

## IZBOR ELEKTRIČNIH MOTORA ZA POGON ELEKTRIČNIH VOZILA SELECTION OF ELECTRIC MOTORS FOR ELECTRIC VEHICLE DRIVE

Miloš Vorkapić, Vladimir Katić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

### Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

**Kratak sadržaj** – U ovom radu je obrađena tema izbora električnih motora koji su najpogodniji za pogon vozila, obzirom da se sve više modela proizvodi i sa električnom varijantom pogona. Deo rada se odnosi na konstrukciju i način rada električnog vozila, razlike i prednosti u odnosu na konvencionalna vozila kao i konstrukciju električnog motora sa parametrima koji ga karakterišu. Na kraju rada predstavljena je simulacija u Matlabu za potrebe prezentacije izgleda signala odziva električnog motora na zahteve gradske vožnje.

**Gljučne reči:** *Sinhroni motor sa permanentnim magnetom, Električna vozila, Električni motori*

**Abstract** – This paper deals with the topic of selection of electric motor that is the most suitable for an electric vehicle drive. Structure and methods of operation of the electric vehicles, advantages are presented. Selection of optimal electric motor with parameters that characterize it is given. Matlab/Simulink model is developed and simulations results are presented. Response signals of the electric motor to the requirements of city driving cycle are shown.

**Keywords:** *PMSM, Electrical vehicles, Electrical machines*

### 1. UVOD

Sa pronalaskom baterije (Alessandro Volta, 1800), stvaranja magnetnog polja iz električne struje (Hans Christian Oersted, 1820) i elektromagneta (William Sturgeon, 1825) postavljena je čvrsta osnova za izgradnju električnog motora. U to vreme još uvek je bilo otvoreno pitanje da li električni motor treba da bude rotacionog tipa ili klipna mašina, tj. da predstavlja jedan klip kao kod parne mašine. Širom sveta, mnogi pronalazači radili su paralelno na ovom zadatku – jer to je tada predstavljalo aktuelan, “moderan” problem. Nove pojave su bile otkrivane svakodnevno, izumi u oblasti elektrotehnike i njihova primena se povećavala iz dana u dan [1].

Prvi električni automobili pojavili su se još pre 180 godina i koristili paralelno sa parnim mašinama, a kasnije i SUS motorima za pokretanje i prevoz u vozila. Zapravo prvi električni automobili su se pojavili neposredno posle konstrukcije prvog električnog motora 1828. godine. Daljim usavršavanjem elektromotora dolazi i do prvih primena u industriji, pa sve do poslednjih godina kada su električna vozila ponovo u zamahu [2].

### NAPOMENA:

**Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Vladimir Katić, red. prof.**

Cilj ovog rada jeste da predstavi izbor optimalnog tipa električnog motora za pogon električnih vozila, modelovanje kompletnog pogona i rezultate simulacije kretanja vozila i dometa baterije primenom standardnog ciklusa vožnje NEDC.

### 2. POČETAK, RAZVOJ I DOSTIGNUĆA ELEKTRIČNIH VOZILA

Sva pomenuta otkrića i poboljšanja dovela su do toga da su kupci vozila za prevoz i transport početkom XIX veka imali mogućnost izbora između vozila na parni pogon, električni ili benzinski (SUS). Međutim, u tržišnoj utakmici prevagu je odneo SUS motor, odnosno potisnuti su i zaboravljeni parni i elektro motor.

Ipak, pored nekoliko pokušaja tokom XX veka, pravo oživljavanje električnih vozila počelo je u XXI veku. Dva glavna događaja koja su pokrenula povratak električnih automobila u masovniju proizvodnju su:

- Pojava Tojotinog modela Prius (1997. god.), koji je bio prvi masovno proizveden hibridni auto, a u kome su korišćene NiMH baterije.

- Osnivanje kompanije Tesla Motors (2006. god.), koja je počela sa proizvodnjom luksuznih sportskih automobila, ekstremnih performansi, a koja su mogla da pređu do 320 km, a sada već i do 600 km sa jednim punjenjem [3].

