

IZBOR POGONSKOG PODSISTEMA ELEKTRIČNOG VOZILA SA NAGLASKOM NA MAŠINE SPECIJALNE KONSTRUKCIJE**ELECTRIC VEHICLE PROPULSION SUBSYSTEM CHOICE WITH EMPHASIS ON MACHINES OF SPECIAL CONSTRUCTION**Nevena Pantić, Bane Popadić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – U modernom dobu inovativna rešenja nude različite izvore energije koji mogu pokretati vozila. Još u 19. veku, naučnici su spoznali značaj električnih vozila, ali u pokušaju da ih tada distribuiraju na tržište nisu uspeli. Danas, sa napretkom tehnologije moguća je globalna upotreba električnih vozila. U ovom radu analizirana su električna vozila sa naglaskom na njihov električni pogonski podsystem. Kao idejno rešenje, odabrana je električna pogonska mašina specijalne konstrukcije, Brushless DC mašina koja bi mogla zadovoljiti potrebe vozila sa električnim pogonom.

Ključne reči: Električno vozilo, Električni podsystem, Hall senzor, Trapezna komutacija

Abstract – In the modern age, innovative solutions offer different energy sources that can drive vehicles. Back in the 19th century, scientists realized the importance of electric vehicles, but in an attempt to distribute them to the market, they failed. Today, with the advancement of technology, the global use of electric vehicles is possible. In this paper, electric vehicles are analyzed with an emphasis on their electric drive subsystem. As a conceptual solution, an electric drive machine of a special construction, a Brushless DC machine that could be used in a vehicle with an electric drive.

Keywords: Electric vehicle, Electric vehicle subsystem, Hall sensor, Six-Step commutation

1. UVOD

Inovativna tehnička rešenja mogu ponuditi različite izvore energije koji se koriste za pogon vozila. Danas, pored tečnih goriva koristi se i električna energija. Vozila koja koriste tu vrstu izvora energije nazivaju se električna vozila (eng. *Electric vehicle* – EV).

Iako vlada mišljenje da su EV tehnološko dostignuće novijeg doba, oni su zapravo stariji izum od vozila koja koriste motore sa unutrašnjim sagorevanjem (eng. *Internal combustion engine* – ICE).

Prvo EV konstruisao je Francuz Gustave Trouvé 1881. godine, to je bio tricikl pogonjen jednosmernim motorom koji je napajan energijom iz baterije.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio doc dr Bane Popadić.

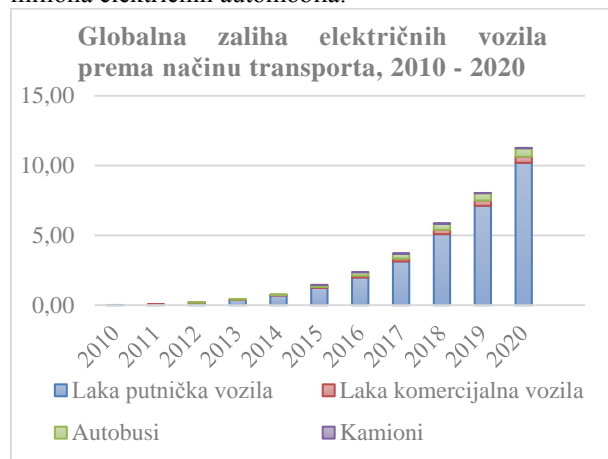
Mnogi naučnici su radili na sličnim projektima u cilju unapređenja nove tehnologije, ali na početku nisu uspeli privući pažnju javnosti jer brzina od 15 km/h i domet od 16 km, nisu impresionirali potencijalne kupce.

2. RAZVOJ ELEKTRIČNOG POGONA U VOZILIMA

Krajem 19. veka, masovna proizvodnja baterija, našla je primenu u EV. Razvojem modernijih saobraćajnica nastaje potreba za drumskim vozilima boljih performansi. EV i dalje su bila preferirana u odnosu na svoje konkurente: vozila sa ICE motorom i vozila na parni pogon. Zbog nepouzdanosti i ručnog načina pokretanja vozila sa ICE motorom, takođe zbog niske efikasnosti i potrebe za osvetljenjem vozila na parni pogon, EV je bilo mnogo pouzdanije u odnosu na svoje konkurente.

