

ELEKTRIČNI TROTINETI MODELOVANJE I SIMULACIJA RADA ELECTRIC SCOOTERS MODELING AND SIMULATION OF WORK

Filip Ačanski, Vladimir A. Katić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – U ovom radu razmatraju se električni trotineti. Počevši od istorije razvoja prvih električnih vozila, preko razmatranja dostupnih električnih vozila male snage. Takođe su razmatrane i zakonske regulative koje se tiču električnih vozila male snage kao i njihovi pogonski podsklopovi. Na kraju pristupilo se modelovanju odgovarajućeg električnog trotineta u programskom jeziku Matlab/Simulink tačnije modela NineBot es5. Cilj simulacije jeste da se što verodostojnije predstavi fizički model električnog trotineta.

Ključne reči: Električni trotineti, Simulacija, Modelovanje

Abstract – This paper deals with electric scooters. Starting with early history of development of electric vehicles, available models of electric vehicles of small power (LEV) on the market are considered. Legislations for electric scooters and small power vehicles in general are also considered. The main part of the paper is a simulation and modeling of an electric scooter using NineBot ES4 in Matlab/Simulink. The goal is to show that model made in Matlab gives adequate results of simulation similar or same to results in reality.

Keywords: Electric scooters, Modeling, Simulation

1. UVOD

Proizvodnja električne energije i saobraćaj danas predstavljaju najdominatnije izvore CO₂ drugih štetnih materija. Obnovljivi izvori energije zajedno sa razvojem i primenom električnih vozila deo su novog plana za rešavanje ovog problema.

Istorija razvoja električnih vozila seže u daleku prošlost. Istorijски dokumenti, koji govore o modelu prvog električnog vozila datiraju iz 1881. godine. Tvorac tog vozila bio je Victor Trouve, francuski pronalazač.

Godine 1884. u Wolverhampton-u engleski pronalazač Thomas Parker kreira prvo električno vozilo, dok jedini materijalni dokaz predstavlja slika vozila načinjena 1885. godine [1].

Međutim, primat na tržištu automobila početkom XX veka preuzimaju vozila sa SUS motorima. Neki od razloga, koji su doprineli ovom stanju su sledeći: slab razvoj infrastrukture za punjenje baterija, otkrića nalazišta nafte, veći domet koji su pružala vozila sa SUS motorima i dr.

NAPOMENA:

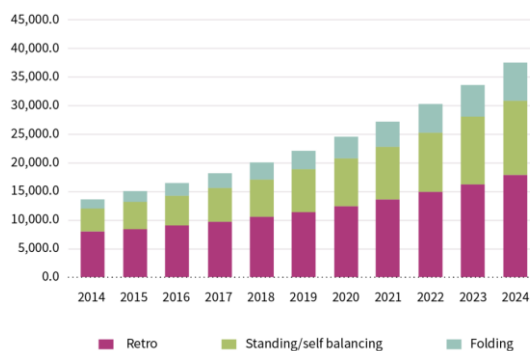
Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Vladimir Katić, red. prof.

Električna vozila zahvaljujući napretku na polju razvoja električnih baterija i tehnologije izrade komponenti energetske elektronike, ali i sve većoj zabrinutosti za životnu sredinu i uticaj čoveka na klimatske promene ponovo dobijaju na popularnosti 90-ih godina XX veka.

Kao paralelna kategorija, dolazi do naglog razvoja električnih vozila male snage ili LEV (*Light Electric Vehicles*), tačnije nominalne snage manje od 3 kW. Moderni oblik i dizajn, ova vozila poprimaju početkom XXI veka. U njih spadaju električni skuteri, električni trotineti, električni bicikli i dr. Perspektiva tržišta ovih vozila u svetu je veoma velika. Na slici 1 prikazana je godišnja prodaja i perspektive tržišta LEV vozila u svetu u periodu od 2014-2024 [2]. Može se uočiti velika vrednost i značajan rast, naročito novih rešenja: električni bicikli i sl. („*Standing/self balancing*“) i novijih modela električnih trotineta („*Folding*“).

Cilj ovog rada jeste da detaljnije predstavi pogon električnog trotineta i da kroz simulacije odredi njegove ključne vozne osobine.

Global electric scooters market by product, 2014 - 2024 (USD Million)
Grand view research: Electric scooters market analysis (2016)



Sl. 1. Prikaz godišnje prodaje LEV vozila [2]

2. ELEKTRIČNA VOZILA MALE SNAGE

Električna vozila male snage ili LEV danas imaju veoma značajan procenat učešća u ukupnom broju električnih vozila u svetu. Njihova jednostavnost i pokretljivost čine ih idealnim za potrebe gradske vožnje. Postoji više vrsta ovih vozila, među kojima su električni trotineti, električni bicikli, automatizovani viljuškari, *hoverboard*-ovi, robotski transporter i dr.