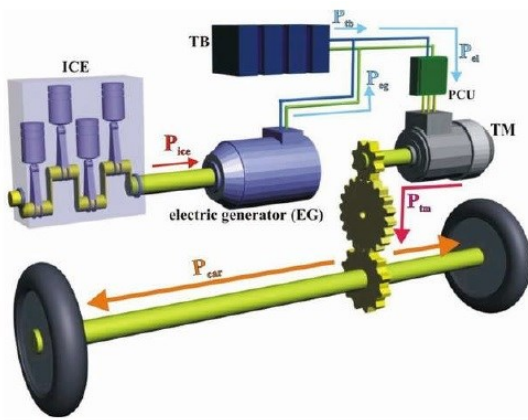
### 3. TIPOVI I DELOVI ELEKTRIČNIH AUTOMOBILA

Električno vozilo je motorno vozilo, kao što je automobil, kamion ili autobus, koji koristi električnu energiju uskladištenu u punjivim baterijama, umesto benzina, dizela, gasa ili druge vrste fosilnih goriva. Električni motori su mnogo moćniji (u većem delu vremena). Oni postižu izvanredna ubrzanja, to je moguće jer na niskim brzinama, električni motor isporučuju veći obrtni moment nego konvencionalni motor što je i prikazano na slici 2. Sila je ono što je potrebno da bi se poterao auto. Ipak benzinski motor i dalje radi bolje na velikim brzinama nego električni.

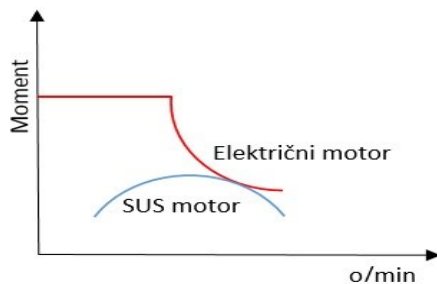
Međutim, kod hibridnih vozila, SUS motor se koristi delimično, dok je kod čisto električnih (baterijskih) SUS motor izbačen, kao i izduvni sistem, a neretko i sistem transmisije.

Kod serijske veze (hibridno vozilo), SUS motor pokreće poseban generator kojim se vučni motor snabdeva električnom energijom i dopunjavaju baterije, slika 1.

Paralelnom kombinacijom motora u hibridnom vozilu je postignuto da se točkovi vozila pokreću i SUS motorom i električnim motor/generatorom.



Sl. 1. Serijska konfiguracija [4]



Sl. 2. Momentne karakteristike električnih i SUS motora

#### 4. ELEKTROMOTOR KAO POGON ELEKTRIČNOG AUTOMOBILA

U cilju dobijanja najprikladnijeg izbora za EV u tabeli 1 navedeni su najvažniji parametri koji figurišu u izboru električnog motora uz uzimanje u obzir sve što je do sada navedeno u analizi. Samo ocenjivanje oslanja se na do sad iznetim prednostima i manama. pa su mane vrednovane sa 1, srednja ocena za datu karakteristiku je 2 a pozitivne strane se vrednuju sa 3 boda.

Kriterijum ocenjivanja je tako izabran iz razloga što svi motori koji se razmatraju koriste se za vuču vozila.

Dobijeni rezultati u tabeli pokazuju da je sinhrona mašina sa premanentnim magnetima (SMPM) najpogodnija najpogodnija za primenu vuče u autoindustriji, sledeći motor je BLDC.

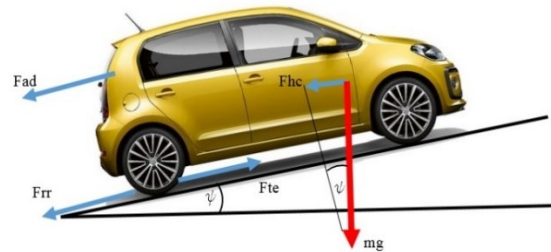
To je očekivano, jer se BLDC motor ne razlikuje u mnogome od SMPM. Razlika je u samoj konstrukciji, inače obe tipa koriste permanentne magnete.

Tabela 1 Ocena električnih motora.