Iako je razvoj EV krenuo u dobrom smeru, rad na poboljšanju tehnologije u pogonu sa ICE motorom, preokrenuo je uloge na tržištu. Tehnologija EV je stagnirala, dok je razvoj ICE vozila napredovao brzim tempom. Godine su prolazile bez većeg oživljavanja upotrebe EV.

Od početka 1990ih evolucija EV je ponovo u usponu. Kao prekretnica može se smatrati razvijanje ekološke svesti društva, koja je podstakla borbu za zdraviju životnu sredinu. Uloženi su veliki naponi i napravljeni značajni koraci u razvoju tehnologije, što je dovelo do ubrzanog rasta tržišta. Prema izveštaju (grafik 2.1.) Svetske agencija za energiju (IEA – *International Energy Agency*) krajem 2020. god. na svetskim putevima bilo je oko 10 miliona električnih automobila.



Grafik 2.1. – Globalna zaliha električnih vozila u svetu prema načinu transporta, 2010. – 2020. [1]

Evropa je po prvi put prestigla Kinu kao najveće svetsko tržište električnih automobila. Takođe, povećane su i globalne zalihe električnih autobusa i kamiona.

3. ARHITEKTURA ELEKTRIČNIH VOZILA

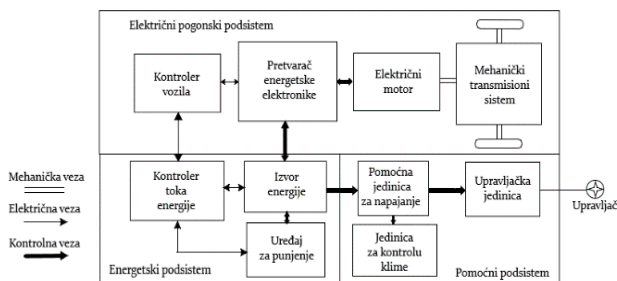
Osnovni principi u EV i u vozilu sa ICE motorom su slični, ali postoje neke bitne razlike. EV u svom pogonskom podsystemu koriste električni motor, koji može biti kontrolisan različitim tehnikama upravljanja. Za njegov rad potrebna je energija koja se obezbeđuje iz različitih izvora, kao što su hemijske baterije, gorive ćelije, ultrakondenzatori i zamajci. EV su mnogo fleksibilnija u odnosu na vozila sa ICE motorom, zbog odsustva složenih mehaničkih komponenti koje se koriste za pokretanje konvencionalnih vozila.

Prvobitno, konfiguracija EV bila je velikoj meri zasnovana na konfiguraciji konvencionalnih vozila uz specifične izmene koje su se odnosile na rezervoar za skladištenje energije i na pogonsku mašinu.

Konstrukcija prvobitnog EV imala je nedostatke koji su bili motiv za stvaranje originalnog dizajna koji će kompenzovati većinu problema i sa time povećati fleksibilnost električnog pogona. Velika masa vozila, smanjena fleksibilnost i performanse vozila, bili su uzrok postepenog nestajanja ove vrste električnog vozila.

Savremeni pogonski sklop električnog vozila ilustrovan je na slici 3.1. Pogonski sklop sastoji se od tri glavna podsystema:

- električni pogonski podsystem,
- energetska podsystem i
- pomoćni podsystem.



Slika 3.1. Savremeni pogonski sklop električnog vozila [2]

Električni pogonski podsystem obuhvata kontroler vozila, pretvarač energetske elektronike, električni motor i mehanički prenosni sistem.

Energetski podsystem uključuje izvor energije, jedinicu za kontrolu toka energije i uređaj za punjenje baterije. Pomoćni podsystem sadrži jedinicu za servo upravljanje, kontroler klime (temperature), takođe sadrži i pomoćnu jedinicu za napajanje. Na slici 3.1. strelicama je ukazano tok energije unutar EV.

Može se primetiti da između određenih jedinica tok energije može da bude u oba smera. Regenerativna energija kočenja proizvedena prilikom usporavanja vozila konvertuje se i skladišti u bateriji.

