

**RAZVOJ MODELA ELEKTRIČNOG AUTOMOBILA U MATLAB SIMULINKU****DEVELOPMENT OF A ELECTRIC CAR MODEL IN MATLAB SIMULINK**Stefan Dupljanin, Marko Vekić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – U ovom radu prikazan je razvoj modela električnog automobila u okviru MATLAB Simulink-a. Model je razvijan korak po korak, gde je na početku automobil predstavljen kao crna kutija, delovanjem sile na tu kutiju uzrokuje se kretanje nekom brzinom. Takođe implementira se i model SUS motora, zatim model DC motora sa nezavisnom pobudom, strujni i brzinski regulatori kao i model slabljenja polja. Svakim korakom razvoja model postaje sve kompleksniji. Implementiranjem modela baterije i vozača završava se sa razvojem modela, jer su obuhvaćeni svi delovi električnog automobila. Na kraju su dati rezultati simulacije realne vožnje kako bi se proverila verodostojnost modela, gde su odzivi simulacije upoređeni sa očekivanim vrednostima, čime je dobijena potvrda ispravnosti modela.

**Ključne reči:** Električni automobil, MATLAB Simulink, SUS motor, DC motor sa nezavisnom pobudom

**Abstract** – The development of an electric car model within MATLAB Simulink is presented in this paper. The model is developed step by step, where at the beginning the car is presented as a black box, the action of force on that box causes movement at some speed. Also, the SUS engine model is implemented, then the DC motor with independent excitation, current and speed regulators as well as the model of field weakening. With every step of the development model becomes more and more complex. Implementing the battery and driver model ends with the development of the model, as all parts of an electric car are covered. In the end, the results of real-time simulation are given to check the credibility of the model, where the simulation responses are compared with the expected values, which gives a confirmation of the correctness of the model.

**Keywords:** Electric Car, MATLAB Simulink, Internal Combustion Motor, DC Motor with Independent Excitation

**1. UVOD**

Električna vozila sve više postaju deo svakodnevnice. Uzrok ovome je sve veća svest ljudi o tome koje sve prednosti donosi korišćenje električnog vozila umesto konvencionalnog.

Jedna od najznačajnijih prednosti jeste očuvanje životne sredine, odnosno smanjivanje emisije štetnih gasova, naročito u većim gradovima gde je zagađenost vazduha

**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Marko Vekić, docent.

sve veći problem. Posledica ove činjenice jeste ta da su vodeći svetski gradovi odlučili da do 2025. godine zabrane vožnju automobila u širem centru grada koji kao pogon koriste fosilna goriva (Pariz, Madrid, Atina, Meksiko Siti, Rim...) [1], što samo po sebi predstavlja podsticaj korišćenju električnih vozila. Dostupnost ovih vozila postaje sve veća razvojem automotiv industrije.

**1.1. Zadatak rada**

Zadatak ovog rada jeste da se napravi model električnog automobila, u MATLAB Simulinku, kako bi se posmatrale mehaničke pojave kao što su potrošnja baterije i pređeni put u zavisnosti od kapaciteta baterije. Sama realizacija je zamišljena tako da se napravi model običnog automobila sa motorom sa unutrašnjim sagorevanjem. Zatim će se takav model unapredi zamenom SUS (sa unutrašnjim sagorevanjem) motora električnim motorom sličnih karakteristika, kako bi se dobile iste ili slične performanse vozila u oba slučaja.