Redni broj	Karakteristike	TIP MOTORA				
		DC sa četkicama	Asihroni	Sinhroni sa PM	Sinhroni reluktantni	DC bez četkica
1	Veliki obrtni moment pri malim brzinama	3	3	3	3	3
2	Nivo kompleksnosti konstrukcije	1	3	3	3	3
3	Efikasnost motora	1	2	3	2	3
4	Održavanje motora	1	3	3	2	3
5	Upravljanje	1	1	2	2	2
6	Gustina energije	2	3	3	3	2
7	Dodatni izvor za stvaranje magnetnog polja	1	1	3	1	3
8	Težina motora	1	2	3	3	3
9	Cena motora	2	2	1	2	1
10	Pouzdanost	1	3	3	2	3
11	UKUPNO	14	23	27	23	26

#### 5. DINAMIČKI MATEMATIČKI MODEL ELEKTRIČNOG MODELA

Prvi i osnovni korak u modelovanju i simulaciji ponašanja električnog vozila je razvijanje jednačine za potrebnu vučnu silu. Ova vrsta sile predstavlja silu koja vuče vozilo napred tj. daje mu mogućnost kretanja i svedena je na tlo preko točkova (slika 3).



Sl. 3. Uticao sila na kretanje vozila.

Suma svih sila prikazanih na slici 3 predstavlja ukupnu silu vuče električnog vozila i data je izrazom (1):

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{acc} \quad (1)$$

gde su:

-  $F_{rr}$  sila otpornosti kotrljanja, data jednačinom

$$F_{rr} = C_r mg \cos \psi \quad (2)$$

-  $F_{ad}$  sila otpornosti vazduha, data jednačinom

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 \quad (3)$$

-  $F_{hc}$  sila uspinjanja, data jednačinom

$$F_{hc} = mg \sin \psi \quad (4)$$

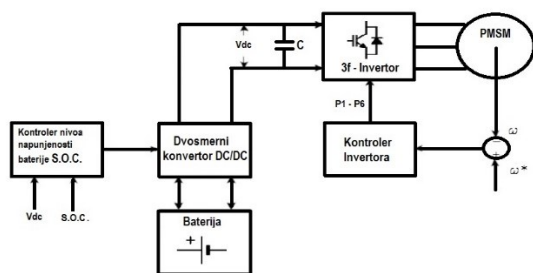
-  $F_{acc}$  sila ubrzanja, data jednačinom

$$F_{acc} = ma \quad (5)$$

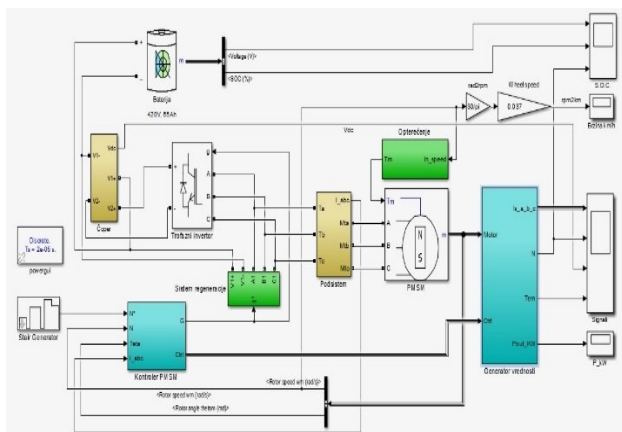
Poslednje dve sile ( $F_{hc}$  i  $F_{acc}$ ) mogu imati negativne vrednosti u slučajevima kada automobil bude usporavao, odnosno kada bude išao nizbrdo (za ovu simulaciju je predviđeno da se vozilo kreće po relativno ravnom gradskom terenu) zbog negativne vrednosti ugla pod kojim je put nagnut [7].

Dinamički model je kreiran u okviru softvera *Matlab/Simulink*. Dimenzije vozila su kao što je već pomenuto izabrane tako da vozilo najviše liči na vozilo iz „B“ segmenta, ali zbog nepoznavanja parametara ekvivalentne šeme motora i nedostatka informacija o bateriji i ostalim komponentama, izabrani su elementi čije su informacije bili dostupne. Na slici 4 prikazana je uprošćena blok šema najčešće konfiguracije jednog električnog pogona za električna vozila. Neki od osnovnih neizostavnih delova jesu izvor napajanja, DC link veza, Invertor, upravljački sistemi za kontrolu napunjenosti baterije i upravljanje radom invertra i pogonski motor.

