EV1 (slika 2.3) kasnije doraden u seriju vozila Impact. Nedugo zatim vođeni uspjesima i ciljevima koje je General Motors postavio proizvodnjom EV1 kao što su paljenjem bez ključa, gume sa malim koeficijentom otpora prilikom okretanja i poboljšanjem regenerativnog kočenja i slično, veliki proizvođači u auto-industriji poput Nissan Motors Corporation, Mitsubishi Motors, Renault Group počeli su masovnu proizvodnju svojih električnih komercijalnih proizvoda. Veliki udar automobilskoj industriji okrenutoj proizvodni ICV-a napravili su proizvodi Nissan Leaf i Mitsubishi MiEV (slika 2.4). I ako to nisu bili prvi elektromobili, na tržištu su bili izuzetno traženi i važni. Sa samo jednim punjenjem mogli su da pređu do 160km, a zbog loše infrastrukture baznih stanica za punjenje tih godina bili su konstruisani da mogu da se napune i sa AC priključkom kućne upotrebe.⁷



Slika 2.3⁸ General Motorsa koji je razvio pionirski električni automobil EV1

⁷ Više o tome na <https://www.rbcwealthmanagement.com/en-eu/insights/is-electric-vehicle-charging-infrastructure-driving-an-opportunity>.

⁸ Preuzeto sa: <https://www.caranddriver.com/news/a36887553/gm-ev1-electric-car-technology/>.



Slika 2.4. Najzastupljeniji elektromobili: a) Nissan Leaf⁹ b) Mitsubishi MiEV¹⁰

Sve tri kompanije su postavile jedinstven cilj koji glasi „liderstvo u oblasti elektrifikacije drumskog saobraćaja sa nultom emisijom štetnih gasova“. Rezultat njihovog cilja uspostavio je partnerstva u ovim oblastima poznatijim kao Alliance 2030¹¹ osnovana 1990 godine.

2.2. Savremena era elektrifikacije drumskog saobraćaja

Kada je Toyota 1997. godine predstavila Prius, šokirala je automobilsku industriju dokazavši da hibridno vozilo na naftni derivat i električnu energiju nije samo tehnički moguće već i ekonomski isplativo. Pojavljivanjem na tržište počinje proizvodnja prvih električnih hibridnih vozila novije ere, koji su osim ekonomičnosti imali veoma moderni i elegantni dizajn (slika 2.5a). Toyota Prius iz 2022. godine je član četvrte generacije ovog nevjerojatnog hibridnog automobila. Raste zainteresovanost za hibridna vozila pa je General Motors na sajmu u Detroitu 2015. godine prvi put plasirao na tržište i Chevrolet Volt hibridno vozilo sa mogućnošću punjenja iz javne distributivne mreže. Podjela i klasifikacija vozila biće naknadno opisana u poglavlju 3.

Svijest o razvoju bolje upotrebe čistih energetske resursa na globalnom nivou počinje da raste pošto su se klimatske promjene pojavile kao ključno pitanje za životni standard (*en. The Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation - SRREN*) [10]. Najnovija era u razvoju savremenih čistih elektromobila sa nultom emisijom štetnih gasova na efekat staklene bašte počela je napretkom energetske elektronike, napretkom poluprovodničkih energetskih pretvarača, razvojem kapaciteta baterije (tzv. *Solid-State Battery*) [11] i što je najvažnije,

⁹ Preuzeto sa: <https://global.nissannews.com/en/photos/photo-641ef9ff043d9a62701298df6d721b8e-leaf-101203-12>.

¹⁰ Preuzeto sa: https://www.mitsubishi-motors.com/publish/pressrelease_en/products/2009/news/detail1940.html.

¹¹ Više o tome na: <https://alliancernm.com/>.

povećanje subvencija državnih institucija. Prvi od njih Tesla Roadster prvi put predstavljen kao prototip 19. jula 2006. godine, dvije godine kasnije 2008. godine zvanično započinje proizvodnju. Ovaj automobil predstavlja inovaciju u polju EV-a novije ere. Napaja se iz litijum-jonske baterije (Li-ION) kapaciteta 60kWh i garantovanom distancom puta do 200.000 km. Naprednije verzije se prodaju sa kapacitetom baterije od 85kWh. (slika 2.5b)



Slika 2.5: a) Toyota Prius 2022¹² b) Tesla Roadster¹³

Najveća imena automobilske industrije sadašnjice predstavila su neke od najpoznatijih marki elektromobila, poput Hyundai Ioniq, Hyundai Kona Electric, BMW i3, Jaguar I-Pace, Porsche Taycan ali njihova kombinovana proizvodnja i prodaja ne dostižu 10.000 vozila godišnje. U odnosu na prethodna vozila, malo bolju poziciju zauzima i Audijev proizvod e-Tron sa godišnjom distribucijom približno 10 000 prodatih proizvoda [90]. Iznad njih na skali je Chevrolet Bolt, poznati brend General Motorsa, sa prodajom od oko 20.000 proizvoda godišnje [91]. Nissan Leaf je jedan od najpopularnijih elektromobila na komercijalnom tržištu, sa prosečnom godišnjom proizvodnjom sa preko 30.000 prodatih jedinica [92]. Prema podacima o proizvodnji i prodaji, Tesla Motors, koji proizvodi modele Tesla S, Tesla X, Tesla 3, Tesla Roadster je najistaknutiji proizvođač automobila. Najpopularniji elektromobil na tržištu trenutno je model Tesla 3 koji se prodao više od 900.000 primjeraka u 2021. godini [93].

¹² Preuzeto sa: <https://www.toyota.com/prius/>.

¹³ Preuzeto sa: <https://www.tesla.com/roadster>.

Tabela 2.1. Trogodišnja vrijednost godišnje proizvodnje i distribucije najpopularnijih elektromobila¹⁴

Godišnji podaci o distribuciji EV	2021	2020	2019
Tesla Model 3	911 208	442 511	92 552
Nissan Leaf	33 772	31 177	31 792
Chevrolet Bolt EV	24 828	20 754	16 418
Audei e-Tron	7 429	6 232	5 369
Svi ostali zajedno	do 10 000 godišnje		

Naizgled ovakvog izvora podataka može se pretpostaviti da je elektrifikacija drumskog saobraćaja globalni trend koji se intenzivira. Uprkos ekološkim prednostima EV-a, prodor na tržište i široka prihvaćenost se samo postepeno poboljšavaju, a tržišni udio putničkih vozila u Evropskoj uniji ostaje oko 1%, prema istraživanju objavljenom 2017. godine u [12]. Dobra vijest je da podaci iz 2021.godine pokazuju porast potražnje za elektromobila od 43% u odnosu na 2019. uprkos činjenici da oni trenutno čine samo 1% svetskog drumskog saobraćaja [94].

Nacionalni ciljevi za postepeno ukidanje IC vozila kao i inicijative proizvođača da elektrifikuju svoje vozne parkove, smanjenje troškova vlasništva EV-a i poboljšanje zainteresovanosti kupaca vjerovatno će promovisati tržište električnih vozila.

2.3. Razvijanje svijesti elektrifikacije transporta

Jedna od najvažnijih strategija za smanjenje emisije gasova staklene bašte je elektrifikacija transporta. To je jedan od ključnih ciljeva u potrazi za neutralnošću ugljenika. Međunarodna agencija za energetiku (*en. International Energy Agency-IEA*) predviđa da će, u koliko se ne preuzmu veće mjere, emisije gasova staklene bašte iz transporta porasti za preko 20% do 2030. i za skoro 50% do 2050 [95]. Da bi se postigla ova tranzicija, najmanje 20% svih vozila za drumski transport moraju biti elektrifikovana na globalnom nivou do 2030. pored globalne elektrifikacije železničkog saobraćaja koja je već u toku. Činjenica da je nekoliko nacija i gradova već počelo da sprovodi ovakve zelene programe nije neočekivano.

Prema najnovijoj studiji sprovedenoj u Sjedinjenim Američkim Državama u saradnji sa Okvirnom konvencijom Ujedinjenih nacija o klimatskim promjenama (*en. United Nations Framework Convention on Climate Change-UNFCCC*), transportni sektor je odgovoran za najveći dio, ili

¹⁴ Na zvaničnim sajtovima distributera podaci za 2022. godinu nisu finalizovani do završetka i predaje rada.

oko 27%, emisija gasova staklene bašte u cijelom svetu [96]. Prema istraživanju sprovedenom u Evropi, transport generiše približno četvrtinu (23%) trenutnih globalnih emisija gasova staklene bašte povezanih sa energijom i vodeći je uzrok zagađenja vazduha [95].

2.3.1. EV30@30 Kampanja

Osmog juna 2017. Inicijativa za električna vozila (*en. Electric Vehicle Initiative - EVI*) objavila je kampanju EV30@30, koja je kreirana kao platforma za Ministarski savet čiste energije (*en. The Clean Energi Ministerial- CEM*). Ova kampanja uspostavlja zajednički aspirativni cilj da ubrza elektrifikaciju drumskog saobraćaja i postigne tržišni udio oko 30% za 2030. godinu među članicama učesnicama kampanje [13]. Ona služi kao globalna platforma za podršku inicijativama koje promovišu tehnologije čiste energije i podržavaju prelazak na ekonomiju čiste energije na globalnom nivou. Evropska komisija (*en. European Commission- EC*)¹⁵ i nekoliko drugih važnih partnerskih zemalja i organizacija podržavaju forum, koji se sastoji od 29 vrhunskih međunarodnih nacija sa svih kontinenata, ali još uvijek nedostaje Republika Crna Gora. Jedan od ključnih ciljeva kampanje EV30@30 je povezivanje otvorenih puteva između najmanje 100 gradova tokom prvih pet godina kako bi se podstakla elektrifikacija drumskog saobraćaja. Takozvani gradski pilot program (*en. Global EV Pilot Citi Programme- EVI-PCP*)¹⁶ je razvijen da bi se olakšala ova veza i zvanično je pokrenut 24. maja 2018. Vozila srednjeg i teškog tereta sa nultim emisijama (*en. Zero-Emission Medium- and Heavy-Duty Vehicles- ZE-MHDVs*) globalnu kampanju razvija CEM kao dodatak prethodno pomenutom pilot programu kako bi se postigla nulta emisija ugljenika do 2050. godine [14].

2.3.2. Pariski sporazum

Pariski sporazum, poznat i kao Pariski klimatski sporazum, potpisan je 12. decembra 2015. godine tokom samita održanog u Parizu. Ujedinjuje 196 nacija u borbi protiv globalnih klimatskih promjena. Svi potpisnici sporazuma su po zakonu obavezni da daju doprinos smanjenju emisije gasova staklene bašte širom svijeta. Pariški sporazum predstavlja svjetski okvir čiji je cilj da spriječi katastrofalne klimatske promjene održavanjem globalnog zagrevanja ispod 2°C.

¹⁵ Više o tome na https://ec.europa.eu/info/index_en.

¹⁶ Više o tome na <https://www.iea.org/areas-of-work/programmes-and-partnerships/evi-global-ev-pilot-city-programme>.

Tačnije ovaj sporazum namjerava da pomogne nacijama u njihovim naporima i poboljša njihov kapacitet da se nose sa posledicama klimatskih promjena. Ovaj dogovor je stupio na snagu 4. novembra 2016. godine, a 197 država ¹⁷, uključujući Republiku Crnu Goru, potvrdilo ga je u decembru 2017. godine [15] usvajanjem *Zakona o potvrđivanju Pariskog sporazuma* [97]. Crna Gora je 2021. godine prihvatila izvještaj za kreiranje ažuriranog nacionalno određenog doprinosa (*en.Nationally Determined Contribution-NDC*), kroz koji namjerava da pomogne Pariskom sporazumu smanjenjem emisija gasova staklene bašte za 35% do 2030. Svakih pet godina nacionalni utvrđeni doprinosi se dostavljaju UNFCCC sekretarijat¹⁸.

2.3.3. Naftni derivati

Proizvodnja naftnih derivata koje koristimo kao gorivo za transport vozila počinje sirovom naftom. Osim što se koristi kao gorivo, sirova nafta se takođe može koristiti i u proizvodnji, za grijanje stanbenih objekata i druge slične primjene. Naftna roba ne samo da pojednostavljuje život na mnogo načina, već ima i negativan uticaj na životnu sredinu. Bušenje, lociranje, proizvodnja i transport naftnih derivata imaju potencijal da promijene ekosistem i naškode životnoj sredini.

Poznato je da je globalna nestašica naftnih derivata, a kao rezultat toga, oni postaju sve skuplji. Postoji velika potreba za svježim izvorima, a mnoge ogromne bušotine derivata nafte su praktično iscrpljene. To će dovesti do globalnog rasta cijena benzina i dizela, što bi mogao biti još jedan važan element u rastu upotrebe električnih automobila [16].

U današnjem svijetu, gdje smo izloženi rastućoj emisiji CO₂ i drugih štetnih gasova u atmosferu, kao i značajnoj energetske krizi koja pogađa gotovo sve industrije, uključujući i automobilsku industriju, ključno je u potpunosti razumjeti funkcionisanje sistema i dizajnirati električna drumska vozila sa ciljem očuvanja životne sredine i korišćenja „čistih” izvora energije. Oslanjanje na obnovljive izvore energije kako bi se drastično smanjilo ili čak eliminisalo korišćenje uglja u proizvodnji energije neophodno je za smanjenje emisije ugljen-dioksida. Sve veći broj komponenti energetskog sistema, kao što su sistemi za skladištenje energije, sistemi za kompenzaciju reaktivne energije, elektromobili, itd., oslanjaju se na energetske elektrone [17].

¹⁷ Podatak iz januara 2021. godine.

¹⁸ Više o tome na <https://www.gov.me/clanak/crna-gora-planira-da-do-2030-godine-smanji-emisiju-gasova-s-efektom-staklene-baste-za-35>.

3. Klasifikacija elektromobila

Težnja ka sve većoj zastupljenosti elektromobila u drumskom saobraćaju razvija se svakodnevno u nadi da će ovaj vid transporta u nekoj bliskoj budućnosti dominirati nad vozilima koja se kreću koristeći naftne derivate. Elektromobilna vozila mogu da izazovu značajan uticaj na životnu sredinu, shodno tome elektromobili mogu biti grupisani u dvije osnovne karakteristike i to:

- elektromobili sa nultom emisijom štetnih gasova
- elektromobili sa smanjenom emisijom štetnih gasova

Vozila koja spadaju u prvu grupu su u auto industriji poznatija kao *ZEV* (*en. Zero Emission Vehicles*) i imaju nultu emisiju izduvnih CO₂ gasova, pritom su veoma uticajna na efekat staklene bašte. Vozila sa malom emisijom izduvnih CO₂ gasova smanjuju potrošnju goriva tokom ciklusa vožnje u odnosu na klasična komercijalna IC vozila i tako djelimično doprinose poboljšanju klimatskih promjena i životne sredine. Takva grupacija vozila u praksi je poznatija pod skraćenicom *LEV* (*en. Low Emission Vehicles*).

Postoje više vrsta elektromobila, zavisno od izvora energije koja je potrebna za njihovo pokretanje. Neki elektromobili rade isključivo na energiji proizvedenoj iz sopstvene baterije, drugi pak mogu imati IC motor koji radi kombinovano sa baterijom, a u praksi se ređe mogu sresti i elektromobili koji mogu koristiti druge načine izvora energije za svoje kretanje. U zavisnosti od sistema napajanja elektromobilnih vozila koje pokreću njihov pogonski sklop, možemo izvršiti klasifikaciju na:

- hibridne elektromobile (*en. Hybrid Electric Vehicle-HEV*)
- hibridne elektromobile sa mogućnošću punjenja (*en. Plug-in Hybrid Electric Vehicle PHEV*)
- elektromobile sa gorivim ćelijama (*en. Fuel Cell Electric Vehicle-FCEV*)
- elektromobile na baterijski pogon (*en. Battery Electric Vehicle-BEV*)

3.1. Hibridni elektromobili

Hibridna elektromotorna vozila spadaju u *LEV* grupu i njihov pogonski sklop je konstruisan kao kombinacija pogona iz električnog motora i IC motora. Većina ovakvih elektromobila električni pogonski sklop koristi kada je potreba sa snagom vozila niska, dok povećanjem snage vozila koja je recipročna brzini kretanja elektromobila, pogonski sklop prelazi sa elektromotornog napajanja

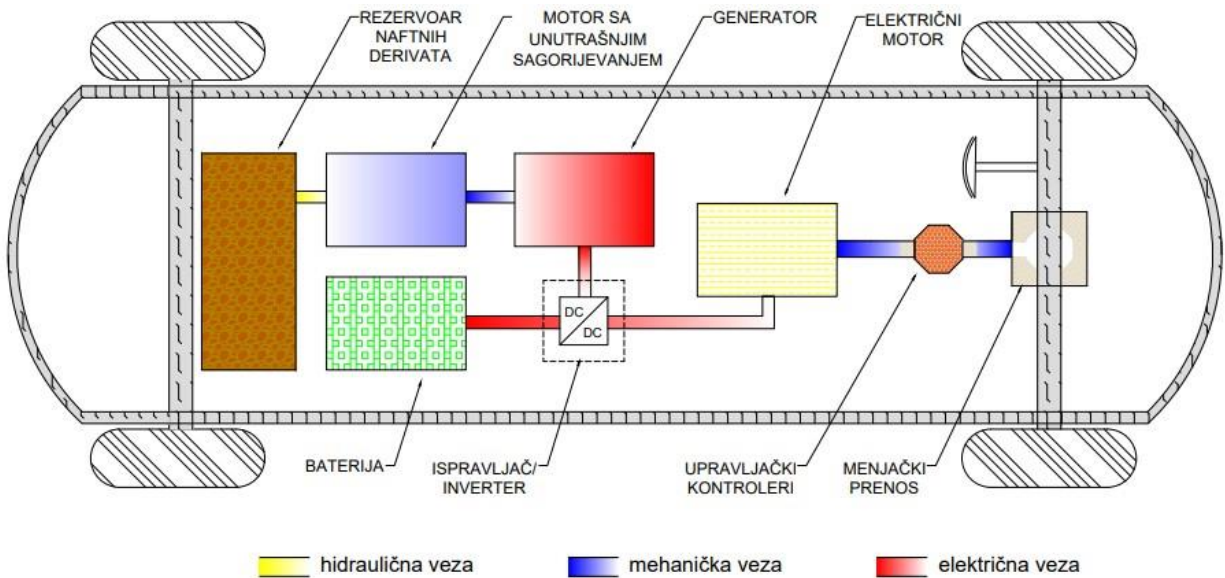
na IC pogon motora. Ciklusi vožnje koji se u praksi najčešće koriste u gradskim i urbanim sredinama gdje je povećan radijus kretanja i gužvi, zastupljena su česta stajanja i kretanja vozila. Ovaj ciklus vožnje u praksi poznatiji kao „start-stop“ kod hibridnih elektromobila ima prednost. HEV smanjuju potrošnju goriva prelaskom na električni pogon jer IC motor ostaje potpuno ugašen tokom perioda praznog hoda tipa semaforškog zaustavljanja ili saobraćajnih gužvi. Na taj način dolazi do smanjivanja emisije CO₂.

Kako bi HEV postigao bolje performanse utroška energije u ciklusu vožnje, HEV može da koristi oba izvora napajanja i to:

- redno ili serijski (Serial Hibrid)
- paralelno (Parallel Hibrid)
- kombinovano (Dual mode Hibrid)
- složeni hibridi

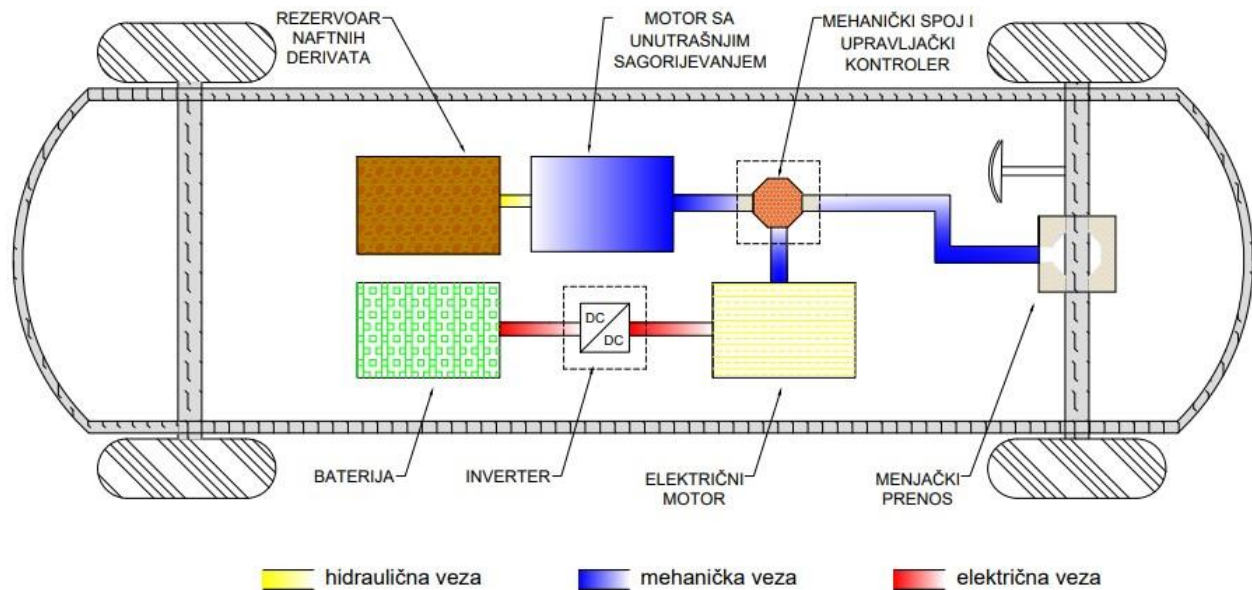
Često se ne koriste više od dva pogona u pokretanju HEV-a jer sistem je prilično složen kada postoji više od dva pogona. Primjena određenog režima rada može optimizovati ukupne performanse, efikasnost i emisije uz ispravnu kontrolu vozila. Stvarni raspored pogona, karakteristike efikasnosti pogonskog sklopa, karakteristike opterećenja i druge varijable igraju ulogu u praktičnom dizajnu kada se određuje koji režim treba koristiti. Električna i mehanička energija su dvije vrste energije koje su prisutne u pogonskom sistemu HEV-a.

Korišćenjem rednog izvora napajanja IC motor nije direktno povezan sa točkovima i ne pokreće direktno vozilo (slika 3.1). Električni motor predstavlja pokretač točkova na vozilu koji se napaja energijom koju dobija iz baterije ili IC motora. Kontroler koji se nalazi pri menjačkom prenosu ima funkciju da odredi da li će energiju za pogon vozila da izvuče iz baterije ili IC motora na osnovu snage koja je potrebna vozilu. Odvajanjem rada oba motora shodno ciklusu vožnje električni motor nema prazan hod i na ovakav način optimizuje se rad vozila. Baterije su gabaritno veće nego kod drugih elektromobila i pune se u sistemu *on-board* punjenja odnosno regenerativnim kočenjem i IC motorom jer HEV se ne može priključiti na punjače koji se napajaju iz elektrodistributivne mreže radi punjenja baterije. Ispravljač, koji služi kao spoj električne energije za regulisanje tokova snage od baterija i generatora do elektromotora, ili na drugi način od elektromotora do baterija, je važna komponenta ovog aranžmana.

Slika 3.1¹⁹ Sažeta blok šema serijskog HEV-a

Kod hibridnih vozila koja koriste paralelni izvor napajanja oba izvora rade u tandemu i pokreću vozilo (slika 3.2). Na taj način električni motor kao i IC motor su preko menjačkog spoja povezani sa točkovima vozila. Dvije mehaničke snage su kombinovane u mehaničkoj spojnici, koja je glavna komponenta ovog dizajna. Glavni izvor energije je IC motor, a energetski blok se sastoji od baterija i elektromotornog pogona. Kontroler koji se nalazi pri menjačkom spojnom prenosu određuje kada će energiju za pogon vozila proisteći iz baterije, a kada iz IC motora. Baterijski sklop paralelnih hibrida je manji u odnosu na serijske hibridnih vozila, a dopunjavaju se regenerativnim kočenjem. Kada se vozilo kreće manjom brzinom odnosno kada je potreba za snagom vozila manja, paralelni hibridi takođe koriste električni motor kao generator za dodatno punjenje baterije.

¹⁹ Prilagodjeno na osnovu literature [83].

Slika 3.2²⁰ Sažeta blok šema paralelnog HEVa

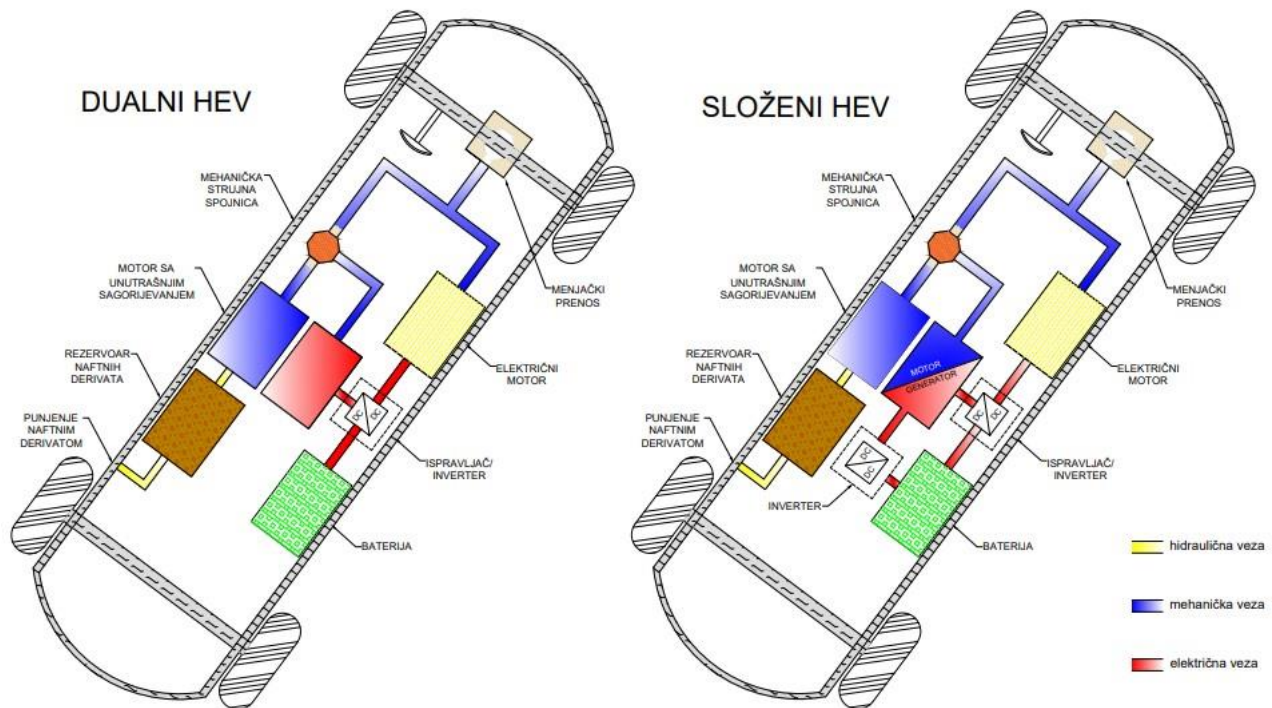
Za razliku od paralelnih hibridnih automobila, koji pokazuju svoju efikasnost na autoputevima i otvorenim dionicama puta, serijska hibridna vozila su se pokazala najefikasnija u saobraćaju koji se odvija u gradovima i metropolitanskim oblastima i često se koriste u taksi vozilima i dostavnim kombijima. Zbog činjenice da može da obezbedi samo određenu količinu snage, serijski pogonski motor je manji od motora sa paralelnim pogonom. Međutim, pošto je baterija u serijskom hibridnom pogonu veća i teža od baterije u paralelnom hibridnom pogonu, cijena serijskog hibridnog automobila je veća od cijene paralelnog hibridnog automobila.

Kombinacijom serijskog i paralelnog pogonskog sklopa hibridnih vozila motor može da pokreće točkove preko menjačkog pogonskog sklopa, a da pritom bude efikasno isključen, pri čemu bi se snaga potrebna za kretanje vozila dobijala iz baterije preko električnog motora. Na taj način postiže se optimalan rad motora i smanjena potrošnja naftnih derivata. HEV Dual Mode kombinuje najveće aspekte i serijskih i paralelnih hibrida, čak i dok strukturalna složenost čini proizvodnju skupljom za razvoj izuzetno uspešne tehnologije. Ovaj sistem dijeli snagu motora u dva pravca, šaljući jedan u generator da proizvede električnu energiju, a drugi koristeći sistem mehaničkog prenosa da pokrene točkove. Razdvajanjem sistema napajanja na IC motor, generator i elektromotor predstavlja ključnu karakteristiku vozila jer se na taj način povećala nezavisnost pokretačkog napojnog sistema. Na slici 3.3 je prikazan jedan takav kombinovani sklop. Tojotin

²⁰ Prilagodjeno na osnovu literature [83].

proizvod hibridnog vozila Toyota Prius je prvi kombinovani pogonski sklop i kao takav postao je veoma popularan u komercionalnoj auto industriji²¹.

Takozvani složeni hibridi koji imaju strukturu sličnu serijsko-paralelnom, prikazani su na slici 3.3 – desno. Glavna razlika je u tome što baterija sada služi kao električni spojni uređaj umesto pretvarača snage, a između motora/generatora i baterije postoji dodatni pretvarač snage. Ovakvi sistemi nisu našli široku primjenu u komercijalnom tržištu zbog svoje komplikovane konfiguracije a samim tim i cijene.



Slika 3.3 Pojednostavljeni blok dijagram kombinovanog HEV-a: lijevo dualni desno složeni tip ²²

Studije su otkrile da se HEV-ovi uspješno koriste u transportnoj industriji. Međutim one se ipak razlikuju u tome koji je oblik HEV ekonomski isplativiji. Prema uporednom istraživanju efikasnosti serijskih i paralelnih hibridnih električnih vozila na osnovu dubinske parametarske analize i analize urađene u radu [18] faktor hibridizacije je presudan za optimizaciju ukupne efikasnosti pogonskog sklopa u paralelnim HEV konfiguracijama, čineći ga efikasnijim u poređenju sa serijskom konfiguracijom HEV-a. S druge strane, istraživanje Univerziteta Sakaria u

²¹ Više o tome na: <https://newsroom.toyota.eu/toyota-prius-plug-in-hybrid/>.

²² Prilagođeno na osnovu literatura [83] i [84].

Turskoj otkrilo je da serijska struktura transportnog sektora koristi manje goriva od paralelne [19]. Ova istraživanja su upoređivala ekonomičnost goriva i potrošnju između paralelnih i serijskih HEV. Upotreba regenerativnog kočenja, koja održava takozvanu slobodnu energiju, uveliko poboljšava ekonomičnost goriva paralelnih HEV vozila, prema studijama koje upoređuju hibridne automobile sa konvencionalnim automobilima u stvarnom svijetu koristeći redovan ciklus vožnje [20]. Upotreba HEV automobila u drumskom saobraćaju je ključna i označava prvi korak ka elektrifikaciji električnih vozila, prema ovom i uporedivom istraživanju.

3.2. Hibridni električni automobili sa mogućnošću punjenja

Plug-in hibridni električni automobili konstruirani su da budu tehnologija između baterijskog i HEV vozila. Prema IEEE plug-in hibridno električno vozilo je svako hibridno električno vozilo koje sadrži jedan ili više sistema za skladištenje energije baterija, koji se koristi za pokretanje i kretanja vozila. Osim toga posjeduje i mogućnost za punjenje istog sistema baterija iz elektrodistributivne mreže. Posebna sposobnost ovog tipa vozila je njegova vožnja u potpuno električnom režimu i bez potrošnje benzina [21].

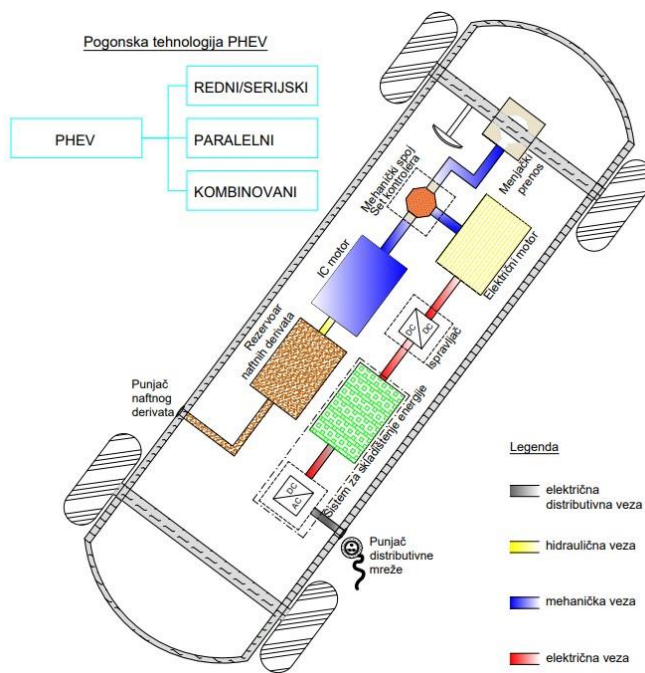
Ova vozila takođe koriste IC motor u kombinaciji sa električnim motorom, sa mogućnošću punjenja iz elektrodistributivne mreže odgovarajućim tipovima AC punjača. Osim toga dopuna baterije se kao i u svim prethodnim slučajevima postiže kinetičkom energijom regenerativnog kočenja. U poređenju sa osnovnim komercionalnim tipovima hibridnih vozila, kapacitet baterije PHEV-a mora imati visoke performanse u cilju povećanja dometa krajnjeg korisnika. Tek nakon potpunog pražnjenja baterije kontroler u menjačkom pogonskom sklopu prebača energiju pogona sa elektromotora na IC motor. PHEV se pokreće u električnom režimu rada i u zavisnosti od stanja napunjenosti baterije može da radi kao EV sve dok je stanje baterije pozitivno, nakon čega prelazi u komercionalno vozilo sa IC motorom.

Zbog dužeg radijusa kretanja koja se u praksi pokazala učestanija u odnosu na komercijalne HEV električne automobile PHEV se nerijetko nazivaju i električnim vozilima sa produženim radijusom kretanja u literaturi poznatiji kao EREV (*en.Extended Range Electric Vehicle*)²³. Smisao ovakvog električnog vozila je da vozilo ima naftni derivat koji se može koristiti za duže udaljenosti vožnje. Ovakva vozila smanjuju aksioznost i daju sigurnost vozačima u smislu neograničenosti dometa

²³ Ponekad se u određenim literaturama može naći i pod skraćenicom ReEVs-Range-extended Electrical Vehicle).

koje ne uzrokuje stanja napunjenosti baterije. Još jedna od prednosti PHEV-a je što mogu da obezbijede ekonomičnu potrošnju goriva tokom planirane vožnje i direktno utiče na smanjivanje štetnih izduvnih gasova u atmosferi. Međutim PHEV pored svih prednosti koje posjeduje u praktičnoj vožnji, pokazao je da ima i određene mane. Ograničenost energije baterije nije uvijek dobar preduslov za određene cikluse vožnje. Kao primjer možemo navesti neki pogonski sklop PHEV-a koji ima kapacitet baterije od 16kWh, a pogonski motorni sklop je ograničen na 125kW. Kada bi vozač elektromobila zahtijevao punu snagu pogonskog sklopa, baterija elektromobila bi morala da obezbijedi snagu 8 puta veću od nominalnog kapaciteta [22] . Jasno je da je teško postići ovakve zahtjeve potrebne za snagu, i pritom može prouzrokovati određene gubitke unutar baterije i direktno smanjiti efikasnost baterije.

Identično klasičnim hibridnim i PHEV elektromobili mogu biti konstruisani u tri pogonska izvora napajanja (slika 3.4). Poređenjem blok šema koje mogu da se nađu u raznim literaturama kao što je opisano u [22] [23] [24] i slično, blok šeme serijskog HEV-a sa PHEV-om primjećuje se da izlaz IC motora povezan sa generatorom i energija proizvedena od strane IC motora i pomoću generatora može koristiti za dopunu baterije ili napajanje baterije pogonskog sklopa. Osnovni primarni način punjenja baterije PHEV vozila je iz elektrodistributivne mreže.



Slika 3.4: Uopšteni dijagramski prikaz PHEV-a [24]

Serijskom konfiguracijom električni motor pokreće točkove preko mehaničkog menjačkog prenosa. Električni motor može biti kolektorski elektromotor sa četkicama, elektromotor bez četkica, indukcion motor i slično (više o tome u poglavlju 4.2). Motor u serijskoj konfiguraciji je napravljen da isporuči obrtni moment potreban za rad vozila u svim okolnostima dok IC motori mogu biti napravljeni da ispune tipične potrebe za snagom.

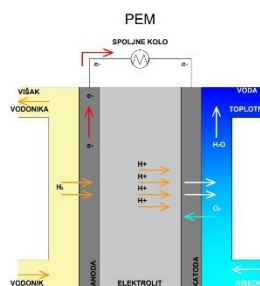
Najčešće EREV imaju pralelni ili dualni pogon koji je koncepciran na principu korišćenja IC motora samo za pokretanje električnog generatora kojim se na osnovu toga pune baterije vozila [25]. Vozilo Chevy Volt je pravi primjer ovakvog elektromobila.

Hibridna vozila se proizvode u modernim i praktičnim linijama, zadržavaju domet koji mogu postići konvencionalna putnička vozila sa IC motorima, dok nude znatno veću efikasnost električnog motora, ali se ne smatraju potpuno električnim vozilima. Kao što je ilustrovano na slici 3.4, konceptualno, PHEV je HEV sa velikom baterijom koja se može puniti iz spoljašnjeg izvora (kao što je elektrodistributivna mreža ili obnovljivi izvor energije) da bi se povećao potpuno električni domet vozila. Dok rad na razvoju jačih baterija i snažnijih električnih vozila stabilno napreduje, nedavno je na razmatranje došla i još jedna blisko povezana ideja. Već je rečeno da PHEV ima sposobnost da puni baterijski paket iz mreže, ali uprkos tome takođe će moći da isporučuje energiju u mrežu. Ovaj koncept u praksi je poznat pod nazivom *Vehicle-to-grid* skraćeno V2G. Da bi mreža prenosila električnu energiju na vozilo dok se puni i da bi automobil isporučivao energiju u mrežu kada se prazni tokom vršnih sati, nova V2G tehnologija mora biti dvosmjerna. Da bi se utvrdilo da li je V2G izvodljiv, od ključne je važnosti da se uradi analiza troškova i prihoda koja uzima u obzir projektovani broj automobila koji učestvuju u V2G snazi, ukupnu količinu skladišnog kapaciteta u vozilima i potrebe za napajanjem mreže. Elektromobili još nisu u širokoj upotrebi, posebno u zemljama u razvoju. Pošto jedan elektromobil ne može sam da zadovolji maksimalnu potražnju, veliki broj elektromobila mora da radi zajedno da bi V2G tehnologija dobro funkcionisala, što je samo po sebi težak i izazovan zadatak [26]. Praktičnost ideje V2G razmatrana je u studiji [27] koristeći ekonomsku analizu, očekivanu potražnju i napredak tehnologije. Ključno je naglasiti da svaki automobil koji podržava V2G mora biti u skladu sa IEEE standardom 1547 da bi se povezao sa uslužnim programom [21].

3.3. Elektromobili sa gorivim ćelijama

Svijet se u posljednje vrijeme drastično udaljava od fosilnih goriva u korist zelenih izvora energije. Pošto je vodonik prilagodljiv i ima širok spektar upotreba, uključujući transport, hemikalije, sintetička goriva, preradu metala, itd. na njega se gleda kao na mogućeg kandidata za alternativnu energiju fosilnim gorivima [28]. Alternativni izvor energije zasnovan na vodoniku je osnovni pokretački derivat elektromobila sa gorivnim ćelijama (FCEV). Zakon o energetskej politici poznatiji kao *Energy Policy Act* koji je usvojen 24.Okt.1992. godine u SAD-u podržava razvoj vozila na alternativna goriva [29]. Za razliku od vozila sa IC motorom, ova vozila emituju samo vodenu paru i topli vazduh što je jasan pokazatelj da FCEV-ovi ne proizvode štetne gasove u atmosferi.

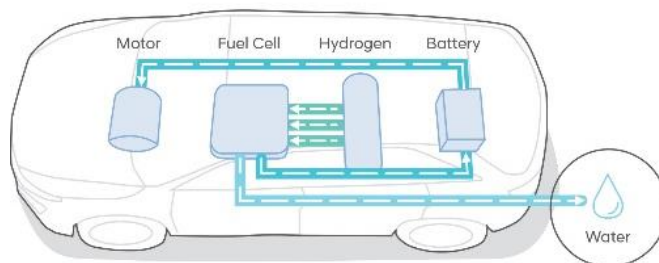
FCEV je konstruktivnim sklopom sličan hibridnim vozilima, sa osnovnom razlikom u pokretačkom derivatu koji se skladišti u rezervoare. Umjesto naftnih derivata koje koriste HEV vozila, FCEV posjeduje rezervoare koji se pune čistim gasom vodonika. Gorivne ćelije sa polimer elektrolitskom membranom (*en.Polymer Electrolyte Membrane-PEM*) su najpopularniji oblik gorivih ćelija za upotrebu u automobilima. Sistem funkcionisanja je prikazan na slici 3.5. Elektrolitska membrane je postavljena u PEM gorivnoj ćeliji između pozitivne i negativne elektrode odnosno između anode i katode. Anoda prima vodonik iz rezervoara vozila, a katoda kiseonik unešen vazдушnim usisom. Elektrohemijska reakcija katalizatora gorivnih ćelija uzrokuje da se molekuli vodonika podijele na protone i elektrone. Membrana propušta protone na putu do katode. Elektroni su primorani da “putuju” preko spoljnog kola. Protoni i elektroni se rekombinuju jedni sa drugima na strani katode gdje se spajaju sa molekulima kiseonika da bi napravili vodu i izvršili rad.



Slika 3.5 Poprečni presjek izgleda PEM gorivne ćelije²⁴

²⁴ Prilagođeno na osnovu literature [20]

Hyundai FCEV NEXO koji je predstavljen 2018. godine, nudi najbolje performance od svih postojećih FCEV vozila na tržištu i opremljen je najsavremenijom tehnologijom koju je kreirala Hyundai Motor Group (slika 3.6). Istraživanja su pokazala da opšti trendovi publikacija i citata od 1999. do 2019. godine kao i rast dometa vožnje oko 600 km i bržeg vremena punjenja, FCEV bi mogli biti dobar kandidat za platformu najnovijih generacija automobila [30].



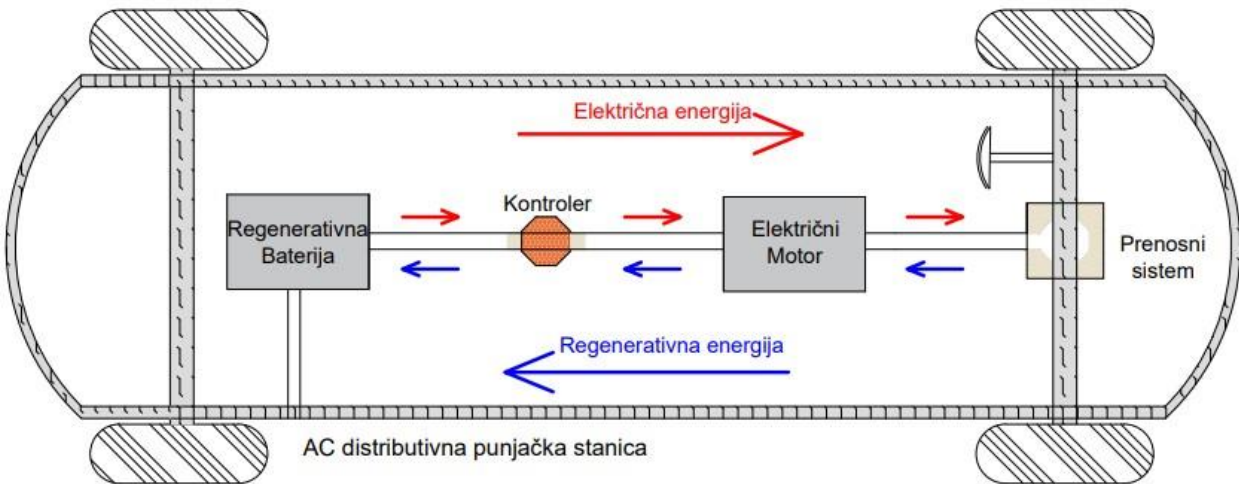
Slika 3.6²⁵ Prikaz Sistema napajanja kroz vodonik FCEV

Veliki broj tehnologija se istražuje kako bi se stvorila ekološki prihvatljivija transportna industrija, a ćelijska tehnologija predstavlja jedan od pristupa koji prilično obećava za postizanje krajnje zamene sa nultom emisijom. Međutim uprkos činjenici da FCEV obećavaju da će smanjiti emisije opasnih gasova, druga istraživanja su pokazala da ova tehnologija uopšte nije održiva za proizvođače automobila [31].

3.4. Baterijski elektromobil

Ideja o automobilima sa nultom emisijom nametnuta je novim ekološkim problemima koji se odnose na količinu zagađujućih materija koje u atmosferu ispuštaju ICE-ovi, fluktuirajuće cijene nafte na svjetskom tržištu i različita pravila o emisiji opasnih gasova. Ovo predstavlja snažan podsticaj za korišćenje električnih automobila na baterije. Baterijski elektromobil predstavlja vozilo koje se napaja isključivo iz struje koju proizvodi njegva baterija. Savremena električna vozila su namjenski konstruisana korišćenjem originalnog dizajna karoserije i okvira. Ovo koristi dodatnu fleksibilnost električnog pogona dok i dalje ispunjava specifične strukturne kriterijume za EV. Slika 3.7 daje konceptualni prikaz savremenog elektromotornog voza.