Većina baterija zajedno sa kondenzatorima i zamajcima, koji se koriste u savremenim pogonskim sklopovima električnih vozila, kompatibilni su da skladište povratnu energiju nastalu tokom regenerativnog kočenja.

4. POGONSKI PODSYSTEM ELEKTRIČNOG VOZILA

Električni pogonski sistem je jezgro električnog vozila, a njegove glavne komponente su električni motor, uređaji energetske elektronike i kontrolni uređaji. Odabir električnog pogonskog sistema električnog vozila najvećim delom zavisi od tri faktora: željenih performansi, ograničenja vozila i izvora energije. Željene performanse određene su prema očekivanjima vozača, što uključuje maksimalnu brzinu, ubrzanje, kočenje, domet i slično. Zatim, odabir električnog pogona zavisi i od tipa vozila, njegove težine i nosivosti. Takođe, vrsta uređaja za skladištenje električne energije u vozilu važna je stavka pri kreiranju električnog pogona.

Jedan od važnijih zadataka jeste izbor tipa električne mašine u električnom pogonu, a na to utiču sledeći parametri:

- snaga motora,
- veliki polazni obrtni momenat,
- širok opseg brzina,
- efikasnost i pouzdanost,
- robusnost,
- jednostavno upravljanje,
- cena i
- jednostavna konstrukcija i dimenzije.

Za razliku od mašina koje se koriste u industriji, električne mašine u okviru pogonskog podsystema EV i HEV zahtevaju česta pokretanja i zaustavljanja, visoke stope ubrzanja/usporavanja, veoma širok opseg radnih brzina itd. Standardi određuju koja će se vrsta električne mašine koristiti, obično su to mašine koje imaju ili jednostavnu konstrukciju ili jednostavno upravljanje ili poboljšanu efikasnost.

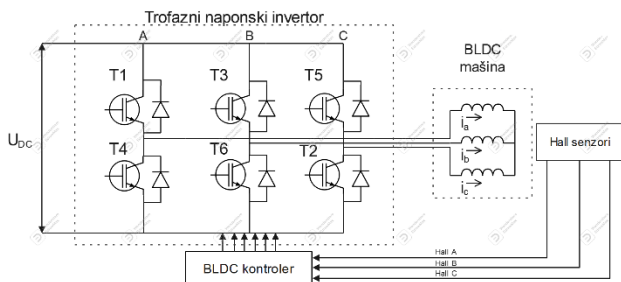
4.1 IZBOR MAŠINE SPECIJALNE KONSTRUKCIJE ZA POGONSKI PODSYSTEM ELEKTRIČNOG VOZILA

Upotrebom energije permanentnih magneta za stvaranje pobude može se konstruisati mašina sa velikom gustinom snage, velikom brzinom i visokim koeficijentom efikasnosti. Prethodno je naglašeno da su navedene prednosti naročito važne u konstrukciji pogonskog podsystema EV i HEV. Najperspektivnija mašina specijalne konstrukcije iz familije mašina sa permanentnim magnetima je jednosmerna mašina bez četkica (BLDC – eng. *Brushless DC machine*). U literaturi može se naći pod nazivom elektronski komutovana mašina jednosmerne struje.

BLDC mašina slična je po konstrukciji i principu rada asinhronim i jednosmernim mašinama. Kao i ostale mašine, takođe i BLDC mašina ima stator i rotor. Za razliku od tradicionalnih jednosmernih mašina koje koriste mehanički komutator, BLDC mašina ostvaruje komutaciju bez mehaničkog kontakta upotrebom električnog prekidačkog kola. Da bi se kontrolisala brzina i smer rotacije koristi se senzor položaja rotora, koji šalje signale na ulaz BLDC kontrolera. Senzor položaja rotora, kontrolno kolo i energetska pretvarač snage deo su sistema BLDC mašine.