2.1 Električni bicikli

Električni bicikli su zapravo bicikli sa ugrađenim električnim motorom, baterijom i kontrolerom. Postoje dva podtipa električnih bicikala:

- sa pomoćnim pedalama (*Pedal Assist*), gde je električni motor regulisan okretanjem pedala i u slučaju detekcije

kretanja, senzor aktivira motor, kako bi olakšao kretanje vozača,

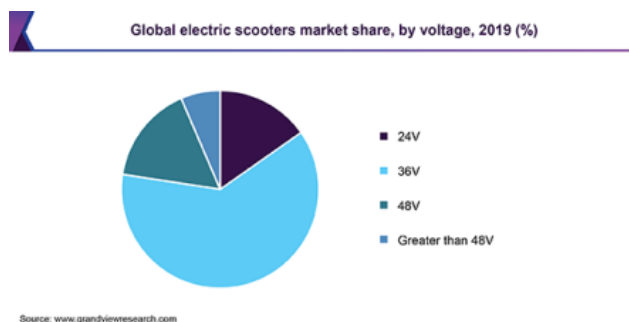
- sa pomoćnim pogonom (*Power on Demand*), gde se električni motor aktivira isključivo preko tastera, na zahtev korisnika i angažuje određena snaga motora.

Električni bicikli se prave ili kao zasebni tipovi ili kao kombinacija gore napomenutih modela.

2.2 Električni trotineti i *Hoverboard*-ovi

Električni trotineti su danas najpopularniji model električnih vozila male snage. Pogonski sklop električnog trotineta čini BLDC (*Brushless DC*) motor, koji se nalazi u samom točku trotineta i poznatiji je kao *hub* motor. Pogonski motori standardnih električnih trotineta su opsega od 300-500 W snage, dok naprednije verzije u sebi imaju ugrađene motore većih snaga i imaju neke druge namene, osim vožnje po asfaltu. Motor električnog trotineta može biti smešten u prednjem, zadnjem točku ili pak trotinet može imati dualne motore smeštene u oba točka [3]. Danas u svetu postoji mnogo različitih proizvođača električnih trotineta, a najistaknutiji su: *Xiaomi*, *Swagtron*, *Razor*, *Segway*, *Ninebot*.

Na slici 2 prikazani su naponi baterija električnih trotineta i njihovo učešće na tržištu. Primetno je da najveći deo električnih trotineta u sebi ima ugrađene baterije od 36 V, zatim slede 48 V, 24 V, dok se naponi većih od 48 V upotrebljavaju kod trotineta veće snage [4].



Sl. 2. Naponski nivoi električnih trotineta [4]

Za razliku od električnih trotineta, *Hoverboard*-ovi imaju točkove paralelno postavljene jedan sa drugim, motori se nalaze u oba točka i kretanje se ostvaruje tako što vozač zauzima odgovarajući nagibni ugao. Žiroskopi detektuju promenu ugla i šalju motorima podatke, koji potom pogone *Hoverboard* određenom brzinom. Kompanija *Segway* poseduje patent na dizajn *Hoverboard* vozila sa stubom za lakše upravljanje. Zbog takvog dizajna, mnoge policijske ustanove širom sveta koriste upravo taj model *Segway Hoverboard*-a. Iako zamišljeni kao prevozno sredstvo, *Hoverboard* vozila uglavnom koriste mlađi naraštaji u svrhu razonode.

2.3 Robotski transporteri i automatizovani viljuškari

Automatizovani viljuškari su svoju svrhu pronašli u velikim magacinskim prostorima u kojima se brinu o transportu i skladištenju robe.

Robotski transporteri veliku primenu danas pronalaze u raznim granama privrede počevši od automobilske industrije do medicine. U automobilskoj industriji roboti služe za obavljanje manualnih ponavljajućih funkcija gde su se znatno bolje pokazali od ljudskog faktora, dok se u medicini koriste kao ispomoć pri transportu medicinske

opreme ili u samim procesima dezinfekcije potrebne aparature.

Neki od sistemi pomoću kojih se automatizovana vozila i roboti kreću u prostoru su: *Railed navigation*, *Wire based navigation*, *Lidar*, *Geo guidance*.

3. MODELOVANJE ELEKTRIČNOG TROTINETA

Modelovanje električnog trotineta i simulacija njegovog rada vršena je u programskom jeziku *Matlab* pomoću njegovog programskog paketa *Simulink*. Pri samoj simulaciji korišćena je verzija R2020a, jer u njoj postoji set blokova pod nazivom *Power Train Blockset*, koji je bio neophodan za modelovanje odgovarajućeg modela. Model trotineta, koji je modelovan je *Ninebot ES4*, čije specifikacije su prikazane u Tabeli 1.