**2. DINAMIKA KRETANJA VUČNOG VOZILA**

Mehanički momenat se može predstaviti sledećom jednačinom:

$$M_m = -J_m \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + M_{em} \quad (1)$$

Kako je od interesa da u jednačini figuriše ugaona brzina izraz za ugaonu brzinu (2) će se uvrstiti u jednačinu (1) čime će se dobiti korigovana jednačina za mehanički momenat (3):

$$\omega_o = \frac{2 \cdot v}{D} = \frac{\omega_m}{N} \quad (2)$$

$$M_m = -J_m \cdot N \cdot \frac{d\omega_o}{dt} + M_{em} \quad (3)$$

Ukoliko se izraz 3. ubaci u jednačinu za dinamičku ravnotežu osovine točka 4. dobija se izraz 5:

$$J_o \cdot \frac{d\omega_o}{dt} = N \cdot M_m - \frac{D}{2} \cdot F_v \quad (4)$$

$$(J_o + N^2 \cdot J_m) \cdot \frac{d\omega_o}{dt} = N \cdot M_{em} - \frac{D}{2} \cdot F_v \quad (5)$$

Ukoliko se iz prethodne jednačine izrazi vučna sila  $F_v$  i ukoliko se uvrste izrazi 2. i 6. dobija se izraz 7 koji predstavlja jednačinu dinamike kretanja vučnog vozila:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = F_v - \sum F_{ot} \quad (6)$$

$$m \cdot (1 + \varepsilon) \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{2N}{D} \cdot M_{em} - \sum F_{ot} \quad (7)$$

Veličina  $\varepsilon$  predstavlja koeficijent korekcije obrtnih masa i njegova vrednost se može dobiti izrazom 8:

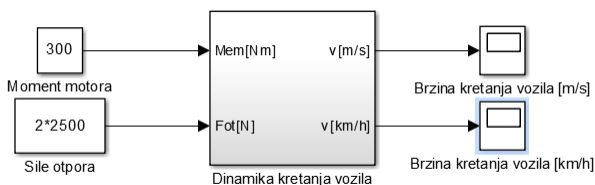
$$\varepsilon = \left(\frac{2}{D}\right)^2 \cdot \frac{J_o}{m} + \left(\frac{2}{D}\right)^2 \cdot N^2 \cdot \frac{J_m}{m} \quad (8.)$$

Zbog implementacije modela u MATLAB-u izraz 7. je prilagođen tako da se kao rezultat modela dobije brzina vozila što je prikazano sledećom jednačinom:

$$v = \int \left( \frac{2N}{D} \cdot M_{em} - \sum F_{ot} \right) \cdot \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{(1+\varepsilon)} dt \quad (9.)$$

## 2.1. Predstava modela dinamike kretanja vozila u MATLAB Simulinku

Model je napravljen tako da kao ulazne parametre prima dve veličine: elektromagnetni moment ( $M_{em}$ ) i sile otpora ( $F_{ot}$ ). Na osnovu ulaznih parametara model proračunava brzinu koja se dobija na izlazu. Ono što je bitno napomenuti, izlazna brzina se može posmatrati u dve merne jedinice, [km/h] i [m/s]. Izgled modela u *MATLAB Simulinku* je prikazan na slici 1.



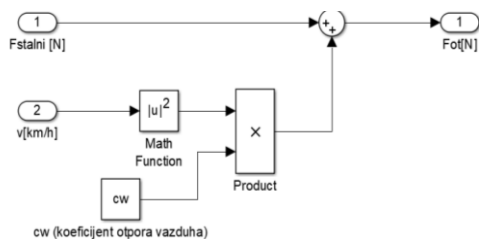
Slika 1 – Prikaz modela u MATLAB Simulinku

## 3. SILE OTPORA KRETANJU VUČNOG VOZILA

U najopštijem slučaju sile otpora koje deluju na vozilo u kretanju mogu se podeliti na unutrašnje i spoljašnje sile otpora.

Pod unutrašnjim silama otpora podrazumevaju se sve sile koje deluju pri prenosu snage od motora do točka, kako inercione tako i sile trenja elemenata transmisije [4].

Na slici 2 se može videti implementacija sile otpora kretanju u *Simulinku*, gde su otpori podeljeni na stalne i na otpore zavisne od brzine kretanja.



Slika 2 – Podsystem sile otpora kretanju

## 4. SUS MOTOR I TRANSMISIJA

### 4.1. SUS motori

Motori sa unutrašnjim sagorevanjem (SUS motori) su toplotni motori kod kojih produkti sagorevanja (dizel, benzin) svojim direktnim dejstvom vrše mehanički rad. Sam pojam motora sa unutrašnjim sagorevanjem obično se odnosi na one SUS motore kod kojih se proces sagorevanja obavlja s prekidima.