Konfiguracija pogonskog kola za upravljanje BLDC mašinom, čiji su statorski namotaji povezani u spregu Y,

prikazana je na slici 4.1. Naponski inverter ima 6 prekidača T1, T2, T3, T4, T5 i T6 koji su uključeni ili isključeni u zavisnosti od upravljačkih signala koje šalje BLDC kontroler. Na taj način se vrši komutacija statorskog polja, odnosno menja struja u statorskim namotajima i sa time se generiše obrtni momenat. *Hall* senzor je najčešće ugrađen u BLDC mašinu. Kada magnetni pol rotora prođe pored *Hall* senzora, on će dati signal visokog ili niskog nivoa, što ukazuje da severni magnetni pol ili južni magnetni pol prolaze pored senzora.

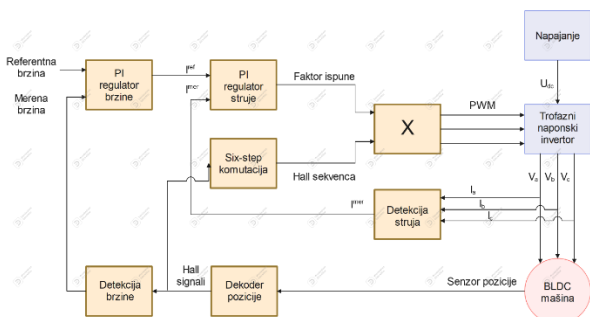


Slika 4.1. Šematski prikaz pogonskog kola za upravljanje BLDC mašinom

Komutacija se odvija sa promenom položaja magneta, tačnije kada se rotor obrne za električni ugao od 60°. Dakle, postoji krug podeljen u šest sektora u kojima se može naći rotor, a sa tim i šest potrebnih *Hall* kombinacija. Ova vrsta komutacije se naziva šest-koračna komutacija (eng. *six step commutation*) ili trapezna komutacija. Odlikuje je jednostavan algoritam, zbog toga je jeftin izbor, a može se primeniti u pogonima koji zahtevaju velike brzine i veliki obrtni moment.

5. SOFTVERSKA REALIZACIJA UPRAVLJANJA BLDC MAŠINOM

Softverska realizacija upravljanja BLDC mašinom je realizovana u MATLAB/SIMULINK radnom okruženju. Za potrebe eksperimentalnog istraživanja preuzet je oficijalni MATLAB model pod nazivom „*Six-step commutation of BLDC motor using sensor feedback*“ [3]. U primeru je implementirana tehnika šest-koračne ili trapezne komutacije za kontrolu brzine trofazne BLDC mašine. Na slici 5.1. data je šema upravljanja sa BLDC mašinom koja je regulisana po brzini.



Slika 5.1. Šema pogona upravljanja sa BLDC mašinom regulisanom po brzini

U radu je korišćena BLDC mašina kineskog proizvođača „*JKONG MOTORS*“, serijskog tipa „*JK86BLS58e-X002*“. Mašina je konstruisana sa ugrađenim *Hall* sondama, koje su pozicionirane u posebno izolovanom

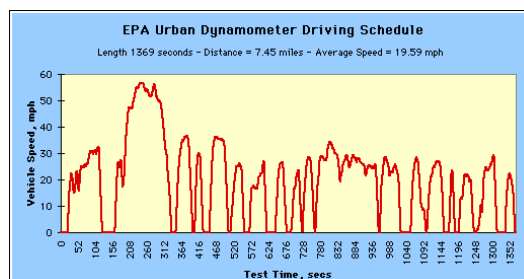
kućištu. U postupku eksperimentalnog rada određeni su neki parametri navedenog tipa mašine, a pojedini su preuzeti iz specifikacija proizvođača. Parametri BLDC mašine u MATLAB modelu su izmenjeni i prilagođeni.

5.1 TESTIRANJE POGONSKOG PODSISTEMA ELEKTRIČNOG VOZILA

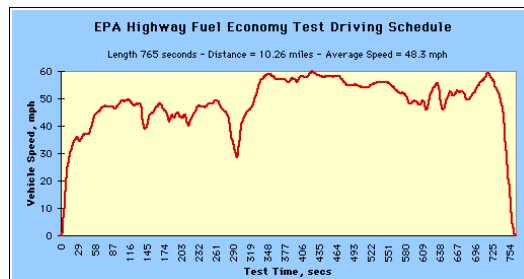
Za procenu performansi vozila koriste se standardizovani ciklusi vožnje preporučeni od strane agencije EPA (eng. *EPA - Environmental Protection Agency*) iz SAD.