²⁵ Preuzeto sa: <https://www.hyundai.co.nz/next-gen2/fuel-cell-technology2>



Slika 3.7 Uprošćena blok šema elektromobila sa punjivom baterijom

Osnovne komponente ovog vozila su njegova baterija koja služi za skladištenje električne energije, zatim elektromotor namijenjen za pogon transmisije, elektroenergetski pretvarači (invertori), kontroleri koji imaju višenamjensku ulogu od kojih su neke kontrola snage koja se dovodi na motor, što ujedno i predstavlja kontrolu brzine vozača kao i pravac kretanja, kontrolu kočionih sistema i slično.

Baterija BEV se najčešće puni iz elektrodistributivne mreže koristeći neki od adekvatnih tipova punjača namijenjenih za dati tip vozila. Tipove punjača elektromobila prikazaćemo u poglavlju 9. Osim toga energija potrebna za dopunu baterije može se postići kočionim sistemom. Manje zastupljeniji primjer dopune električne energije baterije elektromobila mogu se postići primjenom fotonaponskih panela ugrađenih u konstrukciju vozila [32]. Ovakav tip punjenja vozila nema masovnu primjenu u praksi. Proširenje opsega BEV-a se može postići povećanjem kapaciteta baterije. Međutim, baterija velikog kapaciteta možda neće biti korisna jer zauzima puno prostora, značajno povećava težinu vozila, smanjuje performanse i povećava cijenu automobila u cjelini.

Domet vozila zavisi od mnoštva faktora koje utiču na potrošnju same baterije, ali prvenstveno kapacitet odnosno energija skladištena u bateriji je primarni faktor koji određuje krajnji domet vozila. Za domet vožnje od 800 km potrebna je baterija kapaciteta oko 150 kWh, pod pretpostavkom trenutne tehnologije baterije. Većina BEV modela ima domet od 100 do 250 km, dok neki od najboljih modela mogu ići do 300 do 500 km [33]. Neki zvanični sajtovi automobilskih proizvođača navodi se da njihova vozila mogu da dostignu domet i do 600km sa jednim punjenjem

baterije. Nedavna studija uspješno je kreirala tehnike regenerativnog kočenja za električne tricikle koristeći Matlab/Simulink softver i postigla pristojan rezultat za povećanje kilometraže. Utvrđeni su efekti tri različite tehnike kočenja – potpuno mehaničkog kočenja, serijskog regenerativnog kočenja i paralelnog regenerativnog kočenja – na potrošnju energije. U poređenju sa potpunim mehaničkim kočenjem, rezultati su pokazali da ovaj modificovani metod kočenja može povećati kilometražu za otprilike 4% km/kWh [34]. Kroz četvrto poglavlje detaljnije razmatramo mehanizam regenerativnog kočenja.

Razmatrane su razne analize strategija punjenja baterija EV-a uzimajući u obzir kapacitet baterije [35]. Praksa je pokazala da potpuno punjenje prazne baterije AC strujnim punjačima traje oko 5h za većinu modela elektromobila. Često je to dug proces punjenja vozila što stvara korisniku dodatnu nervozu i nestrpljenje pa se većina korisnika EV-a opredjeljuju na kraće trajanje punjenja ili dopune vozila. Punjenje baterije u trajanju od jednog sata AC struju daje oko 20-100km dometa sa novim Evropskim ciklusom vožnje (ciklusi vožnje detaljno su objašnjeni u poglavlju 6.3) dok dvadesetominutno punjenje sa DC strujom daje 100-150km mogućnosti pređene distance [33]. Treba napomenuti da su ovo optimalni uslovi kretanja vozila i da onu u praksi nisu u potpunosti relevantni. Naime stil vožnje, abiotički faktori kao i korišćenje multimedijalnih uređaja i elektronike u vozilu značajno utiču na SoH baterije koje će biti detaljnije opisano u narednim poglavljima. Arhitektura akumulatorskog automobila, njegova efikasnost, modeliranje i infrastruktura za punjenje takođe će biti razmotreni u predsojećim poglavljima.

4. Konfiguracioni sklop elektromobila

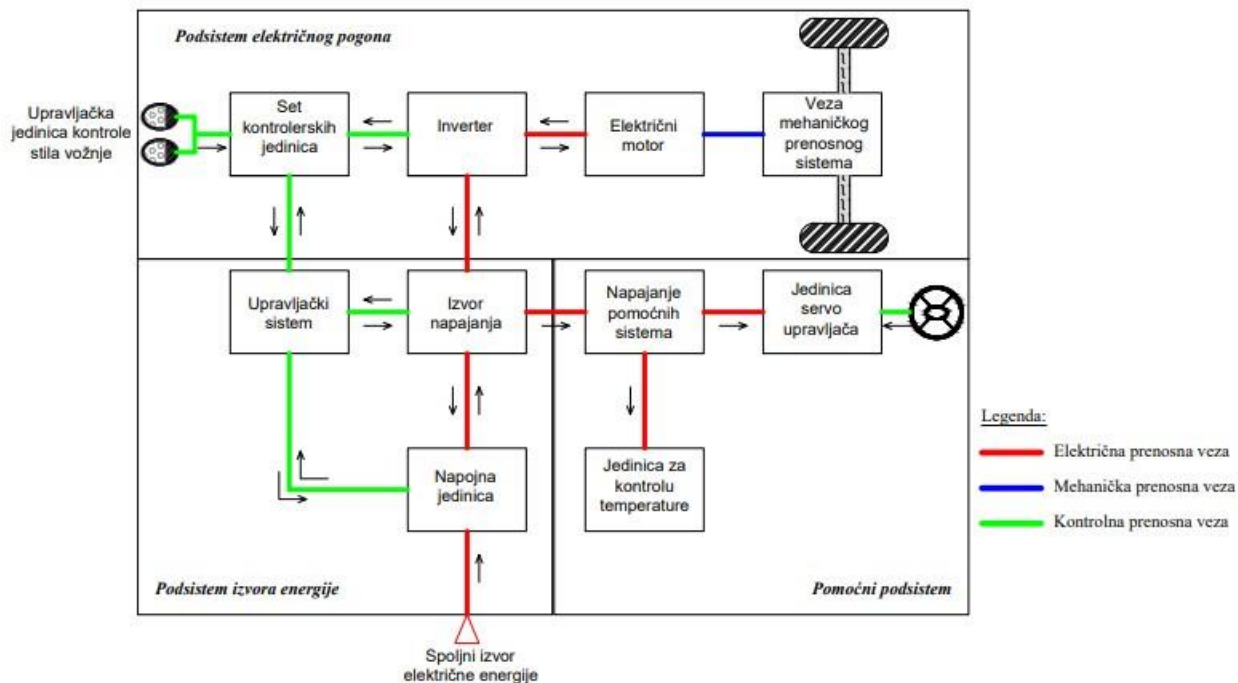
Postoje brojne vrste i veličine elektromobila, kao što smo videli u prošlom poglavlju. Baterija je, osim u klasičnim vozilima sa ICE pogonom, neophodna komponenta u skoro svim drumskim vozilima. Baterija je jedini oblik skladištenja energije u komercijlnim EV, a zauzima i najveći prostor u konfiguraciji samog vozila. Ona mora neprekidno da prima i oslobađa električnu energiju, i kao takva predstavlja jedan od ključnih elemenata. Neka vozila poput FCEV su razvijena koristeći baterije koje su znatno veće od onih koje se obično ugrađuju u hibridne automobile sa vezom IC motora.

U ovom poglavlju ćemo dodatno ispitati i nekoliko tipova električnih motora koji se često viđaju u EV. Elektronski kontroleri predstavljaju ključnu komponentu. Ovo poglavlje takođe pokriva složenije kontrolere potrebne modernim električnim uređajima koji su sve sofisticiraniji. Ovaj standard nas navodi na zaključak da su određene konfiguracije podsistema moguće za EV-a. Slika 4.1 daje konceptualnu ilustraciju savremenog elektromotornog pogona. Kada bismo razdvojili električni automobil na njegova tri glavna podsistema, oni bi izgledali ovako:

- **podsistem izvora energije** koji obuhvata cjelokupni baterijski sklop sa sistemom napajanja.
- **podsistem električnog pogona** koji se sastoji od motora, energetske elektronske pretvarača i kontroler sa setom adekvatnih prenosnika.
- **pomoćni podsistem** koji može da reguliše temperaturu vozila, servo upravljač, razne multimedijalne izvore napajanja i slično.

Ukratko sistem izvora energije isporučuje prerađenu električnu energiju koju koriste drugi djelovi vozila. Električnu energiju pretvaraju elektromotori u mehaničku energiju da bi ispunio zahtjeve za snagom vozila ili obrnuto kad se javi potreba za tim. Energetski elektronski pretvarači se koriste za regulisanje snage između sistema za skladištenje energije i elektromotora sa odgovarajućim naponom i strujom. On obezbjeđuju elektromotoru potrebnu snagu za ubrzanje vozila. S druge strane, pretvarači se takođe mogu koristiti za korišćenje energije koja se povratu tokom regenerativnog kočenja za punjenje sistema skladištenja baterije. Senzori, digitalni procesori i kola interfejsa koja čine razne elektronske kontrolere u vozilu proizvode kontrolne signale za pretvarače i druge električne i mehaničke komponente. Podsistem električnog pogona mora da se pozabavi brojnim kritičnim pitanjima, uključujući profil vožnje, težinu i zapreminu vozila, pouzdanost,

fleksibilnost, sistem multimedije vozila kao i održavanje, i sve po razumnim troškovima, kako bi EV ostao konkurentan komercijalnim IC vozilima.



Slika 4.1 Blok dijagram koji ilustruje unutrašnju strukturu elektromobila ²⁶

4.1. Elektrohemijske baterije

4.1.1. Osnovni parametri baterije

Ovo poglavlje navodi ključne varijable koje definišu ponašanje i performanse baterije. Može se reći da baterija predstavlja srce elektromobila. Osnovni kriterijumi baterija elektromobila su njena energija, snaga, naponi, energetska efikasnost, komercijalna dostupnost, cijena, temperatura, broj životnih ciklusa i punjenje. Odnos između dostupnosti energije i faktora kao što su temperatura okoline, brzine punjenja i pražnjenja, oblik baterije, zahtjevi za hlađenjem su veoma bitni za buduće stanje baterije.

Baterija služi kao sredstvo za skladištenje energije. Napon baterije i količina napunjenosti koju može da zadrži određuju koliko **energije** može da zadrži, a Džoul [J]²⁷ je osnovna jedinica za energiju baterije u SI sistemu.

²⁶ Prilagođeno na osnovu literature [85]

²⁷ Ovo je nezgodno mala jedinica, pa umesto toga koristimo Wh

$$E = VxC \text{ [Wh]} \quad (4.1)$$

Napon baterije [V] i što je još važnije njen kapacitet C [Ah] značajno variraju u zavisnosti od namjeravane primjene baterije. Baterija se brzo isprazni povećavanjem struje koju zahtijeva potrošač i na taj način doći će do smanjivanja napona i kapaciteta baterije. Za svaki kilogram mase elektromobilske baterije postoji određena količina električne energije koja se skladišti u njoj i prepoznatljiva je kao **specifična energija** baterije [Wh kg^{-1}]. Promjenljive kao što su temperatura i brzina pražnjenja imaju značajan uticaj na količinu energije koja se skladišti u baterijama [36]. Količina električne energije koja se čuva u jednom kubnom metru zapremine baterije poznata je kao **gustina energije** [Wh m^{-3}]. Gustina energije je slična specifičnoj energiji, i to je takođe ključni faktor jer se može koristiti za izračunavanje zapremine baterije koja je potrebna dijeljenjem energetske kapaciteta baterije [Wh] njenom gustom energije [Wh m^{-3}].

Količina energije dobijena po kilogramu baterije poznata je kao **specifična snaga** [W kg^{-1}]. Specifična snaga baterije nije konstantna veličina jer na snagu baterije u velikoj mjeri utiče opterećenje koje je na nju elektromobil izazvao, a ne sama baterija. Skladištenjem veće količine energije što predstavlja visoku specifičnu energiju koja se lagano oslobađa (potreba za snagom je mala) može se aproksimirati sa vozilom koje je u stanju da prođe veliku udaljenost sa malim koeficijentom brzine.

Odnos izlazne električne energije baterije i energije koja je potrebna da se ona vrati u stanje prije pražnjenja je ono što se opisuje kao ključna metrika **energetske efikasnosti**. Visoka energetska efikasnost je poželjna jer je to ubjedljivo opravdanje za usvajanje vozila zasnovanih na baterijskom pogonu, što rezultira smanjenjem ukupnih emisija štetnih gasova u atmosferi. Energetska efikasnost baterije značajno varira u zavisnosti od toga kako se ona koristi. Jedan od najčešćih primjera energetske efikasnosti se može predstaviti kroz punjenje baterije pri čemu efikasnost baterije značajno opada ako se baterija brzo puni i prazni. Stopa efikasnosti punjenja je ispod 100% zbog različitih vrsta baterija, temperaturom i brzinim punjenjem, tačna vrednost će se promijeniti. Efikasnost baterije bi bila 100% da postoji savršen potrošač i okruženje kao i da je potrošač sposoban da vrati puno punjenje koje je prethodio. Međutim, takav sistem nije prilagodljiv okruženju u kojem se kreće elektromobil. Očigledno je da je sposobnost baterije da obezbijedi električno punjenje veoma važan faktor. Baterije koje se koriste u elektromobilima (*en. traction batteries*), često se ocjenjuju u smislu njihovog kapaciteta za 5-časovno pražnjenje. Fenomen koji

se dešava kada se većina baterija drži u stanju mirovanja poznat je kao samopražnjenje i implicira da se neke baterije ne mogu koristiti bez punjenja tokom dužeg vremenskog perioda. Tempo samopražnjenja baterije varira u zavisnosti od tipa baterije i drugih parametara od kojih je najčešća temperatura²⁸.

Uticaj temperature okoline na SoH baterije u mnogome ima bitnu ulogu. Dok većina baterija elektromobila bez problema radi na temperaturi okoline, postoje vozila koja prije pokretanja vozila aktiviraju sistem samozagrijavanja baterije kojoj je kasnije potrebo i hlađenje. Određene baterije elektromobila imaju lošije performanse baterije na niskim temperaturama, što je veoma nepoželjan faktor.

Geometrijski sastav baterija elektromobila je veoma prostran. Više ćelija složenih zajedno formiraju bateriju. Ćelije mogu biti kružne, prizmatične, heksagonalne ali najčešće su spakovane u pravougaone blokove. Određene baterije se mogu isporučiti samo u određenom obliku. Neki su dostupni u velikom rasponu visina, širina i dužina. Da bi se obezbijedio nizak centar gravitacije i odlične kvalitete rukovanja, proizvođači, u praksi konstruišu vozila čije baterije su postavljene po cijeloj površini poda.

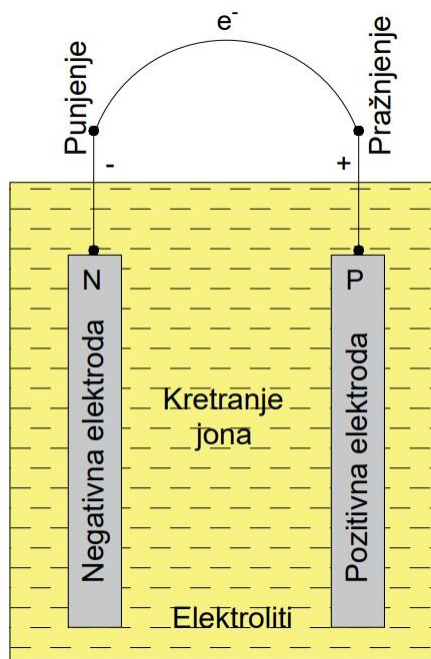
Tri najčešća tipa baterija koje se koriste u automobilskoj industriji su litijum-jonske (Li-ion), litijum-polimerne (Li-poli) i niki-metal hidridne (NiMH). Hibridni automobili često koriste niki-metal hidridne baterije zbog njihove velike gustine energije. Oni se često koriste za napajanje multimedijalnih uređaja u vozilu, pomoćne elektronike vozila, uključujući klima uređaj ili parking senzore. Visoka gustina energije i nizak unutrašnji otpor odlike su litijum-jonskih baterija. Koriste se u električnim i hibridnim vozilima zbog odlične efikasnosti i produženog vijeka trajanja. Osim navedenih, električni i hibridni automobili koriste litijum-polimerske baterije, koje su slične litijum-jonskim baterijama u pogledu njihovih performansi i životnog vijeka, ali mogu biti dizajnirane sa više fleksibilnosti. Iako sve ove baterije imaju svoje prednosti i nedostatke, litijum-jonske baterije su sada najpoželjnije za upotrebu u električnim i hibridnim automobilima zbog njihove velike gustine energije i produženog vijeka trajanja.

²⁸ Povećani nivo temperature značajno povećava koeficijent samopražnjenja

4.1.2. Konfiguracija baterije

Sistem modelovanja inženjerskih sistema i opreme je uvijek važno i korisno i ono se radi iz različitih razloga. Električni modeli baterija su napravljeni da precizno predvide kako će se određeni brend i tip baterije ponašati u različitim uslovima. U ovom radu tip modelovanja baterije će manje zavisi od osnovne fizike i hemije same baterije, odnosno više će zavisi od detaljnog istraživanja stvarnih podataka o performansama. Cjelokupno modelovanje baterija je, u međuvremenu, poznato kao izazovno ali i nepouzdana iz prethodno navedenih faktora koji utiču na kapacitet baterije.

Kao što je prikazano na slici 4.2, ćelija baterije se u suštini sastoji od tri glavne komponente: dvije elektrode (pozitivna i negativna) i elektrolita u kojem su elektrode potopljene. Opšti pojam baterije koja u određenim literaturama se može naći i pod nazivom "elektrohemijske baterije", predstavljaju elektrohemijski uređaji koji tokom punjenja transformišu električnu energiju u potencijalnu hemijsku energiju dok tokom pražnjenja transformišu hemijsku energiju u električnu energiju.



Slika 4.2 Uprošćeni poprečni presjek ćelije baterije [37]

Uprošćena šema baterije predstavljena je na slici 4.3 na kojoj se vidi fiksni izvor napona ćelije unutrašnje baterije E , ekvivalentni unutrašnja otpornost R_{ekv} predstavljen kao otpor unutrašnje

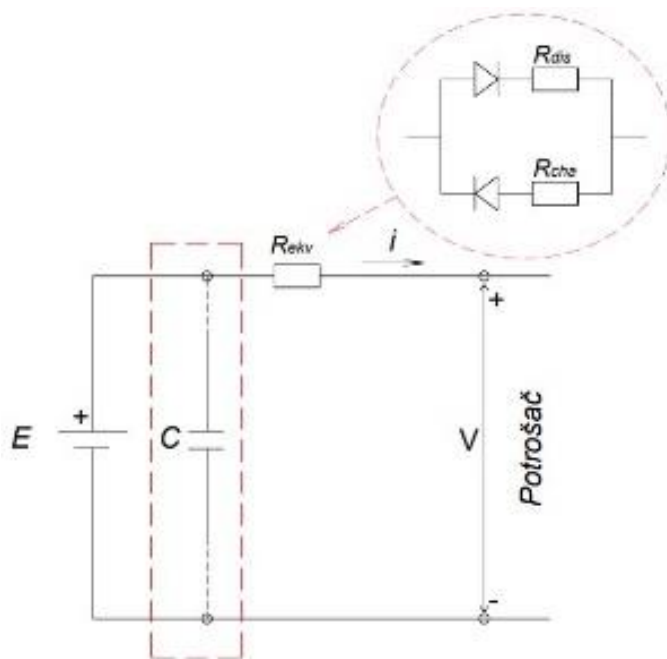
ćelije baterije tokom režima pražnjenja R_{dis} . i otpor unutrašnje ćelije baterije tokom režima punjenja R_{cha} . Izlazni napon baterije predstavljen je sa V , dok je struja koja protiče kroz bateriju i . Protokom struje kroz bareriju možemo primijeniti osnovnu jednačinu drugog Kirhofovog zakona:

$$V = E - IR \text{ [V]} \quad (4.2)$$

Optimalna konfiguracija su dvije diode, što se može opisati kao razlika između otpora za punjenje i pražnjenje. Struje punjenja se tada smatraju negativnim, dok se struje pražnjenja klasifikuju kao pozitivne struje.

$$V = \begin{cases} E - R_{dis}i & ; i \geq 0 \\ E - R_{cha}i & ; i < 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

Ovaj oblik kola ima nedostatak kojim ne objašnjava dinamičko ponašanje baterije. Napon će se brzo promijeniti na novu odnosno sniženu vrijednost ako je opterećenje priključeno na bateriju jer u stvarnosti, je potrebno vrijeme da se napon stabilizuje na novoj vrijednosti. Dodavanjem kondenzatora u kolu efektivnije replicira ove dinamičke efekte. Mogli bismo da nastavimo da poboljšavamo dato kolo kako bismo pružili sve bližu prognozu učinka. Ove teme su obrađene u literaturi, kao što su [38][39].



Slika 4.3 Ekvivalentno kolo baterije

Kao početni korak prvo se mora izmjeriti napon otvorenog kola baterije E . Razlog tome je uticaj stanja napunjenosti baterije. Jednostavna formula data jednačinom 4.4 predstavlja napon otvorenog kola gde je n broj ćelija baterije, a varijabla baterije DoD koja predstavlja dubinu pražnjenja (*en.Depth of Discharge-DoD*). DoD ima vrijednost 0 kada je potpuno napunjena i 1 kada je prazna. Ova formula daje prilično pristojne rezultate za mnoge vrste baterija, međutim dodavanje faktora za temperaturu bi bio prvi korak ka poboljšanju jer ima značajan uticaj.

$$E = n \times (2.15 - DoD \times (2.15 - 2.00)) \quad (4.4)$$

Postoji nekoliko načina da se DoD baterije izrazi u Matlab-u. Korišćenje grafikona koji prikazuje procenat napunjenosti baterije u odnosu na vrijeme pražnjenja predstavlja najjednostavniju tehniku prikaza, kreiranjem y ose koja predstavlja procenat napunjenosti baterije u zavisnosti od ose x tj. vremena pražnjenja. Data linija ili grupa tačaka na grafikonu ilustruje kako procenat napunjenosti baterije fluktuiru u toku pražnjenja. U određenim literaturama histogram se takođe koristiti za ilustraciju količine energije koja se oslobađa tokom vremena. Histogram se sastoji od binova koji odražavaju vremenske intervale i količinu energije oslobođene tokom svakog vremenskog intervala. Najčešće korišćen prikaz u uređajima je grafički pristup za prikazivanje stanja baterije korišćenjem piktograma, kao što je simbol baterije sa promjenljivim stepenom punjenja ili pokazivača koji se kreće unutar okvira koji predstavlja opseg od 0 do 100 procenata napunjenosti baterije. Jasno je svatljivo da je ključno odabrati pristup koji najbolje odgovara vašim ciljevima i kontekstu i koji prenosi informacije koje treba da pružite na najefikasniji način.

4.1.3. Modelovanje baterije elektromobila

Matlab modeli baterija elektromobila moraju uzeti u obzir različite karakteristike, uključujući kapacitet baterije, unutrašnji otpor i uticaj hlađenja. Učitavanje podataka iz stvarnog svijeta o struji, snazi i temperaturi je početna faza u razvoju Matlab modela baterije. Nakon učitavanja podataka, kreće se u razvijanju modela baterije koristeći matematičke modele koji opisuju funkciju baterije. Mogu se koristiti diferencijalne jednačine i modeli za unutrašnji otpor, hlađenje i napon i struju baterije. Konačno, model baterije se može potvrditi korišćenjem podataka iz stvarnog svijeta i prilagoditi tako da pruži najtačnije rezultate. Konstruisanje takvog modela nije jednostavno i zahtijeva opsežnu ekspertizu za Matlab i bateriju.

Od suštinske važnosti je da se stanje punjenja elektromobila saopšti na način koji je svima lako razumljiv. Postoji nekoliko načina da se opiše nivo napunjenosti EV-a, u zavisnosti od okolnosti. Među najčešće korišćenim pristupima je procenat napunjenosti baterije, koji se može izraziti kao „stanje napunjenosti baterije iznosi 60%” ili „preosalo punjenje baterije iznosi 60%”. Količina preostale energije u bateriji se takođe može iskoristiti na primeru „preostala energija u bateriji je 10 kWh” ili „preostala energija u bateriji je 10 miliona džula”. Ako je od vitalnog značaja da navedete vrijeme punjenja, možete reći i nešto poput: „Vozilu su potrebna dodatna tri sata da dostigne 100 procenata napunjenosti”. Najlakši način je sličan frazama "baterija je prazna" ili "baterija je puna", što jasno ukazuje da li je potrebno napuniti bateriju.

Stanje napunjenosti baterije je još jedna ključna komponenta koja se može predstaviti kao odnos kapaciteta koji je još uvijek upotrebljiv i kapaciteta koji je potpuno napunjen i poznat je kao SoC. Sa strujom pražnjenja ili punjenja i , promjena SoC tokom vremenskog perioda dt može biti predstavljena kao

$$\Delta SoC = \frac{idt}{Q(i)} [\%] \quad (4.5)$$

gdje je $Q(i)$ kapacitet baterije izražen sa jedinicom Ah, i strujom pražnjenja ili punjenja i . Tokom procesa pražnjenja baterije struja je pozitivna, dok je u slučaju punjenja baterije suprotno. Prema ovoj definiciji, potpuno napunjena baterija ima SoC od 100%, dok potpuno prazna baterija ima SoC od 0%.

$$SoC = SoC - \frac{1}{Cn} \int_0^t I(t) dt \quad (4.6)$$

Elektrohemijski model konstantne struje (tzv. CC) je jedan od brojnih pristupa modeliranju [40]. U ovom modelu se pretpostavlja da je napunjenost baterije proporcionalna količini struje koja je prošla kroz nju. Da bismo oponašali utrošak odnosno stanje baterije, možemo koristiti CC model baterije u MATLAB-u, kao što je prikazano u sledećem prilogu 4.1.

$$\begin{aligned} SOC_0 &= 100; \\ C_{batt} &= 1; \\ I &= 0.5; \end{aligned} \quad (P:4.1)$$

```
t_end = 3600;
t = 0:1:t_end;
SOC = zeros(size(t));
SOC(1) = SOC_0;
for i = 2:length(t)
    dt = t(i) - t(i-1)
    dSOC = -I * dt / (3600 * C_batt);
    SOC(i) = SOC(i-1) + dSOC;
end
plot(t, SOC);
xlabel('Vrijeme [s]');
ylabel('Stanje napunjenosti [%]');
```

Ovakav model pražnjenja baterije sa 100% početnim punjenjem, i primjerom da baterija ima kapacitet od 1Ah i pretpostavljenom strujom pražnjenja od 0,5A traje 3600 sekundi, odnosno 1 sat. Svake naredne sekunde, petlja ažurira trenutno stanje napunjenosti na osnovu izračunate promjene stanja napunjenosti baterije. Završnica Matlab koda prikazuje grafikon stanja napunjenosti baterije u odnosu na vrijeme. Ovo su osnovni statistički podaci dati u prilogu P4.1, stvarne vrijednosti i poboljšana podešavanja simulacije za elektromobile biće predstavljeni u kasnijim poglavljima.

Da biste prikazali nivo napunjenosti baterije EV-a u Matlabu, podaci o napunjenosti baterije moraju biti učitani u program. Moguće je primati podatke o napunjenosti baterije iz vozila ili bilo kog drugog izvora koji ih snadbijeva. Da biste simulirali podatke o punjenju baterije, na primer, koristeći funkciju *rand()* za proizvodnju nasumičnih podataka, i ako imate podatke o napunjenosti baterije u nizu podataka definisanih kao „*battery_charge*“ i podatke o vremenu u nizu podataka „*time*“, možete koristiti priloženi kod u P4.2 za prikaz grafikona napunjenosti baterije u odnosu na vrijeme.

```
num_data_points = 24;
battery_charge = rand(1,num_data_points) * 100;
```

(P:4.2)

```
time = linspace(0, 24, num_data_points);  
  
figure;  
  
plot(time, battery_charge)  
  
xlabel('Vrijeme [h]')  
  
ylabel('Napunjenost baterije [%]')  
  
title('Napunjenost baterije u toku vremena')
```

Ovaj kod generiše nasumične vrijednosti punjenja baterije između 0% i 100% koristeći funkciju *rand()*. Koristeći *num data points*, metoda *linspace()* generiše vremensku seriju od 0 do 10 sekundi. Poreba da se prikaže napunjenost baterije u realnom vremenu, možete koristiti funkciju *drawnow*, koja omogućava da osvježite podatke i generišete nove vizuelne prikaze. Ovaj uslov će kontinuirano crtati nove grafike jer nema unaprijed definisanog uslova za prekid petlje, stoga je potreban uslov za prekid petlje. Peticlju možemo prekinuti pomoću nekog spolja dovedenog signalnog događaja koji će promijeniti vrijednost uslova za petlju i predstavlja poželjnu varijantu ili jednostavnim korišćenjem naredbe *break* kao što je dato priloženim kodom P4.3 sve dok baterija ne dostigne maksimalnu napunjenost.

```
while true  
    if battery_charge >= 100  
        break  
    end  
  
    plot(time, battery_charge) (P:4.3)  
  
    xlabel('Vrijeme [s]')  
  
    ylabel('Napunjenost baterije [%]')  
  
    drawnow  
  
end
```

Treba napomenuti da su generisani podaci samo simulacija i imaju za cilj da testiraju i pokažu funkcionisanje i da nisu realni niti odražavaju stvarni nivo napunjenosti baterije u vozilu. Poznavanje Matlab-a, moći ćete da generišete širok spektar grafikona koji prikazuju trenutni nivo napunjenosti baterije, kao i da koristite druge funkcije za analizu podataka.

Iako su ova rešenja jednostavna i zasnovano na osnovnoj konfiguraciji, u praksi je potreban dalji rad da bi se uradile stvari kao što su izračunavanje karakteristika unutrašnjeg otpora, uračunavanje Memingerovog efekta²⁹ itd. Istraživanjem uticaja baterije na sigurnost napajanja i širenja obnovljive energije u [41] kreiran je model tržišta električne energije koji dozvoljava modelovanje baterija kao ekonomski vodeći izbor ulaganja. Ovo bi minimalizovalo potreban kapacitet vršnog opterećenja, poboljšalo isplativost privatnog posjedovanja elektromobila i smanjilo emisiju CO₂.

4.2. *Koncept elektromotora*

Poslednjih godina, performanse EV su značajno porasle zahvaljujući razvoju električnih motora i baterija. Brz i precizan odziv na obrtni moment električnih motora EV-a je daleko njegova najuočljivija prednost. Dobijanje osnovnih informacija kao što su ugaona brzina i obrtni moment točkova je takođe mnogo lakše kontinuiranim posmatranjem struje koja prolazi kroz motor. U ovom poglavlju razmatramo različite tipove električnih motora koji se mogu vidjeti u elektromobilima. Napredniji modeli imaju više električnih motora kojima su potrebni prilično složeni kontroleri pa ćemo se ovim poglavljem osvrnuti na neke od njih. Ne postoji jednoznačna preferencija kada je u pitanju tehnologija elektromotora, što je jedan od njenih jedinstvenih aspekata. Trenutni kvaliteti izrade vozila koriste sve tipove motora pomenutih u ovom poglavlju.

U prvom dijelu poglavlja razmatraju se najosnovniji oblici DC motora koji mogu da rade bez ikakve električne kontrole. Namotaj koji je fiksiran unutar motora omogućava otkrivanje položaja rotora i izračunavanje brzine, što rezultira velikom brzinom i ogromnim obrtnim momentom. Predstavljeni su grafici obrtnog momenta i brzine DC motora koji prezentuju efikasnost regulacije kojom se vidi da svaki obrtni momenat i brzina mogu postići ispod maksimalne vrijednosti. Osim kontrolisanja napona moguće je kontrolisati i magnetni fluks. Sledeće poglavlje, međutim, nudi rešenje za nekoliko problema koje imaju kolektorski DC motori. Klasifikovana su tri različita tipa motora koji zadovoljavaju specifikacije EV pogonskih motora. Njihova funkcija rada predstavljena preko dijagrama poprečnih presjeka detaljno je opisana u ovom dijelu poglavlja. Svi tipovi elektromotora imaju niz karakteristika o kojima se govori u odeljku 4.3 i koje ne možemo zanemariti dok simuliramo i izračunavamo njihove operacije. Samim tim efikasnost motora će imati značajan uticaj kada budemo modelirali EV. Elektromotori u elektromobilima imaju

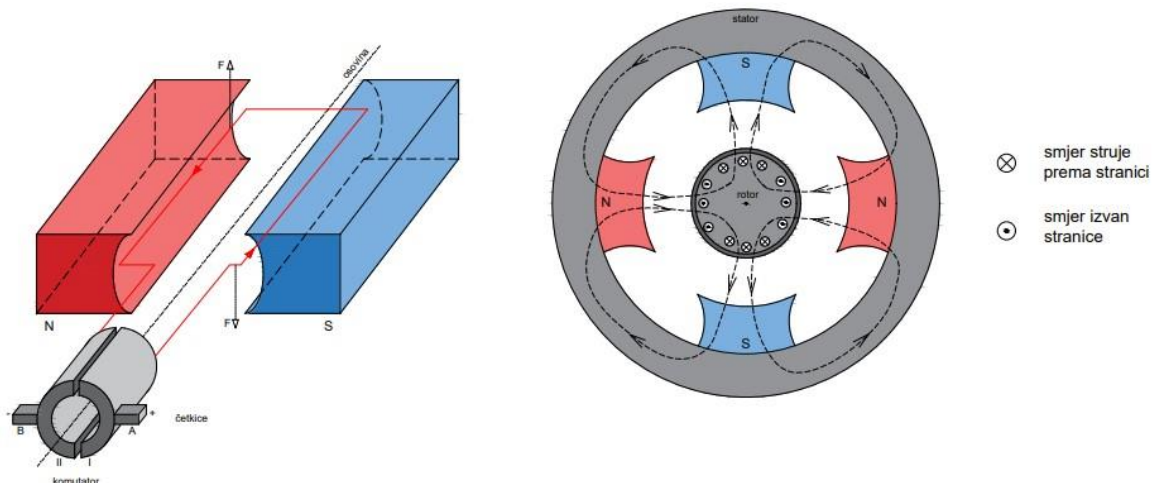
²⁹ Matematički modeli zasnovani na termodinamičkim i elektrohemijskim faktorima baterije uključujući koncentraciju litijum jona, unutrašnji otpor baterije i elektroda i druge parametre.

kapacitet da pretvore kinetičku energiju u električnu, kao što je pokazano u posljednjem odeljku 4.4, što pomaže da se smanje gubici energije. Dio energije koju proizvodi elektromotor se ponovo skladišti u bateriju odnosno njen sistem za skladištenje energije. Regenerativno kočenje je termin koji se u praksi koristi za opisivanje procesa povezivanja akumulatorskog sistema i elektromotora uz pomoć odgovarajućih pretvarača.

4.2.1. Kolektorski DC elektromotori: osobine i princip rada

Kolektorski DC elektromotor predstavlja odlično mjesto za početak jer se često koristi i olakšava objašnjavanje većine značajnih izazova u upravljanju električnim motorima. Sastoji se od trajnog magneta i četkica pa je u praksi poznatiji kao jednosmjerni elektromotor sa četkicama. Četkice su izrađene od grafita koji je odličan provodnik i stabilan je pod uticajem visokih temperatura koja se stvara na kolektoru. Kolektori se sastoje iz višeg broja bakarnih lamelarnih pločica koje nisu međusobno spojene, već se između njih nalazi određeni izolator. Uticaj temperature na rad motora biće opisan u narednim poglavljima. Ovaj aerodinamično pojednostavljeni motor ima samo jedan kalem, a sila stvorena u zavojnici je uzrokovana strujom koja teče kroz žicu blizu magneta (slika 4.4a).

Četkica A, prvi poluprsten komutatora, kalem zatim drugi poluprsten komutatora i četkica B su sve tačke strujnog toka. Taj strujni tok prikazan je crvenom linijom na datoj slici. Zbog struje koja teče nazad prema četkicama i komutatoru postoji uticaj sila, tako da sila djeluje sa jedne strane nagore i naniže na drugoj. Namotaj se okreće kao rezultat dvije sile. Kada se žice oslobode od magneta, kalem se pod inerciom okreće zajedno sa komutatorom sve dok poluprstenovi komutatora ponovo ne dođu u kontakt sa četkama. Motor nastavlja da se okreće jer se struja ponovo kreće u istom smeru u odnosu na magnete i kao rezultat, sile se takođe kreću u istom smjeru. Struja će sada ići preko četkice A kroz drugi poluprsten koji zauzima poziciju na kojoj je prethodno bio prvi poluprsten, kroz kalem preko poluprstena do četkice B. Ovo je osnovni i najjednostavniji princip rada ovog tipa motora.



Slika 4.4 a) Ilustracija koja pokazuje kako radi osnovni DC motor sa permanentnim magnetom; b) dijagram poprečnog presjeka kolektorskog elektromotora

Očigledno je da stvarni DC motor ima mnogo više poboljšanja od ovog prikazanog na slici 4.4a. Dijagram poprečnog presjeka kolektorskog elektromotora na istoj slici je korak bliže stvarnosti od onog prvobitno rečeno. Pored toga, motor se okreće u istom pravcu pomoću svih namotaja. Sila koja djeluje može se opisati jednačinom:

$$F = BIl \quad (4.5)$$

gdje je B magnetno polje, I struja, l dužina namotaja. Razmatrajući samo poluprečnik kalema r koji se u samom rotirajućem žičanom kalemu sastoji od n namotaja, onda bi došli do jedinstvene formule obrtnog momenta koji je dat jednačinom:

$$T = 2nrBIl \quad (4.6)$$

Magnetno polje B koje se javlja prouzrokovano pokretnim naelektrisanjem prestavlja fluks Φ koji prolazi kroz kalem date površine i pojednostavljuje jednačinu obrtnog momenta motora:

$$T = n\Phi I \quad (4.7)$$

U stvari, ovo neće uvijek biti slučaj jer je na ovaj način kalem u potpunosti u fluksu i predstavlja idealnu radijalnost. Pored toga zanemarena je i realnost da postoji mnogo više parova magnetnih polova, a jedan od tih primjera je i prikazan na slici 4.4b.

Kako bi se uspostavila veza između obrtnog momenta sa strujom i magnetnim fluksom potrebno je uvesti konstantu K_m , koja se takođe naziva konstanta motora. Broj zavoja u svakom namotaju, kao i broj parova polova, imaju uticaj na vrednost K_m .

$$T = K_m \Phi I \quad (4.8)$$

Kao rezultat, možemo primijetiti da su struja rotora I i obrtni moment motora T međusobno zavisni. Postavlja se pitanje šta će upravljati ovom strujom? Očigledno zavisi od električnog otpora rotirajućeg žičanog kalema R_a kao i od napona napajanja E_s motora. Rotirajući žičani kalem će se takođe kretati u magnetnom polju dok se motor okreće, što ukazuje da će funkcionisati kao generator. Tako proizvedeni napon se obično naziva "povratnim EMF-om" (*en.back Electromotive Force - EMF*)³⁰, sa simbolom E_b . Generisani napon se izražava jednačinom

$$E_b = Blv \quad (4.9)$$

Da elaboriramo, brzina namotaja koji putuje u magnetnom polju je proporcionalna ugaonoj brzini ω i poluprečniku r , prema jednostavnoj jednačini $v = r\omega$. Pošto rotirajući žičani kalem ima dvije strane i n okreta, jednačina (4.9) postaje:

$$E_b = 2nrBl\omega \quad (4.10)$$

Slično kao i u prethodnim koracima, možemo uvesti konstantu K_m jer je riječ o istom motoru, pa će povratni napon biti

$$E_b = K_m \Phi \omega \quad (4.11)$$

Ovaj napon utiče na smanjenje struje motora suprotstavljajući se naponu napajanja E_s . Struja rotirajućeg žičanog kalema je stoga jednaka količniku neto napona, odnosno razlici između napona napajanja E_s i povratnog EMF E_b , i otpornosti R_a :

$$I = \frac{V}{R_a} = \frac{E_s - E_b}{R_a} = \frac{E_s}{R_a} - \frac{K_m \Phi \omega}{R_a} \quad (4.12)$$

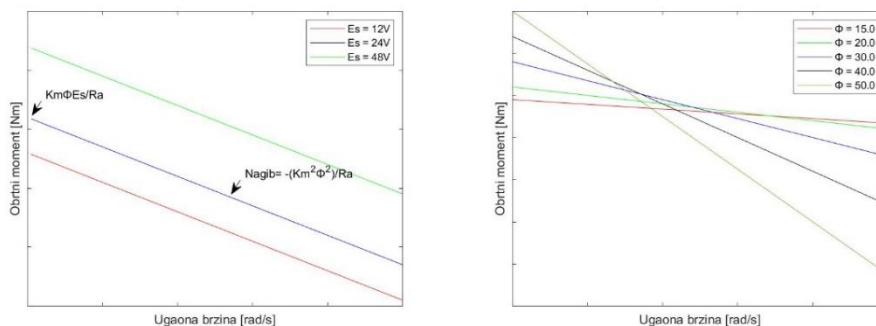
³⁰ U nekim literaturama često se može naći i pod nazivom Counter-electromotive force ili skraćeno CEMF

Da bismo dobili jednačinu koja povezuje obrtni moment i brzinu rotacije, možemo je staviti u jednačinu (4.8) na sledeći način:

$$T = \frac{Km\Phi Es}{Ra} - \frac{Km^2\Phi^2\omega}{Ra} \quad (4.13)$$

Ova ključna jednačina pokazuje da obrtni moment T koji proizvodi ova vrsta motora staje na najvišoj vrednosti pri nultoj brzini i polako opada sa povećanjem brzine.

U našoj analizi zanemarili smo aerodinamičke gubitke, gubitke obrtnog momenta potrebne za prevazilaženje trenja ležajeva i gubitke na komutatoru. Opšti oblik jednačine 4.8 odnosno 4.13 i dalje važi pošto postoji pretpostavka da je konstantan obrtni moment, što rezultira karakterističnim grafikonom prikazanim na slici 4.5.



Slika 4.5 Grafik obrtnog momenta i brzine za DC motor bez četkica lijevo: sa promjenom E_s ; desno-sa promjenom Φ

Maksimalni obrtni moment se proporcionalno smanjuje kada se napon napajanja E_s smanji, a nagib grafika obrtnog momenta i brzine ostaje netaknut, što znači da se svaki obrtni moment i brzina mogu postići ispod maksimalnih vrijednosti. Ovaj metod regulacije ove vrste motora je efikasan. Osim kontrolisanja napona E_s povremeno možemo vršiti kontrolu i podešavanjem magnetnog fluksa Φ . Ako kalemovi, a ne trajni magneti proizvode magnetno polje, to je izvodljivo. Maksimalni obrtni moment se smanjuje kako se magnetni fluks smanjuje, ali se nagib grafika obrtnog momenta i brzine izravna. Kao rezultat toga, motor može biti napravljen da radi na različitim nivoima obrtnog momenta i brzine.

Mogućnost podešavanja intenziteta magnetnog polja variranjem struje je prednost korišćenja elektromagneta za generisanje magnetnog polja. Još jedna prednost je što je to jeftiniji metod stvaranja snažnog magnetnog polja, međutim ova prednost se smanjuje kako tehnologija

proizvodnje permanentnih magneta napreduje. Najveći nedostatak je što će motor skoro sigurno biti manje efikasan jer namotaji polja troše električnu struju i proizvode toplotu. Kao rezultat toga kolektorski jednosmjerni električni motori se i dalje koriste u industriji električnih automobila. Priloženi kod 4.4 u Matlabu za dobijeni lijevi grafik sa slike 4.5 dat je u sledećem formatu:

```

Km = constant;

Ra = constant;

Fi = constant;

omega = 0:0.1:100;

Es1 = 12;

T1 = (Km*Fi*Es1/Ra) - ((Km^2*Fi^2*omega)/Ra);

Es2 = 24;

T2 = (Km*Fi*Es2/Ra) - ((Km^2*Fi^2*omega)/Ra);

Es3 = 48;

T3 = (Km*Fi*Es3/Ra) - ((Km^2*Fi^2*omega)/Ra);

plot(omega, T1, 'red', omega, T2, 'blue', omega, T3, 'green');

legend(sprintf('Es = %dV',Es1), sprintf('Es = %dV',Es2), sprintf('Es = %dV',Es3));

xlabel('Ugaona brzina [rad/s]');

ylabel('Obrtni moment [Nm]');
    
```

(P:4.4)

Napomena: K_m , R_a , Φ su konstante koje su već unešene u jednačinu, neophodno je unijeti tačne vrijednosti konstanti kako bi se dobio tačan grafik. Priloženi kod 4.5 u Matlabu za dobijeni desni grafik sa slike 4.5 dat je u sledećem formatu:

```

omega = 0:0.1:100;

Fi1 = 15;

T1 = (Km*Fi1*Es/Ra) - ((Km^2*Fi1^2*omega)/Ra);

Fi2 = 20;

T2 = (Km*Fi2*Es/Ra) - ((Km^2*Fi2^2*omega)/Ra);

Fi3 = 30;
    
```

(P:4.5)

$$T3 = (Km*Fi3*Es/Ra) - ((Km^2*Fi3^2*\omega)/Ra)$$

$$Fi4 = 40;$$

$$T4 = (Km*Fi4*Es/Ra) - ((Km^2*Fi4^2*\omega)/Ra);$$

$$Fi5 = 50;$$

$$T5 = (Km*Fi5*Es/Ra) - ((Km^2*Fi5^2*\omega)/Ra)$$

figure;

```
plot(omega,T1,'red',omega,T2,'green',omega,T3,'blue',
```

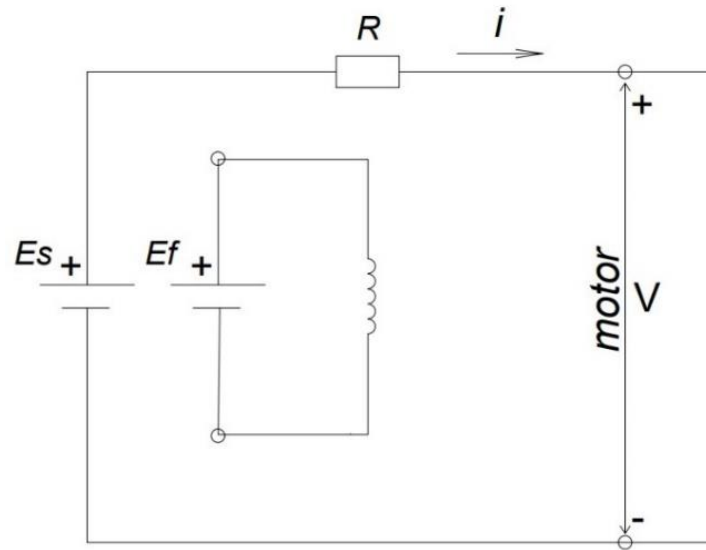
```
omega,T4,'black',omega,T5,'purple');
```

```
xlabel('Ugaona brzina [rad/s]');
```

```
ylabel('Obrtni moment [Nm]');
```

Napomena: Kao u prošlom prilogu konstante su već unešene u jednačinu, neophodno je unijeti tačne vrijednosti konstanti kako bi se dobio tačan grafik koji će pokazati kako obrtni moment T opada sa smanjenjem magnetnog fluksa Φ za nekoliko proizvoljnih vrijednosti. Treba napomenuti da su generisani podaci samo simulacija i imaju za cilj da testiraju i pokažu funkcionisanje kolektorskog DC motora.