Osim ovih, postoje i SUS motori kod kojih se proces sagorevanja obavlja konstantno.

Predstavnici ovih motora su gasne turbine, mlazni motori i većina raketnih motora [6].

Svaki SUS motor u toku svog rada mora obaviti osnovna 4 procesa [7]:

- 1) Usisavanje,
- 2) Sabijanje (kompresija),
- 3) Sagorevanje, širenje (ekspanzija),
- 4) Izduvanje.

### 4.2. Transmisija

Transmisija obuhvata sve delove i sklopove na vozilu koji prenose snagu od motora do pogonskih točkova vozila. Ona ima zadatak ne samo da prenese snagu od motora do pogonskih točkova vozila, nego i da izvrši promenu oblika pogonskih karakteristika motora, odnosno promenu parametara njegove snage [4]. Konceptiju, odnosno vrstu transmisije najčešće određuju vrsta ugrađenog motora, a takođe i namena i kategorija vozila, odnosno uslovi njegove eksploatacije.

Podela transmisije može da se vrši po različitim kriterijumima, najčešći je prema načinu prenošenja snage. Postoje četiri osnovne vrste:

- Mehaničke,
- Hidrauličke,
- Električne,
- Kombinovane.

### 4.3. Model SUS motora u MATLAB Simulinku

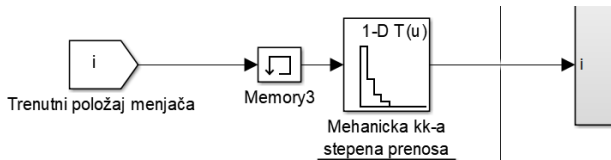
Za prikazivanje SUS motora u ovom modelu, korišćen je element *1-D Lookup Table* koji se nalazi u okviru *Simulink Library Browser*-a u biblioteci *Simulink* → *Lookup Table*. Samo modelovanje se realizuje tako što se zadaju četiri radne tačke, koje su linearno povezane formirajući krivu, čime se predstavlja zavisnost momenta motora od brzine obrtanja. Na slici 3 je prikazan izabrani motor. Sa slike se uočavaju podaci od interesa, kao što su snaga i moment motora, i što je još bitnije pri kojim brzinama se ostvaruju te vrednosti.

Mercedes Benz 190 E 1.8	
prenosi	odnosi brzina pri 6000 o/min pri 4000 o/min pri 2500 o/min
1.	3.910:1 50.4 km/h 33.6 km/h 21.0 km/h
2.	2.170:1 90.8 km/h 60.5 km/h 37.8 km/h
3.	1.370:1 143.8 km/h 95.7 km/h 59.9 km/h
4.	1.000:1 197.0 km/h 131.3 km/h 82.0 km/h
5.	0.810:1 243.3 km/h 162.2 km/h 101.3 km/h
R	4.270:1 46.1 km/h
Dif	3.460:1
120 km/h	V 2959 o/min
130 km/h	V 3206 o/min
150 km/h	V 3700 o/min
0-100 km/h	12.3 s
max	185 km/h pri 4562 o/min
pneu	185/65 R 15 O=1.894 m
potrošnja	
90 km/h	6.7 l
120 km/h	8.7 l
grad	-11.3 l
težina	1150 kg nosivost 500 kg nosivost krova 100kg
motor	
	1797 cc
prečnik x hod klipa	89.0 x 72.2 mm
kompresija	9.1:1
snaga	80kW (109 KS) pri 5500 o/min
obratni momenat	150 Nm pri 3700 o/min

Slika 3 – Karakteristike izabranog motora

#### 4.4. Model transmisije u MATLAB Simulinku

Model transmisije se može realizovati slično kao i SUS motor, dakle pomoću elementa *1-D Lookup Table*, gde se na osnovu ulaznog parametra trenutnog položaja menjača, na izlazu dobija vrednost ukupnog prenosnog odnosa u toj brzini, koji se dalje prosleđuje kao ulazni parametar podsistema *Dinamika kretanja vozila*. Na slici 4 prikazana je implementacija gore opisanog postupka.