Na slici 5 prikazan je razvijeni dinamički model električnog automobila sa odgovarajućim ulazima i izlazima izrađen u *Matlab/Simulinku*. U ulazne parametre sistema ulazi referenca brzine, moment opterećenja koje vozilo mora da savlada i blok napajanja elektro pogona. Izlazi su merenja električnih i mehaničkih veličina koje su od interesa za analizu kao i stanje napunjenosti baterije tokom vožnje. Merenja su prikazana grafički korišćenjem *Scope* blokova.



Sl. 4. Uprošćena blok šema



Sl. 5. Izgled kompletnog modela sa ulazima i izlazima

Parametri koji su uzeti za modelovanje automobila prikazani su tabeli 2, parametri se odnose na uslove na putu i dimenzije vozila, koji su po uzoru na manje vozilo iz „B“ segmenta.

Tabela daje prezentaciju vrednosti koeficijenata i parametara uz pomoć kojih za simulaciju posmatranog sistema.

Za potrebe simulacije, u ovom radu će se koristiti tip motora koji je prema analizi iz poglavlja 4 najpogodniji za vuču vozila. To je PMSM motor sa podacima datim u tabeli 3.

Tabela 2. Karakteristike uslova okoline i vozila

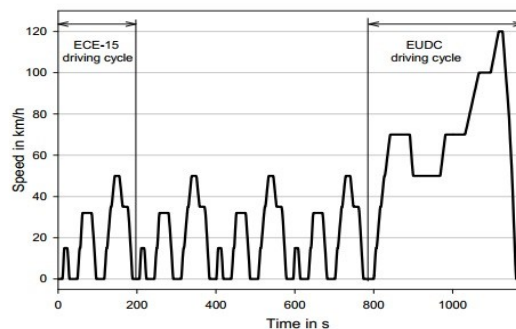
Masa vozila	1050 kg
Gravitaciono ubrzanje	9,81 m/s <sup>2</sup>
Koeficijent trenja (suv put)	0,007
Gustina vazduha	1,2041 kg/m <sup>3</sup>
Koeficijent aerodinamike	0,3
Površina prednje strane vozila	2,5 m <sup>2</sup>
Poluprečnik točka	0,35 m

Tabela 3. Tehnički podaci PMSM [6]

PARAMETAR	VREDNOST
Snaga (kW)	75
Frekvencija (Hz)	50
Max brzina (o/min)	4000
Momenat (Nm)	450
Momenat inercije (kgm <sup>2</sup> )	3,011
Masa (kg)	45
Broj pari polova	4

## 6. NEDC CIKLUS VOŽNJE

Na slici 6 prikazan je izgled NEDC (*New European Driving Cycle*) voznog ciklusa sa naglašenim ciklusima, koji ga sačinjavaju. Trajanje ovakvog ciklusa predloženo je do 1180 s, ali zbog veoma mnogo vremena koliko bi naš softver zahtevao za izvršenje ovakvog tipa simulacije, izvršena je simulacija gradske vožnje sa redukovanim ECE – 15 ciklusom kao referencom brzine. Trajanje od 15 s se pokazalo kao sasvim prihvatljivo vreme za analizu dobijenih rezultata.