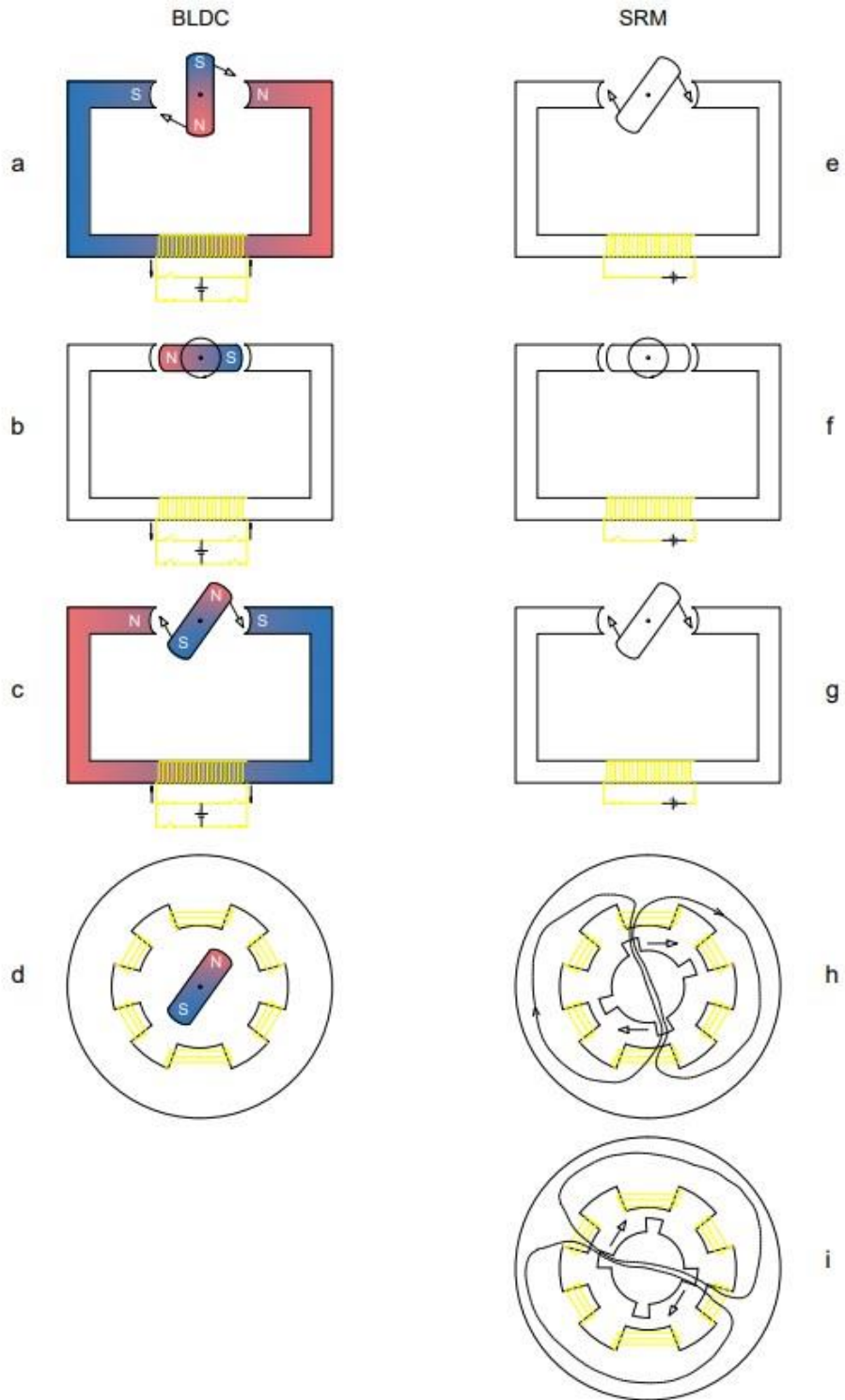
Kolektorski DC motori mogu da se klasifikuju u tri tipa motora sa namotajima polja i to paralelni ili šant motor, serijski motor i motor sa odvojenom pobudom. Motor sa odvojenom pobudom se prilično često koristi kao vučni motor u električnim automobilima u odnosu na paralelni i serijski motor (slika 4.6) [42]. Magnetno polje je skoro uvijek napajano trajnim magnetima u slučaju brojnih malih motora koji su prisutni na svakom tipu vozila. Podešavanjem napona na namotaju polja E_f , motor sa odvojenom pobudom omogućava nam da nezavisno regulišemo i napon napajanja E_s i magnetni fluks Φ . Ovo daje mogućnost uspostavljanja odgovarajućeg obrtnog momenta T pri bilo kojoj potrebnoj ugaonoj brzini uz ogromnu fleksibilnost. Omogućava primjenu ili pristupa smanjenja magnetnog fluksa ili metode smanjenja napona napajanja rotirajućeg žičanog jezgra.



Slika 4.6 Pojednostavljena šema motor sa odvojenom pobudom

4.2.2. Elektromotori bez četkica

Osnovni DC elektromotor je razmatran u prethodnom poglavlju. Četke u ovom motoru očigledno izazivaju zabrinutost jer će se vremenom istrošiti zbog trenja sa komutatorom. Međutim, u poglavlju 4.3 biće razmatran jedan od značajnijih problema sa ovom vrstom motora. U ovom dijelu su prikazana tri različita tipa motora koji se koriste kao vučni motori u automobilima koji ispunjavaju ove kriterijume, a to su jednosmjerni motor bez četkica, prekidački reluktantni motor i indukcioni motor.



Slika 4.7 (a–d) Dijagram koji prikazuje osnovu rada BLDC motora bez četkica i presjek rasporeda tri namotaja na statoru motora

(e–i) Dijagram koji pokazuje princip rada komutacionog reluktantnog motora i presjek motora sa rotorom sa četiri istaknuta pola

4.2.2.1. Jednosmjerni motor bez četkica

Jednosmjerni motor bez četkica (*en.Brushless DC Motor-BLDC*) takođe je poznat kao „elektronski komutirani motor (*en.Electronically Commutated Motor-ECM*)“, „sinhroni motor sa trajnim magnetom“, „samosinhroni motor na naizmjeničnu struju“, „sinhroni motor sa promjenljivom frekvencijom“ i „sinhroni motor sa trajnim magnetom“. Karakteristike brzine i obrtnog momenta BLDC motora veoma su slične običnom DC motoru „sa četkama“.

Slika 4.7 (a-d) ilustruje osnovne principe rada BLDC motora. Unutar rotora se nalazi trajni magnet. Na slici 4.7 a-c, rotor se okreće u smjeru kazaljke na satu kao rezultat struje koja teče u pravcu koji magnetizuje stator. Kao rezultat, proces se nastavlja sa strujom u namotaju statora koja se mijenja dok se rotor okreće u smeru kazaljke na satu. Senzori se koriste za sinhronizaciju prebacivanja struje sa položajem rotora, što je očigledno neophodno. Iako napretkom tehnologije sve više su zastupljeni optički senzori, senzori sa Holovim efektom se često koriste jer mogu da izmjere lokaciju rotora koristeći njegov magnetizam. Podrazumijeva se da trenutno prebacivanje treba da bude usklađeno sa položajem rotora [43].

Ovi BLDC motori imaju svojstvo da se obrtni moment smanjuje kako se brzina povećava. U špulnom namotaju kojim se rotirajući magnet približava proizvođaču se povratna EMF. Ovaj povratni EMF će smanjiti struju koja teče kroz kalem. Smanjena struja će smanjiti jačinu magnetnog polja, što će rezultirati i smanjenju obrtnog momenta T . Maksimalna brzina će se na kraju postići kada je veličina E_b jednaka naponu napajanja. Takođe treba imati na umu da se ovakav motor može vrlo lako koristiti za regenerativno ili dinamičko kočenje što će biti opisano u odeljku 4.4. Uprkos činjenici da je struja koja teče kroz namotaje motora promjenjiva, i dalje je potreban izvor jednosmjerne struje, zbog čega se ovi motori obično kategorišu kao "DC".

Ovi BLDC motori zahtjevaju snažan trajni magnet za rotor, koji ima prednost u tome što ne zahtjeva indukovanje struje u rotoru pa ih to čini donekle efikasnijim i pruža malo veću specifičnu snagu.

4.2.2.2. Prekidački reluktantni motori

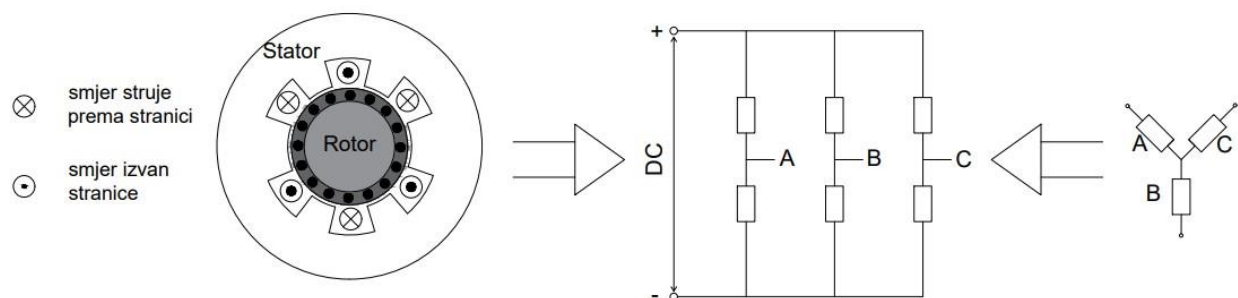
Slika 4.7 (e-i) prikazuje osnovnu operaciju gdje struja koja teče kroz namotaj statora izaziva magnetizovanje gvođenog rotora i statora. Zbog neusklađenosti rotora sa magnetnim poljem, stvaraće se obrtni moment da se smanji vazdušni procjep i povrati simetrija magnetnog polja.

Struja se prekida kada se rotor i stator poravnaju, međutim u inercionom zamahu rotor se pokreće ovim momentom u kružnom kretanju do pozicije prikazane na slici 4.7g. Ovdje se ponovo primjenjuje magnetno polje u istom pravcu. Opisanom operacijom ova vrsta motora nazvana je reluktantnom (*en. Switched Reluctance Motor-SRM*) [44].

Ključni izazov kod SRM-a je to što je obrtni moment mnogo promjenljiviji jer vrijeme uključivanja i isključivanja struja statora mora biti mnogo preciznije kontrolisana. Statoru bi se mogao uvećati broj namotaja da se donekle izravna obrtni moment. Rotor, koji je napravljen od laminiranog gvožđa, ima "izražene polove" ili izbočine. Često će taj broj izraženih polova biti za dva manje od namotaja. Očigledno je da je tačno poznavanje pozicije rotora neophodno za pravilno uključivanje i isključivanje struja u svakom kalemu. Za ovo se obično koriste senzori, iako sofisticirani kontrolni sistemi mogu funkcionisati i bez njih.

4.2.2.3. Indukcioni motor

Laka dostupnost i visok stepen pouzdanosti indukcionih motora pružaju proizvođačima EV-a širok domen upotrebe. Oni zahtijevaju izvor naizmjenične struje, zbog čega izvor jednosmjerne struje poput baterija može izgledati kao neprikladno mjesto za njih. Međutim naizmjenična struja se može jednostavno generisati pomoću pretvarača. Inverter potreban za obezbjeđivanje naizmjenične struje za indukcioni motor zapravo nije sofisticiraniji ili skuplji od kola potrebnih za rad BLDC motora ili SRM-a (više o tome u narednim poglavljima).

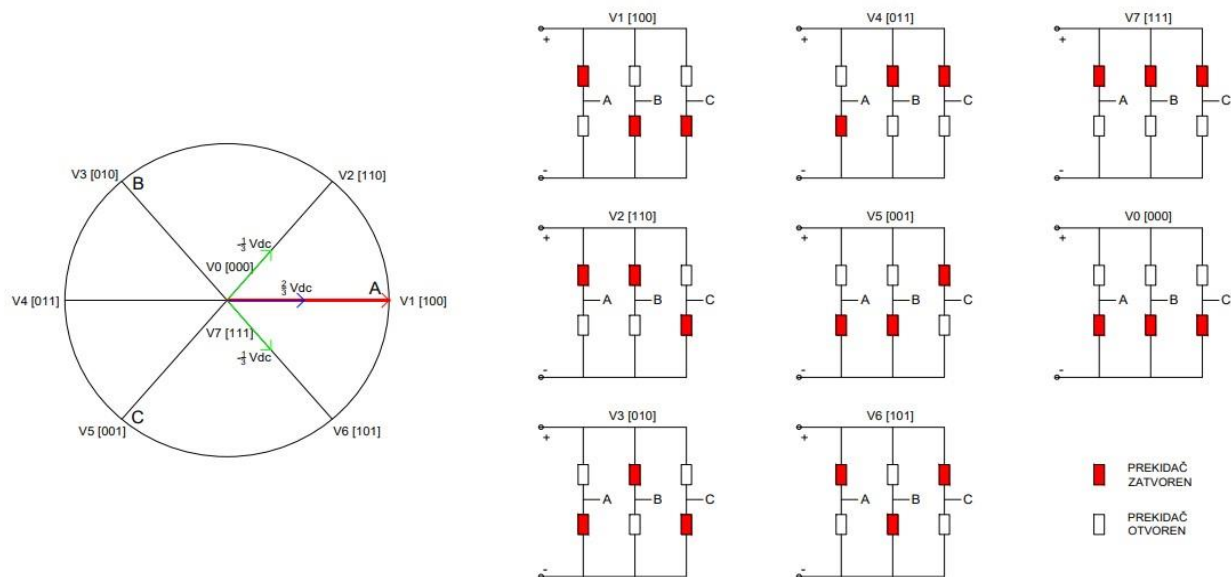


Slika 4.8 Dijagram koji pokazuje stator i rotor asinhronog motora i blok šemu prekidačkog moda

Slike 4.8 prikazuju osnovne principe rada trofaznog indukcionog (ili asinhronog) motora. Kao što je prikazano tri namotaja su čvrsto uvijena oko statora. Rotor je tipično napravljen od bakarnih ili aluminijumskih šipki koje su kratko spojene na krajevima da bi se dobila struktura nalik kavezu.

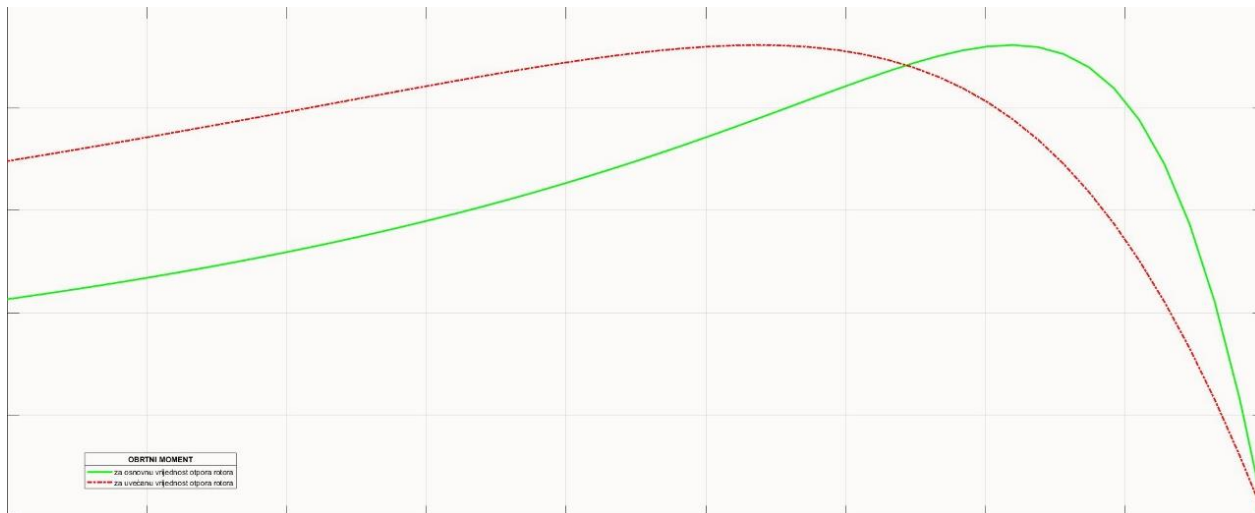
Unutrašnjost kaveznog rotora će često biti ispunjena laminiranim gvožđem, uprkos šupljem izgledu [98].

Pojednostavljeni oblik ovog kola pokazuje da je napon između faze A i neutralnog provodnika $2/3$ napona izvora jednosmjerne struje, dok su naponi od faza B i C do neutralnog provodnika $-1/3$ napona izvora jednosmjerne struje. Ovo je ilustrovano u vektorskom prostornom dijagramu na slici 4.9. Vektor prostora za pozitivan napon pokazuje u pravcu pozitivne faze, dok vektor negativnog napona pokazuje u suprotnom smjeru od faze. Generišemo vektor prostora duž 0 stepeni sabiranjem ova tri vektora. Samo jedan od dva prekidača na svakom kraju pretvarača je zatvoren u svakom trenutku, što nam daje osam različitih kombinacija prekidača. Šest njih, svaki na udaljenosti od 60 stepeni, odgovara vektorima prostornog napona na vektorskom prostornom dijagramu i poznati su kao osnovni tj. bazni vektori. Poslednje dvije kombinacije rezultiraju nultim ili neutralnim vektorom. Ovo se dešava kada su svi gornji ili donji prekidači zatvoreni istovremeno. Pošto struja ne prolazi kroz faze u ovom primjeru, ne stvara se napon, a rezultujući prostorni vektori su nulti vektori dati na početku. Da bismo generisali vektor prostornog napona u modernizovanim okolnostima, u ovom dijelu smo naveli sklopnu strukturu trofaznog pretvarača. Stvaranje vektora prostora pod bilo kojim uglom i veličinom je ono za šta smo istinski zainteresovani. Korišćenjem impulsne širinske modulacije, o kojoj će biti riječi kasnije, možemo to da uradimo i proizvedemo kontinuirani rotirajući vektor napona bilo koje veličine [45].



Slika 4.9 Preklonni obrazac za generisanje trofazne naizmjenične struje i grafikon vektorskog naponskog dijagrama

Vidimo da rezultujuće magnetno polje se okreće u smjeru suprotnom od kazaljke na satu, ako se ova tri namotaja napajaju trofaznom naizmjeničnom strujom. Ovi provodnici, kojim protiče električna struja, izloženi su sili koja rotira rotor. Ne bi bilo relativne brzine između rotirajućeg polja i provodnika ako bi se rotor kretao istom brzinom kao i magnetno polje. Kao posledica ne bi bilo obrtnog momenta. Obrtni moment raste kako ugaona brzina „klizi“ iza magnetnog polja, do optimalnog klizanja, nakon čega obrtni moment donekle opada (slika 4.10) [46] .



Slika 4.10 Ponašanje obrtnog momenta u odnosu na ugaonu brzinu za indukcioni motor

Ovo nudi prilično rigidnu metodu regulacije brzine. Kontrolisanje frekvencije trofaznog napajanja je poželjnije rešenje (biće opisano u poglavlju 5). Zbog takozvanog proklizavanja izazvanog obrtnim momentom, frekvencija ne može pravilno da reguliše brzinu. Međutim, frekvencija se može promijeniti da bi se postigla potrebna brzina ako se ugaona brzina prati i uključuje u povratnu petlju.

Savremena elektronika omogućava konstantnu promjenu frekvencije napajanja kako bi se upravljalo brzinom motora, a samim tim i brzinom vozila. Zbog svoje odlične efikasnosti, sinhroni motori sa trajnim magnetima često preuzimaju ulogu indukcionih motora u mnogim industrijama. Oni su poželjni zbog smanjenja troškova proizvodnje trajnih magneta i sve češće su zastupljeniji u auto industriji. Pouzdani i napredni indukcioni motori imaju tendenciju da budu malo manje efikasni od drugih vrsta bez četkica zbog potrebe da se generiše struja u rotoru, što povećava gubitke.

4.3. Karakteristike i efikasnosti elektromotora

Svi motori imaju određene karakteristike koje treba uzeti u obzir prilikom izbora i upotrebe (efikasnost, hlađenje, veličina i masa) pa su ove karakteristike razmatrane u ovom poglavlju. Precizno izračunavanje gubitaka je veliki izazov za dizajnere električnih motora. Četiri osnovne kategorije gubitaka su iste kod svih tipova elektromotora, a to su:

- gubici bakra;
- gubici gvožđa;
- gubici zbog uticaja trenja;
- gubici vazdušnog zazora.

Krenućemo od osnovnih gubitaka, a to su gubici bakra. Oni su izazvani električnim otporom žica samog motora. Kao rezultat toga, dio upotrebijene električne energije se pretvara u toplotnu energiju umjesto da se koristi za električni rad. Električna struja ima uticaj grijanja koji je proporcionalan kvadratu struje:

$$P=RI^2 \quad (4.14)$$

Pošto nam jednačine (4.7) i (4.8) govore da je struja proporcionalna obrtnom momentu T koji motor proizvodi, možemo reći da je

$$\text{Gubici Bakra}=k_cT^2 \quad (4.15)$$

gde je k_c konstanta na koju utiču magnetni fluks Φ , otpor četkica (ako je u pitanju kolektorski elektromotor sa četkicama), otpor kalema i drugi faktori.

Gubici gvožđa, koji nastaju usled magnetnih efekata u gvožđu motora, posebno u rotoru, su drugi primarni izvor gubitaka. Međutim, moramo shvatiti da je magnetno polje u rotoru dinamično da bi se razumjelo i jedno i drugo. Ovi gubici gvožđa imaju dva primarna izvora. Prvi je poznat kao "gubitak histereze", a odnosi se na energiju koja se troši na stalno magnetiziranje i demagnetizaciju gvožđa kako bi se ponovo poravnali njegovi magnetni dipoli. Ova vrijednost bi trebala da bude izuzetno niska, ali neće biti nula čak i ako se prilikom izrade koristi dobro magnetno meko gvožđe [47]. Drugi gubitak gvožđa nastaje kao rezultat toga što gvožđe generiše struju usled promjenljivog magnetnog polja korišćenjem standardnih tehnika elektromagnetne indukcije (tzv.vrtložne

struje)³¹. Gvozdeni rotor je napravljen od tankih limova koji su svi pričvršćeni ili spojeni zajedno i svaki list je odvojen od narednog slojem boje kako bi se smanjile ove vrtložne struje. Efikasnim podizanjem električnog otpora gvožđa, ovo značajno minimizira vrtložne struje. Jednačina koja bi predstavljala gubitke gvožđa data je kao jednačina 4.16 gdje je k_i konstanta koja u realnim osnovama neće predstavljati konstantu jer će uticaj magnetnog polja imati doprinosa na istu.

$$Gubici\ Gvo\zda=k_i\ \omega \quad (4.16)$$

Treća i četvrta grupacija gubitaka je jasno shvatljiva jer primjetno je da prilikom rada motora ležajevi i četke motora će iskusiti moment trenja. Osim trenja ako je ventilator pričvršćen na rotor radi hlađenja, otpor vjetra rotora može biti prilično visok. U većini slučajeva, sila trenja će biti prilično konstantna dok sila otpora vjetra će rasti u direktnoj proporciji sa kvadratom brzine. Uzećemo da je T_f obrtni moment trenja, a k_v konstanta koja uglavnom zavisi od veličine i oblika rotora, kao i od toga da li je ventilator za hlađenje instaliran ili ne, tada je snaga potrebna za stvaranje ovih sila:

$$Snaga\ Trenja=T_f\ \omega \quad (4.17)$$

$$Snaga\ Vjetra=k_v\ \omega^3 \quad (4.18)$$

Da bi se izračunali i predvideli gubici u motoru, korisno je kombinovati sve ove različite gubitke u jednu jednačinu. Kombinujući jednačine (4.15)-(4.18), dobijamo:

$$Ukupni\ Gubici=k_c T^2 + k_i\ \omega + k_v\ \omega^3 + C \quad (4.19)$$

gdje je C konstanta svih gubitaka na ukupnom nivou. Efikasnost motora se izražava kao količnikom snaga izlaza i ulaza pa je njena forma data jednačinom:

$$\eta_m = \frac{T\omega}{T\omega + k_c T^2 + k_i \omega + k_v \omega^3 + C} \quad \left(\frac{\text{izlazna snaga}}{\text{ulazna snaga}} = \frac{\text{izlazna snaga}}{\text{ulazna snaga} + \text{gubici}} \right) \quad (4.20)$$

³¹Struje kruže samo oko i unutar gvozdenog rotora.

Efikasnost motora će imati značajan uticaj kada budemo modelirali električno vozilo (poglavlje 8). Očigledno je da gubici motora utiču na njegovu efikasnost, ali je manje očigledno da ovi gubici igraju značajnu ulogu u određivanju maksimalne snage koju može proizvesti motor bilo koje veličine.

Detaljna studija [48] objašnjava da je tačna procjena gubitaka neophodna za projektovanje električnih mašina da bi se postigla optimalna efikasnost. Pošto gubici variraju u mnogim radnim tačkama i parametrima napajanja, teže je dizajnirati mašinu za optimalno funkcionisanje tokom ciklusa vožnje. Mape efikasnosti koje su predstavljene u navedenoj naučnoj studiji predstavljaju konturne grafikone maksimalne efikasnosti kao funkcije obrtnog momenta (ili snage) u odnosu na brzinu i često se koriste u istraživanju dizajna mašina za različite tipove EV-a.

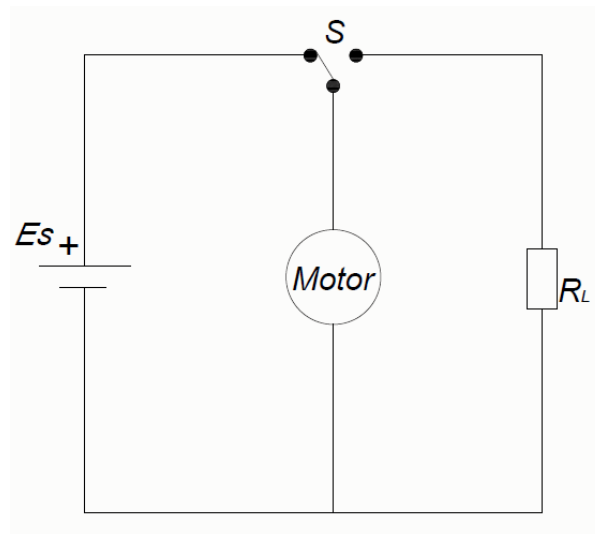
4.4. Princip i primjena regulisanja načina zaustavljanja elektromotora

Kočnica predstavlja mehanički alat koji usporava kretanje oduzimanjem snage iz sistema koji se kreće najčešće korišćenjem svojstva trenja čime se sprečavanje kretanja vozila, točka ili osovine u pokretu. Još jedna od bitnih karakteristika EV-a je njihova sposobnost da koriste električne motore za transformaciju kinetičke energije nazad u električnu. Kao što je rečeno u prethodnom poglavlju jednosmjerni motor povezan sa baterijom male unutrašnje otpornosti i naponom E_s , postiže stabilno stanje, stvarajući obrtni moment T pri ugaonoj brzini ω (slika 4.11). Koristićemo osnovnu jednačinu 4.13 obrtnog momenta T i pretpostavimo da je prekidač S pomjeren udesno. Motor će nastaviti da se okreće istom ugaonom brzinom. Ovo će stvoriti povratni napon E_b kao što smo pomenuli u jednačini 4.11. Ovaj napon će se formirati na otpornik R_L , a struja će se dalje kontrolisati otporom namotaja kalemova. Kao posledica toga, struja se može predstaviti jednačinom:

$$E_b = k_m \Phi_{max} \omega = \sum R I_a \quad (4.21)$$

Gdje je $\sum R$ suma svih pobuda, pa se struja I može predstaviti izrazom:

$$I = \frac{K_m \Phi \omega}{R_a + R_l} \quad (4.22)$$



Slika 4.11 Zamjenska šema motornog kola sa otpornikom u režimu dinamičkog kočenja

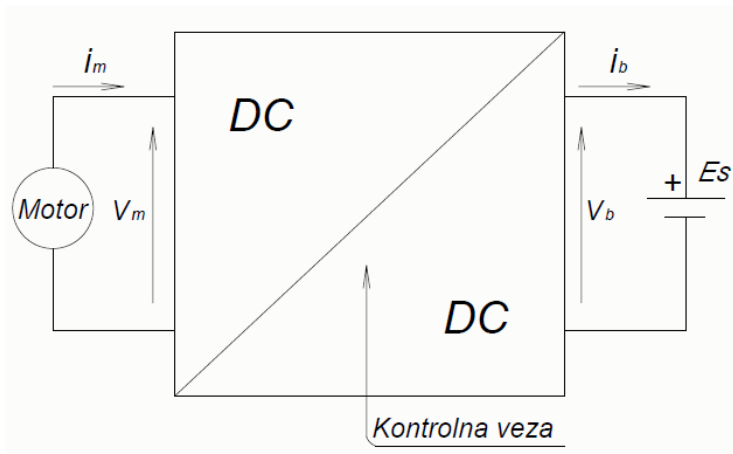
Prilikom položaja prekidača S udesno, napon E_b će imati vrijednost nula, i kao rezultat toga obrtni moment T će biti negativan.

$$T = - \frac{k_m^2 \Phi^2 \omega}{R_a} \quad (7.16)$$

Primjetno je da se promjenom vrijednosti otpornika kao i ugaone brzine može kontrolisati i obrtni moment. Ovo predstavlja dinamičko (otporničko) kočenje. Na specijalizovanim otpornicima koji se koriste za ovu vrstu kočenja, kinetička energija se transformiše u toplotnu tokom dinamičkog kočenja. Segmenti otpornika se isključuju da bi se povremeno regulisala sila vuče. Pošto se ne koči mehanički, nema fizičkog habanja kočnica, ali vozilo ne može da stane sa ovom tehnikom kočenja, što je nedostatak.

Zamislite kada bi se umjesto otpornika na slici 4.11 postavila baterija ili neki tip kondenzatora. Tada bi se dio energije koju proizvodi elektromotor mogao usmjeriti ka tzv. skladištenju. U praksi taj sistem je poznat kao regenerativno kočenje i opisan je u velikom broju literatura, počevši od nekih osnovnih pojašnjenja koja su data u [49], pa sve do naprednijih studijskih simulacija u kojima se procjenjuje vrijednost energije koja se povraća tokom putovanja na rutama sa različitim saobraćajnim uslovima. O tome govori najnovija studija [50] objavljena 2022. godine koja je implementirana u realnim ispitivanjima da bi se prikupili profili brzine i profili ubrzanja. Zatim, nakon verifikacije prikupljenih podataka, profili brzine su implementirani u *AVL Cruise* simulacioni program. Rezultati simulacionog testiranja su pokazali da postoje varijacije u povratu

energije tokom putovanja od oko 2%. Kao zaključak se izvodi da se domet vozila može povećati punjenjem baterije ovom obnovljenom energijom, međutim kočenje pri malim brzinama je manje efikasno u gustom saobraćaju i zastojima. Samo povezivanje baterije sa elektromotorom nije lako izvodljivo i potrebno je postaviti adekvatni pretvarač.



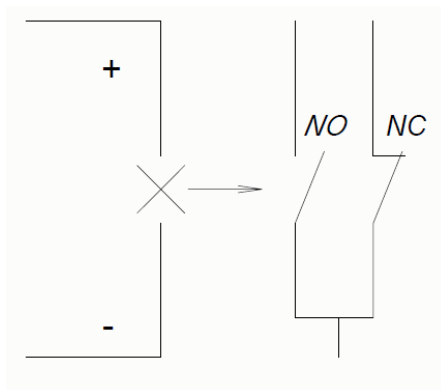
Slika 4.12 Uprošćeni blok regenerativnog kočionog sistema DC motora

Pretvarač, poznatiji kao DC/DC pretvarač, prima struju i_m od motora čiji je napon V_m . Brzina vozila koja zavisi od samog opterećenja rada motora takođe će imati uticaj i na ovaj napon V_m . Potreban kočioni moment će izazvati promjenu struje i_m . Odnos napona i struje motora predstavlja snagu samog elektromotora i ova električna snaga će biti poslata u DC/DC pretvarač, koji će je onda emitovati na višem naponu i nižoj struji kako bi odgovarao punjivoj bateriji koja skladišti energiju. Važno je zapamtiti da čak i ako je napon motora daleko niži od napona baterije, baterija se i dalje može postepeno puniti. Sa savremenom energetsom elektronikom, takva kola su prilično izvodljiva, ali treba uvijek imati na umu da je dio električne energije iz kočionog motora izgubljen.

5. Analiza i primjena napona u elektromobilima

U prethodnom poglavlju imali smo prilike da vidimo da se motor osim pogonskog svojstva takođe može koristiti i u svojstvu kočnica odnosno usporavanja vozila sa energijom uskladištenom u bateriji. Potrebna su nam kola energetske elektronike koja mogu upravljati generisanim naponima da bismo imali ovaj nivo kontrole. U ovom poglavlju koji slijedi pokazaćemo kako ova kola funkcionišu.

Proizvođači elektromobila zahtijevaju od tehnološke industrije da napon na bateriji bude stabilan i dobro regulisan. Međutim često dolazi do potrebe promjene tog napona na bateriji u viši ili niži nivo da bi na taj način kontrolisali brzinu rada motora. Većini električne i elektronske opreme je potreban donekle konzistentan napon. Ovo se može uraditi povećanjem ili smanjenjem napona na unaprijed određenu vrijednost iznad ili ispod radnog opsega baterije. U drugim situacijama želimo da pretvorimo manje ili više konstantan napon baterije u promjenljivi napon (na primer, za motor). Sve neophodne promjene se vrše prebacivanjem ili preklopničkim kolima. U ovim kolima se koriste elektronski prekidači, kao i invertori i kontroleri motora. Koristićemo simbol kola za naponski elektronski prekidač kao na slici 5.1 pri čemu je *NO* otvoren prekidački mod (*en. Normally Open-NO*), dok je *NC* zatvoreni prekidački mod (*en. Normally Closed-NC*).



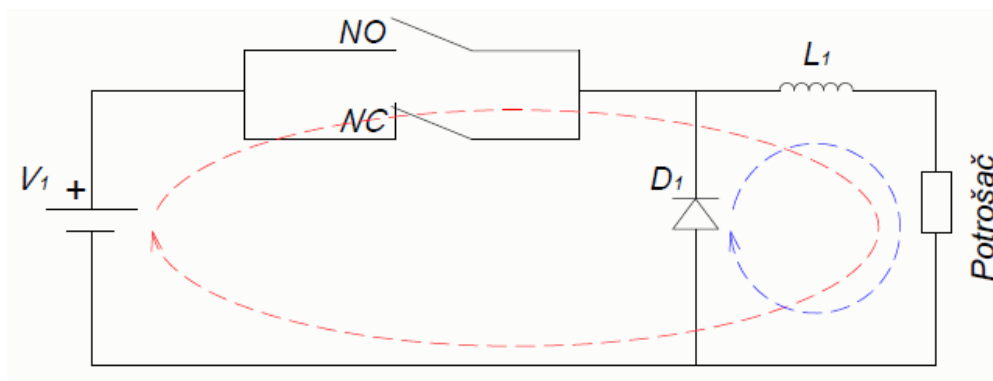
Slika 5.1 Univerzalni simbol naponskog elektronskog prekidača

5.1. Regulacija napona pomoću preklopnih regulatora

5.1.1. Tip Step-Down (Buck) regulator

Osnovni princip funkcionisanja koji je prikazan na slici 5.2 prikazuje prekidački regulator ili kako je u praksi zastupljenije-čoper. Dioda, induktor i električni prekidač sa pogonskim kolom su osnovni neophodni djelovi. Kada je aktivan *NC* prekidački mod, struja teče preko opterećenja i

induktora. Struja progresivno raste kao rezultat povratnog EMF-a koji induktor stvara (strujni krug označen crvenom bojom). Nakon toga, prekidač prelazi u *NO* mod. Kao što se vidi uskladištena energija induktora održava struju opterećenja napajanog diodom (strujni krug označen plavom bojom).

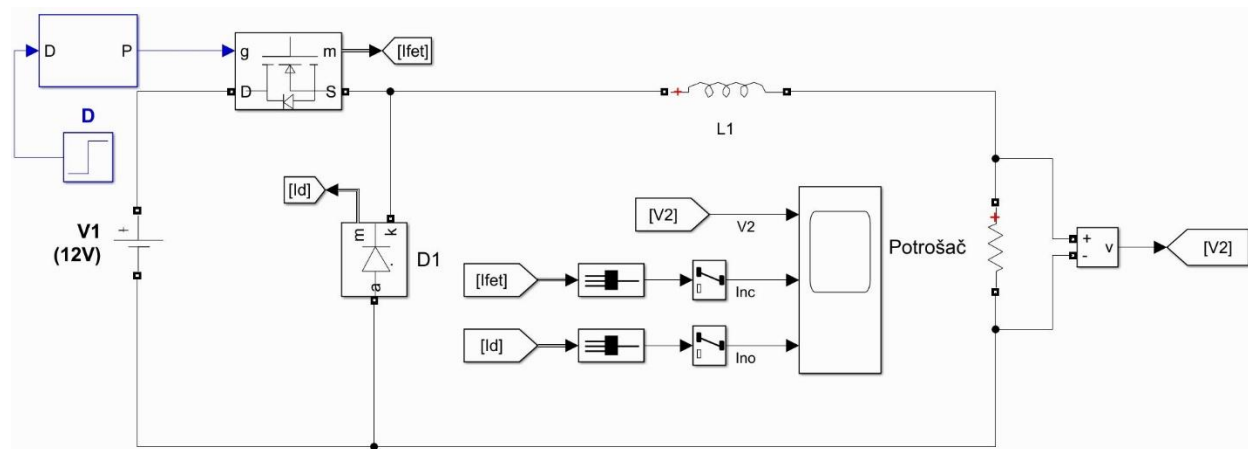


Slika 5.2 Šema kola koja prikazuje rad Buck regulatora u prekidačkom modu

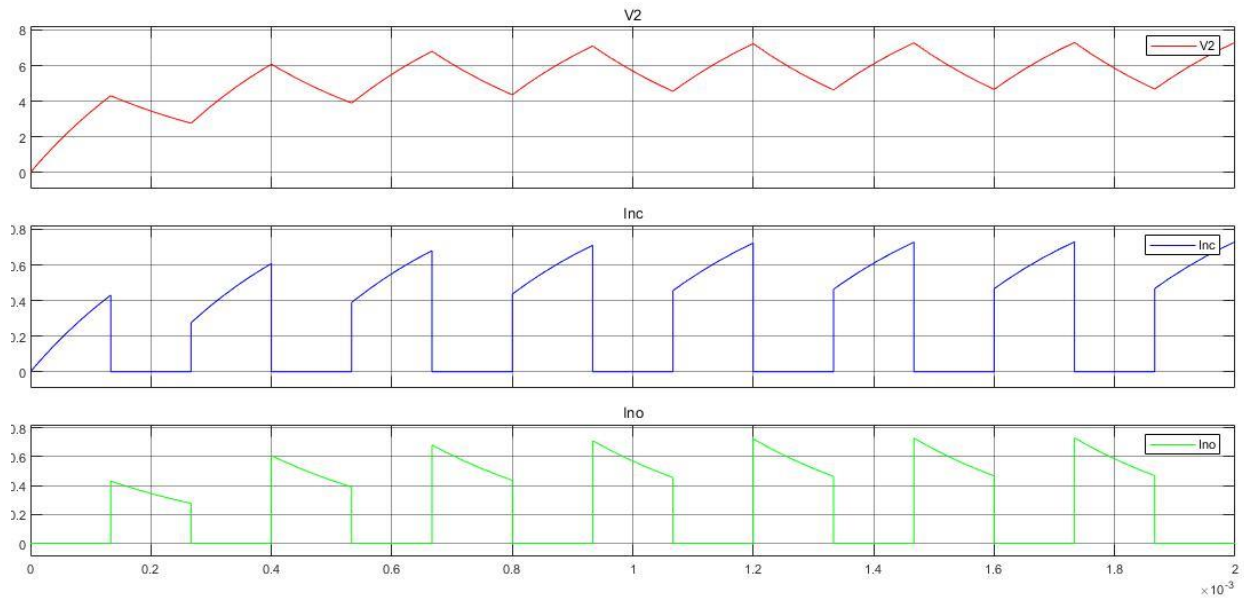
Jednačina:

$$V_2 = V_1 \frac{t_{nc}}{t_{nc} + t_{no}} \quad (5.1)$$

predstavlja izlazni napon V_2 koji se može proizvesti ako je prisutan V_1 napon napajanja, a t_{NC} i t_{NO} su vremena u kojima se električni prekidač uključuje i isključuje, respektivno. Blok dijagram Simulink modela koji je prikazan na slici 5.3 ilustruje jednu od mnogih mogućih konfiguracija Step-Down regulatora. Grafik koji je prikazan na slici 5.4 ilustruje različite struje koje teku kroz svaku fazu ovog ciklusa uključivanja-isključivanja.



Slika 5.3 Simulink konfiguracija Step-Down regulatora



Slika 5.4 Struje u krugu regulatora: prvi grafik-Struja koja teče kroz potrošač ; drugi grafik-struja koju obezbeđuje ćelija tokom vremena ON ; treći grafik-protok struje kroz diodu tokom vremena isključenja

Takođe je očigledno da frekvencija utiče na talasanje tj. veća frekvencija rezultira manjim talasom i obrnuto. Međutim, kako se gubi energija pri svakom uključivanju i isključivanju, frekvencija ne bi trebalo da bude previsoka [51].