Standardni ciklusi vožnje koriste se za ispitivanja kao što su: merenje potrošnje goriva, emisija zagađenja vazduha, analiza stanja baterije i potrošnja energije kod EV, takođe, koriste se za ispitivanje pojedinih komponenti vozila, pogonskog podsklopa, transmisije i slično.

Na slici 5.2. prikazan je karakterističan ciklus vožnje u gradskim uslovima, a na slici 5.3. je prikazan karakterističan ciklus vožnje na „otvorenom“ putu. Za testiranje pogonskog podsistema električnog vozila sa BLDC mašinom specijalne konstrukcije odabran je karakterističan ciklus vožnje u gradskim uslovima.



Slika 5.2. – Karakteristični ciklus vožnje u gradu [4]



Slika 5.3. – Karakteristični ciklus vožnje po „otvorenom“ putu“ [4]

U primeru je testiran dinamički odziv pogona u opsegu brzina koje su određene na osnovu ciklusa vožnje (prvih 140 s). Takođe, testiran je i odziv brzine sa promenom opterećenja. Shodno tome, potrebno je odrediti moment opterećenja mašine koji je uslovljen „profilom puta“.

Na dinamičke performanse vozila utiče rezultanta sila: sila otpora vazduha, otpor kotrljanja, pogonska (vučna) sila i sila otpora uspona. Kretanje vozila uslovljeno „kompleksnom spregom“ sila može se opisati sledećom jednačinom [2]:

$$m_v \frac{d}{dt} V_x = F_x - F_{aero} - F_{roll} - m_v \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (5.1)$$

m_v – masa vozila,

V_x – brzina vozila,

F_x – pogonska (vučna) sila,

F_{aero} – sila otpora vazduha,

F_{roll} – sila otpora kotrljanja i

$m_v \cdot g \cdot \sin \alpha$ – sila otpora uspona (postoji ako je $\alpha \neq 0$).
Brzina vozila i izlazna mehanička snaga mogu se opisati sledećim jednačinama [2]:

$$V_x = r_w \cdot \frac{\omega_r}{g_{dr}} \cdot (1 - s_x) \quad (5.2)$$

$$P_x = T_w \cdot \frac{V_x}{r_w} = T_e \cdot \omega_r \cdot \eta_{dr} \cdot (1 - s_x) \quad (5.3)$$

r_w – poluprečnik točka,

ω_r – ugaona brzina obrtanja električnog motora,

s_x – prosečno proklizavanje i

g_{dr} – prenosni odnos mehaničkog podslopa.

T_w – pogonski otporni moment na točku,

T_e – mehanički moment opterećenja električnog motora i

η_{dr} – prosečna efikasnost izlaznog mehaničkog sklopa.

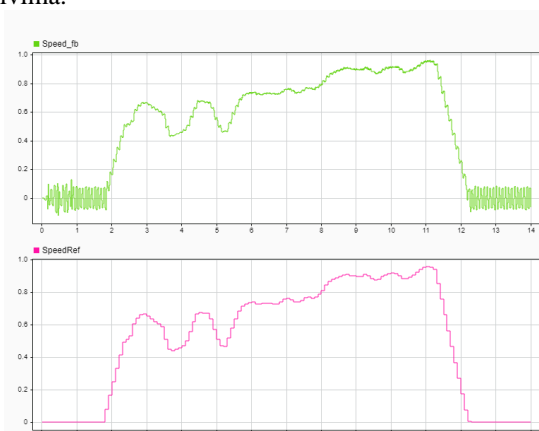
Moment opterećenja može se odrediti na osnovu poznavanja vrednosti pogonske sile. Ona se računa na osnovu prethodno napisane jednačine (5.1), a potom se moment opterećenja odredi na osnovu sledeće relacije [2]:

$$F_x = \frac{P_x}{V_x} = \frac{T_e \cdot g_{dr} \cdot \eta_{dr}}{r_w} \quad (5.4)$$