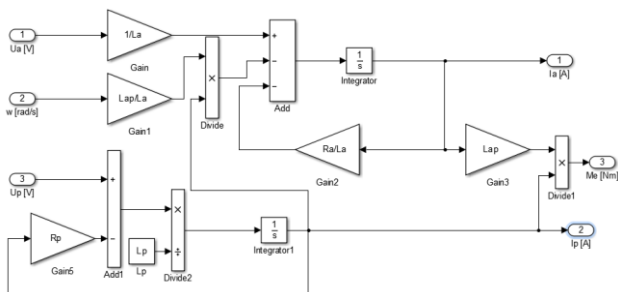
Slika 4 – Implementacija dobijanja stepena prenosa u modelu

#### 5. MOTORI JEDNOSMERNE STRUJE

Motori jednosmerne struje spadaju u rotacione električne mašine kod kojih se vrši pretvaranje električne u mehaničku energiju rotacionog kretanja. Pripadaju dvopobudnim sistemima, jer imaju dva namota, statorski i rotorski [8].

##### 5.1. Primena motora jednosmerne struje u okviru modela vozila

U okviru modela vučnog vozila predstava motora jednosmerne struje će se inkorporirati preko podsistema *Model električnog kola armature i pobude*, jer mehanički podsistem predstavlja samo vozilo. Na slici 5 je prikazana unutrašnjost podsistema *Model električnog kola armature i pobude*.



Slika 5 – Model električnog kola armature i pobude

#### 6. UPRAVLJAČKI SISTEM MOTORA

##### 6.1. Energetski pretvarač – čoper

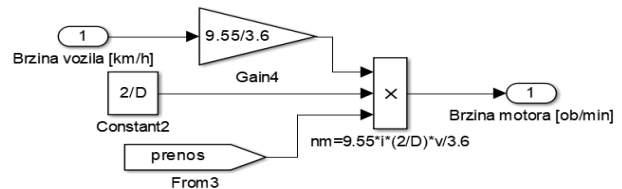
Čoperi ili impulсни regulatori jednosmernog napona su energetski pretvarači koji vrše pretvaranje jednosmernog napona konstantne vrednosti u jednosmerni napon promenljive srednje vrednosti, [4]. U radu se primenjuje četvorokvadrantni čoper.

Radom u sva četiri kvadranta se omogućava pogon u oba smera obrtanja, a reverziranje se može postići rekuperativnim kočenjem. Konceptija rada čopera, odnosno redosled uključivanja i isključivanja energetskih prekidača (tranzistora) može biti različit, u zavisnosti od željenog režima rada, da li kao jednokvadrantni, dvokvadrantni ili četvorokvadrantni.

Upravljanje može biti unipolarno ili bipolarno. U ovom modelu je odabrano unipolarno upravljanje.

#### 7. SIMULACIJA VOŽNJE

Kako bi se došlo do mogućnosti simulacije vožnje potrebno je prilagoditi način zadavanja referentne brzine. Ovo u praktičnom smislu znači da je model potrebno prilagoditi da kao ulazni parametar prima brzinu vozila u [km/h]. Usled činjenice da regulator brzine kao ulazni parametar koristi brzinu motora u [rad/s] neophodno je implementirati konverziju koja će brzinu vozila pretvoriti u brzinu motora. Ovo je ostvareno blokom *Konverzija brzine vozila iz [km/h] u brzinu motora u [ob/min]* čija unutrašnjost je prikazana na slici 6.