Moguće je izraziti Step-Down regulator koristeći Matlab kod koji je predstavljen primjerom P5.1. Kao rezultat ovog koda biće nacrtano sledećih pet linija: napon na ulazu, napon na izlazu, pad napona na otporniku, signal napona na kondenzatoru i signal struje na induktivnosti. Imperativ je da uzmete u obzir činjenicu da se ovo samo smatra prikazom Buck regulatora, a ne stvarnom implementacijom regulatora. U većini slučajeva, implementacija regulatora zahtijeva dodatni stepen složenosti, kao i nekoliko pojedinačnih komponenti. Svrha ovog koda je samo da pomogne da vidite ponašanje napona i struja unutar regulatora.

$$V1 = 12;$$

$$V2 = 5;$$

$$R = 10;$$

$$L = 1e-3;$$

$$C = 10e-6;$$

$$t = 0:0.0001:0.02;$$

(P:5.1)

```
Vi = V1 * ones(size(t));  
Vo = V2 * ones(size(t));  
I = (V1-V2)/R;  
Vr = Vi - I*R;  
tau = L/R;  
I_L = I * exp(-t/tau);  
Vc = V2 + (V1-V2)*exp(-t/(R*C));  
figure;  
subplot(2,2,1);  
plot(t, Vi, 'b', 'LineWidth', 2);  
xlabel('Vrijeme [s]');  
ylabel('Ulazni napon [V]');  
title('Ulazni napon');  
subplot(2,2,2);  
plot(t, Vo, 'r', 'LineWidth', 2);  
xlabel('Vrijeme [s]');  
ylabel('Izlazni napon [V]');  
title('Izlazni napon');  
subplot(2,2,3);  
plot(t, Vr, 'g', 'LineWidth', 2);  
xlabel('Vrijeme [s]');  
ylabel('Napon [V]');  
title('Naponski pad na potrošači');  
subplot(2,2,4);  
plot(t, Vc, 'm', 'LineWidth', 2);  
xlabel('Vrijeme [s]');  
ylabel('Napon [V]');
```

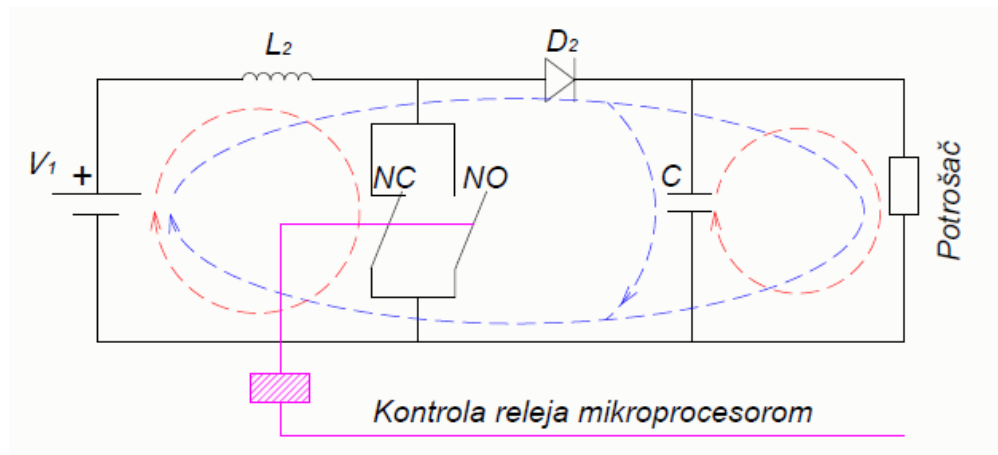
```
title('Naponski signal na kondenzatoru');  
figure;  
plot(t, I_L, 'k', 'LineWidth', 2);  
xlabel('Vrijeme [s]');  
ylabel('Struja [A]');  
title('Strujni signal u induktivnosti');
```

5.1.2. Tip Step-Up (Boost) regulator

Pojačavanje jednosmjernog napona je često korisno, a regenerativno kočenje je samo jedan primer koji smo opisali u prethodnom poglavlju. Osnovni princip rada možemo prikazati na kolo prikazano na slici 5.5 sa pretpostavkom da kondenzator ima neko naelektrisanje. Prekidački mod je u *NC* režimu pa kroz induktor protiče struja (crveni strujni krug). Pražnjenjem kondenzatora dolazi do napajanja opterećenje dok dioda zaustavlja povratak naelektrisanja kondenzatora preko prekidača. U drugom slučaju prekidač u *NO* modu konstruiše plavi strujni krug. Opadanjem struje izaziva se dramatično povećanje napona induktora. Struja će proći kroz diodu, napuniti kondenzator, a zatim će teći kroz opterećenje čim napon pređe napon kondenzatora. Sve dok induktor ima energiju, ovo će se nastaviti. Prekidač se zatim još jednom zatvara kao u prvobitnoj situaciji vraćajući energiju induktora dok kondenzator nastavlja da napaja opterećenje. Izlazni napon V_2 u ovom slučaju iznosiće

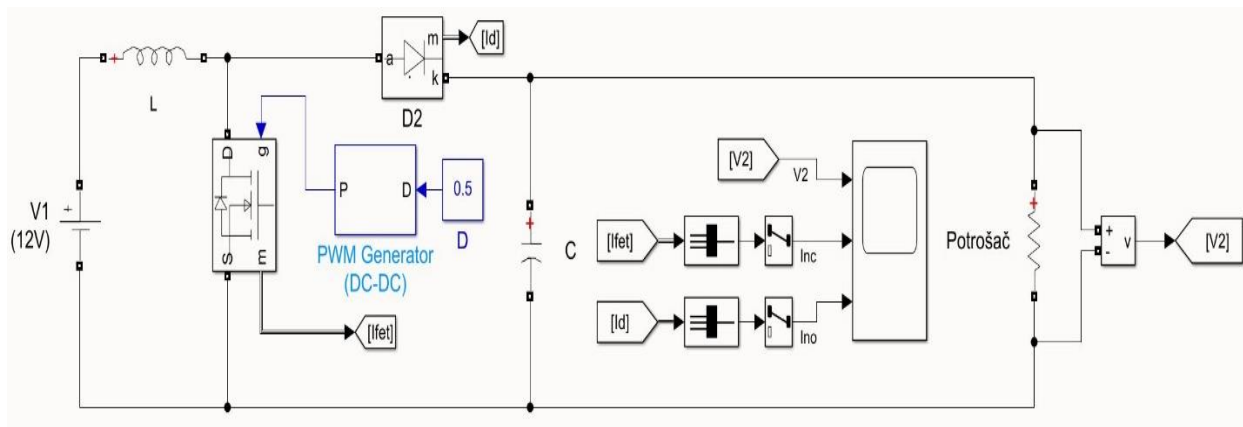
$$V_2 = V_1 \frac{t_{nc} + t_{no}}{t_{no}} \quad (7.20)$$

Kao što smo videli, ovakva prekidačka kola su u teoriji prilično jednostavna s tim što je trik u tome da se na odgovarajući način reguliše okidanje električnog prekidača. Mikroprocesor često obezbeđuje ovu kontrolu. Studija [52] predložila je jedinstveni pojačivač sa jednim prekidačem zasnovan na multiplikatoru napona (*en. Voltage Multiplier- VM*). Poslednjih godina došlo je do velikog interesovanja za ovakav tip pretvarača zbog nekoliko upotreba, uključujući fotonaponske uređaje i proizvodnju energije gorivim ćelijama. Primjenom ovakvih pretvarača postiže se visok stepen konverzije napona u pretvaraču koristeći visokonaponske poluprovodničke komponente na izlazu kola što može da uzrokuje povećanje cijene u proizvodnji i na taj način smanji efikasnost sistema.

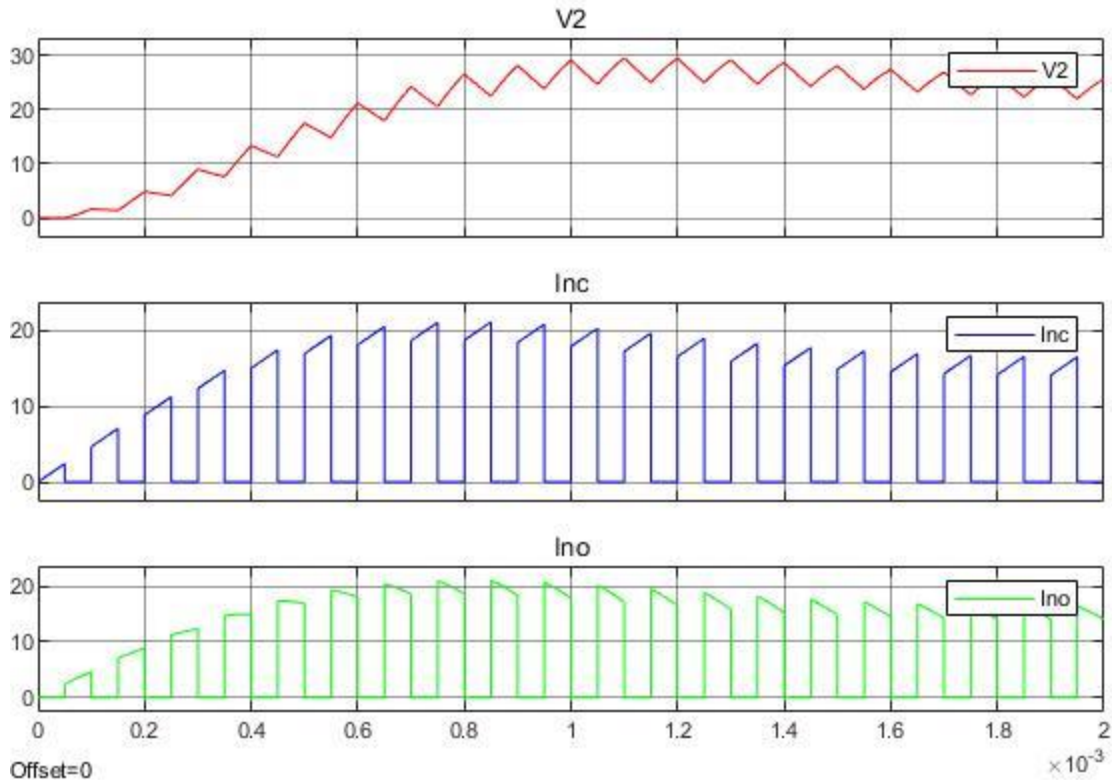


Slika 5.5 Šema strujnog kola koja prikazuje rad Boost regulatora u kontrolnom prekidačkom modu

Slično kao i u prethodnom primjeru regulatora jedna od mnogobrojnih konfiguracija za Step-Up regulator je prikazana u blok dijagramu Simulink modela na slici 5.6. Različite struje koje teku tokom svakog koraka ovog ciklusa uključivanja-isključivanja su prikazane na grafiku na slici 5.7.



Slika 5.6 Simulink konfiguracija Step-Up regulatora



Slika 5.7 Simulacione struje Step-Up regulatora: prvi grafik-Struja koja teče kroz potrošač ; drugi grafik-struja koju obezbeđuje ćelija tokom vremena ON ; treći grafik-protok struje kroz diodu tokom vremena isključenja

Matlab predstavlja odličnu platformu za realizaciju i simulaciju regulatora. Priloženi kod P5.2 generišete crtanje regulatora Step-Up (Boost) u Matlabu. Podešavanjem vrijednosti parametara kao što su frekvenciju prekidača f_s i faktor radnog ciklusa D u kodu mogu se prilagoditi grafici signala za Step-Up regulator. Frekvencija prekidača određuje koliko puta prekidač u regulatoru mijenja ulazni napon. To je ključni parametar jer utiče na brzinu odziva regulatora i uticaja šumova na izlazni napon. U zavisnosti od primjene, vrijednosti frekvencije prekidača mogu izaći i van standardnog opsega u kojem se nalaze od 10 kHz do 1 MHz. Faktor radnog ciklusa kontroliše vrijeme u kom prekidač uključuje/isključuje izvor napajanja. Kada je faktor radnog ciklusa podešen na 0,5, izvor napajanja se uključuje 50% vremena i isto toliko isključuje.

Proračun promjene struje i napona kroz induktivnost i kapacitivnost (ΔI i ΔV) se dešava tokom faza uključivanja i isključivanja prekidača, respektivno, gdje je V_d izlazni napon Boost regulatora, T_{nc} označava period vremena kada prekidač uključuje izvor napajanja, T_{no} označava period vremena kada je prekidač isključen.

Prikaz ulaznog napona postiže se dodavanjem linija koda koje su potrebni za inicijalizaciju i izračunavanje vektora veličina (kao što su naponi, struje i padovi napona) u vremenskom domenu. Oni popunjavaju sve elemente u vektorima ulaznog i izlaznog napona V_{1_vec} i V_{2_vec} , koji imaju dimenzije jednake vremenskom vektoru. Proračun izlaznog napona V_{2_vec} na osnovu vremenskog domena je prikazan u tri reda, pri čemu prva linija izhedačava izlazni napon sa ulaznim naponom V_1 tokom faze uključivanja prekidača. Tokom faze isključenja, druga linija dodjeljuje izlazni napon na promjenu napona na kondenzatoru $V_2 + \Delta V$. Kada je prekidač isključen, treća linija postavlja vrijednost izlaznog napona na izlazni napon V_2 što će na grafiku ove linije predstavljati izlazni napon. Blokovi koda koji se nazivaju IR_vec koji izračunavaju vrijednosti struje induktivnosti u vremenskom domenu dodjeljuju trenutnu vrijednost varijaciji struje induktivnosti tokom faze uključivanja i izračunavaju struju induktivnosti koja se javlja tokom faze isključenja. Linije koda na kraju programa daju grafik sa pet linija, koji predstavljaju ulazni napon, izlazni napon, pad napona na otporniku, signal napona na kondenzatoru i strujni signal na induktivnosti.

```

V1 = 12;
V2 = 24;
R = 10;
L = 250e-6;
C = 100e-6;
fs = 50e3;
D = 0.5;
Vd = V1 - V2;
Tnc = D*(1/fs);
Tno = (1 - D)*(1/fs);
deltaI = Vd*Tnc/L;
deltaV = deltaI*R*Tno/C;
t = 0:1/fs:0.01;
V1_vec = V1 * ones(size(t));
V2_vec = zeros(size(t));
    
```

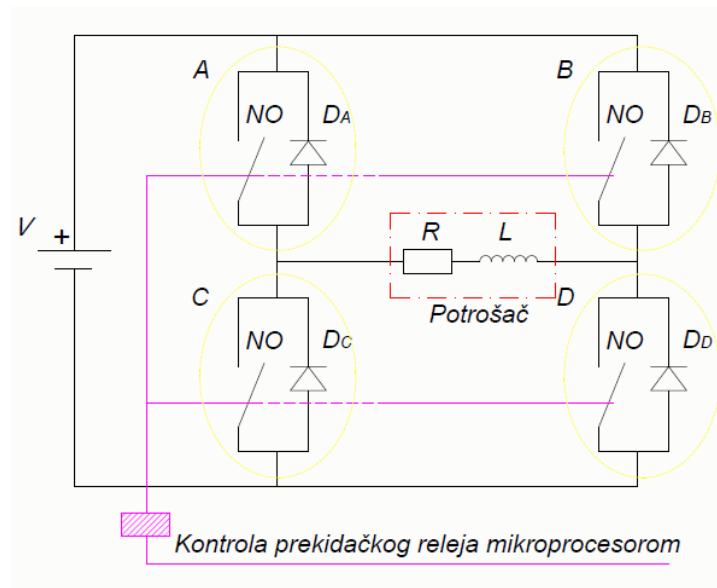
(P:5.2)

```
V2_vec(t<=Tnc) = V1;
V2_vec(t>Tnc & t<=(Tnc+Tno)) = V2+deltaV;
V2_vec(t>(Tnc+Tno)) = V2;
IR_vec = zeros(size(t));
IR_vec(t<=Tnc) = deltaI;
IR_vec(t>Tnc & t<=(Tnc+Tno)) = deltaI-(V2-V1)*Tnc/L;
IR_vec(t>(Tnc+Tno)) = -deltaI;
VR_vec = R*IR_vec;
VC_vec = C*diff(V2_vec)./diff(t)/fs;
VC_vec = [VC_vec(1) VC_vec];
IL_vec = deltaI*ones(size(t));
IL_vec(t>Tnc & t<=(Tnc+Tno)) = deltaI+(V1-V2)*Tno/L;
IL_vec(t>(Tnc+Tno)) = deltaI;
figure;
hold on;
plot(t, V1_vec, 'b');
plot(t, V2_vec, 'r');
plot(t, VR_vec, 'g');
plot(t, VC_vec, 'm');
plot(t, IL_vec, 'k');
hold off;
xlabel('Vrijeme [s]');
ylabel('Napon [V] / Struja [A]');
title('Step-Up (Boost) regulator');
legend('Ulazni napon', 'Izlazni napon', 'Naponski pad na otporu', 'Naponski signal na kondenzatoru', 'Strujni signal u induktivnosti');
```

U većini slučajeva, implementacija regulatora zahtijeva dodatni nivo složenosti, kao i više različitih komponenti. Cilj ovog koda je samo da pokaže kako se napona i struja ponašaju unutar regulatora.

5.2. Optimizacija korišćenja energije u elektromobilima

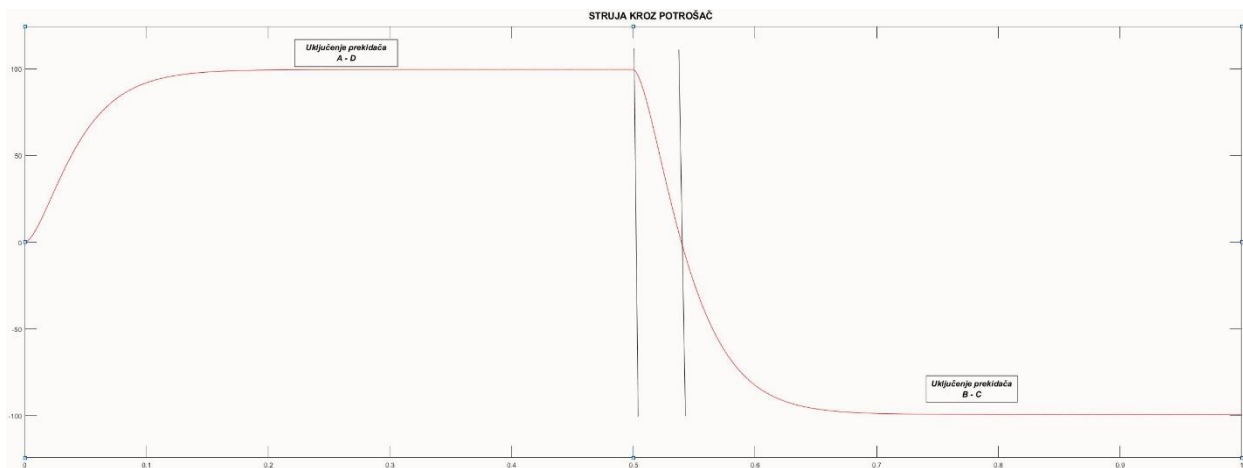
Motori koji će se proučavati u sledećem dijelu zahtijevaju naizmjeničnu struju, dok kola prve dvije sekcije ovog poglavlja služe kao osnova za regulaciju konvencionalnog DC motora. Inverter je kolo koje pretvara jednosmjernu energiju iz izvora kao što su baterije u naizmjeničnu. U praksi su zastupljeni jednofazni i trofazni pretvarači, pa krenućemo prvenstveno sa jednostavnijom varijantom.



Slika 5.8 Invertersko kolo H-mosta

Slika 5.8 prikazuje konfiguraciju osnovnih djelova monofaznog pretvarača. U određenim literaturama možemo ga pronaći pod nazivom "H-most" (*en. H-bridge*) i sastoji se od četiri električna prekidača sa označenim slovima *A*, *B*, *C* i *D*, a diode su postavljene kod svakog prekidača paralelno. Otpornik i induktor služe kao prikazi opterećenja preko kojih treba da se pokreće naizmjenična struja. Osnovni rad pretvarača je relativno jednostavan i kao prvi korak zasnovan je na uključivanju prekidača *A* i *D* gdje struja prolazi kroz opterećenje i kreće se udesno. Zahtjev za diodama postaje očigledan kada su ova dva prekidača isključena. Pretpostavka da opterećenje najvjerojatnije ima neku induktivnost, struja neće moći odmah da se zaustavi, već će nastaviti da teče preko dioda *D_B* i *D_C* i nazad u napajanje. Kada su prekidači *B* i *C* aktivirani,

struja počinje da teče lijevo u suprotnom smjeru. Kada se prekidači isključe kroz diode paralelno prekidačima A i D struja će imati slobodan tok. Slika 5.9 prikazuje talasni oblik generisane struje.



Slika 5.9 Grafik struje monofaznog pretvarača za uređaj za prebacivanje kvadratnog talasa

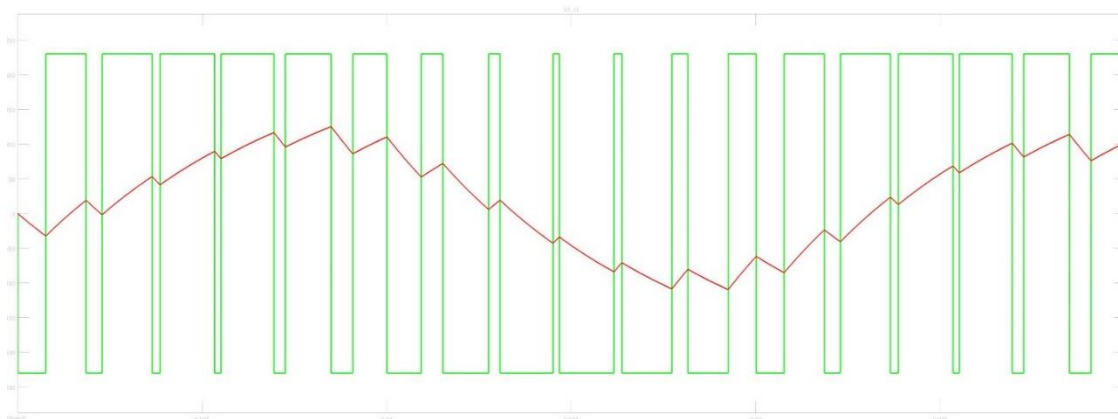
Primjetno je da je ovakav talasni oblik prilično daleko od sinusoidalnog talasnog oblika. Koncept harmonika se može koristiti za opisivanje razlike između čistog sinusnog talasa i bilo kog drugog talasnog oblika. To su oscilacije napona ili struje sa frekvencijom f_v koja je zapravo višestruka od osnovne frekvencije oscilovanja. Furijeova analiza je vjerovatno najbolja tehnika lociranja ovih harmonika. Dakle, harmonici viših frekvencija superponirani na osnovnu frekvenciju mogu se koristiti za opisivanje razlike između talasnog oblika napona ili struje i čistog sinusnog talasa.

Već smo pomenuli da je jedan od problema elektromotora taj da harmonici mogu pogoršati gubitke gvožđa. Primijetili smo da je frekvencija promjene magnetnog polja srazmjerna sa ovim gubicima gvožđa. Prava brzina promjene, a samim tim i gubici, biće znatno ubrzani ovim višim harmonicima ako se naša naizmjenična struja koristi da generiše promjenljivo magnetno polje. Zbog toga se često preferiraju komplikovaniji sistemi koji obezbjeđuju glatkiju promjenu struje nego što je upravo pomenuti osnovni obrazac prebacivanja.

Zbog toga treba uvesti termin modulacija širine impulsa (*en. Pulse Width Modulation-PWM*). Slika 5.8 prikazuje blok dizajn u kojem je samo prekidač D neprekidno uključen tokom pozitivnog ciklusa, dok je prekidač A samo povremeno aktivan. Kada je A uključen, struja opterećenja raste. Čak i kada je prekidač A isključen, struja teče preko prekidača D i diode povezane paralelno sa prekidačem C zbog induktivnosti opterećenja. U negativnom ciklusu se dešavaju iste pojave, osim što je prekidač B stalno uključen i prekidač C pulsira. Dok je C uključen, struja opterećenja se

povećava, kada je isključen, nastavlja da teče, iako sporije, kroz gornju petlju kola i diodu povezanu paralelno sa prekidačem A.

Vrsta opterećenja će odrediti tačan oblik talasnog oblika. Vidjevši sliku 5.10 još uvijek nije sinusni talas, ali talasni oblik je mnogo bliži nego na onom sa slike 5.9. Očigledno je da će talas biti bliži čistom sinusnom talasu i da će harmonici biti manji što više impulsa ima u svakom ciklusu. Standard koji se često koristi i obično daje odlične rezultate je dvanajest impulsa po ciklusu.³² Preklapne impulse u savremenim kolima proizvode mikroprocesorska kola.

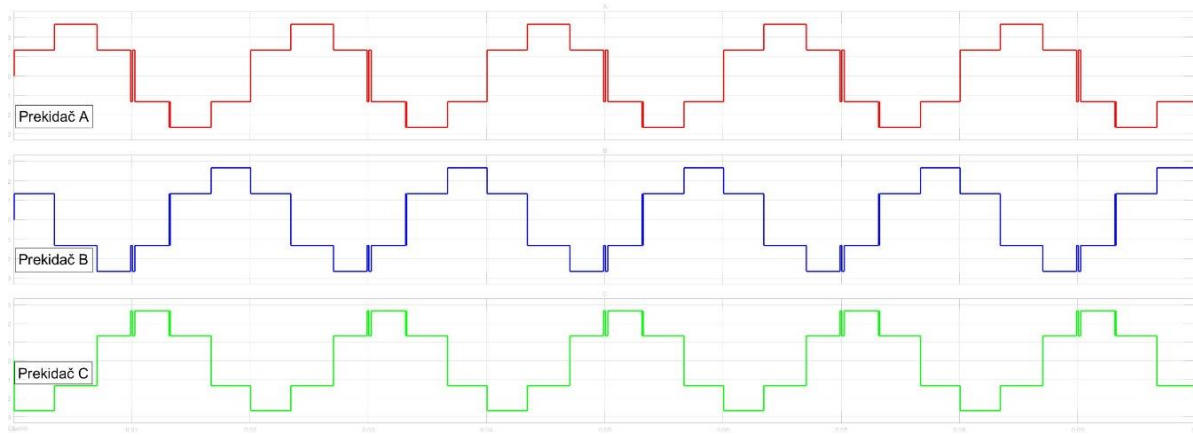


Slika 5.10 Preklapna sekvenca koja koristi modulaciju širine impulsa da bi se stvorila naizmjenična struja koja je skoro sinusoidnog oblika.

U drumskoj auto industriji zastupljenost elektromotora EV-a je sa tri seta namotaja umjesto sa jednim zbog čega je za ove sisteme i za standardne mrežne sisteme potrebno trofazno napajanje naizmjeničnom strujom. Trofazni transformator sa desne strane je povezan sa šest prekidača sa slobodnim diodama kao što je ranije prikazano na slici 4.8. Data slika ilustruje blok prekidača i njihovu funkciju za proizvodnju tri napona koji su uporedivi, ali nisu u fazi. Šest koraka se može koristiti za podjelu svakog ciklusa. Grafikoni na slici 5.11 ilustruju kako se sa ovom jednostavnom konfiguracijom struja u svakoj od tri faze mijenja tokom vremena.

Jasno je da ove krive nisu sinusni talasi, ali kao i kod monofaznih pretvarača PWM se koristi da bi se promijenila izuzetno osnovna sekvenca prebacivanja prikazana na slici 5.11.

³² Teorija i praksa elektrotehnike preporučuju dvanajest impulsa po ciklusu za konvencionalno H-most invertersko kolo radi balansiranja efikasnosti, kvaliteta signala i cijene.



Slika 5.11 Grafik struje u odnosu na vrijeme za osnovni trofazni sistem za generisanje naizmjenične struje za svaku fazu pojedinačno

6. Analiza dinamike karoserije elektromobila i Matlab/Simulink analiza dometa

U ovom poglavlju ćemo pokazati kako da kombinujemo jednačine koje smo kreirali u ranijim poglavljima da bismo izvršili simulacije koje su i tačne i korisne. Ove simulacije se mogu lako izgraditi na široko korišćenim tabelama i matematičkim alatima kao što su Matlab i Excel paket.

Performanse vozila će biti početni parametar koji modelujemo. Osim fizičkih performansi koje definišu vozilo kao što su dimenzije vozila, težina vozila, aerodinamički otpor i raspodelu težine između osovina konkretno pod performansama se ovdje misli i na brzinu i ubrzanje jer svaki elektromobil mora biti u stanju da se bezbjedno prilagodi sa komercijalnim gradskim saobraćajem. Opseg EV-a je još jedan ključni aspekt koji moramo biti u stanju da predvidimo. Pored toga, ovo može biti teorijski modelovano, a kompjuterski alati ovo čine prilično jednostavnim.

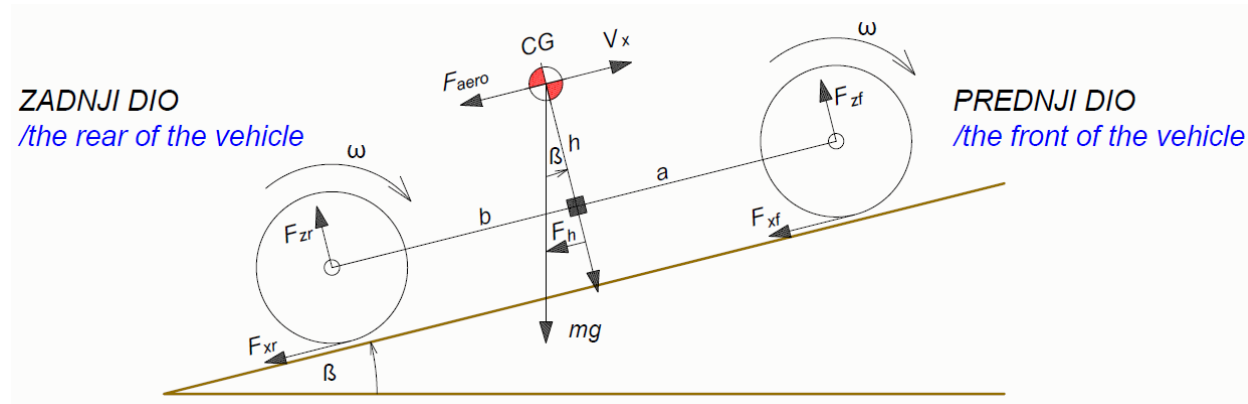
6.1. Sile koje djeluju na karoseriju vozila

Konstrukciona šasija automobila je izložena brojnim različitim silama. Oni su prvenstveno:

- sila trenja koja se pojavljuje kada dva tijela dodiruju jedno drugo. Ova sila utiče na kočenje i ubrzanje vozila;
- sila gravitacije koja djeluje na sva tijela i koja povlači vozilo prema dolje;
- sila opterećenja, koja se pojavljuje kada vozilo nosi teret na karoseriji. Ova sila utiče na stabilnost vozila i podešavanje osovine i njenih komponenti;
- aerodinamična sila koja djeluje kada vozilo kreće kroz vazduh ili dijelom kroz vodu. Ova sila utiče na potrošnju goriva i stabilnost vozila;
- sila centrifugalnosti koja se pojavljuje kada se vozilo okreće. Ova sila utiče na stabilnost vozila;
- sila udara koja se pojavljuje kada se vozilo sudara sa drugim objektima. Ova sila može dovesti do oštećenja ili čak uništenja vozila.

Sve ove sile su važne za projektovanje i izgradnju karoserije vozila, kako bi se osigurala sigurnost, udobnost i efikasnost vožnje. Počecemo tako što ćemo definisati blok karoserije vozila. Osovine automobila stvaraju ravan i paralelne su jedna sa drugom. Ova ravan sadrži uzdužni pravac "x", koji je paralelan sa osama. Normalni pravac "z" nikada nije paralelan sa gravitacijom dok se vozilo

kreće uzbrdo, umesto toga, uvijek je upravno na uzdužnu ravan ose. Dodatno možemo da ugradimo dinamiku nagiba i vešanja. Varijable modela kretanja vozila definisane su na slici 6.1. Prvo ćemo opisati sile djelovanja na vozilo u pokretu.



Slika 6.1 Blok karoserije vozila koji ilustruje sile kretanje karoserije dvoosovinskog vozila.

Otpor kotrljanja (sa predznakom **rr-Rolling Resistance**) predstavlja silu koja se pojavljuje kada točkovi vozila dodiruju podlogu i koja se suprotstavlja kretanju vozila kao posledica trenja između gume i podloge. Postoje više uticaja na otpor kotrljanja vozila:

- površina podloge-asfalt se lakše kotrlja od šljake ili prljavštine.
- debljina i kvalitet gume.
- brzina povećava otpor kotrljanja.
- težina vozila povećava otpor kotrljanja.

Da bi povećali performanse vozila i uštedu goriva, proizvođači automobila pokušavaju da smanje otpor kotrljanja. Neki od načina kojim se poboljšanje može postići su dizajnom aerodinamičke karoserije vozila, upotrebom guma sa smanjenim otporom kotrljanja i upotrebom tehnologija kao što su start-stop sistemi i hibridni pogoni. Otpor kotrljanja je otprilike konstantan i nerijetko se mijenja sa brzinom vozila. Otpor kotrljanja usko je povezan i sa samom težinom vozila. Sila koja predstavlja otpor kotrljanja može se predstaviti jednačinom³³.

$$F_{xrr} = n \cdot (F_{xf} + F_{xr}) \quad (6.1)$$

³³ Sila otpora kotrljanja predstavlja kumulativni zbir otpora prednjih i zadnjih osovinskih guma.

pri čemu je n broj točkova na vozilu, F_{xf} sila koja predstavlja otpor kotrljanja na prednjim, a F_{xr} na zadnjim točkovima, pa puni oblik jednačine može da se predstavi kao:

$$F_{xrr} = n \cdot (mg\mu_{rr(front)} + mg\mu_{rr(rear)}) \quad (6.2)$$

gde je μ_{rr} koeficijent otpora kotrljanja. Uzimajući u obzir da su ovi koeficijenti nepromjenjive varijable, prosti oblik jednačine sile koja predstavlja otpor kotrljanja na dvoosovinskom vozilu može se predstaviti jednačinom:

$$F_{xrr} = \mu_{rr}mg \quad [\text{N}] \quad (6.3)$$

Vrsta gume i pritisak u gumama su ključne odrednice μ_{rr} . Kretanjem vozila stabilnim tempom uz praćenje potrebne sile, prilično je jednostavno odrediti vrednost μ_{rr} . Za gume sa radijalnim slojem, tipične vrednosti μ_{rr} kreću se od 0,015 do otprilike 0,005 kada su napravljene posebno za električne automobile.

Trenje karoserije vozila koje putuje kroz vazduh je odgovorno za dio sile koju nazivamo **aerodinamički otpor**. Zavisí od nekoliko različitih aspekata, uključujući prednju oblast, formu, izbočine kao što su bočni retrovizori, kanali i vazdušni kanali, spojleri i još mnogo toga. Jednačina dejstva sile aerodinamičnog otpora može se predstaviti kao ³⁴

$$F_{aero} = \frac{1}{2}\rho AC_d v^2 \quad (6.4)$$

gde je A frontalna površina, v je brzina kretanja vozila (ova jednačina je proširena u nekim publikacijama kako bi uključila uticaj vjetrova na kretanje vozila) i ρ gustina vazduha. Koeficijent otpora (C_d) je konstanta i dobro dizajnirano vozilo može minimizirati koeficijent otpora C_d . Limuzinski automobili obično imaju vrednost od 0,3, međutim neki dizajni EV-a su uspeli da se spuste i na 0,19. Naravno, faktori kao što su temperatura, visina i vlažnost utiču na gustinu vazduha (suvi i hladni vazduh imaju manji otpor u odnosu na vlažni i topli vazduh), međutim u većini situacija, cifra od 1,25 kg/m³ je prikladna za korišćenje. Brzina vozila ima uticaj na aerodinamički otpor, što se vozilo brže kreće dolazi do povećavanja otpora.

³⁴ Vrednost F_{aero} će biti prikazana u njutnima ako se koriste SI jedinice za frontalnu površinu [m²] i brzinu [ms⁻¹]

Najjednostavnije kretanje vozila bi bilo u ravni sa horizontalom bez nagiba. Međutim to nije slučaj u praksi. Potrebno je naći i silu kojom bi se vozilo kretalo uzbrdo. Nulto normalno ubrzanje i obrtni momenat sa nultim korakom određuju normalnu silu na svakom prednjem i zadnjem točku.

$$F_{zf} = \frac{-h \cdot (F_{aero} + mg \cdot \sin \beta + m \cdot V_x) + b \cdot mg \cdot \cos \beta}{n \cdot (a+b)} \quad (6.5)$$

$$F_{zr} = \frac{+h \cdot (F_{aero} + mg \cdot \sin \beta + m \cdot V_x) + a \cdot mg \cdot \cos \beta}{n \cdot (a+b)} \quad (6.6)$$

Sa istim indeksima kao i u prethodnim jednačinama. Normalne sile točka zadovoljavaju uslov

$$F_{zf} + F_{zr} = mg \cdot \frac{\cos \beta}{n} \quad (6.7)$$

Jednostavna rezolucija sile nam omogućava da to posmatramo jednačinu kao oblik

$$F_h = mg \sin \beta \quad (6.8)$$

gdje je vozilo mase m , koje ide brzinom v , uz nagib pod uglom β . Pored sila prikazanih na slici 6.1 nesumnjivo će biti potrebno obezbijediti još jednu silu ako se brzina vozila mijenja. Da bismo imali bolju predstavu o sili potrebnoj za **ubrzanje vozila**, moramo takođe uzeti u obzir silu potrebnu za ubrzanje komponenti koje se okreću. Drugim rečima, pored linearnog ubrzanja mora se uzeti u obzir i rotaciono ubrzanje.³⁵ Ubrzanje vozila zahtijeva:

- silu proizvedenu motorom - motor pokreće točkove da bi povećao brzinu vozila;
- kinetičku energiju – brzina vozila generiše kinetičku energiju. Veće brzine znače veću kinetičku energiju za ubrzanje;
- potencijalnu energiju. Položaj vozila mu daje potencijalnu energiju, ubrzanje će biti efikasnije ako se vozilo kreće prema usponu.

³⁵ Električni motor je ovdje najveći problem, ne zbog njegovog posebno velikog momenta inercije, već zbog većih ugaonih brzina.

Sila ubrzanja vozila takođe zavisi i od ukupne masa samog vozila tako što sila ubrzanja raste sa težinom vozila. Sila je zavisna i sa otporom kotrljanja jer ubrzanja raste sa otporom kotrljanja. Već pomenuti aerodinamički otpor povećava silu ubrzanja.

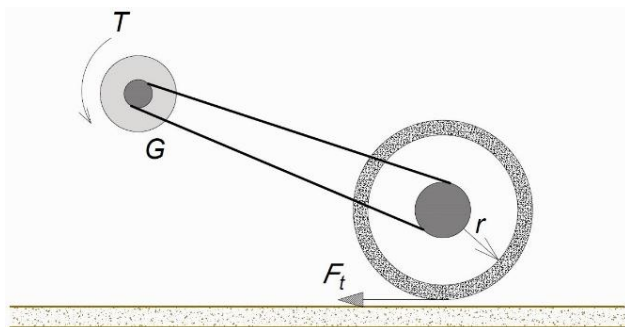
Sila ubrzanja se može izvesti jednačinom izvedenom iz drugog Njutnovog zakona (jednačina 6.9). Ta jednačina je linearnog karaktera. Sila ubrzanja u mnogome zavisi od prenosnog sistema kojim će se definisati dalje ubrzavanje ili usporavanje vozila.

$$F_a = ma \quad (6.9)$$

Vidjevši sliku 6.2, potrebno je doći do vrijednosti obrtnog momenta T . Obrtni moment osovine jednak je

$$T = \frac{F_t r}{G} \quad \rightarrow \quad F_t = \frac{G}{r} T \quad (6.10)$$

gde je F_t vučna sila koju proizvodi motor, r poluprečnik pneumatika, dok je G prenosni odnos sistema koji povezuje motor sa osovinom. Rotacija kružnih tijela zahtijevaju i ugaonu brzinu, a znajući da je ugaona brzina ω jednaka odnosu brzine i poluprečnika pneumatika, tada bi jednačina ugaone brzine osovine sa priključnim prenosnim odnosom bila



Slika 6.2 Pojednostavljena konfiguracija za vezu motora na pogonski točak

$$\omega = G \frac{v}{r} \text{ rad s}^{-1} \quad (6.11)$$

Motorno ugaono ubrzanje bi tada iznosilo

$$\omega = G \frac{a}{r} \text{ rad s}^{-2} \quad (6.12)$$

Obrtni moment koji predstavlja ugaono ubrzanje je bi iznosio

$$T = I x G \frac{a}{r} \quad (6.13)$$

gde I označava moment inercije rotora motora. Kombinovanje ove jednačine sa jednačinom 6.10, koja rezultira silom na točkovima neophodnom za stvaranje sile ugaonog ubrzanja (F_{ua}), predstavlja rešenje problema.

$$F_{\omega a} = I x \frac{G}{r} x G \frac{a}{r} \rightarrow F_{\omega a} = I \frac{G^2}{r^2} a \quad (6.14)$$

Konstante obično imaju vrijednosti od 40 za G/r i $0,025 \text{ kgm}^2$ za moment inercije I . Često se ispostavlja da je moment inercije motora nepoznat pa bi u ovim okolnostima, pristojna aproksimacija bila izostavljanje sile F_{ua} i u jednačini 6.9 povećati masu za 5%.

Vodeći se do sad navedenim dejstvom sila sa slika 6.1 i 6.2 ukupna vučna sila vozila bi bila kumulativni zbir svih sila koje djeluju na vozilo u pokretu.

$$F_t = F_{xrr} + F_{aero} + F_h + F_a + F_{\omega a} \quad (6.15)$$

Treba da budemo svesni da ako automobil usporava, F_a i F_{ua} će biti negativni, dok F_h će biti negativan ako se vozilo kreće naniže.

6.2. Ubrzanje vozila

Da podsjetimo, ugaona brzina motora zavisi od prenosnog odnosa G i poluprečnika pogonskog pneumatika r . Maksimalni obrtni moment elektromotora je već predstavljen u poglavlju 4 kao vrlo jasna funkcija ugaone brzine. Maksimalni obrtni moment je obično konstantan pri malim brzinama sve dok brzina motora ne dostigne kritičnu vrijednost ω_c , u kom trenutku obrtni moment T opada. Obrtni moment vozila koji sadrži DC elektromotor sa permanentnim magnetima se linearno smanjuje kako brzina raste. U većini drugih tipova motora, obrtni moment se smanjuje na način koji održava snagu konstantnom. Za uslov:

$$\omega < \omega_c \quad \text{ili} \quad v < \frac{r}{G} \omega_c \quad (6.16)$$

tada je $T = T_{max}$. Kada se prođe ova faza konstantnog obrtnog momenta, to je $u \geq u_c$, tada je ili snaga konstantna (jednačina 6.17)³⁶ ili obrtni momenat opada (jednačina 4.13).

$$T = \frac{T_{max}\omega_c}{\omega} = \frac{T_{max}r\omega_c}{Gv} \quad (6.17)$$

$$T = T_0 - k\omega \quad (6.18)$$

Kada se jednačina 6.11 zamijeni za ugaonu brzinu

$$T = T_0 - kv\frac{G}{r} \quad (6.19)$$

Sada možemo kombinovati jednačine koje su nam potrebne da bismo odredili ubrzanje vozila pa jednačina vučne sile motora postaje razvijena za vozilo na ravnom terenu sa prosječnom gustinom vazduha $1,25 \text{ kg/m}^3$ u Crnoj Gori³⁷

$$F_t = \mu_{rr}mg + 0,625 AC_d v^2 + ma + I\frac{G^2}{\eta_g r^2}a \quad (6.20)$$

prilikom čega možemo primijeniti diferencijalnu jednačinu prvog reda za ubrzanje vozila i zamijeniti F_{te} iz jednačine 6.10

$$T\frac{G}{r} = \mu_{rr}mg + 0,625 AC_d v^2 + (m + I\frac{G^2}{\eta_g r^2})\frac{dv}{dt} \quad (6.21)$$

Pod uslovom da su sve konstante poznate ili da se mogu zaključiti sa razumnom tačnošću ova diferencijalna jednačina će dalje biti korišćena u Matlab simulaciji ubrzanja elektromobila. Da biste kreirali simulacioni kod i izračunali ubrzanje vozila u Matlabu koristeći potrebne jednačine, morate imati informacije o masi vozila, potisku motora, otporu kotrljanja i aerodinamičkom otporu. Ove informacije mogu prikupiti senzori vozila ili drugi izvor.

Matlab kod za izračunavanje ubrzanja može imati puno opcija koje su detaljno opisane u raznim literaturama. Autor Rajamani sa svojim saradnicima se u svojoj literaturi [53] detaljno bavi

³⁶ Kao kod većine motora bez četkica.

³⁷ Više o tome na linku <https://www.skybrary.aero/articles/international-standard-atmosphere-isa>.

mnogim temama vezanim za dinamiku i kontrolu vozila, uključujući i izračunavanje ubrzanja u tri komponente: ubrzanje u longitudinalnom smjeru, ubrzanje u transvenzalnom smjeru i ubrzanje u smjeru rotacije. Knjiga daje detaljne informacije o svakoj od ovih komponenti sa smjernicom kako dobiti krajnje rezultate. Jedna od glavnih teza letarature [99] autora Genta obrađuje uticaj različitih faktora na ubrzanje vozila kao što su gume, trenje, aerodinamički otpor i slično. On objašnjava kako se uticaj ovih faktora može modelovati kroz različite algoritme i metode za analizu podataka i kako se mogu koristiti za izračunavanje ubrzanja. Slično Genti, autori literature [54] Laurence i Gerdes , obrađuju uticaj različitih faktora na ubrzanje vozila s detaljnim informacijama o korišćenju različitih tehnika kontrole ubrzanja i brzine vozila kroz serijski kaskadni model složenosti kombinacijom NMPC (*en.-Nonlinear Model Predictive Control*) [55]. Razvijene su različite metode za planiranje i kontrolu vozila u realnom vremenu kao što je metoda za aproksimiranja podataka i rešavanja zadataka kroz sistem programske petlje.

6.3. Ciklusi vožnje za modelovanje opsega elektromobila

Jedan od važnih problem kod elektromobila je njihov ograničen domet i kao takav je usko povezan sa efikasnim skladištenjem električne energije. Ovo predstavlja vrlo važnu stavku i mora se uzeti u obzir prilikom dizajniranja bilo kojeg EV-a. Postoje dva različita proračuna od kojih je jedan simulacija konstantne brzine što zapravo predstavlja najjednostavniji način, dok drugi uključuje vožnju automobila kroz profil stalno promjenljivih brzina, bilo u stvarnom životu ili u kompjuterskoj simulaciji. Nijedno vozilo se nikada ne vozi konstantnom brzinom što znači da je drugi oblik testiranja korisniji. Ciklusi su dizajnirani da odgovaraju stvarnim obrascima vožnje u različitim okolnostima zahvaljujući savremenim kompjuterskim algoritmima.