Sl. 6. NEDC ciklus vožnje

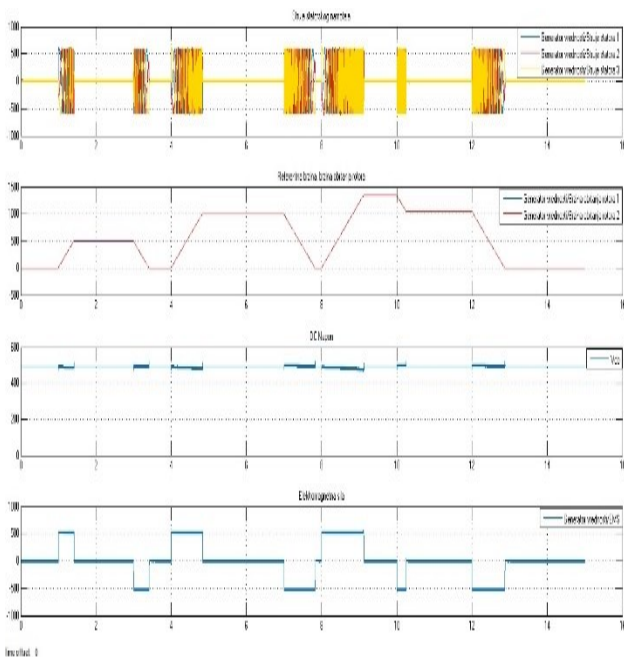
ECE – 15 ciklus ima zadatak da reprezentuje tipične uslove za vožnju u velikim evropskim gradovima u kojima je saobraćaj mnogo gust. Pošto je namenjen vožnji ravnim putem, ne očekuje se mnogo veliko opterećenje. Ograničenje je postavljeno na 50 km/h, koliko i iznosi ograničenje brzine kroz naseljeno mesto. EUDC ciklus predstavlja mnogo agresivniju vožnju, sa brzinama do 120 km/h, ali ovaj ciklus nije uzet u svrhu simulacije usled tehničkih ograničenja u snazi i brzini korišćenog pogonskog motora [7].

## 7. REZULTATI SIMULACIJA

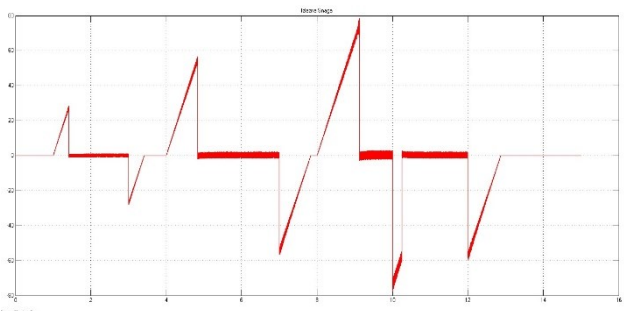
Nakon izvršene simulacije gore predstavljenog dinamičkog modela dobijeni rezultati su prikazani slikama 7-9. Zavisnosti tri statorske fazne struje, brzine, elektromagnetnog momenta i napona DC međukola od vremena dati su na slici 7. Zabeleženi signali daju sliku ponašanja elektropogonskog sklopa električnog automobila prilikom vožnje kroz naseljeno mesto.

Primećuje se brz odziv brzine na referencu što je uzrok relativno malog momenta inercije vozila, koji iznosi 3,011 kgm<sup>2</sup>. Ovaj podatak se unosi na početku inicijalizacije parametara u bloku koji se odnosi na vektorsko upravljanje u okviru mehaničkih veličina motora.

Na slici 8 prikazana je promena snage motora tokom simulacije. Momenat i snaga u direktnoj srazmeri, pa sa porastom razvijenog momenta dolazi do rasta snage koja se troši. U trećoj sekundi, kada dolazi do smanjenja brzine i prelaska u generatorski režim rada, menja se i smer snage. U osmoj sekundi, dolazi do ubrzanja do najveće brzine tokom simulacije što je rezultirano najdužim trajanjem razvijenog momenta, kao i najvećom utrošenom snagom tokom simulacije. Same vrednosti nisu od velikog interesa koliko pregled sistema odnosno zavisnosti promena pojedinih veličina u vremenu i odziva sistema na zadatu referencu.