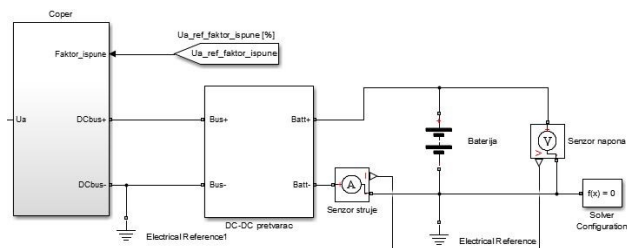
Slika 6 – Unutrašnjost bloka kojim se konvertuje brzina vozila iz [km/h] u brzinu motora u [ob/min]

#### 8. BATERIJE ZA ELEKTRIČNA VOZILA

Baterije za električna vozila predstavljaju proizvod koji se koristi za napajanje pogona električnog vozila. Najčešće se koriste za napajanje viljuškara, vozila za golf terene, električne motocikle, električne automobile, kamione, kombije i druga električna vozila, dok sve veću primenu imaju i kod električnih biciklova.

##### 8.1. Implementacija modela baterije u modelu

Model baterije je realizovan tako što je iskorišćen gotov model baterije koji se nalazi u okviru biblioteke *Simscape* → *SimPowerSystems* → *Sources* → *Battery*, slika 7.



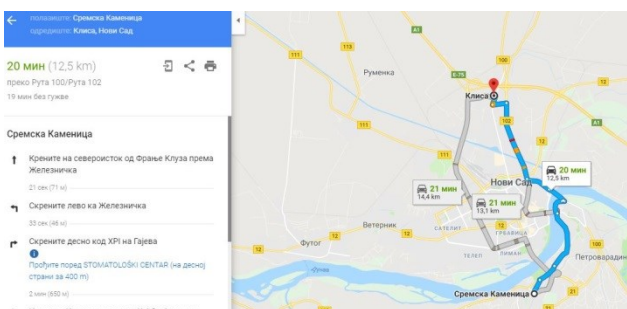
Slika 7 – Izgled baterije u okviru modela

Pomoću senzora struje i napona se detektuje struja i napon baterije, respektivno. Blok *PS-Simulink Converter* služi kako bi se fizički signal konvertovao u simulink signal. Ovo je neophodno iz razloga što biblioteka *SimPowerSystems* koristi fizički signal, dok se u ostatku modela koristi Simulink signal.

## 9. SIMULACIJA REALNE VOŽNJE

Kako bi se proverila verodostojnost modela, uzeće se parametri neke realne vožnje, u ovom slučaju ruta od Sremske Kamenice do Klise, gde će se predviđeno trajanje puta i pređena kilometraža proveriti sa odzivom simulacije. U zavisnosti od poklapanja ovih rezultata, oćeniće se sama verodostojnost modela.

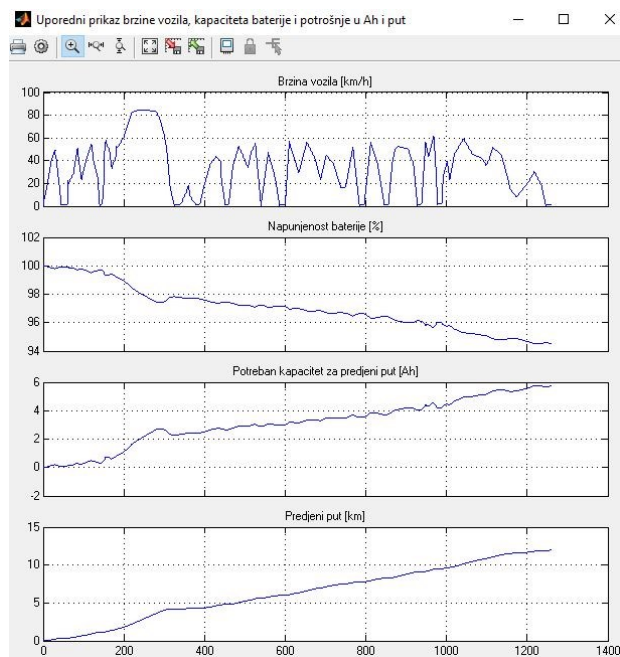
Na slici 8 se može videti izabrana ruta sa procenjenim parametrima, odnosno predviđenom kilometražom i vremenskim trajanjem puta.