Ciklusi vožnje su prvenstveno razvijeni da obezbijede tačan i praktičan test za emisiju izduvnih gasova automobila. Postoje više različitih ciklusa vožnje kreiranih u Matlabu. Najznačajnije od njih možemo sortirati kao:

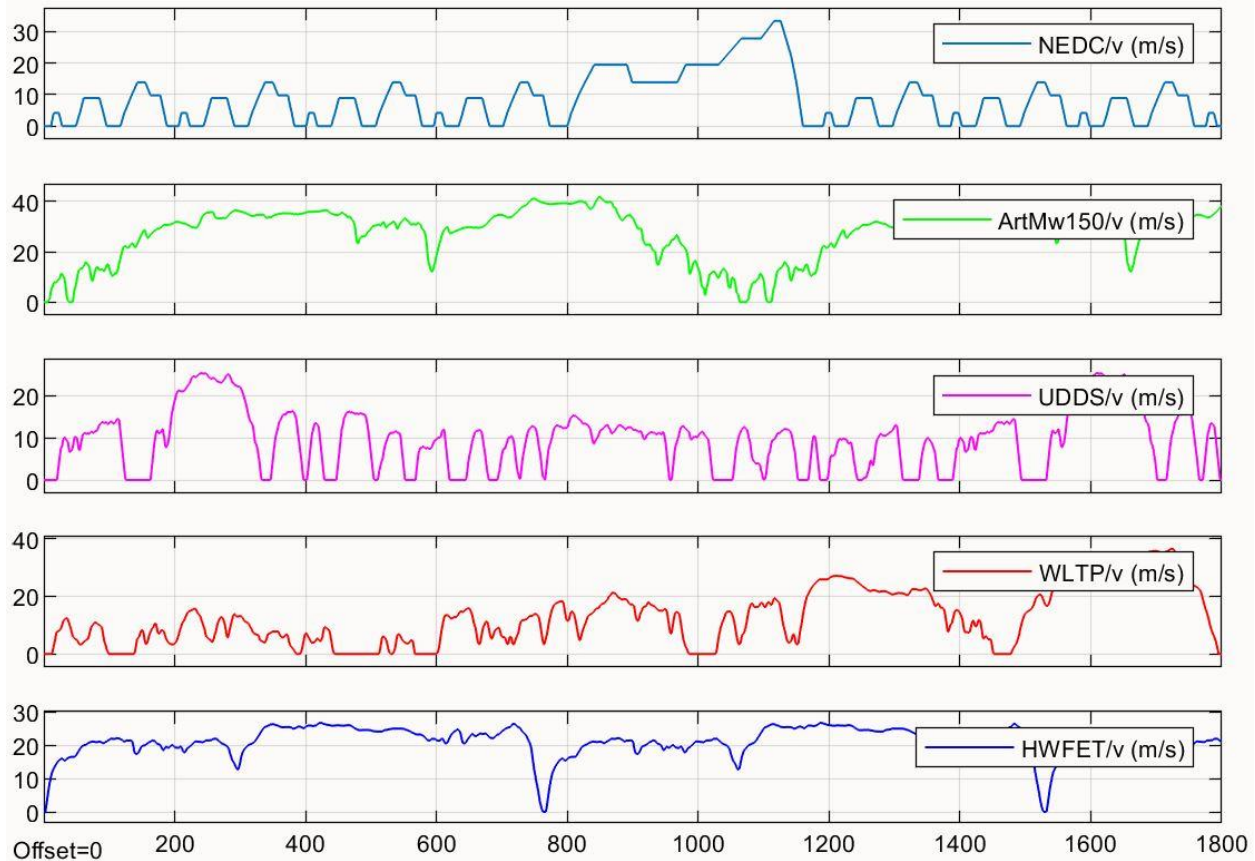
- LA-4 ciklus vožnje;
- US06 ciklus vožnje;
- ECE-15 ciklus vožnje;
- FTP-75 ciklus vožnje i slično.

Razvoj federalnog rasporeda gradske vožnje, (*en.the Federal Urban Driving Schedule- FUDS*)³⁸ odnosno ciklusa poznatijeg kao **LA-4** je bio zasnovan na stvarnim obrascima saobraćaja u Los Anđelesu. Postoji i ciklus *SFUDS*, koji je komprimovana verzija ovog ciklusa sa samo 360 tačaka/podataka u 360 sekundi. Ovi ciklusi repliciraju vožnju u gradovima, dok se neki drugi ciklusi koriste za prikaz vangradske vožnje ili na autoputu. Dva značajna primjera za ovo su standard **US06** (*en.Supplemental Federal Test Procedure*), koji je moderniji i češće se koristi, i Federalni raspored vožnje na autoputu, ili **FHDS** (*en.Federal Highway Driving Schedule- FHDS*)³⁹. Ciklusi na evropskoj sceni često imaju periode neprekidnog ubrzanja i stalne brzine i poznatiji su kao ciklus **ECE-15**, međutim zbog tačnosti simulacije i rezultata poželjno je da on bude uparen sa ciklusom vangradske vožnje (**EUDC**), koji ima maksimalnu brzinu od 120 km/h. Literatura [56] pruža sveobuhvatne opise svih ovih ciklusa vožnje, uključujući statističke podatke kao što su dužina ciklusa vožnje, ukupna dužina sekcije, brzine sekcije, procenti i grafički prikazi podataka, što se sve može dobro iskoristiti u obradi podataka i simulaciji modela u Matlab.

Neki od ovih ciklusa vožnje su prikazani na slici 6.3. Ciklus koji je nama interesantan za razvoj simulacije je **FTP-75** (*en.Federal Test Procedure 75- FTP-75*) ciklus koji ćemo koristiti u Matlab simulacionom programu za testiranje našeg vozila. Osim toga postoje još i **UDDS** (*en.Urban Dynamometer Driving Schedule- UDDS*), **WLTC** (*en.World Light-Duty Test Cycle- WLTC*) i mnogi drugi.

³⁸ Više o tome na: <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules>

³⁹ U nekim literaturama je predstavljen pod imenom HWFET (*en.Highway Fuel Economy Test*).



Slike 6.3 Podaci simulacije vožnje koje generiše Matlab Simulink koriste se u raznim automobilskim aplikacijama.

Matlab nudi brojne opcije za kreiranje ciklusa vožnje, od kojih je jedna od najčešćih da opiše brzinu i ubrzanje ciklusa kao funkciju vremena. Tačke u ciklusu vožnje mogu se generisati korišćenjem više različitih funkcija, iako su *linspace* i *interp1* najčešće. Kada se to uradi, funkcije poput *diff* i *trapz* mogu se koristiti za određivanje brzine i ubrzanja vozila. Ovo je samo ilustracija ciklusa vožnje FTP-75 i ne izvodi se sa istim nivoom preciznosti kao pravo testiranje vozila. Da bi ostali na pravom putu, moramo da iskoristiti stvarne podatke o brzini i trajanju iz FTP-75 testova. Tokom ciklusa vožnje, kod u prilogu 6.1 će generisati dva grafika, jedan za brzinu i jedan za ubrzanje. Bitno je napomenuti da su brojevi brzine koje smo naveli samo tačke i da se interpolacija koristi za izgradnju linije između tačaka, što može dovesti do odstupanja od preciznog ciklusa.

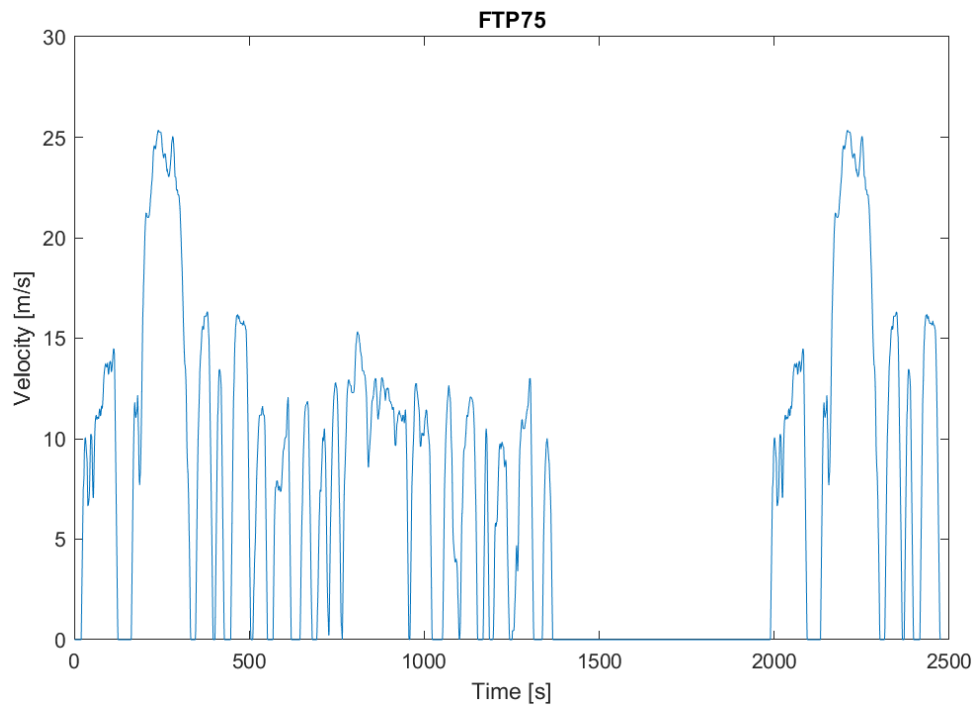
```
time = [0:1:600];
```

```
speed = [0, 13, 43, 55, 61, 61, 75, 80, 75, 53, 35, 0];
```

(P:6.1)

```
X = 0:length(speed)-1;
speed = interp1(X, speed, time);
acceleration = diff(speed) ./ diff(time);

figure
subplot(2,1,1);
plot(time, speed)
xlabel('Vrijeme [s]')
ylabel('Brzina [m/s]')
subplot(2,1,2);
plot(time(1:end-1), acceleration)
xlabel('Vrijeme [s]')
ylabel('Ubrzanje [m/s^2]')
title('Grafik brzine i ubrzanja tokom ciklusa vožnje')
```



Slike 6.4 Podaci simulacije ciklusa vožnje FTP75 signala u Matlab Simulink-u

7. Predloženi simulink model predikcije energije

Kada je u pitanju tačno predviđanje količine energije koju koriste elektromobili, tada model za predikciju potrošnje električne energije predstavlja neprocjenjiv resurs. Ovakvi modeli se koriste u procesu projektovanja, optimizacije i razvoja elektromobila. Pored toga, koristi se u procesu planiranja i upravljanja rute puta putovanja. Model predviđanja energije se obično sastoji od matematičkih jednačina, koje smo opisali u prethodnom dijelu rada i koje se koriste za izračunavanje potrošnje energije na osnovu različitih parametara uključujući brzinu, uspon, aerodinamički otpor, masu vozila i snagu motora. Obično se ove jednačine izvode korišćenjem podataka o performansama i karakteristikama EV-a, kao i podataka o okruženju u kojem se vozilo planirano kreće. Dodatno, proizvođači EV-a su u mogućnosti da poboljšaju efikasnost sistema za punjenje svojih vozila, kao i dometa svojih vozila, korišćenjem modela za predikciju energije. Ovo omogućava proizvođačima da optimizuju performanse vozila. Na primjer, model se može koristiti za predikciju količine energije koja će biti potrošena u zavisnosti od rute predstojećeg putovanja kako bi se izračunao broj putovanja koji će biti izvodljiv sa jednim ili nekoliko punjenja baterije.

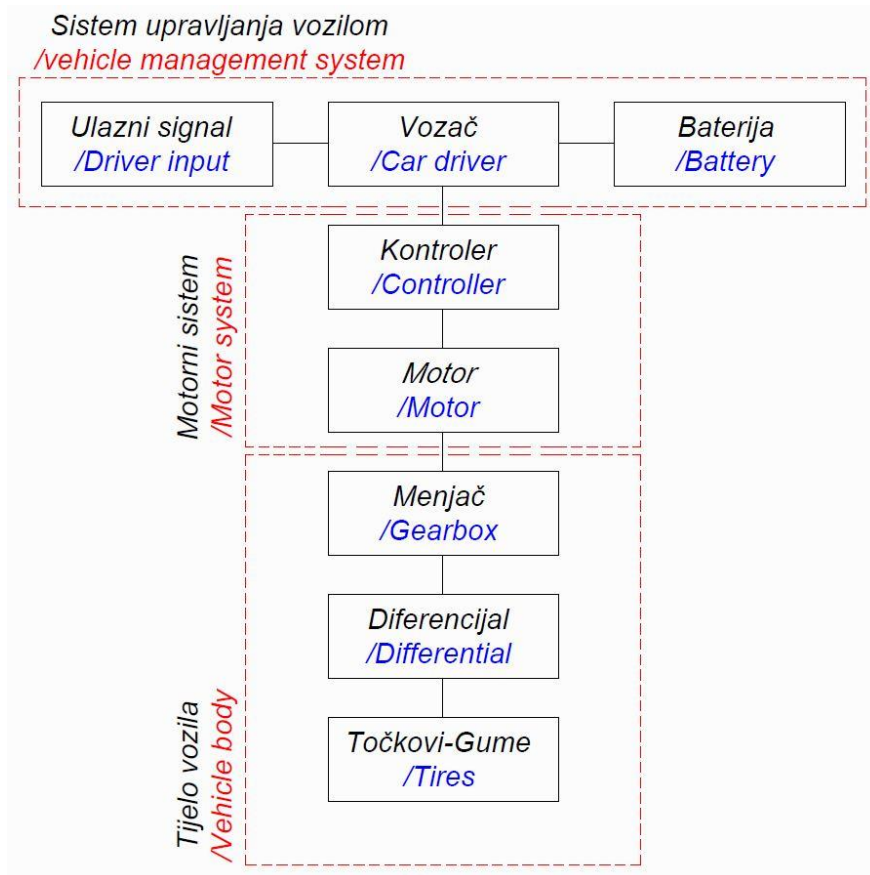
U ovom poglavlju biće opisana simulacija elektromobila marke „Tesla Model S“ pomoću simulacionog programa Matlab Simulink. Simulacijom prikazuje kretanje vozila određenom (zadatom) brzinom po horizontalnoj i kosoj ravni, i na osnovu toga je prikazan grafik potrošnje baterije kao i preostalog kapaciteta energije u njoj. Pored navedenog prikazani su još neki određeni grafici i podaci napona i struje na bateriji prateći tok same simulacije. Opis cjelokupne simulacije je praćena opisom blokova kroz koje prolazimo tokom konstruisanja simulacione šeme. Simulacijom nije obuhvaćeno:

- promjena pravca vozila u pokretu na lijevo ili desno skretanje - što znatno ne utiče na samu preciznost simulacije;
- vremenske/atmosferske prilike u kojima vozač upravlja svojim autom i imaju određen značaj na SoC;
- potrošnja baterije korišćenjem multimedijalne i senzorske elektronike;
- gustina toka saobraćaja.

Gore navedene teze drastično ne umanjuju preciznost simulacije ovog tipa, što će detaljnije biti objašnjeno u analizi rezultata simulacija (poglavlje 8).

7.1. Napredna modelovanja performansi elektromobila kroz Simulink

Modelovaćemo EV koristeći Matlab alat za simulaciju i njegove Simulink blok funkcije. Ovo će nam omogućiti da vidimo stanje napunjenosti SoC-a elektromobila, kao i njegov preostali opseg SoH. Da bismo izvršili simulaciju, tj. predikciju potrošnje električne energije elektromobila u Matlabu, prvo moramo da imamo fundamentalno razumijevanje blok dijagrama koji opisuje kako EV funkcioniše.



Slika 7.1 Osnovni blok dijagram funkcionisanja EV-a u tri cjeline

Osnovno pitanje je, kako se može izgraditi put do simulacije? Za početak, moramo da opišemo naš metod, koji uključuje davanje opisa potrebnih blok dijagrama. Simulacija djelova motornih vozila je jedna od mnogih simulacija koje se mogu uraditi u Matlabu, a značajna je za ciljeve ovog rada. Da bi se pokrenula simulacija, prvo što treba uraditi je ugraditi blok koji predstavlja karoseriju vozila i gume. Ovaj blok će zatim specificirati diferencijal u zupčanicima kao i sve druge relevantne podatke koji se odnose na sam sklop automobila. Drugo pitanje je pozicioniranje kontrolera i motora u blok dijagramu koji predstavlja simulaciju. Nakon toga bi trebalo da se

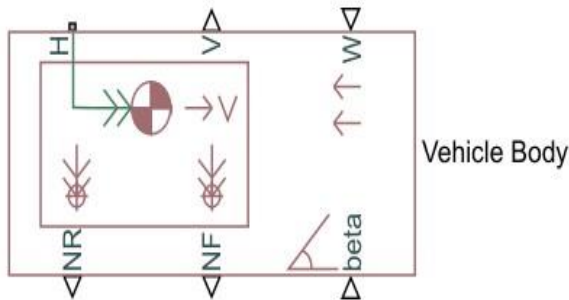
prikaže blok koji imitira vozača. Ovaj blok treba da reguliše ciklus vožnje, odnosno količinu gasa koju vozač unosi.

Za početak, trebaće nam motor koji može da obezbijedi određenu snagu i obrtni moment. Ovaj obrtni moment će biti poslat u menjač, gde će biti umnožen prije nego što se prenese na diferencijal. Diferencijal je tačka u kojoj se obrtni moment isporučuje na gume.

Pošto vozač ne preuzima kontrolu nad automobilom tokom ove vrste testiranja ili simulacije vozila na isti način kao u stvarnom svijetu, važno je da se napravi kontroler kojem će biti dodijeljena vrsta vožnje i koji će upravljati sam motor. Podrazumijevani kontroler će se napajati baterijama, međutim takav tip napajanja ne može biti direktan jer bi rezultirao neregulisanim napajanjem, što bi nas spriječilo da kontrolišemo brzinu kontrolera. Baterije će se koristiti za napajanje podrazumijevanog kontrolera. Neophodno je imati simulator ulaza vožnje koji je analogan kontroleru da bi kontroler pravilno radio kada je usmjeren na motor automobila. Ideja unosa drajvera u Matlab simulatoru je da imate virtuelnog drajvera sa naredbama kao što su gas i kočnica. Nakon što se signal pretvori, kontroler signala će onda dati taj signal motoru, i ovo predstavlja ukupni blok dijagram.

I dio:

Prvo ćemo definisati blok karoserije našeg vozila (*Vehicle Body*). To je dio softvera koji može da modeluje dinamiku vozila, kao što su njegova masa, moment inercije i koeficijent trenja. Mogu se opisati i dodatne karakteristike koje utiču na dinamiku vozila, kao što su koeficijent uspona i otpora izazvani aerodinamičnim silama. Pruža mogućnost drugim blokovima simulacije, kao što su *Engine*, *Transmission* ili *Tire*, mogu biti pričvršćeni za blok *Vehicle Body* i na taj način pojačaju simulaciona svojstva pogona, transmisije, odnosno guma. Ovaj blok se takođe može koristiti za repliciranje brojnih okolnosti, kao što su vožnja po ravnom putu, vožnja po krivudavom putu, kočenje ili ubrzanje. Ovaj simulacioni blok označava razne slučajeve vozila, tako da ovdje postoji šest izvoda koje smo predstavili slikom 7.2



- NR – Normalna sila zadnje osovine
- NF – Normalna sila prednje osovine
- Beta – Ugao nagiba puta
- H – Horizontalno kretanje
- V – Uzdužna brzina
- W – Brzina vjetra

Slika 7.2 Simulaciona blok karoserije vozila u Matlab Simulink-u

Blok karoserija dvoosovinskog vozila koja se kreće u uzdužnom pravcu moguće je da ima isti ili različiti broj točkova na svakoj osovini. Ilustracije radi, mogu biti dva točka na prednjoj osovini i jedan točak na zadnjoj osovini. Očekuje se da svi točkovi vozila imaju isti prečnik. Težište vozila (CG) može se alternativno nalaziti na, ispod ili u istoj ravni sa površinom za vožnju.

Ako pogledamo sliku 6.1 možemo vidjeti da vozilo ima osovine koje su poređane paralelno jedna prema drugoj, stvarajući ravan. Ova ravan sadrži uzdužni pravac 'x', koji je okomit na ose i ide duž ove ravni. Normalni pravac, ili pravac 'z', nije paralelan sa gravitaciom kada se vozilo kreće uzbrdo, nego je uvijek upravno na uzdužnu ravan ose. Slijede varijable modela kretanja vozila koje se koriste za Tesla Model S električnog vozila, kao što je prikazano na slici 6.1 i tabeli 7.1:

Tabela 7.1. Skraćeniće promjenljivih vrijednosti modela kretanja vozila EV Tesla Model S

Simbol	Legenda
g	- gravitaciono ubrzanje
β	- ugao nagiba terena
m	- masa vozila
h	- Visina težišta vozila (CG) iznad zemlje
a, b	- udaljenost prednje i zadnje osovine, od normalne tačke projekcije vozila CG
V_x	- brzina vozila ($V_x > 0$ vozilo se kreće napred; $V_x < 0$ vozilo se kreće unazad)
n	- broj točkova po osovini
F_{aero}	- sila usled otpora vjetra
F_{xrr}	- sila otpora kotrljanja točkova (F_{xf} - prednjih ; F_{xr} zadnjih točkova)
F_{zf}, F_{zr}	- Normalne sile opterećenja na svakom točku na prednjoj i zadnjoj tački kontakta
F_h	- Normalna sila vozila na poflogu
F_t	- Vučna sila
A	- Efektivna površina poprečnog preseka prednjeg vozila
C_d	- Aerodinamički koeficijent otpora
ρ	- Gustina mase vazduha

Priloženi dio koda P 7.1 simulira karoseriju vozila koristeći promjenljive za masu, koeficijent otpora i prednju površinu. Prvo, sila otpora se izračunava uzimajući u obzir koeficijent otpora, brzinu i površinu prednjeg dijela. Zatim, ubrzanje se izračunava računanjem i sile potiska i sile otpora. Na kraju se razvija izlazna struktura koja je odgovorna za ograničavanje ubrzanja i sile otpora vazduha.

```
input.velocity = constant;

input.thrust = constant;

mass = constant;

drag_coef = constant;

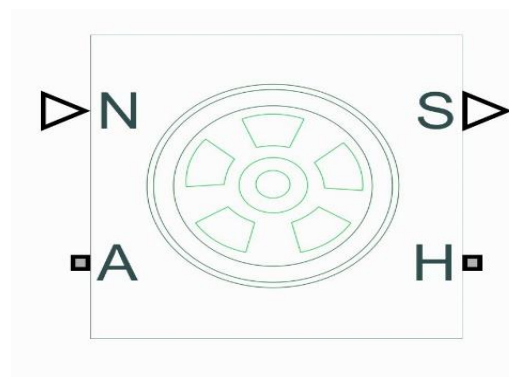
front_area = constant;

output = vehicle_body(input,mass, drag_coef, front_area);

function output = vehicle_body(input,mass, drag_coef, front_area)
    drag_force = 0.5 * drag_coef * input.velocity^2 * front_area;
    acceleration = (input.thrust - drag_force) / mass;
    output.acceleration = acceleration;
    output.drag_force = drag_force;
end
```

(P:7.1)

Naredni korak je postavljanje simulacionih pneumatika. Pošto ima četiri izlazna porta, blok simulacije pneumatika (*Magic Formula*) biće najkorisniji u našem Simulink modelu. Ovaj blok modeluje gumu sa uzdužnim ponašanjem tj. uzdužni smjer gume jednak je pravcu kretanja dok se okreće po kolovozu. Ovaj blok je strukturna komponenta zasnovana na bloku *Tire-Road Interaction*. Izvodni priključci predstavljaju:



- A - osovinu na kojoj je guma postavljena.
- H - komponenta točka koja je odgovorna za prenos sile koju vrši guma na druge dijelove vozila.
- N - prima ulaz normalne sile koja djeluje na gumu preko fizičkog signala.⁴⁰
- S - pruža fizički signal koji uključuje proklizavanje gume koje je izmjereno dok je simulacija bila u toku..

Slika 7.3 Simulaciona blok gume vozila u Matlab Simulink-u

Na slici 6.1 su prikazane sile koje djeluju na gumu. Ovaj blok predstavlja model gume kao krutu kombinaciju točak-guma u dodiru sa putem i podložnom klizanju. Kada se obrtni momenat pojavi osovini točka, guma se “gura“ o tlo (dok je takođe izložena kontaktnom trenju), a sila koja se vraća točku kao rezultat ovog odgovora poznata je kao sila reakcije. Točak se pomjera naprijed ili nazad u zavisnosti od toga da li je i koja akcija preduzeta. Kada se opterećenje primijeni na gumu koja ima uključenu opcionu usklađenost pneumatika, guma će se takođe fleksibilno deformisati. Blok guma, koji će biti korišćen u ovom Simulink modelu, isključivo razmatra kretanje u uzdužnom pravcu, ne uzima u obzir kretanje tipa u bočnom pravcu.

Priloženi Matlab P:7.2 kod je implementacija takozvanog *Magic Formula* simulacionog bloka koji se koristi za izračunavanje sila i obrtnih momenta koji djeluju na gume. Funkcija uzima tri argumenta kao ulaz: „*alfa*“, koji predstavlja ugao nagiba gume, „*Fz*“, koji predstavlja vertikalnu silu, i „*params*“, koji predstavlja parametre gume kao strukturu podataka objašnjenih u tabeli 7.2 (*Cx*, *Cy*, *Dx*, *Dy*, *Ex*, *Ey*, *Shx* i *Shy*). Postoje tri izlazna parametra koje vraća funkcija bloka simulacije, a to su *Fx* koji predstavlja uzdužnu silu, *Fy* predstavlja bočnu silu i *Mz* predstavlja obrtni momenat prilikom okretanja točka. U ovoj funkciji *Magic Formula*, matematički model rada pneumatika koji se sastoji od sinusoidnih funkcija i arkustangens funkcija je osmišljen kako bi simulirao performanse guma sa većom preciznošću od pristupa neke druge funkcije.

```
function [Fx, Fy, Mz] = magic_formula(alpha, Fz, params)
```

```
Fx = params.Cx * sin(params.Ex * atan(params.Dx * (alpha + params.Shx)));
```

(P:7.2)

```
Fy = params.Cy * sin(params.Ey * atan(params.Dy * (alpha + params.Shy)));
```

⁴⁰ Kada normalna sila djeluje nadolje na gumu i pritiska je na put, to ukazuje na pozitivnu vrijednost za normalnu silu.

$Mz = Fz * \text{params.Dy} * \cos(\text{params.Ey} * \text{atan}(\text{params.Dy} * (\text{alpha} + \text{params.Shy})));$

End

Tabela 7.2. Objašnjenje parametara i funkcija priloženog koda 7.2

Objašnjenje	
<i>Alpha</i>	- nagib kretanja
<i>Fz</i>	- vertikalno opterećenje
<i>Params</i>	- parametri guma
<i>Cx</i>	- Uzdužni koeficijent
<i>Cy</i>	- bočni koeficijent
<i>Dx</i>	- koeficijent uzdužnog pritiska
<i>Dy</i>	- koeficijent bočnog pritiska
<i>Ex</i>	- koeficijent uzdužnog skretanja
<i>Ey</i>	- koeficijent bočnog skretanja
<i>Shx</i>	- faktor uzdužnog pomjeranja
<i>Shy</i>	- faktor bočnog pomjeranja
Objašnjenje	
<i>Fx</i>	- uzdužna (longitudinalna) sila
<i>Fy</i>	- bočna (lateralna) sila
<i>Mz</i>	- obrtni momenat kretanja gume

Sledeći potez koji je potrebno uraditi je menjački pogon i diferencijal. Dva bloka koja se koriste u simulaciji sistema prenosa u Matlab Simulink-u se nazivaju "*Simple Gear*" i "*Differential*". Blok:

- *Simple Gear* ilustruje jednostavnu vezu prenosa između dva obrtna kola u simulacionom modelu. Uz njegovu pomoć ovdje se ostvaruje simulacija prenosnog odnosa između dvije komponente u prenosnom sistemu. Ovaj blok kao ulazne varijable prima obrtni moment i broj obrtaja u minuti i na izlazu daje broj obrtaja u minuti. Ulazni obrtni momenat se množi prenosnim odnosom kao npr. 5:1, što je parametar koji se postavlja, a zatim se broj obrtaja izlaznog kola izračunava dijeljenjem rezultujućeg izlaznog momenta sa momentom inercije izlaznog kola. Ulazni obrtni momenat se množi sa prenosnim odnosom.

`function output_speed = simple_gear(input_torque, input_speed, gear_ratio, output_inertia)` (P:7.3)

```

input_torque = const.;

input_speed = const.;

gear_ratio = const.;

output_inertia = const.;

output_speed = (input_torque * gear_ratio) / output_inertia;

end

```

- *Differential* simulira način na koji diferencijal vozila funkcioniše. To je sistem koji omogućava točkovima koji su pričvršćeni za istu osovinu da se okreću različitim brzinama. Ovaj blok za ulaz prihvata broj obrtaja lijevog i desnog kola i na izlazu vraća broj obrtaja izlaznog kola. Razlika između ulaznih obrtaja se dijeli sa 2 da bi se dobili obrtaji izlaznog kola.

```

left_speed = const.;

right_speed = const.;

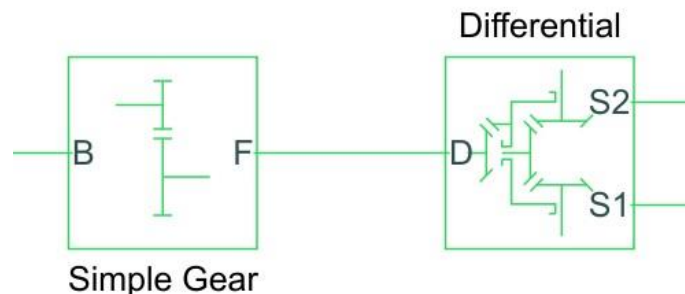
output_speed = (left_speed - right_speed) / 2;

disp(output_speed);

```

(P:7.4)

Ovi kodovi su primjeri koji pokazuju jednostavne načine da se funkcionalnost ovih simulacionih djelova primijeni u praksi. Treba ih modifikovati tako da budu primjenljivi na određene okolnosti, a takođe bi mogli imati koristi od dodavanja dodatnih karakteristika i/ili fizičkih procesa. Oba ova gradivna bloka su jednostavna za konfigurisanje i koriste se u širokom spektru uključujući sisteme prenosa za vozila, i druge tipove sistema prenosa.

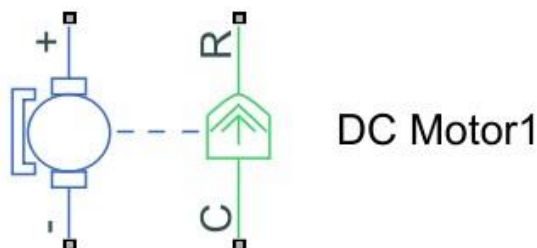


Slika 7.4 Simulaciona blok prenosnog sistema vozila u Matlab Simulink-u

Na ovaj način smo predstavili prvi dio bloka pristupa ka simulaciji EV, tj. prikaz karoserije i guma (vidi sliku 7.1).

II dio:

Drugi dio je postavljanje blok šema motora i kontrolera. Koristićemo jednosmjerni (DC) motor radi jednostavnosti simulacije. Matlab Simulink uključuje model električnog motora koji se naziva *DC Motor*. Ovaj blok daje modele električnih i mehaničkih svojstava DC motora, kao što su otpori i induktivnosti statora i rotora; kao i brzina, obrtni momenat i snaga motora. Detaljnije o tome smo govorili u poglavlju 4.2. Blok simulacije DC motora takođe uključuje izbore za kontrolu brzine motora, uključujući PWM kontrolu preko simulacionog bloka *Controlled PWM Voltage* i kontrolu fiksnog napona. Pored toga, blok motora jednosmjerne struje ima sposobnost da imitira rezultate preopterećenja kao i pregrijavanja. Unosom adekvatnih promjenjivih možete da prilagodite njegove karakteristike tako da odgovaraju vašem određenom DC motoru. Ovi parametri uključuju otpor, induktivnost i EMF.



Slika 7.5 Simulaciona blok elektromotora vozila u Matlab Simulink-u

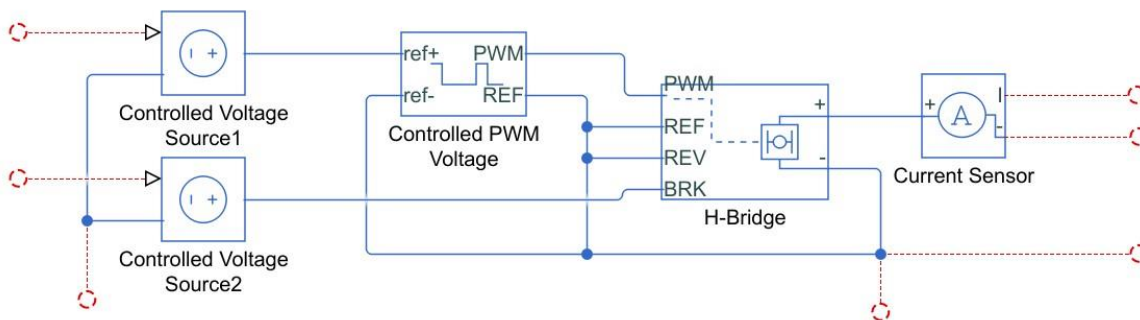
Simulacioni PWM generator blok u Matlab Simulink-u se može koristiti za regulisanje brzine jednosmjernog motora. Ovaj blok je odgovoran za proizvodnju signala modulacije širine impulsa, koji se zatim primjenjuje na DC motor da bi regulisao njegovu brzinu. Signal modulacije širine impulsa se sastoji od ciklusa koji su uvijek iste dužine. U okviru svakog ciklusa postoji period u kome je signal „1“ (visoka frekvencija), a postoji i vrijeme u kome je signal „0“ (niska frekvencija). Količina vremena provedenog u stanju "1" u odnosu na stanje "0" u PWM signalu se naziva "Širina impulsa" i koristi se za kontrolu brzine DC motora. Ako je širina impulsa veća, motor će se rotirati brže, dok ako je širina impulsa manja, motor će se rotirati sporije.

U mogućnosti ste da odredite frekvenciju PWM signala, širinu impulsa i razne opcije kontrole korišćenjem bloka *Controlled PWM Volatage* u Matlab Simulink-u. Neke od ovih opcija kontrole uključuju:

- promjenu brzine kroz ulaznu snagu;
- modifikaciju brzine unosom komandi;
- modifikaciju brzine putovanja putem unosa pratnje;
- podešavanje brzine na osnovu prethodno utvrđenih parametara.

Kada se PWM signal sa ovim blokom primijeni na elektroniku za kontrolu brzine DC motora, PWM signal se pretvara u napon ili struju koja se koristi za pokretanje i kontrolu brzine DC motora. Za direktan pogon motornog bloka ne koristimo samo kontrolisani PWM blok. Pogonski sklop PWM motora prekida krug između impulsa. Za pogon i upravljanje motornog bloka koristitimo blok polu mostnog upravljačkog programa koji se u Simulink-u naziva *H-Bridge*.

Pošto se napajanje motora može obrnuti sa ovim blokom, motor može da se rotira u bilo kom smjeru (pogledaj poglavlje 5). Pošto je motor ožičen na ovaj način, nema potrebe da se instalira mehanički prekidač da bi se kontrolisalo napajanje. Pored rada DC motora blok *H-Bridge* se može koristiti za regulisanje brzine i pravca reluktantnih motora.



Slika 7.6 Simulaciona blok kontrolnog sistema vozila u Matlab Simulink-u

Kada se kreće motor preko bloka H-Bridge, postavljamo prosječne parametre režima simulacije *Averaged* da bi ubrzali simulacije. Ovo primjenjuje prosjek zahtijevanog napona PWM na motor. Prosječni režim pretpostavlja da je impedansa induktivnog člana motora mala na frekvenciji PWM. Blok ima mogućnosti režima simulacije PWM-a na način što izlaz mosta je kontrolisani napon koji zavisi od ulaznog signala na PWM portu. Ako ulazni signal ima vrijednost veću od

vrijednosti parametra omogućuje prag napona, izlaz mosta je uključen i ima vrijednost jednaku vrijednosti parametra amplitude izlaznog napona. On će aktivirati prag napona ako blok održava krug opterećenja koristeći jednu od sledeće tri slobodno hodne alternative čija je vrijednost manju od vrijednosti parametra i to:

- preko jednog poluprovodničkog prekidača i jedne slobodne diode;
- preko dvije slobodne diode;
- preko dva poluprovodnička prekidača i jedne slobodne diode.

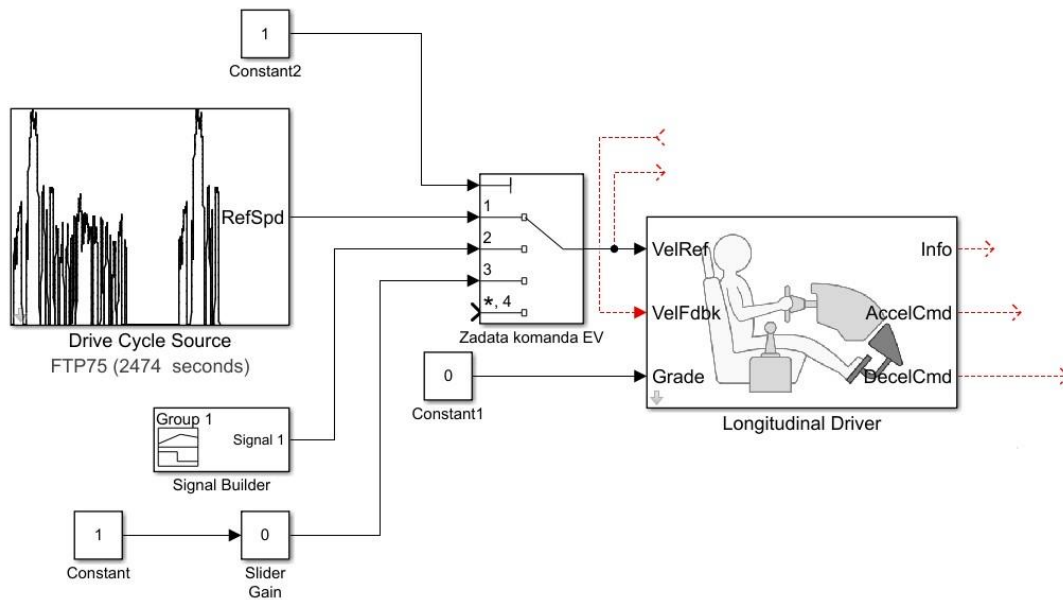
Prva i treća opcija se ponekad nazivaju sinhronim radom. Signal na *REV* portu određuje polaritet izlaza. Ako je vrijednost signala na *REV* portu manja od vrijednosti parametra napona reverznog praga, izlaz ima pozitivan polaritet, u suprotnom, ima negativan polaritet.

Struju motora ćemo izmjeriti pomoću simulacionog strujnog senzora *Current Sensor*. Takođe da bi prikazali vrijednosti u realnim vremenima potreban nam je konvertor kao što je bio slučaj i u prethodnom paragrafu.

Neophodno je imati na umu da će rezultati simulacije biti samo gruba procjena stvarnog ponašanja sistema. Štaviše, ove simulacije će uticati na ispravnost modela kao i na parametre koji su korišćeni.

III dio:

Ovaj dio kreiranja Matlab simulacije predstavlja pokretački program i njegove kontrole. Matlab Simulink sadrži komponentu poznatu kao *Longitudinal Driver* blok koja se može koristiti za oponašanje kretanja vozila naprijed i nazad. Ovo obuhvata i simulaciju brzine i ubrzanja vozila, kao i kontrolu brzine vozila preko regulatora brzine.



Slika 7.7 Simulaciona blok komandnog sistema vozila u Matlab Simulink-u

Ovaj upravljački simulator ima povratne informacije o referentnoj brzini od šest portova. Blok implementira uzdužni kontroler za praćenje brzine. Na osnovu referentnih brzina i povratnih informacija, blok generiše normalizovane naredbe za ubrzanje i kočenje koje mogu varirati od 0 do 1 (na osnovu njih podešavamo i vrijednosti u kontrolnim blokovima).

Sledeće komponente se često nalaze unutar ovog bloka:

1. Ulazni port za komandu brzine (*VelRef*): Ovaj port je odgovoran za prijem ulaznog signala koji predstavlja predviđenu brzinu vozila. Postoji mogućnost da se signal mijenja tokom vremena.
2. Ulazni port za trenutnu brzinu (*VelFdbk*): Ovaj port je odgovoran za prijem ulaznog signala koji predstavlja brzinu kojom se vozilo kreće u ovom trenutku. Tipično u realnim uslovima ovaj signal bi se dobijao preko senzora brzine koji se nalazi u vozilu.
3. Ulazni port za signal koji predstavlja ugao nagiba puta (*Grade*) i koji se koristi za simulaciju uticaja putanje na brzinu i ubrzanje vozila.
4. Izlazni port komande za ubrzanje (*AccelCmd*): Ovaj port je odgovoran za signal koji predstavlja potreban nivo ubrzanja za vozilo. U većini slučajeva, signal dobija regulator brzine.
5. Izlazni port komande za usporavanje (*DecelCmd*) koji šalje signal za željeno usporavanje vozila.

6. Izlazni port koji predstavlja signal podataka (*Info*): On može sadržati različite vrste podataka koje dobija od senzora, kontrolera ili nekih drugih komandi.

Longitudinal Driver često sadrži dodatne komponente kao što su: modelovanje brzine, ubrzanja, snage i kontrole vozila. Nakon određivanja signala koji će biti ulazni i izlazni, treba da se povežu blokovi i parametri koji će se koristiti tokom simulacije. Ovo će uključivati parametre za model vozila, koeficijente kontrolera i tako dalje. Treba znati da je ovaj opis podložan promjenama, jer se razlikuje ne samo od jednog projekta do drugog, već i od jedne implementacije do druge.

Na ovaj način možemo da koristimo različite pogonske cikluse što je jako bitno za simulaciju vožnje EV u realnom svijetu. Dodatak ovom dijelu je prekidač sa više priključaka (*Multiport Switch*) i on nam omogućava da se lakše možemo prebaciti između naših ulaza. Postavlja se pitanje kako ovaj prekidač radi? Blok Multiport Switch određuje koji od nekoliko ulaza u blok prelazi na izlaz. Blok zasniva ovu odluku na vrijednosti prvog unosa. Prvi ulaz je kontrolni ulaz, a preostali ulazi su podaci. Vrijednost kontrolnog ulaza određuje koji ulaz podataka prelazi na izlaz.

Unutar Matlab Simulink-a, blok *Drive Cycle Source* predstavlja blok koji se može koristiti za proizvodnju ulaznih signala za simulaciju vozila. Ovaj blok proizvodi signal koji predstavlja komandu brzine vozila na osnovu ciklusa vožnje koji je već podešen. Termin „ciklus vožnje“ odnosi se na skup tačaka vremena i brzine. Ove tačke se mogu definisati pomoću tabele ili datoteke, u zavisnosti od potreba krajnjeg korisnika. Dodatno, mogu se opisati dodatni aspekti ciklusa, kao što su nagib puta, simulacija zastoja, naprezanja snage vozila i slično. Za kreiranje komande brzine između dvije tačke pogonskog ciklusa, ovaj blok koristi interpolaciju tj. obrađuje signal komande brzine koji je prilično uglačen i uobličen. Osnovne karakteristike koje posjeduje ovaj simulacioni blok su:

- sposobnost da generiše širok spektar ciklusa vožnje, uključujući gradski ciklus, ciklus autoputa i niz drugih (detaljnije o tome smo govorili u poglavlju 6.3);
- mogućnost specificiranja različitih karakteristika ciklusa vožnje, kao što su početna i završna tačka ciklusa, kao i ukupno trajanje ciklusa;
- mogućnost definisanja parametara vozila kao što su masa vozila, koeficijent trenja i aerodinamički koeficijenti, između ostalog.

U simulaciji automobila, blok *Drive Cycle Source* se koristi za obezbjeđivanje ulaznih signala koji su tačni prikazi stvarnih situacija u vožnji. Zbog toga se simulacija vozila sada može učiniti realističnijom tako što će biti sličnija uslovima koji stvarno postoje.

Uključenjem izvora pogonskog ciklusa postavimo na poziciju prvog unosa *Multiport Switch* bloka. Blok pogonskog ciklusa generiše standardni ili korisnički zadati uzdužni ciklus pogona. Izlaz bloka je navedena uzdužna brzina vozila koju možete koristiti za:

- predviđanje obrtnog momenata motora i potrošnju goriva/energije koja su potrebna vozilu da bi postigla željenu brzinu i ubrzanje za datu referencu brzine;
- realne reference brzine i pomjeranja za komande za ubrzanje i kočenje zatvorene petlje za kontrolu vozila i modele opreme;
- podešavanje i optimizaciju kontrole vozila, performanse sistema i robusnost sistema tokom više ciklusa vožnje.

Obezbijeđen tačnim referencama za brzinu i pomjeranje za naredbe ubrzanja i kočenja u zatvorenoj petlji za kontrolu vozila i modele postrojenja, Matlab Simulink ima blok poznat kao blok za izgradnju signala *Signal Builder* koji se može koristiti za konstruisanje komplikovanih ulaznih signala za simulaciju. Koristeći ovaj blok, korisnik dobija mogućnost da razvija, uređuje i testira različite situacije signala unutar grafičkog okruženja. Količina vremena i vrijednost koju svaki odeljak zauzima može se individualno prilagoditi. Interpolacija se koristi za proizvodnju signala popunjavanjem praznina između pojedinačnih signalnih tačaka. Dodatno blok za izgradnju signala omogućava korisniku da promijeni parametre postojećeg signala, kao što su parametri vremena i vrijednosti, da doda ili ukloni segmente i da promijeni interpolaciju između tačaka. Testiranje signala bloka *Signal Builder* daje korisniku mogućnost da testira svoj signal u realnom vremenu, što znači da može da posmatra kako signal reaguje kada se simulira. Ovakav blok eliminiše potrebu za pisanjem koda pružajući korisniku grafički interfejs u kome mogu da generišu, uređuju i testiraju komplikovane signale.

U Matlab Simulink-u, blok poznat kao *Slider Gain* se može koristiti za obavljanje linearne transformacije na ulaznom signalu. Ovaj blok se koristi za regulisanje pojačanja signala, što je još jedan način da se kaže da se koristi za promjenu nivoa ulaznog signala. Nivo ulaznog signala može se povećati ili smanjiti zahvaljujući linearnoj transformaciji. Koristeći klizač koji se nalazi na bloku, pojačanje se može promijeniti. Displej bloka *Slider Gain* pruža mogućnost da se trenutno

pojačanje prikaže na samom bloku. Ovo omogućava korisniku da prati promjenu signala. Ujedno blok pruža korisniku klizač koji može linearno da prilagođava jačine ulaznog signala u realnom vremenu.