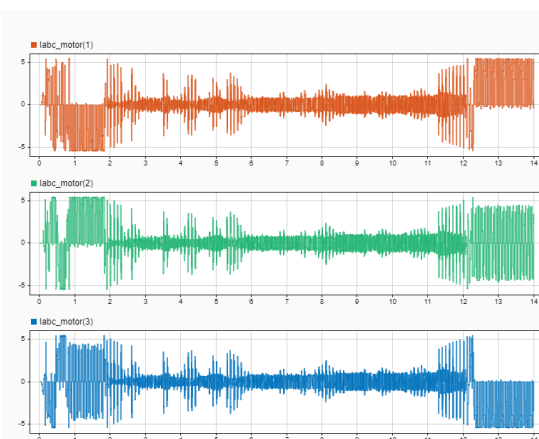
5.2 REZULTATI RAČUNARSKE SIMULACIJE

Rezultati računarske simulacije za slučaj upravljanja BLDC mašinom metodom trapezne komutacije u MATLAB/SIMULINK radnom okruženju prikazani su na slici 5.4.

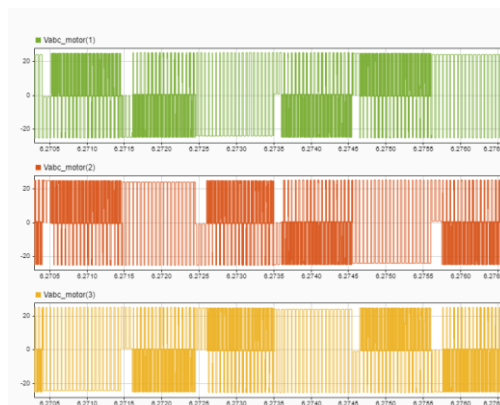
U simulaciji su posmatrane veličine od interesa, vršena je njihova analiza i upoređivane su sa predviđenim odzivima.



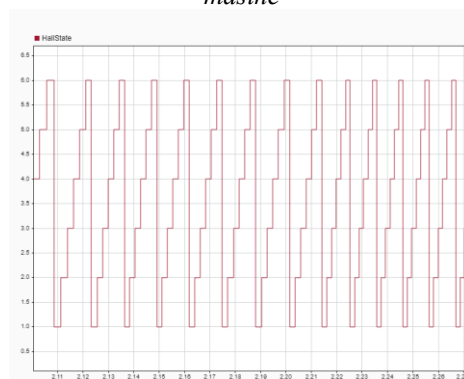
Slika 5.4. (a) Vremenski odziv brzine električne mašine u poređenju sa referentnom (zadatim) brzinom



Slika 5.4. (b) Vremenski odziv struja električne mašine



Slika 5.4. (c) Vremenska promena napona električnog mašine



Slika 5.4. (d) Hall signal za sinhronizaciju komutacije

6. ZAKLJUČAK

Na osnovu datih rezultata vremenskih odziva može se potvrditi ispravnost osmišljenog algoritma upravljanja, sposobnost brzog reagovanja na zadatu brzinu i obrtni moment opterećenja. Dobijeni rezultati računarske simulacije potvrđuju teorijska razmatranja koja su prethodno data u radu, te se može zaključiti da BLDC mašina specijalne konstrukcije može biti potencijalni izbor električnog pogonskog podsistema električnog vozila.

7. LITERATURA

- [1] "IEA Global EV stock by region, 2010 - 2020". URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021?mode=overview>
- [2] "Modern Electric Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicle" – Mehrdad Ehsani
- [3] MATLAB model "Six-step commutation of BLDC motor using sensor feedback". URL: <https://www.mathworks.com/help/mcb/gs/six-step-commutation-blcdc-motor-using-position-sensor.html>
- [4] "EPA Dynamometer Drive Schedules". URL: <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules>

Kratka biografija:



Nevena Pantić rođena je 1997. godine u Vlasenici, BiH. Osnovne akademske studije je završila na Fakultetu tehničkih nauka 2016. godine, na smeru: Energetika, elektronika i telekomunikacije.