Slika 8 – Izabrana ruta

Sa slike se uočavaju osnovni parametri ove rute, da je predviđeno trajanje puta 20 minuta, te da je razdaljina između početne i krajnje tačke 12,5 km.

Nakon zadavanja ulaznih parametara, brzine vozila u intervalu od 20 minuta, simulacija je pokrenuta. Na slici 9 se mogu videti rezultati simulacije, odnosno brzina vozila, napunjenost baterije, potrošeni kapacitet i pređeni put, respektivno. Uočava se da je pređeni put u simulaciji, slika 9, gotovo identičan predviđenom pređenom putu sa slike 8, iz čega proizilazi činjenica da model verodostojno oslikava realnu vožnju.



Slika 9 – Odziv modela

## 10. ZAKLJUČAK

Ovaj rad predstavlja osvrt na deo razvojnog procesa električnog automobila, jer je sastavni deo logičke

arhitekture sistema, gde se koristi modelovanje u *Simulinku* kako bi se opisala logika zahtevanih funkcionalnosti automobila.

U zavisnosti na kojim pojavama je fokus, model se može prilagoditi tako da se simuliraju željene veličine.

Kao što je na početku bilo naznačeno ovaj rad se bazirao na mehaničke pojave vezane za električan automobil, kao što su potrošnja baterije i pređeni put. U skladu sa interesnom sferom model se razvijao u pravcu posmatranja prethodno pomenutih stvari, ovo je razlog nekih zanemarenja u modelu,

## 11. IZVORI

- [1] N. Zimmermann, *Move is on to ban diesel cars from cities*, DW Germany, 2018.
- [2] <https://elbil.no/english/norwegian-ev-policy/>
- [3] [https://en.wikipedia.org/wiki/Plugin\\_electric\\_vehicles\\_in\\_Norway](https://en.wikipedia.org/wiki/Plugin_electric_vehicles_in_Norway)
- [4] B. Radojković, *Električna vuča*, Zavod za izdavanje udžbenika Socijalističke Republike Srbije Beograd, 1965.
- [5] I. Husain, *Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals*, Taylor & Francis e-Library, 2005.
- [6] J. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill Education, 1988.
- [7] C. F. Taylor, *The Internal-combustion Engine in Theory and Practice: Combustion, fuels, materials, design*, MIT Press, 1985.
- [8] K. Hameyer, *Electrical Machine I: Basics, Design, Function, Operation*, RWTH Aachen University Institute of Electrical Machines, 2001.
- [9] B. Jeftenić, Đ. Oros, V. Vasić, *REGULISANI ELEKTROMOTORNI POGONI-REŠENI PROBLEMI SA ELEMENTIMA TEORIJE*, Akademska misao, 2004.
- [10] Siemens AG, *Catalog DA 12 – 2008 (DC motors, Sizes 160 to 630, 31.5 kW to 1610 kW)*, Siemens, 2008.
- [11] M.H. Westbrook, *The Electric Car: Development and Future of Battery, Hybrid and Fuel-cell Cars*, The Institution of Engineering and Technology, 2001.

## Kratka biografija:



**Stefan Dupljanin** rođen je 1994. godine u Vrbasu. Gimnaziju „Isidora Sekulić“, završio je u Novom Sadu, 2013. godine. Fakultet tehničkih nauka, studijski program Energetika, elektronika i telekomunikacije upisao je školske 2013/2014 godine. Na studijama se opredelio za smer Elektroenergetika– Elektroenergetski sistemi i diplomirao 15.11.2017. god. Sledeće godine je upisao Master akademske studije, smer Energetska elektronika i električne mašine.



**Marko Vekić** je docent na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, na Katedri za Energetsku elektroniku i pretvarače. Oblast interesovanja su energetska elektronika u prenosnim i distributivnim mrežama i kvalitet električne energije.