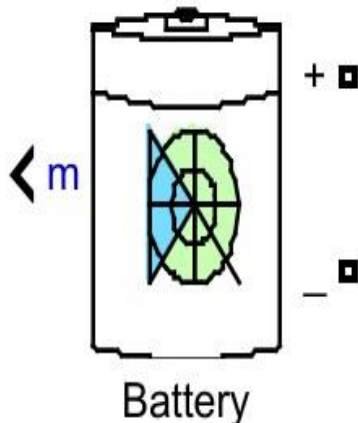
Ovo nije ništa drugo nego naša referentna brzina. Sada izlaz iz upravljačkog programa ima digitalne vrijednosti od 0 do 1. Zbog toga na izlazu treba postaviti konvertor. Treba koristiti izvor upravljačkog ili kontrolisanog napona. Matlab Simulink uključuje blok koji se naziva *Controlled Voltage Source* i koji se može koristiti za oponašanje kontrolisanog izvora napona. Ovaj blok je odgovoran za generisanje izlaznog signala koji predstavlja regulisani napon nakon što primi instrukciju o naponu. Blok kontrolisanog izvora napona dobija signal koji odražava potreban napon od korisnika u obliku komande ulaznog napona. Moguće je da komanda napona ostane konstantna ili da se mijenja tokom vremena. Blok izvora kontrolisanog napona koristi primjenu komande ulaznog napona kako bi se stvorio izlazni signal koji je reprezentativan za kontrolisani napon. Interpolacija između komandnih tačaka napona je ono što na kraju dovodi do generisanja izlaznog signala. Jedna definicija bloka kontrolisanog napona opisuje idealan izvor napona kao onaj koji je dovoljno robustan da zadrži konstantan napon na svom izlazu bez obzira na količinu struje koja prolazi kroz izvor. Ako pogledamo vrijednosti dobijene iz upravljačkog programa, vrijednost kontrolisanog napona će ležati između 0 do 1. Modelovanje električnih sistema, uključujući elektromotore, napajanje i druge slične komponente, zahtijeva korišćenje bloka kontrolisanog izvora napona. Omogućava generisanje izlaznog signala koji odgovara regulisanom naponu na osnovu komande ulaznog napona.

7.2. Kritička analiza energetske efikasnosti baterije elektromobila kroz

Simulink

Matlab-ova sposobnost da simulira sisteme baterija je omogućena uključivanjem paketa *SimPowerSystems*, koji sadrži blok simulacije *Battery*. Sistem baterija je prikazan kao ukupno skladište električne energije koje u zavisnosti od stanja napunjenosti ili pražnjenja, može da obezbijedi struju potrošačima ili da prima struju iz drugog izvora. Dodatno opcije uključene u ovaj blok mogu biti uticaji gubitka baterije u vidu otpor unutrašnje struje i zaštita od prenapona i na taj način podići nivo preciznosti simulacije. Ovaj tip bloka za simulaciju je koristan alat za razvoj, modelovanje i analizu sistema baterija. Takođe se može koristiti za procjenu radnih svojstava

baterije kao i uticaja koji ona ima na cjelokupni sistem. U ovom radu ovaj blok se koristi za modelovanje baterije kao uređaja za skladištenje električne energije.



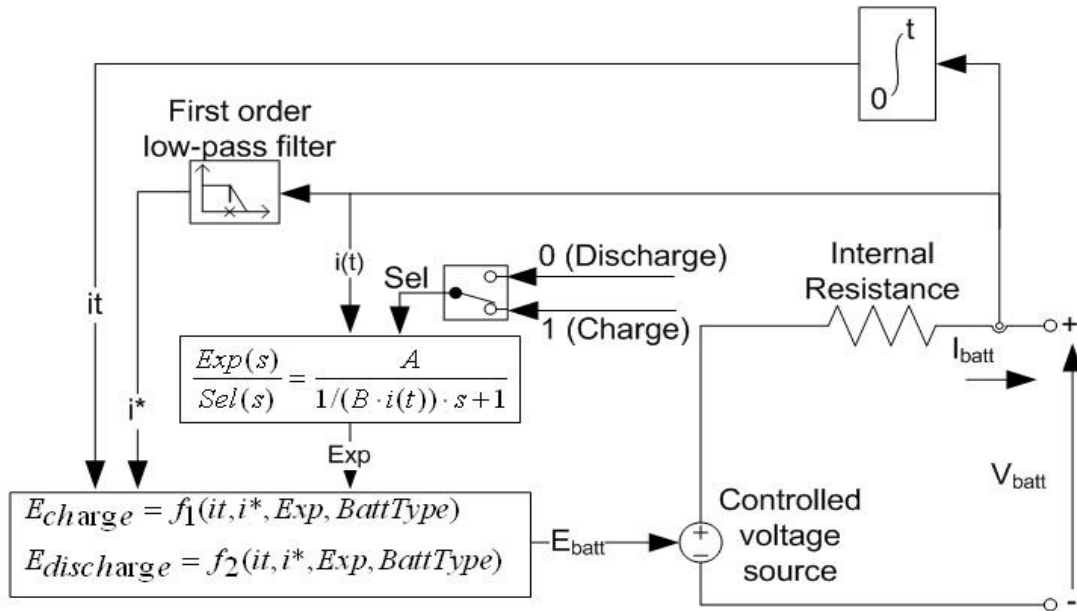
Slika 7.8 Simulaciona blok baterije vozila u Matlab Simulink-u

Osnovna karakteristika kojoj težimo kada koristimo simulacioni blok *Battery* u Matlabu je da procijenimo stepen napunjenosti koji baterija trenutno posjeduje odnosno opseg SoC. Ovo se postiže korišćenjem različitih karakteristika povezanih sa performansama baterije, kao što su trenutni kapacitet baterije, normalni kapacitet baterije i izlazna struja potrošača.

Tabela 7.3. Osnovni parametri *Battery* simulacionog bloka

Simbol	Legenda
Q_{nc}	- Kapacitet baterije // Normal Capacity (Ah)
R_i	- Otpornost unutrašnje struje // Internal resistance (Ohms)
V_n	- Napon baterije // Nominal voltage (V)
V_{oc}	- Radni napon // Open-circuit voltage (V)
Q	- Trenutni kapacitet // Current capacity (Ah)
V	- Trenutni napon // Current voltage (V)
I	- Izlazna struja // Current (A)

U dosad izgrađenom blok dijagramu treba umetnuti baterije elektromobila. Opšti dinamički model koji je parametrizovan da predstavlja najčešće tipove punjivih baterija (Li-ION) koristi se od strane baterijskog bloka i dijagram koji je predstavljen na slici 7.9 ilustruje kolo koje odgovara bateriji koju blok oponaša. Model koristi sledeće jednačine da bi predstavio tip litijum-jonske baterije:



Slika 7.9 Dinamički model baterije u Matlab Simulink-u

Model pražnjenja ($i^* > 0$):

$$f_1(i_t, i_*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - i_t} \cdot i_* - K \cdot \frac{Q}{Q - i_t} \cdot i_t + A \cdot \exp(-B \cdot i_t) \quad (7.1)$$

Model punjenja ($i^* < 0$):

$$f_2(i_t, i_*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{i_t + 0,1 \cdot Q} \cdot i_* - K \cdot \frac{Q}{Q - i_t} \cdot i_t + A \cdot \exp(-B \cdot i_t) \quad (7.2)$$

Tabela 7.4. Osnovni parametri dinamički model baterije simulacionog blok [57]

Simbol		Legenda
E_o	-	Konstantni napon
K	-	Konstanta polarizacije
i^*	-	Dinamička struja niske frekvencije
i	-	Struja baterije
i_t	-	Struja kapaciteta baterije
Q	-	Maksimalni kapacitet baterije
A	-	Eksponecijalni napon
B	-	Eksponecijalni kapacitet

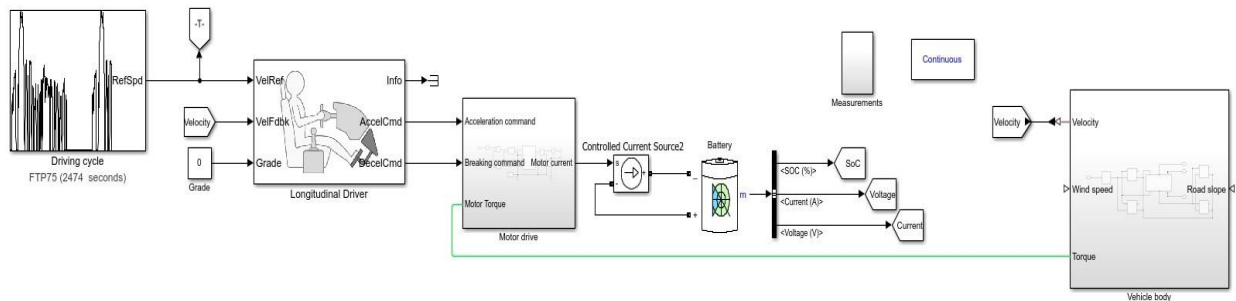
Tabela 7.4 prikazuje pojednostavljeno značenje datih simbola u jednačinama. Međutim, u ovoj simulaciji nije uzet u obzir uticaj spoljašnje temperature ili zagrijavanja samog motora vozila, uprkos činjenici da je uticaj temperature veoma važan faktor u određivanju stanja baterije. Korist ove odabrane baterije u simulacionom bloku elektromobila je ta što će nam SoC prikazati direktno bez potrebnih dodatnih kalkulacija.

Ukratko, tokom proteklih nekoliko godina, došlo je do porasta interesovanja za istraživanje performansi Li-ION baterija. Postoji mnogo različitih pristupa koji se mogu primijeniti da bi se istražilo ovo ponašanje; međutim, vrsta korišćenog modelovanja može postaviti ograničenja na to kako se rezultati mogu primijeniti ili optimizovati. Detaljniji opis različitih modela koji se koriste za simulaciju Li-ION baterija može se naći u [58][59] i šire. Ovi modeli uključuju model punjenja/praznjenja sa linearnim unutrašnjim strujnim otporom, a opis se fokusira na to kako se ovi modeli mogu koristiti u nizu različitih aplikacija. Ovo su samo neke od referenci koje se mogu otkriti na ovu temu. Pored ovih postoji velika količina dodatnih knjiga i časopisa koje govore o ovoj temi.

8. Rezultati simulacije predikcije potrošnje električne energije elektromobila

8.1. Simulink metodologija simulacije elektromobila

U prethodnom poglavlju opisali smo tok kreiranja simulatora elektromobila kroz glavne simulacione blokove. Formirali smo tijelo vozila, glavni prenos komandi kao i simulator toka vožnje. U ovom poglavlju ćemo dati rezultate simulacije korišćenjem Matlab Simulink-a i unosom podataka o performansama vozila tipa Tesla „Model S“. Rezultati će biti predstavljeni u vidu pređenog puta, količine potrošnje baterije i brzine vozila. Sveobuhvatna komponenta digitalne simulacije vozila prikazana je na slici 8.1.



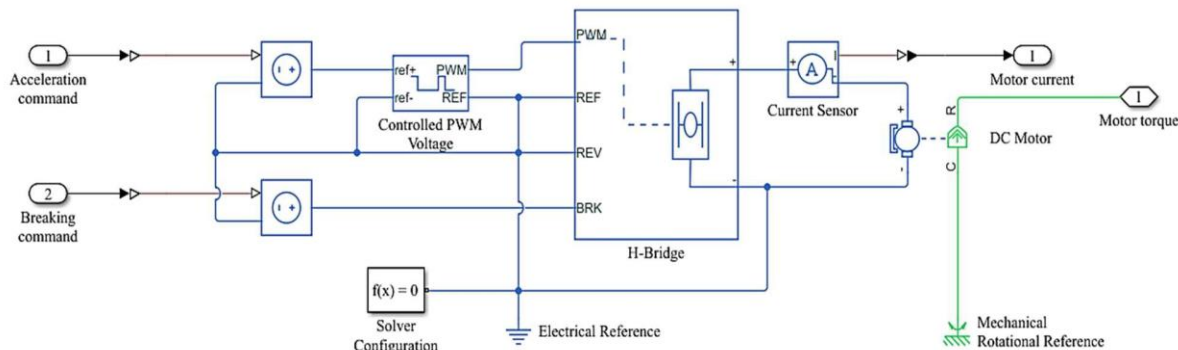
Slika 8.1 Blok dijagram kreiranog modela u Matlab Simulink-u

Blok dijagram kreiranog Simulink modela za predviđanje količine energije koju troši elektromobil predstavljen je na slici 8.1. Primarna komponenta modela je ciklus vožnje, koji opisuje progresiju brzine vozila tokom vremena. Kontroler za praćenje brzine koji je uključen u *Longitudinal driver* blok vozača koristi ciklus vožnje kao referentni signal kako bi pratio brzinu vozila. Kontroler za praćenje brzine je proporcionalno-integralni (PI) kontroler koji generiše normalizovane komande za ubrzanje i kočenje na osnovu razlike između referentne brzine i izmjerene brzine. Ove komande se zasnivaju na razlici između referentne brzine i izmjerene brzine. PI kontroler takođe omogućava da se obezbijedi profil visine duž posmatrane putanje. Ovo čini uputstva za ubrzanje i kočenje u zavisnosti od topografije puta, što omogućava korišćenje takvog kontrolera na stvarnim rutama.

Sa odvojenim dijagramom ilustrovanim na slici 8.2 normalizovana uputstva za ubrzanje i kočenje koje izdaje blok *Longitudinal driver* odražavaju ulaze bloka *DC Motor*⁴¹. H-most služi kao

⁴¹ U ovom radu ćemo se fokusirati na elektromobile koji se pokreću DC motorima radi jednostavnosti.

kontroler za DC motor. Već smo naglasili da ćemo koristiti *PWM-controlled voltage source*. Normalizovana instrukcija ubrzanja se mijenja tako da se može transformisati u prihvatljivu vrijednost napona na ulazu H-mosta.

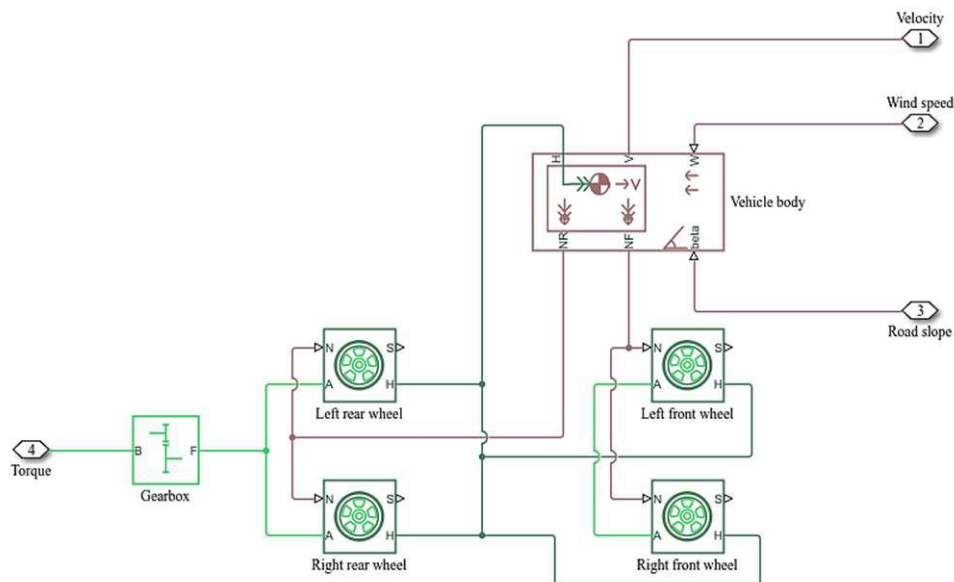


Slika 8.2 Blok dijagram motornog pogona projektovanog sa odvojenom arhitekturom u Matlab Simulink-u

Kratak spoj se stvara na izlazu H-mosta kao direktan rezultat naloga kočenja, što zauzvrat dovodi do prekida napajanja DC motora. *Flyback* dioda je uključena u H-most tako da u slučaju naglog prekida napajanja ne dođe do povećanja napona. Simulacijom rada DC motora kao odgovora na komande za ubrzanje i kočenje, moguće je odrediti promjenu obrtnog momenta na bregastoj osovini motora kao i promjenu struje koju motor proizvodi u funkciji vremena. Ove dvije vrijednosti su primarni izlazi koje proizvodi blok motora.

Glavni ulaz bloka *Vehicle block* može se vidjeti na slici 8.3 a predstavljen je obrtnim momentom koji se primjenjuje na osovinu motora. Točkovi vozila nisu direktno povezani sa osovinom motora, nego je korišćen sistem prenosa koji povezuje osovину motora sa točkovima. Sistem prenosa je dizajniran da prilagodi brzinu i obrtni moment na vratilu motora odgovarajućim nivoima na točkovima. Prenosni sistem se može opisati njegovim prenosnim odnosom kao i stepenom njegove efikasnosti i za električno vozilo Tesla Model S on iznosi 9.734:1.⁴²

⁴² Ovaj prenosni odnos varira u zavisnosti od tipa vozila.



Slika 8.3 Blok dijagram pojednostavljenog prikaza unutrašnjeg mehaničkog sklopa vozila u Matlab Simulink-u

Koristiće se interakcija koja se javlja između točkova i asfaltirane površine puta i modeluje se pomoću formule koja omogućava da se izračuna vučna sila koja djeluje na točkove detaljno opisane jednačinom 6.15, odnosno 6.21. Kada su vrijednosti u ovim jednačinama poznate, moguće je izračunati novu brzinu vozila koja je posledica rezultata ubrzanje i kočenje. Signal devijacije PI kontrolera za praćenje brzine koji se nalazi u *Longitudinal driver* bloku vozača formira se korišćenjem izmjerene brzine vozila u petlji negativne povratne sprege čime se omogućava da signal bude što precizniji [60].

Korišćenjem *Battery* bloka, koji implementira generički model litijum-jonskih baterija koje se pretežno koriste u automobilske industriji, promjena struje motora u vremenu se recipročno koristi za određivanje promjene stanja napunjenosti baterije. Ovo se implementira upoređivanjem početnog stanja napunjenosti sa novim stanjem napunjenosti kao što je prikazano jednačinom 4.5. Date jednačine 7.1 i 7.2 omogućavaju izračunavanje brzine kojom se stanje napunjenosti baterije mijenja tokom vremena. Pored toga, blok baterije omogućava izračunavanje brzine kojom se izlazni napon baterije pomjera tokom vremena.

Postoji mnoštvo objavljenih stručnih strategija koje detaljno govore o velikom broju pristupa koji se mogu koristiti za predviđanje količine energije koju troše električni vozili. Tehnike za predviđanje potrošnje električne energije autori su u radu [61] razdvojili u dvije kategorije. Ove kategorije su metode koje se zasnivaju na longitudinalnoj dinamici vozila i statističke metode koje se zasnivaju

na mjerenju energije koju troše elektromobili kao i na podacima iz stvarnog svijeta. Autori [62] su koristili neuronsku mrežu da karakterišu okruženje u kojem elektromobil radi i procjenjuju potrošnju energije koristeći prosečne okolnosti. Ovo je urađeno kako bi se utvrdilo kolika je snaga potrebna za rad vozila. Autori studije su naveli da je njihov metod imao tačnost između 20 i 30 procenata u svih 800 testnih situacija, iako je strategija koja je data ignorisala dinamiku vozila. Autori studije [63] su koristili pojednostavljeni model dinamike u kome se potrebna snaga navodi kao linearna funkcija nagiba puta kako bi sproveli analizu uticaja koju topografija puta ima na količinu energije koja se koristi u elektromobilu. Utvrđeno je da aplikacije za rutiranje koje pokušavaju da smanje količinu energije koju koriste elektromobili moraju uzeti u obzir teren puteva. Kreiranjem *offline/online* tehnike koristeći informacije o ruti otvorenog koda i pojednostavljeni model uzdužne dinamike vozila prilagođen za vozilo Volkswagen Lupo autori u [64] su prikazali tačnost predložene tehnike koja je utvrđena na 5% za *online* metodu i 10% za *offline* metod kroz vozačke ispite sprovedene na javnim putevima. U poređenju sa FASTSim-om, modelom pogonskog sklopa visokog nivoa koji je kreirao NREL [65], autori [66] su obezbijedili računarski efikasan model potrošnje energije koji je podešen za EV Nissan Leaf. Modeli korišćenja energije su takođe od interesa u aplikacijama za ekološku vožnju i eko-rutiranje, sa različitim modelima koji se koriste u [67][68][69][70].

Kao rezultat, svrha ovog rada je da se demonstrira fizički model elektromobila koji je kreiran korišćenjem grafičkog programskog okruženja Simulink u MATLAB-u. Predloženi model sadrži i električne i mehaničke karakteristike EV-a, i može se prilagoditi tako da odgovara raznim vrstama elektromobila. Ove karakteristike uključuju performanse generisanog modela koje se procjenjuju korišćenjem standardnog FTP75 gradskog ciklusa vožnje, kao i ciklusa vožnje izvedenog za stvarnu rutu. Razvijeni model je parametrizovan korišćenjem podataka koji su trenutno dostupni na Tesla Model S [71].

U narednim odeljcima biće riječi o specifičnostima generisanog modela, kao i o rezultatima simulacija koje su izvedene predstavljenim ciklusima probne vožnje. Pored toga, sprovodi se istraživanje načina na koji brzina vjetera i nagib puta utiču na potrošnju energije vozila.

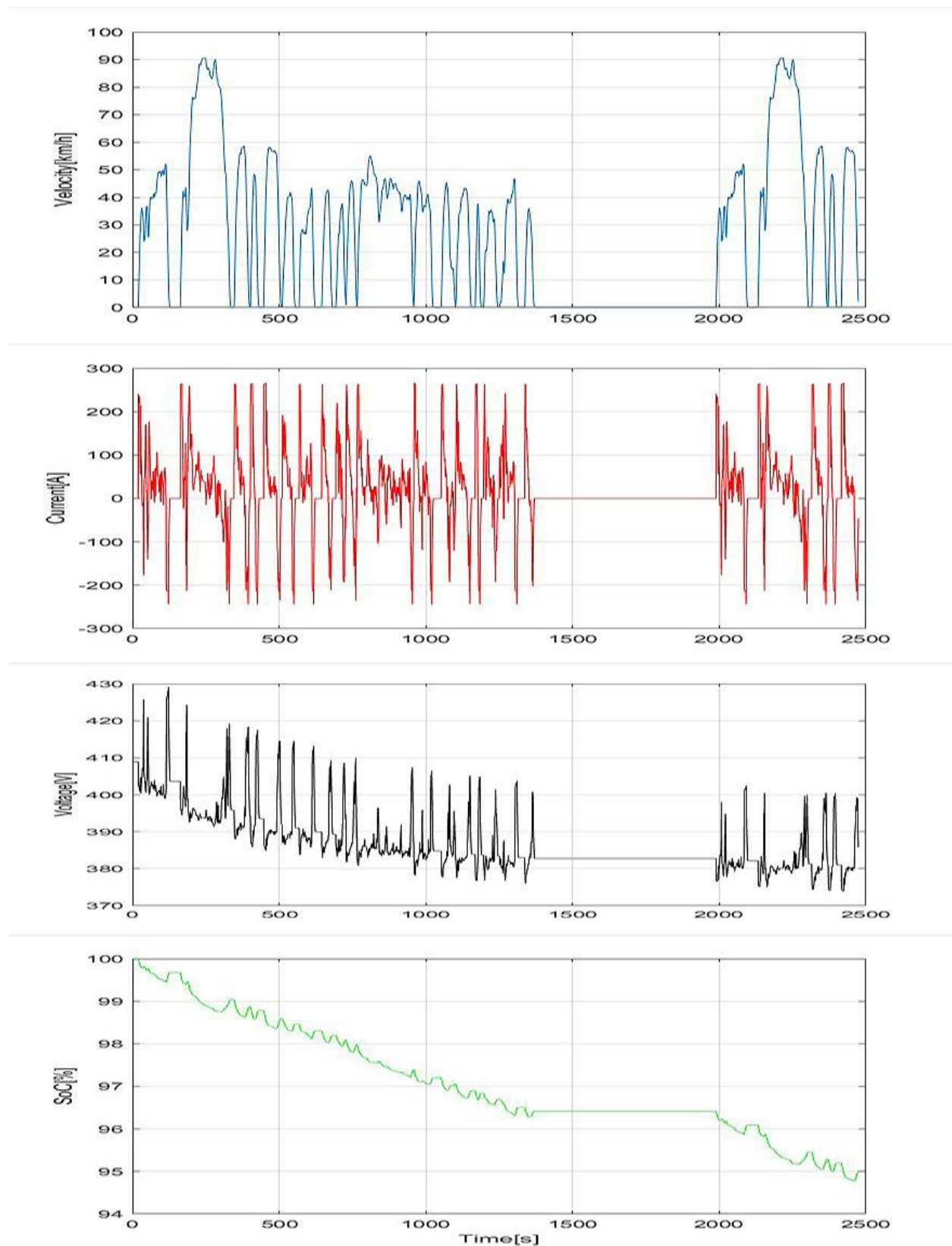
Performanse EV-a sa pogonom na baterije „Tesla Model S“, koje je najzastupljenije EV u saobraćajnoj infrastrukturi Crne Gore, dobijene su od njegovog distributera, Limit Prime iz Podgorice, i prikazane su u [71]. Podaci iz priloga su korišćeni u neophodnim Matlab blokovima

simulacije za generisanje tačnih rezultata simulacije na osnovu performansi originalnog vozila. Model S ima Li-Ion bateriju od 85 kWh koja se nalazi na dnu vozila između prednje i zadnje osovine i teži približno 500 kg. Sastoji se od 16 djelova kapaciteta 7100 ćelija. Nominalni napon baterije je 350V DC, dok je stvarni napon 12V. Prednji motor je sinhroni motor na naizmjeničnu struju sa permanentnim magnetom sa promenljivom frekvencijom, dok je zadnji motor asinhroni motor naizmjenične struje sa promenljivom frekvencijom i nominalnim naponom od 320V. Ovi podaci su neophodni za realizaciju daljeg toka simulacije.

8.2. Test simulacije broj 1 – FTP75 gradski ciklus vožnje

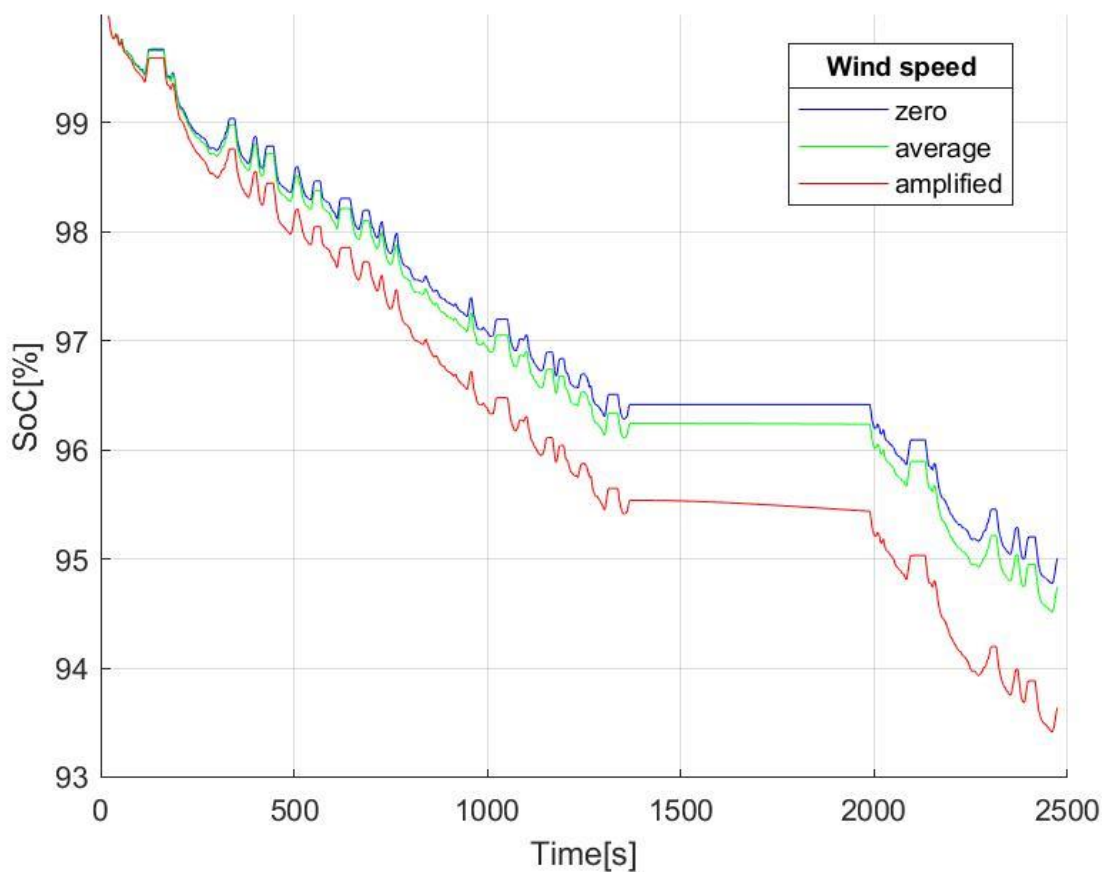
Specifikacije proizvedenog simulacionog modela su modifikovane tako da odgovaraju onima za električno vozilo Tesla Model S. Motor je kalibrisan da obezbijedi maksimalnu izlaznu snagu od 280 kW, a ima maksimalni obrtni moment od 420 Nm. Li-ION baterija ima kapacitet od 100 kWh i na osnovu proizvođačkog testiranja može da obezbijedi domet od oko 360 kilometara kada je potpuno napunjena. Sistem prenosa sa fiksnim odnosom prenosa od 9.734:1 povezuje točkove i motor. Ovaj odnos je jedini koji se može koristiti. Masa praznog vozila je ukupno 2.200 kilograma. Funkcionalnost izgrađenog Simulacija Simulink modela prikazana je na slici 8.4, koja koristi standardni FTP75 gradski ciklus vožnje kao izvor podataka. Rezultati simulacije koji se mogu vidjeti ovdje pokazuju kako napon, struja i stanje napunjenosti baterije fluktuiraju tokom vremena.

Dati prikazi signala predstavljaju vrijednosti zadate brzine i kretanja vozila, a prate ga i oscilacija struje, napona i potrošnja baterije za prikazan tip vožnje. Ono što je jako bitno u validnosti simulacije je to da EV ni u jednom trenutku na grafiku simulacije ne prelazi maksimalnu brzinu zadatu simulacijom komande vožnje, već je prati što dovodi do zaključka da je simulacija ovog tipa ispravna. Nakon otprilike 18 kilometara putovanja, baterija je pala iz stanja potpune napunjenosti na početku putovanja na nivo napunjenosti koji je 95% od punog. Kao rezultat čestih pokretanja i zaustavljanja ciklusa gradske vožnje, prosječna potrošnja po kilometru je nešto veća od potrebnih 18,1 kWh/100 km za Tesla Model S. To je i očekivano zbog prirode ciklusa gradske vožnje.



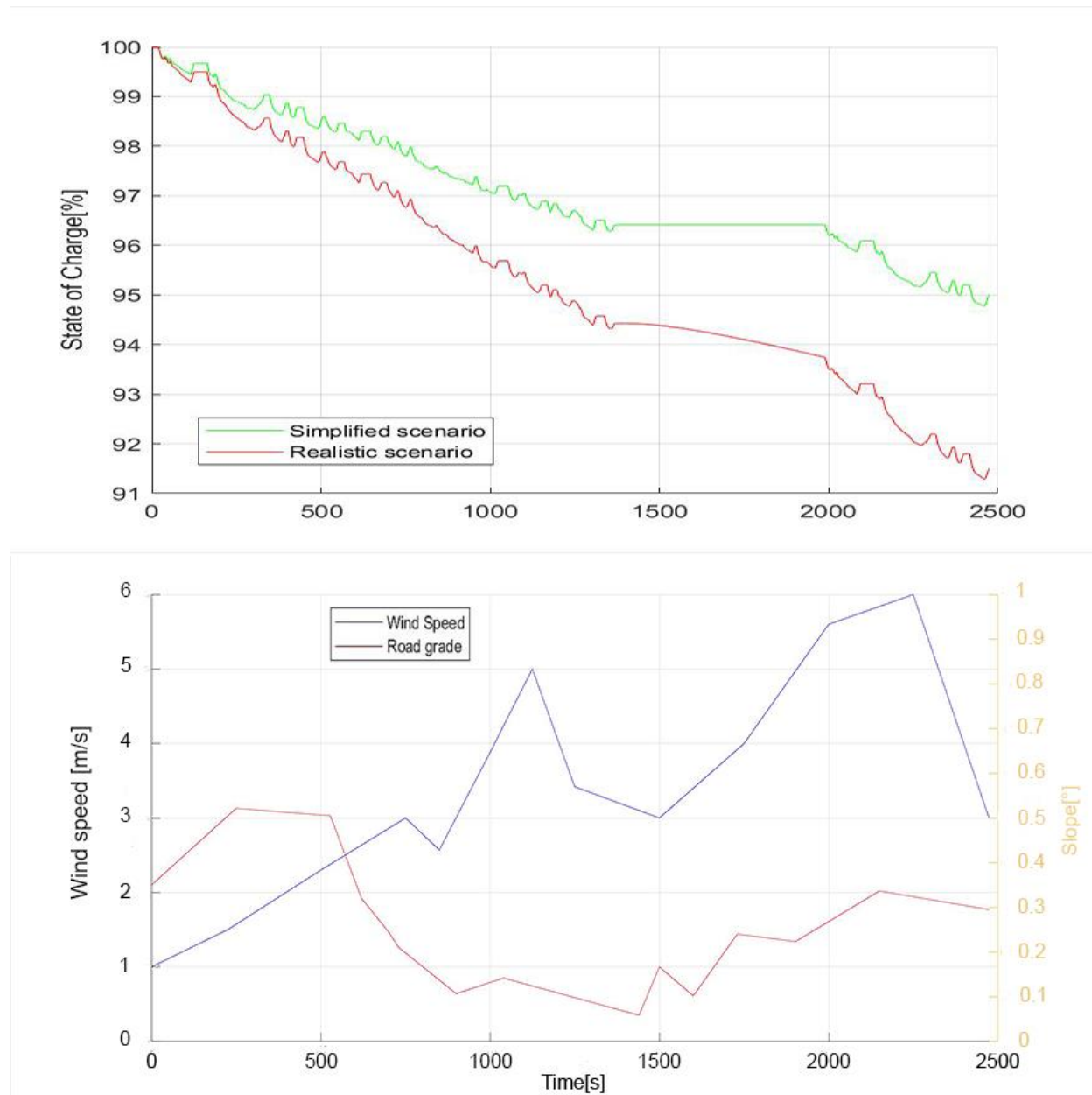
Slika 8.4 Mjerenje SoC baterije zasnovano na konvencionalnom FTP75 ciklusu gradske vožnje

Rezultati koji su dati na slici 8.4 čine smjelu pretpostavku da nema vjetra i da nema nagiba na cijeloj trasi. Ovo je nerealna pretpostavka za pravce koji zaista postoje. Prema onome što je obrađeno u prethodnom dijelu ovog poglavlja, model koji je dat dodatno omogućava da se uzme u obzir varijacija brzine vjetra i nagiba puta. Ako se zanemari uticaj vjetra na potrošnju energije, procjenjena količina energije potrebna za završetak putovanja može biti znatno niža od stvarne količine. Kada se poveća brzina vjetra u smjeru kojim se vozilo kreće, povećava se i aerodinamička sila otpora, što može dovesti do značajnog povećanja potrošnje goriva. Činjenica da isti ciklus vožnje tokom različitih brzina vjetra dovodi do različite potrošnje energije na cijeloj ruti, kao što je prikazano na slici 8.5, pokazuje da vjetar može imati značajan uticaj na količinu energije koju troše elektromobil. Promjena brzine vjetra je generisana na osnovu podataka o prosječnom djelovanju vjetra u Podgorici, (glavni grad Crne Gore), a podaci su uzeti iz [72]. Isto važi i za nagib puta, koji može imati značajan uticaj na potrošnju goriva.



Slika 8.5 Grafik uticaj brzine vjetra na količinu energije koju troše elektromobili

U stvarnosti, brzina vjetra i nagib puta variraju tokom putovanja. Slika 8.6 ilustruje jedan primjer ove vrste slučaja. Varijacije u brzini vjetra i nagibu puta duž rute se proizvode nasumično. U poređenju sa jednostavnim scenarijem, koji ignoriše uticaj brzine vjetra i nagiba puta, povećanje potrošnje energije je za oko 5% veće. Ako se zanemari uticaj brzine vjetra i nagiba puta, moguće je da bi došlo do precjenjivanja dometa vozila s obzirom na relativno kratku udaljenost rute koja se razmatra (18 kilometara).



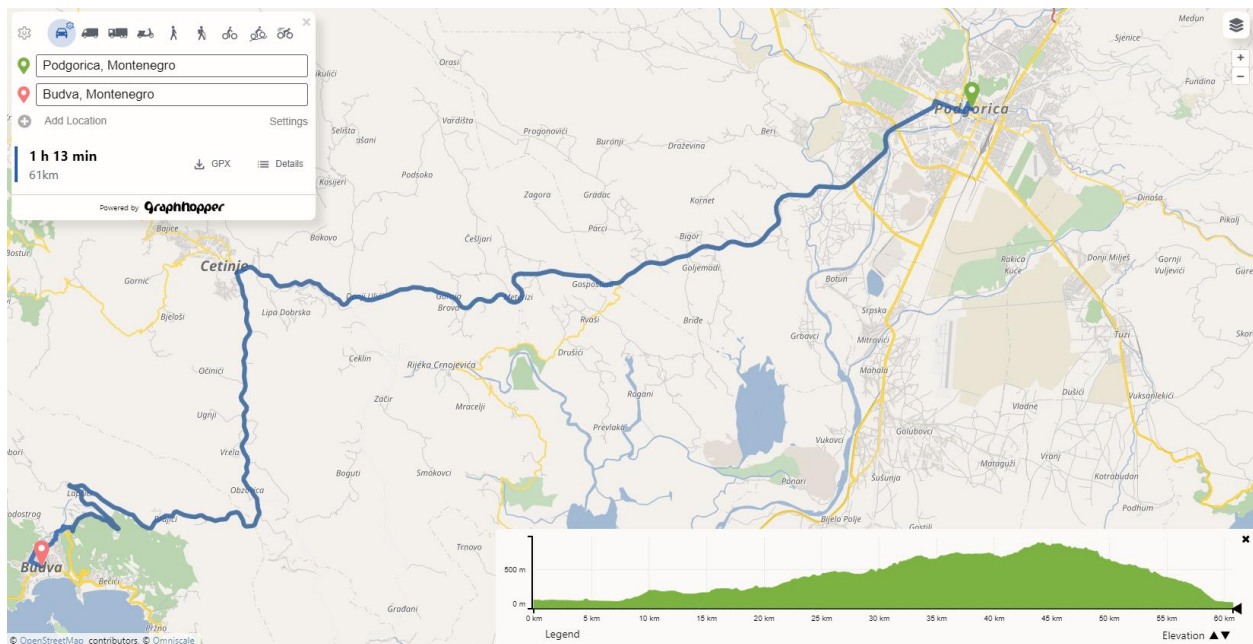
Slika 8.6 Grafik uticaja faktora puta i vjetra na količinu energije koju troše elektromobili.

8.3. Test simulacije broj 2 – Kontinuirana platforma zasnovana na predikciji globalnih ruta lokacija

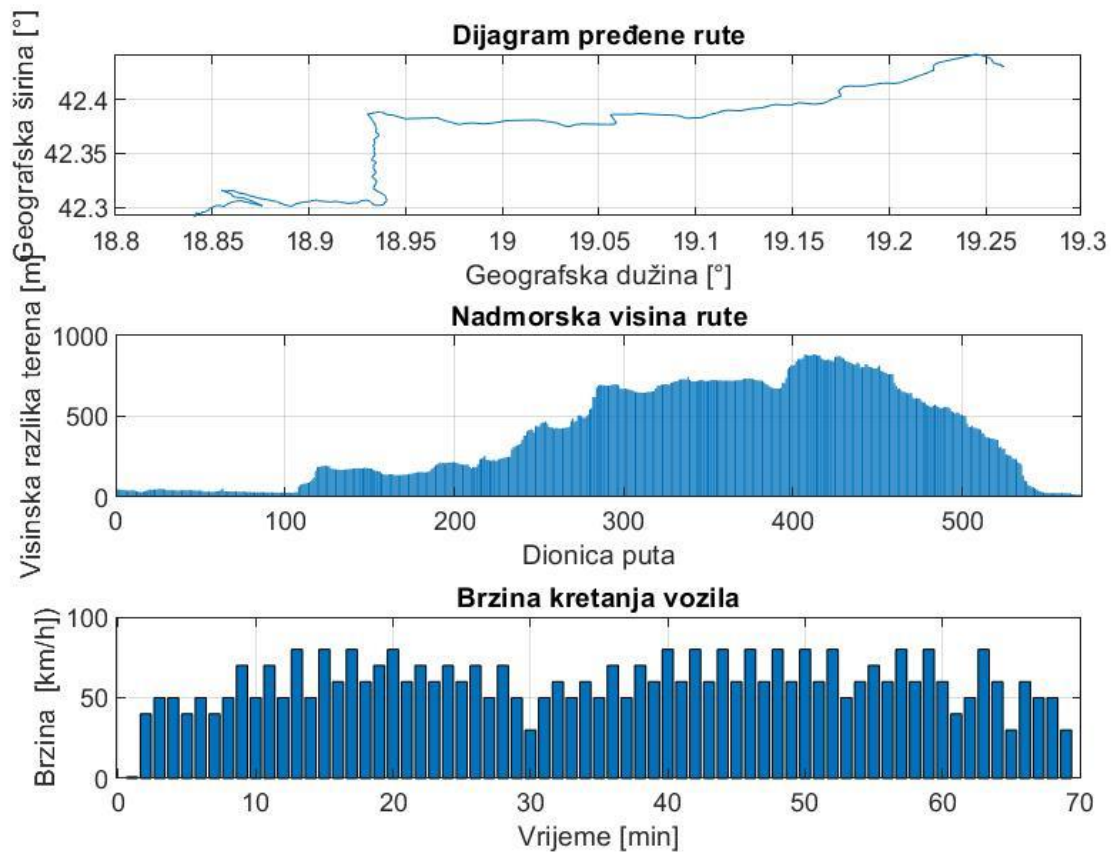
Koristeći neke od biblioteka rutiranja koje su trenutno dostupne na globalnom internetu potrebno je procijeniti predloženu tehniku koristeći uslove stvarne rute. Postoji mnogo dostupnih biblioteka rutiranja, a neke od najpopularnijih su OSM (*en. OpenStreetMaps*) tj. otvoreni projekat koji pruža informacije o ruti kao što su tip puta i ograničenje brzine na osnovu porijekla i odredišta. GraphHopper je otvoreni okvir za rutiranje (*en. Routing Framework*) koji se može koristiti za određivanje optimalne rute između dvije lokacije na mapi. Omogućava korisnicima da inkorporiraju funkcionalnost rutiranja u svoje aplikacije i da prilagode rute svojim specifičnim zahtjevima. GraphHopper koristi grafikone i algoritme za pretragu putanje da bi odredio najbrži ili najkraći put između dvije tačke. GraphHopper može da koristi više izvora podataka, kao što su OSM i Google Maps. Takođe pruža mogućnost korišćenja različitih algoritama za pretragu putanje, uključujući Dijkstru algoritam [73]. GraphHopper je renomiran program zbog svoje upotrebljivosti i prilagodljivosti. Osim GraphHopper-a korisne su takođe i platforme Mapbox, MapQuest, Leaflet Routing Machine koje takođe predstavljaju *open-source* biblioteke za rutiranje koje se temelje na OSM-u. Nezavisno od OSM-a, dodatno se može koristiti i popularna platforma za karte i rutiranje Google Maps koja se temelji na podacima koje prikuplja Google Street View, Microsoftova platforma za karte i rutiranje Bing Maps koja se koristi u mnogim aplikacijama i uslugama kao i HERE Maps platforma zasnovana na patentiranim algoritmima kao bi se korisnicima pružile najbolje rute.

U ovom radu obrađeni su podaci realnog rutiranja pomoću OSM i GraphHopper projekta čiji je zajednički poduhvat da se napravi globalna geografska mapa koja se može uređivati i koja je otvorena za volonterske doprinose. Očekuje se da će OpenStreetMap postati visokokvalitetna alternativa Google mapama otvorenog koda u bliskoj budućnosti, pošto njegova pokrivenost nastavlja da raste. OSM može da obezbijedi putne parametre specifične za rutu, kao što su klasifikacija puta i ograničenje brzine, na osnovu porijekla i odredišta rute. Koristeći GraphHopper, prikupljeni su podaci za rutu koja počinje u Podgorici (42.4304, 19.2594) i završava se u Budvi (42.2911, 18.8404). Slika 8.7 prikazuje i trasu i visinski profil duž puta. GraphHopper vraća segmentiranu putanju zajedno sa atributima svakog pojedinačnog segmenta. Zbog činjenice da je ciklus vožnje koji vraća GraphHopper diskontinuirani skup podataka, on mora biti prethodno

obrađen prije nego što može poslužiti kao ulaz u model. Ovaj zahtevni zadatak obrade podataka realizovan je korišćenjem Matlab programskog jezika, koji daje tačne i pouzdane rezultate koji ispunjavaju zahteve krajnjih korisnika. Cijeli ciklus vožnje se računa u skladu sa ograničenjima brzine koja su na snazi duž tražene rute. Zbog toga je interpolacija tačaka ugrađena u ciklus vožnje kako bi se simulirao saobraćaj i odstupanje brzine od ograničenja brzine. Ovo omogućava preciznije simulacije. Slika 8.8 je kreirana uz pomoć Matlab koda P8.1 i prikazuje putanju ciklusa vožnje kao i količinu energije potrošene u različitim vremenima tokom putovanja. Predviđena ruta ima tipično trajanje putovanja malo više od 1 sata, a količina potrošene energije je proporcionalna količini potrošene energije u prvobitnom scenariju poglavlja 8.2. Preporučljivo je napraviti predikciju količine energije koja će biti potrošena prije putovanja na određenoj ruti. To je zato što dužina izračunavanja modela za izabranu rutu može biti u rasponu od 5 do 10 sekundi kada se izvrši više od 100 puta.



Slika 8.7 Prikaz relevantne informacije GraphHopper karte, uključujući geografsku lokaciju, udaljenost, nadmorsku visinu i trajanje rute između dvije lokacije.