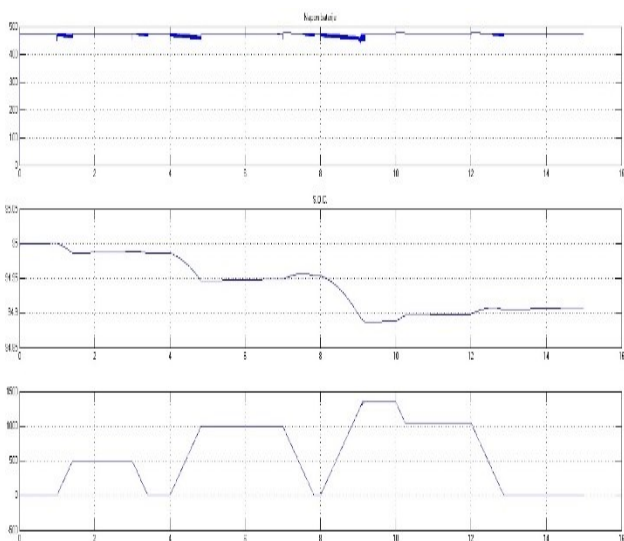


Sl. 7. Odziv sistema



Sl. 8. Aktivna snaga motora na njegovom izlazu

Na slici 9 prikazan je status i način pražnjenja baterije. Sa grafika se može uočiti ciklus pražnjenja i punjenja izvora napajanja prilikom ubrzavanja vozila, odnosno punjenje baterije na račun kočenja vozila (motora) prilikom kočenja. Na samom početku simulacije nivo napunjenosti baterije (SOC) je 95%, a sa kretanjem vozila baterija polako počinje da se troši.



Sl. 9. Ciklus pražnjenja i punjenja izvora napajanja

## 8. ZAKLJUČAK

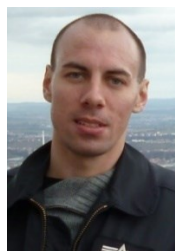
Izneta analiza u ovom radu čini skup osnovne teorije rada, konstrukcije električnim motorima i njihovoj primeni u automobilske industriji, prvenstveno kao pogonske jedinice.

Generalno svaki od datih električnih pogona ima relativno dobre karakteristike tako da je teško napraviti najbolji izbor. Ipak na osnovu svih iznetih činjenica između pomenutih električnih motora i karakteristika koje treba da poseduju kako bi bili upotrebljeni kao pogoni električnih vozila, motori sa premanentnim magnetima (PMSM) imaju blagu prednost nad ostalim pogonima. Trenutno oni su najbolji izbor za električna vozila u pogledu odnosa efikasnost – cena, gustine energije i visoke pouzdanosti.

## 9. LITERATURA

- [1] <https://www.eti.kit.edu/english/1376.php> (pristupio 25.09.2016.)
- [2] M. Stojkov, D. Gašparović, D. Pelin i dr., "Electric Car – history and components", 5<sup>th</sup> International Natural Gas, Heat and Water Conference, Hrvatska 2014., (pristupio 19.08.2016.)
- [3] V. Katić i dr., „Mali Električni Automobili - Ispitivanje Osnovnih Pogonskih Karakteristika“, ENEF, Bnja Luka, Nov.2013, dostupno na [http://enef.etfbl.net/resources/Zbornik\\_2013/24\\_Rad.pdf](http://enef.etfbl.net/resources/Zbornik_2013/24_Rad.pdf) (pristupio 11.08.2016.) st.:2-3
- [4] Ž. Banković, „Hibridna Vozila“, Seminarski rad, Elektrotehnički fakultet u Nišu, Jun 2010.
- [5] X. D. Xue, K. W. E. Cheng and N. C. Cheung, "Selection of Electric Motor Drives for Electric Vehicles", Hong Kong Polytechnic, University Hong Kong, China, January 2009
- [6] N. Tovilović, "Testiranja pogona električnog automobila – Prva faza", diplomski rad, FTN Novi Sad, 2013 (pristupio 25.10.2016)
- [7] M. Čulibrk, "Modelovanje i simulacija E – pogona modernog električnog automobila", master rad, FTN Novi Sad, 2016.

### Kratka biografija:



**Miloš Vorkapić** rođen je u Vršcu 1988. god. Fakultet tehničkih nauka, studijski program Energetika, elektronika i telekomunikacije upisao je školske 2007/2008. Na studijama se opredelio za smer Elektroenergetika i diplomirao je 2015. god. Master rad iz oblasti Energetske elektronike i električnih mašina. odbranio je 2019. god.

kontakt: milos.vorkapic88@gmail.com



**Vadimir Katić** rođen je 1954. godine u Novom Sadu. Doktorirao je na Univerzitetu u Beogradu 1991. godine. Od 2002. godine je redovni profesor Univerziteta u Novom Sadu. Trenutno je prodekan Fakulteta tehničkih nauka. Oblasti interesovanja su energetske pretvarači, obnovljivi izvori energije i kvalitet električne energije.