Slika 8.8 Upoređeni rezultati Matlab simulacije i sa podacima karte GraphHopper za OSM API rutu između dve lokacije.

Prikazani Matlab kod P8.1 se sastoji od više različitih modula koji koriste GraphHopper API za dobijanje detalja rute za dati par polaznih i odredišnih koordinata, kao i za izvođenje specifičnih informacija kao što su dužina, geografska širina, nadmorska visina i brzina rute. Prikupljeni podaci se zatim koriste za prikaz rute na mapi i vizuelizaciju podataka o nadmorskoj visini i brzini. Prvo, kod utvrđuje vrijednosti geografske širine i dužine polaznih i odredišnih lokacija. Zatim definiše osnovnu URL adresu i dodaje početnu i odredišnu tačku ovoj URL adresi da bi proizveo pun URL zahteva za API. Funkcija *'weboptions'* se koristi za određivanje formata odgovora i metoda zahtjeva. Konstante i parametri vozila koje je korišćeno za putovanje nalaze se u sledećem dijelu koda. Obrada podataka se vrši nakon što se preuzmu preko GraphHopper API-ja. U prvoj fazi, sve informacije o ruti koje su primljene iz prethodnog bloka se prenose i obrađuju kako bi se izračunalo vrijeme koje mora da prođe između dvije tačke, udaljenost koja mora proći između tačaka i brzina vozila koje mora saobraćati između lokacija. Nakon ovog koraka, obrađene vrijednosti se dodaju

u nizove označene kao *Lon*, *Lat*, *Ele* i *Time*. Nakon konverzije promjenljivih *Lon* i *Lat* u radijane koju ovaj blok izvršava, obrađene varijable se upisuju u promjenljive *Lon*, *Lat* i *Ele_mat*, respektivno. Dalje slijedi izvođenje niza matematičkih operacija nad ulaznim podacima koje su čuvane u varijabli *data*. Prva linija koda *Brzina_intervala* izvlači brzine iz ulaznih podataka dobijenih zahtjevom operatera. Slijedi stvaranje intervala za vremenske intervale kretanja vozila. Svaki red matrice *Intervali* sadrži početak i kraj vremenskog intervala u kojem se vozilo kreće s istom brzinom. Slijedi izračunavanje vremena za svaki vremenski interval kretanja vozila. Vrijeme se računa kao razlika između početka i kraja intervala. Potom se iz ulaznih podataka u varijabli *data* izvlače vrijednosti nadmorske visine i sprema se u varijablu *Ele_mat*. Konačno, sprovodi se računanje potrošnje baterije za svaki interval kretanja vozila. Za svaki interval, izračunava se ukupna snaga potrebna za kretanje vozila, uključujući nadmorsku visinu. Iz te snage se računa energija koju vozilo troši tokom intervala, a potom se izračunava potrošnja baterije za interval. Na kraju, računa se SoC nakon svakog intervala. Linija koda *Stil_voznje* kreira matricu koja sadrži dvije kolone. Prva kolona sadrži vrijednosti intervala za svaku tačku u ruti, a druga kolona sadrži brzinu koja se koristi u svakom intervalu kretanja vozila. Simulaciju modela baterije pomoću simulinka se postavljaju u neke početne parametre koji predstavljaju ime simulink modela koji se koristi za simulaciju, ime bloka koji predstavlja bateriju u simulink modelu i izvlače se podaci iz baterije koji su potrebni za dalju obradu signala. Pouzdanost veze između zahtjeva operatera koji se kroz Matlab kod obrađuje i Simulink bloka baterije našeg elektromobila povezana je postavljanjem vremenskog ograničenje simulacije *ogranici_vrijeme* tako da traje koliko i najkraća putanja iz skupa putanja, kako bi se osiguralo da se svi podaci koriste u simulaciji. Nakon toga, model se pokreće pozivom funkcije *sim*, a zatim se uzimaju izlazni podaci simulacije, odnosno struje, napona i stanja baterije, i rezultati se spremaju u promjenjive *SFCurrent*, *SFVoltage* i *SFBattery*. Konačno, simulink model se čuva i zatvara. Nakon toga slijede grafički i numerički prikazi podataka koji se čuvaju u datoteke.

```
od_lat = "42.4304";  
od_lon = "19.2594";  
do_lat = "42.2911";  
do_lon = "18.8404";
```

(P:8.1)

```
base_url =  
"https://graphhopper.com/api/1/route?vehicle=car&locale=sr&calc_po  
ints=true&key=e73d5de3-faac-4818-b45c-  
b02fb58592f7&elevation=true&details=time&details=max_speed&details  
=distance&points_encoded=false";
```



```
url = base_url + "&point=" + od_lat + "," + od_lon + "&point=" +
do_lat + "," + do_lon;
options = weboptions('RequestMethod', 'get',
'ArrayFormat', 'json');
data = webread(url,options);

max_snaga = 280;
gustina_vazduha = 1.25;
koeficijent_otpora = 0.25;
povrsina_prednje_strane = 2;
gravitacija = 9.81;
masa_vozila = 2200;
vremenski_korak = 0.1;
napon = 350;
kapacitet = 243;
baterija = 100;
koef_snage = 1;

result1 = {};
Lon = {};
Lat = {};
Ele = {};
Time = {};
id_tacaka_segmenta_staze={};
Brzine = {};

path = data.paths(1);
if isempty(path)
    return;
end
time = datetime('now');
i = 0;
for j = 1:length(path.details.time)
    timeFrame = path.details.time(j,:);
    startPoint = timeFrame(1)+1;
    endPoint = timeFrame(2)+1;
    duration = timeFrame(3)+1;
    coordinate = path.points.coordinates(startPoint,:);
    endCoordinate = path.points.coordinates(endPoint,:);
    Udaljenost=
distance(deg2rad(coordinate(2)),deg2rad(coordinate(1)),deg2rad(end
Coordinate(2)),deg2rad(endCoordinate(1)))* 6371000;
    Trajanje= duration/1000;
    Brzina = Udaljenost/Trajanje;
    Brzine = [Brzine; Brzina];
    Lon = [Lon; coordinate(1)];
    Lat = [Lat; coordinate(2)];
    Ele = [Ele; coordinate(3)];
    Time = [Time; datetime(time,'Format' , 'dd.MM.yyyy
HH:mm:ss')];
    time = time + milliseconds(duration);
    id_tacaka_segmenta_staze=[id_tacaka_segmenta_staze; i];
    i = i + 1;
end

lastCoordinate = path.points.coordinates(end,:);
```

```

Lon = [Lon; lastCoordinate(1)];
Lat = [Lat; lastCoordinate(2)];
Ele = [Ele; lastCoordinate(3)];
Time = [Time; datetime(time, 'Format', 'dd.MM.yyyy HH:mm:ss')];
Lon=cell2mat(Lon);
Lat=cell2mat(Lat);
Ele_mat = cell2mat(Ele);

i = i + 1;
id_tacaka_segmenta_staze=[id_tacaka_segmenta_staze; i];
id_tacaka_segmenta_staze=cell2mat(id_tacaka_segmenta_staze);

lat_rad = deg2rad(90-Lon);
lon_rad = deg2rad(Lon);
distance_m = acos(cos(lat_rad(1:end-1)).*cos(lon_rad(1:end-1)-lon_rad(2:end)) +
sin(lat_rad(1:end-1)).*sin(lon_rad(2:end))) * 6371 * 1000;
vrijeme_sekunde = seconds(Time - Time(1));
razlike_sekunde = diff(vrijeme_sekunde);
Brzina_m=distance_m./razlike_sekunde;
Brzine = cell2mat(Brzine);
Brzina_km=Brzine *3.6;
min_length = min(length(id_tacaka_segmenta_staze),
length(Brzina_km));
nova_varijabla = [id_tacaka_segmenta_staze(1:min_length),
Brzina_km(1:min_length)];

Brzina_intervala = data.paths.details.max_speed(:, 3);
Intervali = zeros(size(data.paths.details.max_speed,1), 2);
for i = 1:size(data.paths.details.max_speed,1)
    if i == 1
        Intervali(i,:) = [0 data.paths.details.max_speed(i,1)];
    else
        Intervali(i,:) = [data.paths.details.max_speed(i-1,1)
data.paths.details.max_speed(i,1)];
    end
end
Intervali(end,2) = Intervali(end-1,2);

for i = 2:length(Brzina_intervala)
    if isnan(Brzina_intervala(i))
        Brzina_intervala(i) = Brzina_intervala(i-1);
    end
end

if isnan(Brzina_intervala(1))
    Brzina_intervala(1) = 1;
end

vreme = zeros(size(Intervali, 1), 1);
vreme(1) = Intervali(1, 2) - Intervali(1, 1);
for i = 2:size(Intervali, 1)
    vreme(i) = Intervali(i, 2) - Intervali(i-1, 2);
end

```

```
Ele_mat = evalin('base', 'Ele_mat');
potrosnja_baterije = zeros(size(Intervali, 1), 1);
for i = 1:size(Intervali, 1)
    vrijeme = Intervali(i, 2) - Intervali(i, 1);

    snaga = Brzina_intervala(i) * (gustina_vazduha/2) *
koeficijent_otpora * površina_prednje_strane ...
        + (masa_vozila * gravitacija * Brzina_intervala(i))
...
        + (masa_vozila * gravitacija * Ele_mat(i) *
koef_snage);
    if snaga > max_snaga
        snaga = max_snaga;
    end
    energija = snaga * vrijeme / 60;
    potrosnja_baterije(i) = energija / napon * 100 / kapacitet;
    baterija = baterija - potrosnja_baterije(i);
end

soc = zeros(size(Intervali, 1) + 1, 1);
soc(1) = 100;
for i = 1:size(Intervali, 1)
    soc(i+1) = soc(i) - potrosnja_baterije(i);
end
Stil_voznje = [data.paths.details.max_speed(:,1)
Brzina_intervala];

SFName='OSBGV_GPS';
SFBlock='OSBGV_GPS/Li-ION';
load_system(SFName);
Baterija_full=100;
Nominalni_napon=get_param(SFBlock, 'NomV');
Nominalni_kapacitet = str2double(get_param(SFBlock, 'NomQ'));

min_podataka = min(arrayfun(@(x)
length(id_tacaka_segmenta_staze(x,:)),
1:size(id_tacaka_segmenta_staze,1)));
ogranici_vrijeme = min_podataka *
size(id_tacaka_segmenta_staze,1);
set_param('OSBGV_GPS', 'StopTime', num2str(ogranici_vrijeme));
save_system(SFName)
sim(SFName)
save_system(SFName)
close_system(SFName)

SFCurrent=out.I_bat1;
SFVoltaget=out.V_bat1;
SFBattery=out.SOC1;

udaljenost = data.paths.distance;
udaljenost_km = udaljenost / 1000;

vrijeme_ms = data.paths.time;
vrijeme_min = vrijeme_ms / 60000;
```

```
disp([' '])
fprintf('Udaljenost:           %.2f km\n', udaljenost_km);
fprintf('Vrijeme putovanja:     %.2f min\n', vrijeme_min);
disp([' '])
disp(['Nominalni napon Li-Ion baterije automobila:      ',
num2str(Nominalni_napon), ' V']);
disp(['Nominalni kapacitet Li-Ion baterije automobila: ',
num2str(Nominalni_kapacitet), ' Ah']);
disp([' '])
disp(['Potrošnja SOC-a:           ', num2str(100-soc(end)), '%']);
disp(['Preostalo stanje baterije: ' num2str(soc(end)) '%'])

figure(1);
subplot(2,3,1);
plot(Lon, Lat);
xlabel('Geografska dužina [°]');
ylabel('Geografska širina [°]');
title('Dijagram pređene rute');
grid

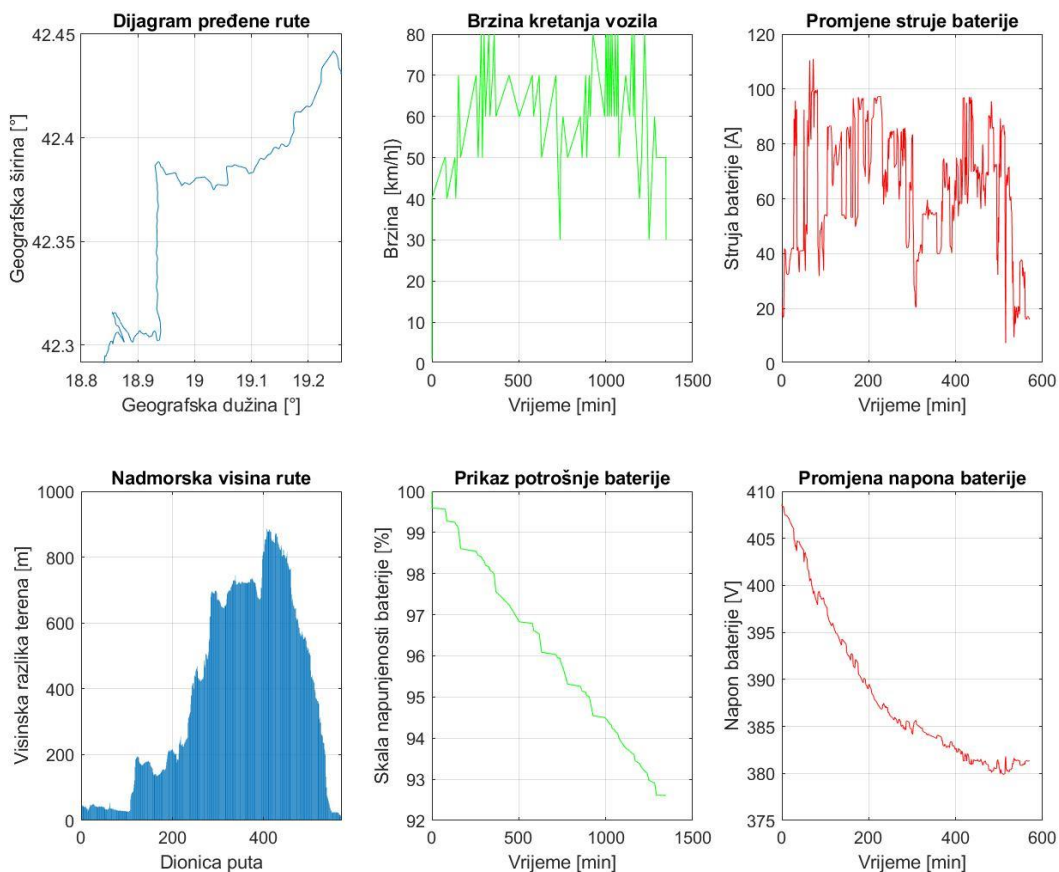
subplot(2,3,4);
bar(Ele_mat);
xlabel('Dionica puta');
ylabel('Visinska razlika terena [m]');
title('Nadmorska visina rute');
grid

subplot(2,3,2)
plot(Intervali(:, 1), Brzina_intervala,'g')
xlabel('Vrijeme [min]')
ylabel('Brzina [km/h]')
title('Brzina kretanja vozila')
grid

subplot(2,3,5)
plot(Intervali(:, 1), soc(2:end),'g')
xlabel('Vrijeme [min]')
ylabel('Skala napunjenosti baterije [%]')
title('Prikaz potrošnje baterije')
grid

subplot(2,3,3);
plot(SFCcurrent, 'r');
xlabel('Vrijeme [s]');
ylabel('Struja baterije [A]');
title('Promjene struje baterije');
grid

subplot(2,3,6);
plot(SFVtarget, 'r');
xlabel('Vrijeme [s]');
ylabel('Napona baterije [V]');
title('Promjena napona baterije');
grid
saveas(gcf, 'ČUVANJE PODATAKA', 'jpg');
```



Slika 8.9 Grafički prikaz potrošnje energije u određenoj oblasti (Podgorica-Budva)

Neophodno je uzeti u obzir činjenicu, pored savjeta inženjera koji su konstruisali Tesla EV, da baterija EV ne bi trebalo da padne ispod 15% (tzv. rezerva), jer to pomaže u održavanju zdravlje iste baterije (SoH). U slučaju da je neophodno da EV putuje sa kapacitetom baterije ispod 15%, potrebno je doći do najbliže stanice za punjenje, u suprotnom Tesla EV može da se kreće maksimalno 15 kilometara [71]. U ovom slučaju, važno je doći do najbliže stanice za punjenje.

Grafikon potrošnje baterije elektromobila dobijen simulacijom korišćenjem Simulink blokova u Matlabu, koji je zasnovan na stvarnoj ruti koristeći OSM podatke između dvije lokacije i specifičnih podataka EV Tesla Model S, koristan je instrument za analizu energetske efikasnosti vozila. Grafikon 8.9 pruža vizuelni prikaz količine energije potrošene na određenoj lokaciji, a sa mogućnošću promjene lokacije i samim tim prikaza predikcije potrošnje električne baterije na različitim lokacijama tokom putovanja kroz Matlab kod P8.1, prikazujući informacije o potrošnji energije u odnosu na specifične faktore kao što su brzina, nagib terena, itd. Grafikon potrošnje

baterije omogućava preciznije razumijevanje efikasnosti elektromobila u uslovima vožnje u stvarnom svijetu, što je korisno za kontinuirani razvoj i poboljšanje performansi ovog tipa vozila.

8.4. Test simulacije broj 3 – Testiranje vozila na osnovu dokumentovane rute

U cilju testiranja predikcije potrošnje energije baterije kao i performansi elektromobila korišćen je metod snimanja kretanja vozila između dvije tačke na putu pomoću aplikativnih senzora, bez obzira na vrstu puta koji se vozilo kretalo. Za snimanje kretanja vozila korišćena je aplikacija GeoTracker. GeoTracker je softverska aplikacija za praćenje i upravljanje vozilom koja prati kretanje vozila u realnom vremenu. Ovaj softver omogućava vlasnicima vozila i administratorima voznog parka da prate lokaciju, brzinu i putanju svojih vozila, između ostalih podataka o vožnji. GeoTracker takođe može da prikupi i analizira dodatne podatke vezane za vožnju, kao što su potrošnja energije i vrijeme provedeno na putu. Ovaj tip softvera može biti veoma koristan za upravljanje velikom flotom vozila, jer omogućava efikasnije planiranje rute, poboljšanu administraciju vozača, smanjenje troškova i povećanu bezbednost vožnje. Prikupljeni podaci su zatim analizirani korišćenjem softverskih programa Matlab i Simulink, što je rezultiralo sveobuhvatnim informacijama o performansama vozila.

Koristeći metode za dokumentovanje kretanja vozila, dobijeni podaci omogućili su preciznu analizu performansi vozila u realnom okruženju, što je ključno za razvoj simulacionog modela za predikciju potrošnje električne energije elektromobila. Ovaj metod je olakšao akumulaciju podataka o kretanju vozila u stvarnom svijetu bez potrebe za specijalizovanim testovima ili protokolima. Pored toga, Matlab i Simulink programi su omogućili sveobuhvatnu analizu prikupljenih podataka i izračunavanje parametara performansi vozila, kao što su potrošnja energije, efikasnost mobilnosti itd.

Matlab kod predstavljen primjerom P8.2 se koristi za obradu podataka o vožnji koje je snimljena u aplikaciji GeoTracker. Informacije o vožnji su prvobitno snimljene u GPX formatu, a zatim prenijete u Excel tabelu. Ovaj kod se koristi za preuzimanje dodatnih informacija o navigaciji čitanjem, pretvaranjem i obradom podataka iz Excel tabele. Kod je organizovan u nekoliko blokova. U početnom bloku je navedena putanja do datoteke sa podacima i opseg podataka koji se koristi za naknadnu obradu. Drugi dio koda obrađuje informacije o geografskoj širini i dužini. Podaci o geografskoj širini i dužini se uzimaju iz Excel tabele, a rastojanje između tačaka rute se zatim određuje korišćenjem Haversove formule. Ovaj blok koda takođe sadrži dijagram pređene

rute. Treći dio koda bavi se efikasnošću obrade podataka. Ovaj segment koda izračunava tempo za svaku stavku podataka, kao i minimalnu, maksimalnu i prosečnu brzinu. Ove informacije se prikazuju na ekranu. Četvrti odeljak koda stvara tehniku odnosno stil vožnje zasnovanu na informacijama o brzini i vremenu. Tehnika vožnje se sastoji od identifikacije segmenta rute i podataka o brzini. Ovaj blok koda takođe koristi funkciju *min* da ograniči niz podataka o brzini i vremenu na minimalni broj elemenata koji su raspoloživi za pokretanje simulacije i dobijanje adekvatnih podataka. Na kraju koda, ispisuju se rezultati minimalne, maksimalne i prosječne brzine vožnje na ekranu, kao i stil vožnje na osnovu brzine i vremena vožnje. Korisniku je dostupan podatak o procjeni stanja baterije u simuliranom sistemu. Varijabla *soc start* simbolizuje početno stanje napunjenosti baterije, dok *soc end* predstavlja njeno konačno stanje napunjenosti. Kod zatim generiše grafikone koji prikazuju stanje napunjenosti baterije tokom simulacije.

```

FileName='track_points.xlsx';
SheetNo=1;
Opseg_podataka='A2:I10000';
Podaci=xlsread(FileName, SheetNo, Opseg_podataka);

Lon=Podaci(:,1); % [rad]
Lat=Podaci(:,2); % [rad]
id_tacaka_segmenta_staze=Podaci(:,5);
nadmorska_visina=Podaci(:,6); % [stepeni]
obrada_vremena = readtable('track_points.xlsx');
vrijeme_str = table2array(obrada_vremena(:, 'time'));
vrijeme_datum = datetime(vrijeme_str, 'Format', 'dd.MM.yyyy
HH:mm:ss');
vrijeme_sekunde = seconds(vrijeme_datum - vrijeme_datum(1));
razlike_sekunde = diff(vrijeme_sekunde);

lat_rad = deg2rad(90 -Lon);
lon_rad = deg2rad(Lon);
distance_m = acos(cos(lat_rad(1:end-
1)).*cos(lat_rad(2:end)).*cos(lon_rad(1:end-1)-lon_rad(2:end))
+ sin(lat_rad(1:end-1)).*sin(lat_rad(2:end))) * 6371 * 1000;
plot(Lon,Lat);
xlabel('Lon');
ylabel('Lat');
title('Dijagram pređene rute');
grid

Brzina_m=distance_m./razlike_sekunde; % [m/s]
Brzina_km=Brzina_m*3.6; % [km/h]
min_brzina = min(Brzina_km);
max_brzina = max(Brzina_km);
prosjecna_brzina = mean(Brzina_km);
fprintf('Minimalna brzina: %0.2f km/h\n', min_brzina);
fprintf('Maksimalna brzina: %0.2f km/h\n', max_brzina);

```

```
fprintf('Prosječna brzina:      %0.2f km/h\n',
prosjecna_brzina);

min_length = min(length(id_tacaka_segmenta_staze),
length(Brzina_km));
stil_voznje = [id_tacaka_segmenta_staze(1:min_length),
Brzina_km(1:min_length)];

SFName='OSBGV';
SFBlock='OSBGV/Li-ION';
load_system(SFName);
SoC1=100;
nominalni_napon=get_param(SFBlock, 'NomV');
disp(['Nominalni napon Li-Ion baterije automobila:      ',
num2str(nominalni_napon), ' V']);
nominalni_kapacitet = str2double(get_param(SFBlock,'NomQ'));
disp(['Nominalni kapacitet Li-Ion baterije automobila: ',
num2str(nominalni_kapacitet), ' Ah']);

min_podataka = min(arrayfun(@(x)
length(id_tacaka_segmenta_staze(x,:)),
1:size(id_tacaka_segmenta_staze,1)));
ogranici_vrijeme = min_podataka *
size(id_tacaka_segmenta_staze,1);
set_param('OSBGV', 'StopTime', num2str(ogranici_vrijeme));

save_system(SFName)
sim(SFName)
save_system(SFName)
close_system(SFName)

soc_start = SoC1(1);
soc_end = out.SOC1(end);
SoC = soc_start - soc_end;
SoH = 100-SoC;
disp(['Potrošnja SOC-a:          ', num2str(SoC), '%']);
disp(['Preostalo stanje baterije: ' num2str(SoH) '%']);

figure(1);
subplot(2, 1, 1);
plot(out.SOC1);T
xlabel('Vrijeme [s]');
ylabel('State of charge [%]');
title('SoC');
grid;
subplot(2, 1, 2);
text(0.5, 0.5, ['Potrošnja SOC-a:          ', num2str(SoC),
'%', newline, 'Preostalo stanje baterije: ', num2str(SoH),
'%'], 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 14);
axis off;
saveas(gcf, 'SoC', 'jpg');
```

Uzimajući u obzir sve navedene činjenice, korišćenje metoda snimanja kretanja vozila sa GeoTracker aplikacijom i softverskim paketom Matlab i Simulink je efikasan i pouzdan metod za

ispitivanje performansi elektromobila. Upoređujući rezultate ove vrste snimanja kretanja vozila sa prethodna dva načina predikcije potrošnje električne energije baterije elektromobila u Matlabu, koristeći Matlab cikluse testova vožnje i korišćenje GPS podataka iz OSM-a, dobijeni rezultati su na visoko zadovoljavajućem nivou tačnosti. Testiranje vozila na osnovu dokumentovane rute pouzdano potvrđuje valjanost i validnost prethodne dvije metode predikcije potrošnje energije baterije elektromobila predstavljene poglavljima 8.2 i 8.3. Ovakav pristup ispitivanju performansi elektromobila ima brojne prednosti u odnosu na dosadašnje metode, kao što su smanjenje troškova ispitivanja i povećanje tačnosti dobijenih podataka, što je od ključnog značaja za dalji razvoj EV-a. Primjena ovih metoda omogućava preciznu analizu performansi vozila u realnom okruženju, što pruža dragocjenu podršku u procesu optimizacije performansi EV-a.

9. Bazne punjive stanice elektromobila

Punjači za elektromobile su elektronski uređaji koji se koriste za napajanje baterija koje se koriste u električnim i hibridnim vozilima. Budući da su primarni faktor koji diktira koliko daleko automobil može da vozi sa jednim punjenjem baterije, oni su postali suštinska komponenta poslovanja u automobilskoj industriji. EV punjači su nastali zajedno sa uvođenjem prvih EV-a u XIX vijeku. Istorijski gledano, punjači su se obično sastojali od običnih baterija povezanih u seriji. Međutim, sa napretkom tehnologije, punjači su postali efikasniji i brži. Na današnjem tržištu postoji veliki broj kompanija koje proizvode punjače za elektromobile, kao što su ABB, Siemens, Delta Electronics, Schneider Electric, Tritium, Bosch, Panasonic i mnogi drugi. Tesla je sada lider u industriji i najveći proizvođač. Tesla je odgovoran za proizvodnju Supercharger mreže brzih punjača pored Vallbok-a, ChargePoint-a i EVBok-a.

Korišćenje stanice za punjenje za EV ima brojne prednosti, ali ima i nekoliko nedostataka koje treba uzeti u obzir. Slijede neke od najznačajnijih prednosti i nedostataka ove opcije:

Prednosti:

- u poređenju sa benzinskim stanicama, električni punjači su znatno čistiji izvor energije zbog činjenice da proizvode manje opasnih gasova i proizvode manje zagađenja;
- električni motori su daleko efikasniji od benzinskih motora, što znači da su u stanju da transformišu veći dio energije uskladištene u baterijama automobila u upotrebljivu formu kada se vozilo pokrene;
- troškovi dopunjavanja EV-a su znatno niži od troškova kupovine benzina ili dizela. Ovo ukazuje da bi vlasnici EV-a mogli dugoročno da uštede novac;
- rad je veoma tih. Električni punjači su daleko manje bučni od benzinskih pumpi i dizel pumpi, što znači da neće izazvati nikakve smetnje u okolini;
- smanjeno održavanje: Pošto električni motori imaju mnogo manji broj pokretnih dijelova u poređenju sa benzinskim motorima, manja je vjerovatnoća da će doživjeti mehaničke kvarove i zahtjevaju niži nivo održavanja.

Nedostaci:

- ograničen domet vožnje – Većina EV-a ima ograničen domet vožnje i ne mogu da odu tako daleko kao konvencionalni automobili na benzin. Ovo ukazuje da vlasnici EV-a mogu biti podložni ograničenjima u pogledu mogućnosti putovanja na velike udaljenosti;
- zavisnost od električne mreže. Pošto EV-a dobijaju električnu energiju iz električne mreže, ova zavisnost ih čini predmetom problema u slučaju da električna mreža iskusi sopstvene probleme, kao što su nestanci struje ili drugi poremećaji;
- infrastruktura za punjenje: Još uvijek postoje djelovi svijeta koji nemaju adekvatnu infrastrukturu za punjenje, što može otežati putovanje i umanjiti korisnost korišćenja Eva;
- vremena punjenja koja su duža od onih potrebnih za dopunu automobila sa motorom sa unutrašnjim sagorijevanjem;
- visoka cijena EV-a i punjača neophodnih za njihovo napajanje mogla bi biti smetnja za mnoge potrošače koji razmišljaju o kupovini.

9.1. Klasifikacija baznih punjivih stanica elektromobila

Klasifikacija punjača se oslanja na različite karakteristike, uključujući stepen snage punjenja, vrstu veze i tehniku punjenja. Pored toga, postoji sistem za kategorizaciju punjača prema njihovoj kompatibilnosti sa različitim tipovima baterija za elektromobile. Postoje tri osnovne vrste punjača za EV-a: brzi punjači, kućni punjači i javni punjači.

- brzi punjači su dizajnirani da brzo pune EV baterije i obično se koriste na putu ili na lokacijama gde je brzo punjenje neophodno. Ovi punjači su sposobni da pune baterije na visokim naponima i strujama, što im omogućava da to učine za nekoliko minuta;
- punjači za stambenu upotrebu su manji i mogu se instalirati u garažu ili ispred parkinga. Kućni punjači su namijenjeni da pune vozilo preko noći ili dok je parkiran kod kuće;
- javni punjači su punjači koji se nalaze na javnim lokacijama kao što su parking mjesta, trgovci, restorani, hoteli i slično.

9.2. Tipovi baznih punjivih stanica elektromobila

Punjači su kategorisani prema tehnici punjenja, snazi punjenja, vrsti veze i struji punjenja. Mogu imati monofazni ili trofazni izlaz. Punjači koji su monofazni koriste samo jednu fazu od 230V AC,

dok punjači koji su trofazni koriste sve tri faze od 400V AC. U poređenju sa monofaznim punjačima, trofazni punjači su skuplji, ali pune vozilo brže i efikasnije od monofaznih punjača.

Snaga punjenja predstavlja bitnu karakteristiku u ovom sistemu. Snaga punjenja baterije je mjera koliko brzo se može puniti baterija vozila. Postoji mala snaga koja može dostići do 3kW, srednja snaga koja može dostići između 7 i 22kW i velika snaga (iznad 22kW). Snaga punjenja brzog punjača je često prilično visoka, ali snaga punjenja kućnog ili javnog punjača može biti bilo koji od tri nivoa [100].

Postoji nekoliko različitih tipova utikača za priključke za punjenje elektromobila među kojima su najčešći CHAdeMO (*Charge de Move*), CCS (*Combined Charging System*) odnosno kombinovani sistem punjenja i punjač sa AC portovima (monofazni i trofazni). CCS standard se koristi u Evropi i Sjedinjenim Američkim Državama, dok se CHAdeMO standard koristi u Japanu i istočnim zemljama. Protok punjenja se mjeri u kilovatima (kW) i predstavlja količinu energije koja se prenosi na bateriju u jedinici vremena. Tipično, brzi punjači imaju brz tok punjenja, što im omogućava da pune baterije rekordnom brzinom.

Sve u svemu, bazne stanice za punjenje elektromobila su vitalne komponente poslovanja i neophodni su za efikasno punjenje vozila. Značajan napredak u tehnologiji punjača omogućava vozilima da imaju veći domet i brže se pune, čineći elektromobile sve popularnijim načinom prevoza.

Area	U.S.A.	Europe	China	Japan	
Standard	SAE	IEC	GB/T	CHAdeMO	Tesla
AC	 J1772	 62196-2	 20234.2	 J1772	
DC	 J1772	 62196-3	 20234.3	 CHAdeMO	 Tesla

Slika 9.1 Glavni tipovi veza baznih stanica [74]

9.3. Infrastruktura baznih punjivih stanica elekromobila

Na trenutnom tržištu postoji mnogo različitih proizvođača punjača za elekromobile, međutim neki od najvećih i najuticajnijih proizvođača čija proizvodnja osim mnogobrojnih električnih uređaja i komponenti, uključujući punjače za elekromobile su Švajcarska korporacija ABB, Njemačka multinacionalna korporacija Siemens, Delta Electronics sa sjedištem na Tajvanu čija su ključna tržišta u Kini i Evropi, dalje Francuska multinacionalna korporacija Schneider Electric, ChargePoint Američka firma specijalizovana za razvoj punjača EV-a. Poseban naglasak daje se na još jednom Američkom proizvođaču automobila i punjača za elekromobile, kompaniji Tesla. Njegovi punjači su integrisani u globalnu mrežu superpunjača, što omogućava vlasnicima Tesla vozila da brzo dopune svoje baterije. Postoje i drugi proizvođači punjača za EV-a koji su manje poznati ili se nalaze isključivo na lokalnom tržištu. Bitno je napomenuti da bi lista najdominantnijih proizvođača punjača mogla da se mijenja kao odgovor na tržišne trendove i fluktuacije.

Infrastruktura koja se koristi za punjenje elekromobila širom svijeta prolazi kroz kontinuirani razvoj kako bi održala korak sa rastućom potražnjom za elektrifikacijom drumskog saobraćaja. Počecu predstavljanjem nekih osnovnih informacija o infrastrukturi za punjenje u Evropi, Americi i Aziji, nakon čega slijedi nekoliko lokacija sa kojih se mogu dobiti konkretnije informacije.

Evropa: U Evropi postoji velika mreža stanica za punjenje EV-a i ona je svo vrijeme u procesu povećanja. ABB, EVBox, Allego, Ionity i Fastned su najistaknutija imena u industriji proizvodnje punjača. Prema informacijama koje je prikupila Evropska opservatorija za alternativna goriva (*en.European Alternative Fuels Observatory- EAFO*), broj javnih stanica za punjenje u Evropi je u septembru 2021. dostigao 248.836 [101]. Nemačka, sa svojih 47.980 javnih stanica za punjenje, ima najviše od svih zemalja u Evropi, slijede Francuska (44.571) i Ujedinjeno Kraljevstvo (UK) (35.565). EAFO takođe nudi specifične statističke podatke o broju punjača prisutnih u svakoj evropskoj zemlji, kao i o lokaciji tih punjača, stopi po kojoj se pune i vrsti konektora koji se koriste.

Amerika: ChargePoint, EVgo, Tesla, Electrify America i Blink su najistaknutiji proizvođači punjača za EV-a u Sjedinjenim Američkim Državama i Kanadi, respektivno. Prema informacijama koje je pružio centar za alternativna goriva (*en.Alternative Fuels Data Center-AFDC*), postojalo je 43.357 javnih stanica za punjenje u Sjedinjenim Američkim Državama i 7.249 u Kanadi do avgusta 2021 [102]. AFDC nudi sveobuhvatne podatke o punjačima koji se nalaze u svakoj državi

i provinciji, uključujući informacije o tipovima korišćenih konektora i cijenama po kojima se naplaćuju.

Azija: Kompanije BYD, SGCC, State Grid Company of China, iCharge, ABB i Nissan su najistaknutiji proizvođači punjača u Aziji. Prema podacima koje je prikupio *EV-Volumes*, broj javnih i privatnih punjača u Aziji dostigao je 1.364.097 u septembru 2021 [103]. Najviše punjača ima u Kini, koja ima 1.296.000, zatim Japanu koji ima 25.980 i Južna Koreja, koja ima 19.539. Veb stranica *EV-Volumes* daje specifične statistike o broju punjača u svakoj naciji u Aziji, pored vrste veze i brzine punjenja.

Preostale zemlje: Infrastruktura potrebna za punjenje EV-a se takođe gradi u nizu drugih zemalja. Ipak, broj dostupnih punjača i tip konektora mogu se promijeniti u zavisnosti od toga gde u svijetu idete. Veb lokacije *Global EV Statistics*⁴³ i *EV-Database*⁴⁴ su dva primjera resursa koji se mogu konsultovati za određene informacije na nivou zemlje o infrastrukturi za punjenje.

Japan i Kina sada određuju tempo za razvoj infrastrukture za punjenje EV-a u azijskom regionu. Ciljevi Kine da postane vodeća zemlja u oblasti elektromobilnosti su izuzetno ambiciozni, a vlada želi da ima preko 4 miliona stanica za punjenje EV-a do 2025. godine⁴⁵. Japan već ima više od 30.000 stanica za punjenje, a planiraju da više od četiri puta povećaju taj iznos do 2030. Takođe, u Japanu je u toku pokret za standardizaciju mehanizma plaćanja za punjenje EV-a. Postoje različiti projekti koji se odvijaju u izgradnji infrastrukture za punjenje EV-a u Sjedinjenim Državama, konkretno u državama kao što su Njujork i Teksas, pored pozicije Kalifornije kao vodeće države u tom dijelu svijeta. Nemačka je zemlja koja prednjači u izgradnji infrastrukture za punjenje EV-a u Evropi. Takođe postoji značajan broj stanica za punjenje u drugim zemljama, kao što su Norveška, Holandija i Ujedinjeno Kraljevstvo. Ove zemlje takođe sprovode nove programe za unapređenje infrastrukture svojih stanica za punjenje.

Mnogi različiti izvori pružaju informacije o infrastrukturi za punjenje EV-a širom svijeta. Ovi izvori uključuju izveštaje organizacija kao što su Međunarodna agencija za energiju⁴⁶ i Svetska zdravstvena organizacija⁴⁷, kao i automobilske kompanije i druge organizacije za

⁴³ Detaljnije o tome na linku: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer>

⁴⁴ Detaljnije o tome na linku: <https://ev-database.org/>

⁴⁵ Podaci preuzeti sa linka:

http://english.www.gov.cn/statecouncil/ministries/202201/22/content_WS61eb3b40c6d09c94e48a415d.html.

⁴⁶ Detaljnije o tome na linku: <https://www.iea.org/>.

⁴⁷ Detaljnije o tome na linku: <https://www.who.int/>.

elektromobilnost. Dostupni su i drugi nezavisni portali i aplikacije, kao što su PlugShare⁴⁸ i ChargeMap⁴⁹, koji pružaju informacije o lokacijama stanica za punjenje EV-a širom svijeta.

9.4. Standardi baznih stanica za punjenje

Neophodno je primijeniti standarde za punjenje elektromobila kako bi se garantovalo da se sva vozila, bez obzira na njihovu marku ili model, mogu puniti na siguran i efikasan način. Kada je u pitanju stvaranje punjača za EV-a, postoji nekoliko različitih standarda koji se koriste. U nastavku su neki od standarda koji se najčešće koriste:

1. *CCS* predstavlja standard koji koristi kombinovano punjenje. Ovo implicira da se isti konektor koristi i za jednosmjernu i za naizmjeničnu struju pri metodi punjenja baterije vozila. Ovo je standard koji se poštuje i u Evropi i u Sjedinjenim Američkim Državama.
2. *CHAdeMO* je standard za punjenje DC baterija automobila. Ima vezu koja ima jednu glavnu iglu i pet manjih pinova. Ovaj poseban standard se uglavnom koristi u Japanu, ali se može dobiti i u drugim regionima svijeta.
3. *Tesla Supercharger* je jedinstveni punjač koji je napravila Tesla korporacija i koristi se isključivo u svrhu punjenja njihovih vozila. Ovaj punjač koristi jednosmjernu struju i može brzo da dopuni baterije u vozilima.
4. *GB/T* (Guobiao) je standard koji se koristi u Kini za proces punjenja EV-a. Ovaj standard je prilično sličan CCS standardu po tome što koristi kombinovano punjenje.
5. *IEC* produkt od međunarodne elektrotehničke komisije, je međunarodni standard koji osigurava punjenje baterija EV-a na način koji je bezbjedan i efikasan. IEC standardi se odnose na nekoliko elemenata punjenja, uključujući bezbjednost, efikasnost i kompatibilnost između ostalog.

Standard IEC 61851-1 je međunarodni standard koji se odnosi na bezbjednost i interoperabilnost punjača za EV-a. Ovaj standard utvrđuje glavne kriterijume za punjačke bazne stanice elektromobila, uključujući njihovu zaštitu od električnog udara, zaštitu od prenapona i zaštitu od preopterećenja. Pored toga, ovaj standard definiše posebne kvalitete punjača, kao što su parametri njihovog ulaza i izlaza, kao što su napon, struja i snaga. Istaknuto je nekoliko načina punjenja, kao što su brzo punjenje, postepeno punjenje i mješovito punjenje. Dodatno punjači koji su zasnovani

⁴⁸ Detaljnije o tome na linku: <https://www.plugshare.com/>.

⁴⁹ Detaljnije o tome na linku: <https://chargemap.com/>.

i na DC strujom i punjači koji rade sa AC strujom moraju da budu u skladu sa standardom IEC 61851-1. Ovaj standard se koristi širom svijeta i garantuje da su punjači za EV-a bezbjedni za upotrebu i da mogu da „komuniciraju“ jedni sa drugima. Ovaj standard se često koristi u kombinaciji sa drugim standardima, kao što su CCS, CHAdeMO, GB/T, kako bi se garantovalo da su punjači za EV-a usklađeni sa svim važećim standardima i da mogu da pune različite tipove automobila koji svaki imaju svoj jedinstveni skup zahtjeva.

Utikači, utičnice i kablovi koji se koriste u procesu punjenja EV-a pokriveni su **standardom IEC 62196-1**. Ovaj standard definiše ne samo električne i mehaničke karakteristike utikača i utičnica, već i standarde za bezbjednost, zaštitu od preopterećenja, zaštitu otpornosti na kontakte, otpornost na habanje i niz drugih karakteristika. Ovaj standard opisuje dvije različite vrste utikača, označene kao tip 1 i 2. Utikači tipa 1 se koriste u Sjevernoj Americi i Japanu, dok se utikači tipa 2 koriste u Evropi (pogledaj sliku 9.1). Pored toga, standard navodi niz dodatnih podataka za svaku vrstu utikača, uključujući broj pinova, napon i struju.

IEC 62196-1 standard se prati svuda u svijetu kako bi se osiguralo da su utikači i utičnice koje se koriste za punjenje EV-a bezbjedni i kompatibilni jedni sa drugima. Ovaj standard se često koristi u kombinaciji sa drugim standardima, uključujući IEC 61851-1 i CCS, kako bi se garantovalo da su punjači i utikači usklađeni sa svim važećim standardima i da mogu da pune različite tipove automobila od kojih svaki ima svoje jedinstvene zahtjeve.

Pored standarda IEC 61851-1 i IEC 62196-1 postoji više IEC standarda koji se odnose na temu punjenja elektromobila. Ovi standardi se mogu naći u IEC platformama, a među njima su sledeće:

- **IEC 61851-21**: Ovaj standard opisuje komunikacioni protokol koji treba da se koristi između punjača i automobila kako bi se omogućilo da punjač i vozilo međusobno „komuniciraju“ dok se vozilo puni. Ovaj standard je ključan da garantuje da različiti punjači i automobili mogu da komuniciraju jedni sa drugima na neprimetan način;
- Standard **IEC 61851-23** je onaj koji opisuje bezbjednosne standarde za punjače koji se koriste u spoljašnjim okruženjima. Ovo uključuje punjače koji se koriste napolju, na parkiralištima ili duž puteva. Ovaj standard sadrži kriterijume za zaštitu od kiše, snijega, prašine i drugih spoljašnjih uticaja koji mogu uticati na bezbjednost i performanse punjača. Ovi efekti mogu uključivati faktore okoline kao što su temperatura i vlažnost;

- **IEC 61851-24** je standard koji se odnosi na bezbjednosne standarde za punjače koji se koriste u zatvorenim mestima. Primjeri zatvorenih prostora uključuju garaže, skladišta i druge slične lokacije. Ovaj standard utvrđuje kriterijume za zaštitu od požara, eksplozije, elektrostatičkog pražnjenja i nekoliko drugih potencijalno opasnih okolnosti;
- Međunarodna elektrotehnička komisija objavila je standard **IEC 61980**, koji opisuje metode za procjenu svojstava punjača kao što su efikasnost, harmonijska distorzija i drugi atributi. Ovaj standard je veoma neophodan da bi se garantovao kvalitet i funkcionalnost punjača;
- Međunarodna elektrotehnička komisija razvila je standard pod nazivom **IEC 61851-22** koji opisuje bezbjednosne zahtjeve koje moraju da ispune punjači koji koriste baterije visokog napona. Ovaj standard utvrđuje standarde za zaštitu od prekomjernog punjenja, prekomjerne struje i drugih potencijalno opasnih okolnosti koje mogu uticati na bezbjednost punjača kao i baterija.

U zaključku, postoje različiti IEC standardi koji se odnose na temu punjenja elektromobila koji opisuju bezbjednosne kriterijume, metode mjerenja performansi, specifikacije komunikacionih protokola i druge elemente koji su potrebni za bezbjedan rad punjenja EV-a, kao i efikasnost i interoperabilnost.

9.5. Dizajn punjača elektromobila

Dizajn punjača za elektromobile je veoma važan kako bi se obezbjedio proizvod koji nije samo praktičan i efikasan već i privlačan osobi koja će ga na kraju koristiti. U većini slučajeva, ovaj postupak će se odvijati u više faza. Definisanje zahtjeva i ciljeva koje punjač treba da ispuni često je zadatak prvog koraka procesa. Ovi zahtjevi su često određeni propisima i standardima koji su na snazi u zemlji u kojoj će se punjač koristiti. Zbog dinamične prirode današnje energetske infrastrukture, elektromobili mogu igrati brojne različite uloge. U radu [75] predložena je metodologija za analizu reaktivne snage javnih stanica za punjenje elektromobila na dva glavna indikatora elektrodistributivnog sistema: globalni, koji se odnosi na gubitke aktivne snage, i lokalni koji se odnosi na starenje transformatora. Predloženi metod uzima u obzir činjenicu da se mreža može podijeliti na proizvoljan broj djelova i da svaki dio može da sadrži proizvoljan broj stanica. Sledeća faza je proračun električnih parametara mreže, na osnovu čega se može izvršiti adekvatna analiza opterećenja transformatora kako bi se odredio optimalni kapacitet i spriječili

problemi preopterećenja. Pored toga, uzimaju se u obzir i specifični tehnološki aspekti elektromobila koji će se puniti. Nakon koraka definisanja specifikacija, slijedi faza projektovanja ideje. Obično se ove ideje nude kupcu kako bi se zatražili komentari i postigao dogovor oko konačnog dizajna. Tokom faze detaljnog projektovanja razvijaju se tehnički zahtjevi i odgovarajući crteži za svaku komponentu punjača. Čim se dizajn završi, proces prelazi u proizvodnju, a zatim u fazu prototipa. Prije nego što se punjač proizvede u velikim količinama, dizajn je prošao kroz svoj korak uz pomoć prototipa. Kada se proizvodnja završi, sledeća faza je uvođenje na tržište i faza prodaje. Često se u ovoj tački procesa sprovode marketinški naponi sa ciljem da se privuče što više potencijalnih potrošača koliko je to moguće. Estetska razmatranja, poput boja, oblika i rasporeda materijala, uzimaju se u obzir tokom procesa dizajniranja punjača elektromobila kako bi gotov proizvod bio privlačan potrošačima.

Kao što je razmatrano u studiji [76] proces optimizacije punjenja i pražnjenja elektromobila može se postići pažljivo definisanim algoritmom. Korišćenjem Matlab kvadratnog algoritma za programiranje, ciljna funkcija sa skupom ograničenja koja zavisi od tipa elektromobila, zahtjeva vlasnika i bazne infrastrukture za punjenje elektromobila je minimizirana. U scenariju koji se razmatra, uzeto je 160 elektromobil. Algoritam predstavljen u ovom radu demonstrira mogućnost korišćenja baterije elektromobila za smanjenje vršne snage u mikromrežama, kao jednu od brojnih alternativa za korišćenje EV baterija. Koristeći Matlab, izvedeni rezultati pokazuju da je moguće smanjiti vršnu snagu mikro mreže za više od 12% upotrebom baterija elektromobila. Upoređivanje ovog oblika analize studija sa Matlab programiranjem otkriva stvarnu mogućnost povezanosti između Matlab predikcije potrošnje električne energije u ovom radu i navedene studije [76]. Težnja usavršavanja razvijenog modela i njegovog umreženj sa baznim stanicama za punjenje pokazuje značajan doprinos ovog rada unapređenju elektrifikacije drumskog saobraćaja. Obimno istraživanje [77] identifikuje poteškoće uzrokovane punjenjem elektromobila i predlaže rešenje koje odražava optimalnu koordinaciju velikog broja punjenja vozila u nastojanju da se optimizuje naponski profil distributivnog sistema.

Prostrana je lista objavljenih radova koji se mogu koristiti za istraživanje i dizajna punjača elektromobila, a neki od njih su [78] [79] [80] [81] u kojima se mogu naći savremene metode dizajniranja i kontrole električnih baznih stanica za punjenje vozila sa svim potrebnim komponentama. Dodatno, informacije o izradi punjača za EV-a mogu se pronaći na zvaničnim

sajtovima proizvođača punjača, kao i na sajtovima organizacija koje se bave razvojem infrastrukture za punjenje EV-a, kao što su EVBok, ChargePoint, Tesla.

9.6. OCPP protokol

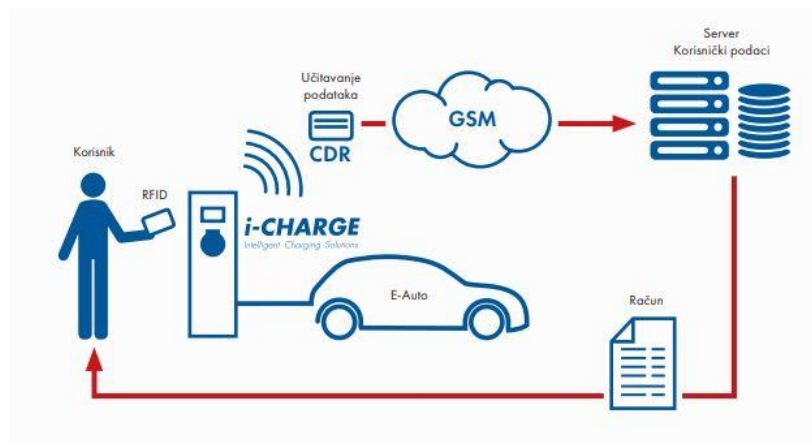
SMART punjači (*Smart Charging Stations*), predstavljaju pametne stanice za punjenje, koje su inteligentni punjači za EV-a koji su u stanju da komuniciraju i razmjenjuju podatke sa drugim uređajima i sistemima. Kao rezultat toga, stanicama za punjenje elektromobila može se efikasnije upravljati i nadzirati, a vozači mogu bolje da iskoriste raspoloživi kapacitet u električnoj mreži.

Open Charge Point Protocol, često poznat kao OCPP, je standardni protokol za komunikaciju između pametnih punjača za EV-a i kontrolnih sistema. Ovaj protokol omogućava uređajima da međusobno komuniciraju i dijele podatke. Sa namjerom da definiše protokol za komunikaciju između pametnih punjača, *Open Charge Alliance*⁵⁰ (OCA), nezavisna grupa proizvođača opreme za punjenje EV-a, osmislila je OCPP. OCPP pruža podršku za različite funkcije, kao što su autentifikacija korisnika, prikupljanje podataka o naplati, administracija i nadzor mreže naplate, praćenje naplate i upravljanje i kontrola naplate. *Open Connectivity Foundation*⁵¹ (OCF) omogućava integraciju različitih tipova punjača i kontrolnih sistema, što zauzvrat omogućava da proizvodi različitih proizvođača rade zajedno. Kada se koriste pametni punjači i OCPP protokol, ostvaruju se brojne prednosti. Neke od ovih prednosti uključuju poboljšanje kapaciteta mreže za korišćenje, smanjenje opterećenja na elektroenergetski sistem, smanjenje troškova energije i poboljšano upravljanje i praćenje mrežnih punjača. Pored toga, pametni punjači i OCPP protokol omogućavaju kontrolu punjenja elektromobila na način koji je lakši i efikasniji. Ovo je suštinska sposobnost za dalji rast električne mobilnosti.

Korisnici, kompanije za distribuciju električne energije i sistemi za upravljanje energijom su u mogućnosti da daljinski nadgledaju i upravljaju stanicama za punjenje zahvaljujući uvođenju tehnologije daljinskog upravljanja za bazne stanice za punjenje elektromobila. Ovo se postiže korišćenjem komunikacionih tehnologija, koje omogućavaju prenos informacija i komandi između opreme na daljinu.

⁵⁰ Detaljnije o tome na linku <https://www.openchargealliance.org/>.

⁵¹ Detaljnije o tome na linku <https://openconnectivity.org/>.



Slika 9.2 Standardni komunikacioni protokol OCPP 1.5 koji omogućava uređajima različitih proizvođača da komuniciraju unutar iste mreže. [88]

Kupci su u mogućnosti da lociraju i rezervišu besplatnu stanicu za punjenje pomoću daljinskog upravljača ili aplikacije za pametni telefon, kao i da počnu ili zaustave proces punjenja i upravljaju plaćanjima. Daljinsko upravljanje mogu da koriste električna preduzeća i sistemi za upravljanje energijom za prilagođavanje količine potrošene električne energije i za upravljanje opterećenjem mreže. Na primjer, oni mogu da podese brzinu punjenja baterije u skladu sa trenutnom potrebom za energijom ili preusmjere energiju na druge lokacije koje imaju veće potrebe za njom. Stacionarni baterijski sistemi se mogu kontrolisati daljinski kako bi skladištili energiju tokom perioda niske potražnje i oslobađali uskladištenu energiju tokom perioda velike potražnje, čime se doprinosi održavanju ravnoteže mreže i snižavanju troškova energije. Uobičajna je praksa kombinovanja OCPP protokola sa daljinskim upravljanjem kako bi se olakšala komunikacija između stacionarnih punjača i drugih uređaja sadržanih u sistemu. Kontrolu punjenja, praćenje statusa i praćenje potrošnje energije omogućava OCPP, što olakšava upravljanje opterećenjem mreže i maksimizira efikasnost potrošnje.

Zaključna razmatranja

Električna vozila su jedan od najznačajnijih obrazaca u savremenom saobraćaju ali njihova budućnost je nesumnjivo još uvijek neizvjesna. Vidna je potreba za vozilima koja prave najmanju štetu po životnu sredinu. Iako su troškovi proizvodnje takvih automobila trenutno skupi u mnogim aspektima, većina neophodne tehnologije koja je tražena u elektrifikaciji vozila je razvijena, što može da omogući njihovu masovnu proizvodnju. Njihova ekološka efikasnost doprinijela je njihovoj popularnosti međutim za dalji razvoj ove tehnologije neophodno je istražiti i poboljšati efikasnost baterija koje napajaju ova vozila. Ova studija je bila uspješna u postizanju svog glavnog cilja, a to je da krajnjem korisniku pruži konstruisani model koji je imao izuzetno precizne rezultate za predikciju potrošnje energije koju troši baterija elektromobila korišćenjem podataka iz stvarnog svijeta, usmjeravajući na taj način korisnike elektromobila u njihovoj potrazi za energetsom efikasnošću.

Matlab i Simulink su efikasni instrument za modeliranje, simulaciju i analizu dinamičkih sistema i predstavljaju neophodni instrumenti za testiranje potrošnje baterija elektromobila. Dokazano je da ovi instrumenti omogućavaju precizno mjerenje SoC i predviđanje potrošnje EV-a zasnovano na simulaciji. Kreirani model u ovom studijskom radu može pomoći inženjerima u razvoju i testiranju različitih aspekata EV-a, uključujući performanse baterije, potrošnju i efikasnost, što može doprinijeti napretku tehnologije EV-a i širokom usvajanju istih.

Domet elektromobila je određen brojnim faktorima, uključujući kapacitet baterije, snagu motora, težinu vozila i uslove rada. Kroz početno poglavlje savremene ere elektrifikacije drumskog saobraćaja tabelarno smo prikazali poboljšanja u napretku elektrifikacije vozila poslednjih godina što je rezultat napretka tehnologije baterija i električnog pogona koji su povećali domet elektromobila. Pored toga kroz završno poglavlje ovog rada opisana je tendencija država članica i potpisnica međunarodnih kampanja i sporazuma ka sve većem doprinosu u elektrifikaciji drumskog saobraćaja i razvijanju dostupnosti infrastrukture za punjenje EV-a na taj način povećavajući privlačnost samih vozača.

Model predviđanja energije se sastoji od matematičkih jednačina, koje su predstavljene u samoj analizi rada i koriste se za izračunavanje potrošnje energije na osnovu nekoliko karakteristika kao što su brzina, uspon, aerodinamički otpor, masa vozila i snaga motora. Razvijeni model je stabilan i pouzdan uzimanjem u obzir tri slučaja testiranja. Prvi je zasnovan na standardnom ciklusu vožnje

Matlab FTP-75 korišćenjem podataka dostupnih za električno vozilo Tesla Model S i na taj način kroz dobijene rezultate daje stabilnost samih Simulink blokova. Mnogobrojne klasifikacije ciklusa vožnje opisane kroz ovaj rad su kompatibilne sa simulink blokom, omogućavajući korisniku da isproba svoje vozilo u različitim metodama vožnje. Drugi slučaj testiranja zasnovan na OSM-u i njegovoj blisko povezanoj topologiji puta uključuje korišćenje preciznih informacija o ruti koje se mogu dobiti korišćenjem različitih kontinuiranih platformi zasnovanih na globalnom predviđanju rutiranja za zahteve krajnjeg korisnika. Ova vrsta procjene ima za cilj da pruži savremenom korisniku tehnologije precizne informacije o korišćenju energije baterije njegovog elektromobila na osnovu putanje izabrane između dvije lokacije. Ovaj tip simulacionog modela takođe uzima u obzir fundamentalne procedure i uslove realnog rutiranja, a preko Matlab koda se uspostavlja veza između podataka predstavljenih na OSM platformi i konačnih rezultata koje zahtijeva korisnik. Podaci koje zahtijeva korisnik preuzimaju se sa OSM platforme, obrađuju se putem Matlab programiranja i predstavljaju u numeričkim i grafičkim formatima koji se lako i jasno objašnjavaju krajnjem korisniku. Dodatna funkcionalnost kojoj se može pristupiti preko koda uključuje kapacitet za čuvanje rezultata za buduću upotrebu, modifikovanje ili administriranje podataka koje zahteva korisnik za određenu rutu. Završni ciklus testiranja elektromobila zasnovan na prethodno dokumentovanim rutama koristeći GeoTracker softverski uslužni program za praćenje i analizu kretanja vozila je ključan za poređenje validnosti prethodna dva slučaja. Na osnovu već dokumentovane rute kojom je vozilo bar jednom prošlo, daje precizne podatke o samoj ruti na osnovu različitih ciklusa vožnje, koji se mogu grafički vidjeti u poljima rezultata. Takav metod daje pravo posmatraču na širi pogled na kretanje korisnika vozila kao rezultat njegovog ličnog stila vožnje. Kao i u prethodnoj instanci, ovaj metod testiranja kroz Matlab obradu koda daje rezultate koji se mogu sačuvati i koristiti na više načina. Ova studija predstavlja izvedena predviđanja za različite scenarije, uključujući konfiguraciju vozila i okoline kao i karakteristike i analize istih.

Doprinos koji ovaj model može da pruži ima brojne prednosti u odnosu na dosadašnje metode, uključujući smanjenje troškova testiranja i povećanje preciznosti dobijenih podataka, a oba su ključna za nastavak razvoja EV-a. Primjena ovih metoda omogućava preciznu analizu performansi vozila u realnom okruženju, što pruža dragocjenu podršku za optimizaciju performansi EV-a. Predviđanja modela predstavljenog u ovom radu su ograničena na izgled budućeg povezivanja sa OCPP protokolom!

Zaključno, ovaj rad nudi mogućnost predikcije potrošnje električne energije elektromobila u unapređenju tehnološke infrastrukture EV-a, njihovih punjača i aplikativnih softvera koji omogućava korisniku da predvidi potrošnju električne energije svog elektromobila.

Literatura

Knjige i radovi

- [1] M. Tamba *et al.*, “Economy-wide impacts of road transport electrification in the EU,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 182, no. May, p. 121803, 2022, doi: 10.1016/j.techfore.2022.121803.
- [2] S. Mujović and F. Mišurović, “Numerical Probabilistic Load Flow Analysis in Modern Power Systems with Intermittent Energy Sources,” *Energies*, vol. 15, no. 6, 2022, doi: 10.3390/en15062038.
- [3] K. B. Kumar, “Simulation of Electric Vehicle Drive with Matlab/Simulink,” *Int. J. Adv. Eng. Manag.*, vol. 2, no. 1, pp. 22–27, 2020.
- [4] D. McDonald, “Electric Vehicle Drive Simulation with MATLAB/Simulink,” *Proc. 2012 North-Central Sect. Conf.*, pp. 1–24, 2012.
- [5] M. Al Halabi and A. Al Tarabsheh, “Modelling of Electric Vehicles Using Matlab/Simulink,” *SAE Tech. Pap.*, vol. 2020-Janua, pp. 1–10, 2020, doi: 10.4271/2020-01-5086.
- [6] A. A. Abulifa, R. K. Raja Ahmad, A. Che Soh, M. A. M. Radzi, and M. K. Hassan, “Modelling and simulation of battery electric vehicle by using MATLAB-Simulink,” *IEEE Student Conf. Res. Dev. Inspiring Technol. Humanit. SCORED 2017 - Proc.*, vol. 2018-Janua, pp. 383–387, 2018, doi: 10.1109/SCORED.2017.8305360.
- [7] Ching Chuen Chan, “THE RISE & FALL OF ELECTRIC VEHICLES IN 1828–1930: LESSONS LEARNED,” *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 1, pp. 206–212, 2013.
- [8] Z. Nikolić, Ž. Zlatomir, and R. Kragić, “DEVELOPMENT AND PERSPECTIVS OF ELECTRIC VEHICLES,” in *PRVA KONFERENCIJA O OBNOVLJIVIM IZVORIMA ELEKTRIČNE ENERGIJE*.
- [9] J. Z. Kiarash Ahi, Kamyar Makinejad, “Development of Energy Storage Systems for Electric Vehicles : Challenges and Possible Solutions,” no. November, 2015.
- [10] Y. S. Ottmar Edenhofer, Ramón Pichs-Madruga, *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. 2012.
- [11] H. Shen *et al.*, “Solid-state electrolyte considerations for electric vehicle batteries,” *Sustain. Energy Fuels*, vol. 3, no. 7, pp. 1647–1659, 2019, doi: 10.1039/c9se00119k.

- [12] C. De Cauwer, W. Verbeke, T. Coosemans, S. Faid, and J. Van Mierlo, “A data-driven method for energy consumption prediction and energy-efficient routing of electric vehicles in real-world conditions,” *Energies*, vol. 10, no. 5, 2017, doi: 10.3390/en10050608.
- [13] Clean Energy Ministerial, “EV30 @ 30 Campaign,” no. June, p. 2019, 2019.
- [14] H. Sips, “GLOBAL MOU FOR ZE-MHDVs.” p. 2040, 2021.
- [15] M. O. R. i Turizma, “Izvještaj o sprovođenju NACIONALNE STRATEGIJE U OBLASTI KLIMATSKIH PROMJENA DO 2030 . GODINE,” 2018.
- [16] International Energy Agency, “Oil 2021,” *Int. Energy Agency*, p. 167, 2021, [Online]. Available: www.iea.org
- [17] M. Calasan *et al.*, “Estimation of Parameters of Different Equivalent Circuit Models of Solar Cells and Various Photovoltaic Modules Using Hybrid Variants of Honey Badger Algorithm and Artificial Gorilla Troops Optimizer,” *Mathematics*, vol. 10, no. 7, 2022, doi: 10.3390/math10071057.
- [18] X. Li and S. S. Williamson, “Comparative investigation of series and parallel Hybrid Electric Vehicle (HEV) efficiencies based on comprehensive parametric analysis,” *VPPC 2007 - Proc. 2007 IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, pp. 499–505, 2007, doi: 10.1109/VPPC.2007.4544176.
- [19] G. Canbolat and H. Yaşar, “Performance Comparison for Series and Parallel Modes of a Hybrid Electric Vehicle,” *Sak. Univ. J. Sci.*, no. November 2020, pp. 1–1, 2019, doi: 10.16984/saufenbilder.369149.
- [20] A. Al-Samari, “Study of emissions and fuel economy for parallel hybrid versus conventional vehicles on real world and standard driving cycles,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 56, no. 4, pp. 721–726, 2017, doi: 10.1016/j.aej.2017.04.010.
- [21] S. Jain and L. Kumar, *Fundamentals of Power Electronics Controlled Electric Propulsion*, 4th ed. Elsevier Inc., 2018. doi: 10.1016/b978-0-12-811407-0.00035-0.
- [22] I. Phevs, “Plug - In Hybrid Electric Vehicles,” pp. 111–141, 2018.
- [23] M. R. Wahid, B. A. Budiman, E. Joelianto, and M. Aziz, “A review on drive train technologies for passenger electric vehicles,” *Energies*, vol. 14, no. 20, pp. 1–24, 2021, doi: 10.3390/en14206742.
- [24] I. Kim and H. Kim, “Configuration analysis of plug-in hybrid systems using global optimization,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 6, no. 2, pp. 391–404, 2013, doi:

- 10.3390/wevj6020391.
- [25] V. A. Katić, “Mali električni automobili - ispitivanje osnovnih pogonskih karakteristika,” *Naučno-stručni Simp. Energ. Efik. | ENEF 2013, Banja Luka*, pp. 22–30, 2013.
- [26] S. Mujović, V. Radulović, and L. Šćekić, “Pumped hydroelectric energy storage as a facilitator of renewable energy in liberalized electricity market,” *Energies*, vol. 13, no. 22, 2020, doi: 10.3390/en13226076.
- [27] R. Deivanayagam, “Vehicle-to-grid Technology: Concept, Status, and Challenges,” *J. Undergrad. Res. Univ. Illinois Chicago*, vol. 10, no. 1, 2017, doi: 10.5210/jur.v10i1.8013.
- [28] J. M. Technology, “Powering the Future through Hydrogen and Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells,” *Johnson Matthey’s Int. J. Res. Explor. Sci. Technol. Ind. Appl.*, vol. 44, no. 0, pp. 0–23, 2020.
- [29] E. Energy, E. Standards, and L. Assistance, “Energy Policy Act of 1992 (106 STAT 2776),” vol. 92, no. 486, pp. 2776–3133, 1992, [Online]. Available: <https://www.congress.gov/102/statute/STATUTE-106/STATUTE-106-Pg2776.pdf>
- [30] J. Kurtz, S. Sprik, G. Saur, and S. Onorato, “Fuel Cell Electric Vehicle Driving and Fueling Behavior Fuel Cell Electric Vehicle Driving and Fueling Behavior,” no. March, pp. 1–22, 2019.
- [31] I. Alvarez-Meaza, E. Zarrabeitia-Bilbao, R. M. Rio-Belver, and G. Garechana-Anacabe, “Fuel-cell electric vehicles: Plotting a scientific and technological knowledge map,” *Sustain.*, vol. 12, no. 6, 2020, doi: 10.3390/su12062334.
- [32] Z. Marja and R. Brzakovi, “SOLAR POWER ELECTRICAL VEHICLES - ADVANTAGES AND DEFICIENCIES OF USE,” pp. 1–4.
- [33] E. A. Grunditz and T. Thiringer, “Performance analysis of current BEVs based on a comprehensive review of specifications,” *IEEE Trans. Transp. Electrif.*, vol. 2, no. 3, pp. 270–289, 2016, doi: 10.1109/TTE.2016.2571783.
- [34] M. Islameka, C. Kusuma, and B. Budiman, “Influence of Braking Strategies for Electric Trike Energy Consumption,” *Int. J. Sustain. Transp. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 20–25, 2020, doi: 10.31427/ijstt.2020.3.1.4.
- [35] S. U. Jeon, J. W. Park, B. K. Kang, and H. J. Lee, “Study on Battery Charging Strategy of Electric Vehicles Considering Battery Capacity,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 89757–89767, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3090763.

- [36] C. Zhu, X. Li, L. Song, and L. Xiang, “Development of a theoretically based thermal model for lithium ion battery pack,” *J. Power Sources*, vol. 223, pp. 155–164, 2013, doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.09.035.
- [37] Y. Oriksa, K. Yamamoto, T. Shimizu, and Y. Uchimoto, “Multiscale and hierarchical reaction mechanism in a lithium-ion battery,” *Chem. Phys. Rev.*, vol. 3, no. 1, p. 011305, 2022, doi: 10.1063/5.0062329.
- [38] G. Ning, B. Haran, and B. N. Popov, “Capacity fade study of lithium-ion batteries cycled at high discharge rates,” *J. Power Sources*, vol. 117, no. 1–2, pp. 160–169, 2003, doi: 10.1016/S0378-7753(03)00029-6.
- [39] P. Ramadass, B. Haran, R. White, and B. N. Popov, “Mathematical modeling of the capacity fade of Li-ion cells,” *J. Power Sources*, vol. 123, no. 2, pp. 230–240, 2003, doi: 10.1016/S0378-7753(03)00531-7.
- [40] N. N. Dingari, M. Mynam, and B. Rai, “A reduced-order electrochemical model for coupled prediction of state of charge and state of health of lithium ion batteries under constant current-constant voltage charging conditions,” *Energy Storage*, vol. 2, no. 6, pp. 1–13, 2020, doi: 10.1002/est2.194.
- [41] A. Coester, M. W. Hofkes, and E. Papyrakis, “Economic analysis of batteries: Impact on security of electricity supply and renewable energy expansion in Germany,” *Appl. Energy*, vol. 275, no. June, p. 115364, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115364.
- [42] Y. Qi, “Separately Excited DC Motor for Electric Vehicle Controller Design,” 2016.
- [43] P. Damodharan and K. Vasudevan, “Sensorless brushless DC motor drive based on the zero-crossing detection of back electromotive force (EMF) from the line voltage difference,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 3, pp. 661–668, Sep. 2010, doi: 10.1109/TEC.2010.2041781.
- [44] R. E. Araújo and José Roberto Camacho, *Modelling and Control of Switched Reluctance Machines*. Published in London, United Kingdom, 2005. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.82219>
- [45] S.-H. Kim, *Pulse width modulation inverters*. 2017. doi: 10.1016/b978-0-12-812138-2.00007-6.
- [46] A. Hughes and B. Drury, “Induction Motors – Rotating Field, Slip and Torque,” *Electr. Mot. Drives*, pp. 141–167, 2013, doi: 10.1016/b978-0-08-098332-5.00005-x.

- [47] P. F. Levi E. , R., Bojoi R., “Multiphase induction motor drives-a technology status review,” *IET Electr. Power Appl.*, vol. 1, no. 5, pp. 643–656, 2007, doi: 10.1049/iet-epa.
- [48] E. Roshandel, A. Mahmoudi, S. Kahourzade, A. Yazdani, and G. M. Shafiullah, “Losses in efficiency maps of electric vehicles: An overview,” *Energies*, vol. 14, no. 22, 2021, doi: 10.3390/en14227805.
- [49] A. Mamgai, “Regenerative Braking Systems (Rbs),” *Int. J. Eng. Appl. Sci. Technol.*, vol. 6, no. 7, pp. 207–210, 2021, doi: 10.33564/ijeast.2021.v06i07.034.
- [50] E. M. Szumska and R. Jurecki, “The Analysis of Energy Recovered during the Braking of an Electric Vehicle in Different Driving Conditions,” 2022.
- [51] H. Xie and E. Guo, “How the Switching Frequency Affects the Performance of Buck Converter Application Report How the Switching Frequency Affects the Performance of a Buck Converter,” pp. 1–8, 2019, [Online]. Available: www.ti.com
- [52] B. Zhu, H. Wang, and D. M. Vilathgamuwa, “Single-switch high step-up boost converter based on a novel voltage multiplier,” *IET Power Electron.*, vol. 12, no. 14, pp. 3732–3738, 2019, doi: 10.1049/iet-pel.2019.0567.
- [53] R. Rajamani, *Vehicle Dynamics and Control*, no. 9. 2019.
- [54] V. A. Laurence and J. Christian Gerdes, “Long-Horizon Vehicle Motion Planning and Control through Serially Cascaded Model Complexity,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 30, no. 1, pp. 166–179, 2022, doi: 10.1109/TCST.2021.3056315.
- [55] F. Gao, Q. Hu, J. Ma, and X. Han, “A simplified vehicle dynamics model for motion planner designed by nonlinear model predictive control,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 21, 2021, doi: 10.3390/app11219887.
- [56] T. Barlow, S. Latham, I. Mccrae, and P. Boulter, “A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions,” *TRL Publ. Proj. Rep.*, p. 280, 2009, [Online]. Available: http://www.trl.co.uk/online_store/reports_publications/trl_reports/cat_traffic_and_the_environment/report_a_reference_book_of_driving_cycles_for_use_in_the_measurement_of_road_vehicle_emissions.htm%5Cnhttps://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/344442/trl_report_a_reference_book_of_driving_cycles_for_use_in_the_measurement_of_road_vehicle_emissions.pdf
- [57] O. Tremblay and L. A. Dessaint, “Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications,” *24th Int. Batter. Hybrid Fuel Cell Electr. Veh. Symp. Exhib. 2009, EVS*

- 24, vol. 2, pp. 930–939, 2009.
- [58] A. Seaman, T. S. Dao, and J. McPhee, “A survey of mathematics-based equivalent-circuit and electrochemical battery models for hybrid and electric vehicle simulation,” *J. Power Sources*, vol. 256, pp. 410–423, 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.057.
- [59] V. Ramadesigan, P. W. C. Northrop, S. De, S. Santhanagopalan, R. D. Braatz, and V. R. Subramanian, “Modeling and Simulation of Lithium-Ion Batteries from a Systems Engineering Perspective,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 159, no. 3, pp. R31–R45, 2012, doi: 10.1149/2.018203jes.
- [60] S. Mujović, F. Janković, and L. Šćekić, “Matlab / Simulink Based Energy Consumption Prediction of Electric Vehicles,” *21st Int. Symp. Power Electron.*, 2021.
- [61] C. De Cauwer, J. Van Mierlo, and T. Coosemans, “Energy consumption prediction for electric vehicles based on real-world data,” *Energies*, vol. 8, no. 8, pp. 8573–8593, 2015, doi: 10.3390/en8088573.
- [62] R. Shankar and J. Marco, “Method for estimating the energy consumption of electric vehicles and plug-in hybrid electric vehicles under real-world driving conditions,” *IET Intell. Transp. Syst.*, vol. 7, no. 1, pp. 138–150, 2013, doi: 10.1049/iet-its.2012.0114.
- [63] M. Neaimeh, G. A. Hill, Y. Hübner, and P. T. Blythe, “Routing systems to extend the driving range of electric vehicles,” *IET Intell. Transp. Syst.*, vol. 7, no. 3, pp. 327–336, 2013, doi: 10.1049/iet-its.2013.0122.
- [64] J. Wang, I. Besselink, and H. Nijmeijer, “Battery electric vehicle energy consumption prediction for a trip based on route information,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 232, no. 11, pp. 1528–1542, 2018, doi: 10.1177/0954407017729938.
- [65] A. Brooker, J. Gonder, L. Wang, E. Wood, S. Lopp, and L. Ramroth, “FASTSim: A Model to Estimate Vehicle Efficiency, Cost and Performance,” *SAE Tech. Pap.*, vol. 2015-April, no. April, 2015, doi: 10.4271/2015-01-0973.
- [66] K. N. Genikomsakis and G. Mitrentsis, “A computationally efficient simulation model for estimating energy consumption of electric vehicles in the context of route planning applications,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 50, pp. 98–118, 2017, doi: 10.1016/j.trd.2016.10.014.
- [67] B. Saerens, *Optimal Control Based Eco-Driving – Theoretical Approach and Practical Applications*, no. June. 2012. doi: 10.13140/RG.2.2.14398.79681.

- [68] W. Dib, A. Chasse, P. Moulin, A. Sciarretta, and G. Corde, "Optimal energy management for an electric vehicle in eco-driving applications," *Control Eng. Pract.*, vol. 29, pp. 299–307, 2014, doi: 10.1016/j.conengprac.2014.01.005.
- [69] N. Petit and A. Sciarretta, *Optimal drive of electric vehicles using an inversion-based trajectory generation approach*, vol. 44, no. 1 PART 1. IFAC, 2011. doi: 10.3182/20110828-6-IT-1002.01986.
- [70] F. Mensing, R. Trigui, and E. Bideaux, "Vehicle trajectory optimization for application in ECO-driving," *2011 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2011*, 2011, doi: 10.1109/VPPC.2011.6042993.
- [71] Tesla, "Tesla Model S Owner's Manual, Version 2018.48.12," 2020, [Online]. Available: https://www.tesla.com/sites/default/files/model_s_owners_manual_north_america_en_us.pdf
- [72] U. Montenegro, "Prostorno-urbanisticki plan Glavnog grada Podgorica, do 2025. godine".
- [73] M. A. Javaid, "Understanding Dijkstra Algorithm," *SSRN Electron. J.*, no. January 2013, 2013, doi: 10.2139/ssrn.2340905.
- [74] Q. S. Jia and T. Long, "A Review on Charging Behavior of Electric Vehicles: Data, Model, and Control," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 5, pp. 598–601, 2020, doi: 10.1016/j.ifacol.2021.04.149.
- [75] A. Pavlićević and S. Mujović, "Impact of Reactive Power from Public Electric Vehicle Stations on Transformer Aging and Active Energy Losses," *Energies*, vol. 15, no. 19, 2022, doi: 10.3390/en15197085.
- [76] S. Mujovic, M. Calasan, and M. Kotic, "Electric vehicles as a mean for peak power curtailment in micro grids," *2019 20th Int. Symp. Power Electron. Ee 2019*, pp. 3–7, 2019, doi: 10.1109/PEE.2019.8923320.
- [77] S. Mujovic, T. Ninkovic, and M. Calasan, "Coordination of electric vehicles charging in the distribution system," *2020 19th Int. Symp. INFOTEH-JAHORINA, INFOTEH 2020 - Proc.*, no. March, pp. 18–20, 2020, doi: 10.1109/INFOTEH48170.2020.9066303.
- [78] S. Kiran, M. Palanivendhan, V. Sharma, R. Parihar, and A. K. Singh, "Design and development of prototype model of advanced charging system for energy efficient electric vehicle," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 993, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/993/1/012157.

- [79] J. A. Domínguez-Navarro, R. Dufo-López, J. M. Yusta-Loyo, J. S. Artal-Sevil, and J. L. Bernal-Agustín, “Design of an electric vehicle fast-charging station with integration of renewable energy and storage systems,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 105, no. March 2018, pp. 46–58, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.08.001.
- [80] T. Ref, P. Intel, T. Refundido, P. Intelectual, S. Consolidated, and C. Act, “DESIGN AND CONTROL OF A BATTERY CHARGER FOR ELECTRIC VEHICLES Adrià Marcos Pastor,” 1996.
- [81] I. Of, “Design and Implementation of Charging Circuit for Electric Vehicles,” vol. 2021, no. 8, pp. 0–70, 2020, doi: 10.15662/IJAREEIE.2017.0612019.
- [82] O. Kupovina, “Anlagentechnik Put u budućnost u korak sa očuvanjem životne sredine”.
- [83] M. M. Lyati, “Hybrid Electric Vehicles (HEV): classification, configuration, and vehicle control,” vol. 1, no. 1, 2021, [Online]. Available: <https://munerlyati.com/>
- [84] Mehrdad Ehsani Yimin Gao Stefano Longo Kambiz M. Ebrahimi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles-Third Edition*. 2019.
- [85] F. Un-Noor, S. Padmanaban, L. Mihet-Popa, M. N. Mollah, and E. Hossain, “A comprehensive study of key electric vehicle (EV) components, technologies, challenges, impacts, and future direction of development,” *Energies*, vol. 10, no. 8, pp. 1–82, 2017, doi: 10.3390/en10081217.

Web izvori

- [86] <https://www.thehenryford.org/collections-and-research/digital-collections/expert-sets/105070/>
(pristupljeno: 25.08.2022).
- [87] [Charles F. Kettering, inventor of electric self-starter, is born - HISTORY](#)
(pristupljeno: 25.08.2022).
- [88] [Gottlieb Daimler | German engineer and inventor | Britannica](#)
(pristupljeno: 25.08.2022).
- [89] [Ferdinand Porsche – the electric vehicle pioneer](#)
(pristupljeno: 25.08.2022).
- [90] https://carsalesbase.com/us-audi-etron/?ak_action=reject_mobile
(pristupljeno: 02.08.2022).
- [91] <https://carsalesbase.com/us-chevrolet-bolt-ev/>
(pristupljeno: 02.08.2022).
- [92] <https://carsalesbase.com/europe-nissan-leaf/>
(pristupljeno: 02.08.2022).
- [93] <https://ir.tesla.com/press-release/tesla-q4-2021-vehicle-production-deliveries>
(pristupljeno: 02.08.2022).
- [94] <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021/trends-and-developments-in-electric-vehicle-markets>
(pristupljeno: 01.10.2022).
- [95] https://www.electrical-installation.org/enwiki/Electric_Vehicle_trends
(pristupljeno: 01.10.2022).
- [96] <https://www.epa.gov/greenvehicles/fast-facts-transportation-greenhouse-gas-emissions>
(pristupljeno: 01.10.2022).
- [97] <https://zakoni.skupstina.me/zakoni/web/dokumenta/zakoni-i-drugi-akti/246/1529-9633-27-1-17-6.pdf>
(pristupljeno: 01.10.2022).
- [98] <https://www.britannica.com/technology/electric-motor/Construction-of-induction-motors>
(pristupljeno: 01.10.2022).
- [99] <https://www.perlego.com/book/853287/road-vehicle-dynamics-fundamentals-of->

modeling-and-simulation-fundamentals-of-modeling-and-simulation-pdf (pristupljeno: 13.01.2023).

[100] <https://www.siemens.com/global/en/company/stories/infrastructure/2022/how-super-fast-charging-infrastructure-will-drive-ev-adoption.html>

(pristupljeno: 21.02.2023).

[101] <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/>

(pristupljeno: 21.02.2023).

[102] <https://afdc.energy.gov/>

(pristupljeno: 21.02.2023).

[103] <https://www.ev-volumes.com/>

(pristupljeno: 21.02.2023).

PRILOZI

PRILOG 1

Popis slika, grafika i tabela

Popis slika, grafika i tabela

Slika 2.1 Električno vozilo Backer Electric u Crawford muzeju

Slika 2.2 The Lohner-Porsche Semper Vivus proizveden 1900

Slika 2.3 General Motorsa koji je razvio pionirski električni automobil EV1

Slika 2.4 Najzastupljeniji elektromobili: a) Nissan Leaf b) Mitsubishi MiEV

Slika 2.5 a) Toyota Prius 2022 b) Tesla Roadster

Slika 3.1 Sažeta blok šema serijskog HEV-a

Slika 3.2 Sažeta blok šema paralelnog HEVa

Slika 3.3 Pojednostavljeni blok dijagram kombinovanog HEV-a: lijevo dualni desno složeni tip

Slika 3.4 Uopšteni dijagramski prikaz PHEV-a

Slika 3.5 Poprečni presjek izgleda PEM gorivne ćelije

Slika 3.6 Prikaz Sistema napajanja kroz vodonik FCEV

Slika 3.7 Uprošćena blok šema elektromobila sa punjivom baterijom

Slika 4.1 Blok dijagram koji ilustruje unutrašnju strukturu elektromobila

Slika 4.2 Uprošćeni poprečni presjek ćelije baterije

Slika 4.3.Ekvivalentno kolo baterije

Slika 4.4 a) Ilustracija koja pokazuje kako radi osnovni DC motor sa permanentnim magnetom; b) dijagram poprečnog presjeka kolektorskog elektromotora

Slika 4.5 Grafik obrtnog momenta i brzine za DC motor bez četkica lijevo: sa promjenom E_s ; desno-sa promjenom Φ

Slika 4.6 Pojednostavljena šema motor sa odvojenom pobudom

Slika 4.7 (a–d) Dijagram koji prikazuje osnovu rada BLDC motora bez četkica i presjek rasporeda tri namotaja na statoru motora ; (e–i) Dijagram koji pokazuje princip rada komutacionog reluktantnog motora i presjek motora sa rotorom sa četiri istaknuta pola

Slika 4.8 Dijagram koji pokazuje stator i rotor asinhronog motora i blok šemu prekidačkog moda

Slika 4.9 Preklopni obrazac za generisanje trofazne naizmjenične struje i grafikon vektorskog naponskog dijagrama

Slika 4.10 Ponašanje obrtnog momenta u odnosu na ugaonu brzinu za indukcionu motor

Slika 4.11 Zamjenska šema motornog kola sa otpornikom u režimu dinamičkog kočenja

Slika 4.12 Uprošćeni blok regenerativnog kočionog sistema DC motora

Slika 5.1 Univerzalni simbol naponskog elektronskog prekidača

Slika 5.2 Šema kola koja prikazuje rad Buck regulatora u prekidačkom modu

Slika 5.3 Simulink konfiguracija Step-Down regulatora

Slika 5.4 Struje u krugu regulatora: prvi grafik-Struja koja teče kroz potrošač ; drugi grafik-struja koju obezbeđuje ćelija tokom vremena ON ; treći grafik-protok struje kroz diodu tokom vremena isključenja

Slika 5.5 Šema strujnog kola koja prikazuje rad Boost regulatora u kontrolnom prekidačkom modu

Slika 5.6 Simulink konfiguracija Step-Up regulatora

Slika 5.7 Simulacione struje Step-Up regulatora: prvi grafik-Struja koja teče kroz potrošač ; drugi grafik-struja koju obezbeđuje ćelija tokom vremena ON ; treći grafik-protok struje kroz diodu tokom vremena isključenja

Slika 5.8 Invertersko kolo H-mosta

Slika 5.9 Grafik struje monofaznog pretvarača za uređaj za prebacivanje kvadratnog talasa

Slika 5.10 Preklopna sekvenca koja koristi modulaciju širine impulsa da bi se stvorila naizmjenična struja koja je skoro sinusoidnog oblika.

Slika 5.11 Grafik struje u odnosu na vrijeme za osnovni trofazni sistem za generisanje naizmjenične struje za svaku fazu pojedinačno

Slika 6.1 Blok karoserije vozila koji ilustruje sile kretanje karoserije dvoosovinskog vozila.

Slika 6.2 Pojednostavljena konfiguracija za vezu motora na pogonski točak

Slika 6.3 Podaci simulacije vožnje koje generiše Matlab Simulink koriste se u raznim automobilskim aplikacijama.

Slika 6.4 Podaci simulacije ciklusa vožnje FTP75 signala u Matlab Simulink-u

Slika 7.1 Osnovni blok dijagram funkcionisanja EV-a u tri cjeline

Slika 7.2 Simulaciona blok karoserije vozila u Matlab Simulink-u

Slika 7.3 Simulaciona blok gume vozila u Matlab Simulink-u

Slika 7.4 Simulaciona blok prenosnog sistema vozila u Matlab Simulink-u

Slika 7.5 Simulaciona blok elektromotora vozila u Matlab Simulink-u

Slika 7.6 Simulaciona blok kontrolnog sistema vozila u Matlab Simulink-u

Slika 7.7 Simulaciona blok komandnog sistema vozila u Matlab Simulink-u

Slika 7.8 Simulaciona blok baterije vozila u Matlab Simulink-u

Slika 7.9 Dinamički model baterije u Matlab Simulink-u

Slika 8.1 Blok dijagram kreiranog modela u Matlab Simulink-u

Slika 8.2 Blok dijagram motornog pogona projektovanog sa odvojenom arhitekturom u Matlab Simulink-u

Slika 8.3 Blok dijagram pojednostavljenog prikaza unutrašnjeg mehaničkog sklopa vozila u Matlab Simulink-u

Slika 8.4 Mjerenje SoC baterije zasnovano na konvencionalnom FTP75 ciklusu gradske vožnje

Slika 8.5 Grafik uticaj brzine vjetra na količinu energije koju troše električni automobili

Slika 8.6 Grafik uticaja faktora puta i vjetra na količinu energije koju troše električni automobili.

Slika 8.7 Prikaz relevantne informacije GraphHopper karte, uključujući geografsku lokaciju, udaljenost, nadmorsku visinu i trajanje rute između dvije lokacije

Slika 8.8 Upoređeni rezultati Matlab simulacije i sa podacima karte GraphHopper za OSM API rutu između dvije lokacije.

Slika 8.9 Grafički prikaz potrošnje energije u određenoj oblasti (Podgorica-Budva)

Slika 9.1 Glavni tipovi veza baznih stanica

Slika 9.2 Standardni komunikacioni protokol OCPP 1.5 koji omogućava uređajima različitih proizvođača da komuniciraju unutar iste mreže.

Tabela 2.1. Trogodišnja vrijednost godišnje proizvodnje i distribucije najpopularnijih elektromobila

Tabela 7.1. Skraćeniće promjenljivih vrijednosti modela kretanja vozila EV Tesla Model S

Tabela 7.2. Objašnjenje parametara i funkcija priloženog koda 7.2

Tabela 7.3 Osnovni parametri *Battery* simulacionog bloka

Tabela 7.4 Osnovni parametri dinamički model baterije simulacionog blok

PRILOG 2

Popis skraćenica

Popis skraćenica

Opšti pojmovi:

GHG - en. **GreenHouse Gas**

EV - en. **Electrical Vehicle**

SoC - en. **State of Charge**

SoH - en. **State of Health**

ICV - en. **Internal Combustion Vehicle**

ICE - en. **Internal Combustion Engine**

SS - en. **Starter System**

ZEV - en. **Zero Emission Vehicles**

LEV - en. **Low Emission Vehicles**

HEV - en. **Hybrid Electric Vehicle**

PHEV - en. **Plug-in Hybrid Electric Vehicle**

FCEV - en. **Fuel Cell Electric Vehicle**

BEV - en. **Battery Electric Vehicle**

EREV - en. **Extended Range Electric Vehicle**

V2G – en. **Vehicle-to-grid**

PEM - en. **Polymer Electrolyte Membrane**

DoD - en. **Depth of Discharge**

EMF - en. **back Electromotive Force**

BLDC - en. **Brushless DC Motor**

ECM - en. **Electronically Commutated Motor**

SRM - en. **Switched Reluctance Motor**

NO - en. **Normaly Open**

NC - en. Normally Closed

VM - en. Voltage Multiplier

PWM - en. Pulse Width Modulation

NMPC - en. Nonlinear Model Predictive Control

OSM - (en. OpenStreetMaps)

Institucije i međunarodne zajednice:

IEA - en. International Energy Agency

UNFCCC - en. United Nations Framework Convention on Climate Change

SRREN - en. The Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation

EVI - en. Electric Vehicle Initiative

CEM - en. The Clean Energi Ministerial

EC - en. European Commission

NDC - en. Nationally Determined Contribution

EAFO - en. European Alternative Fuels Observatory

AFDC - en. Alternative Fuels Data Center

Međunarodno razvijeni pilot programi:

EVI-PCP - en. Global EV Pilot Citi Programme

ZE-MHDVs - en. Zero-Emission Medium- and Heavy-Duty Vehicles

Međunarodni ciklusi vožnje:

FUDS - en. the Federal Urban Driving Schedule

US06 - en. Supplemental Federal Test Procedure

FHDS - en. Federal Highway Driving Schedule

FTP-75 - en. Federal Test Procedure 75

UDDS - en. Urban Dynamometer Driving Schedule

WLTC - en. World Light-Duty Test Cycle