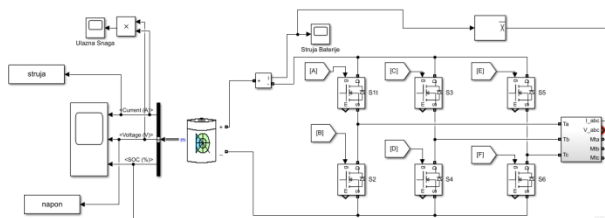
Tabela 1. Specifikacije električnog trotineta [5]

Model	Ninebot ES4
Maksimalna brzina (km/h)	30
Maksimalni domet (km)	44,8
Kapacitet Baterije (Wh)	374
Napon (V)	36
Ukupna masa (kg)	13,90
Vreme punjenja (h)	7
Nominalna snaga (W)	300
Maksimalna snaga (W)	500
Maksimalni uspon (°)	11
Kočnice	Mehaničke+električne
Trag zaustavljanja (m)	3,9624
Amortizeri	prednji +zadnji
Prednji točak - prečnik (inch)	8
Zadnji točak - prečnik (inch)	7.5
Maksimalna nosivost (kg)	100
Aplikacija/Bluetooth	da
LED Ekran	Mod, brzina, nivo bat
Sigurnost vidljivost	Prednji reflektor +zadnji i bočni
Dimenzije (V* Š *D)	(102*43*113)cm
Zaštita od vode	IP54
Preporučena starost	14-60 godina
Vrsta motora	BLDC motor

Model električnog trotineta sastoji se iz 4 podsistema koji su potom kompaktno uvezani u funkcionalnu celinu.

3.1 Energetski podsistem

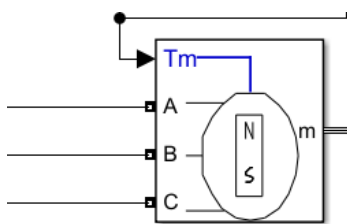
Energetski podsistem električnog trotineta sastoji se od li-Ion-ske baterije napona 36 V, kapaciteta 10,5 Ah. Kao inicijalni stepen popunjenosti baterije, uzeta je vrednost od 80%, dok su temperaturni efekti i efekti starenja baterije zanemareni. Na slici 3 prikazan je model energetskog podsistema, koji uključuje i trofazni inverter sačinjen od 6 parova MOSFET/dioda, koji omogućavaju dvosmerni tok energije.



Sl. 3. Energetski podsistem električnog trotineta

3.2 Pogonski podsistem

Pogonski podsistem sastoji se od odgovarajućeg trofaznog BLDC motora nominalne snage 300 W i maksimalne snage 500 W (Sl. 4). Povezivanjem motora sa *Bus selector* blokovima dobija se mogućnost očitavanja ugaone brzine, momenta, struja motora.



Sl. 4. BLDC Motor

Na ulaz T_m doveden je mehanički momenat, tačnije momenat opterećenja, koji se suprotstavlja samom kretanju vozila, a koji je izražen kao zbir sila otpora trenja i sile otpora vazduha. Sila otpora trenja je konstanta, dok se sila otpora vazduha menja u zavisnosti od trenutne brzine. Formule za proračun odgovarajućih sila koje se suprotstavljaju vozilu su date u nastavku. Sila otpora vazduha vozila i vozača je:

$$F_{trv} = 0,5 \rho v^2 C_w A \quad (1)$$

gde su F_{trv} sila otpora vazduha u Njutnima; ρ gustina vazduha, $\rho=1,18 \text{ kg/m}^3$; v brzina kretanja; C_w vrednost otpora vazduha, $C_w=0,2$; A frontalna površina vozila i vozača, $A=0,75 \text{ m}^2$ [6]. Referentne brzine kretanja su zadate u km/h te je stoga potrebno izvršiti pretvaranja km/h u m/s. Sila otpora trenja je data sa:

$$F_{tr} = m g \mu \quad (2)$$

gde su F_{tr} sila trenja u Njutnima; m masa vozila, $m=85 \text{ kg}$; g ubrzanje gravitacija, $g=9,81 \text{ m/s}^2$; μ koeficijent trenja, $\mu=0,002$. Sada je ukupna sila, koja se suprotstavlja kretanju data sa:

$$F_{uk} = F_{tr} + F_{trv} \quad (3)$$

a mehanički moment je dat sa:

$$T_m = F_{uk} \quad (4)$$

Neke od vrednosti momenata, za odgovarajuće brzine kretanja, date su u Tabeli 2.

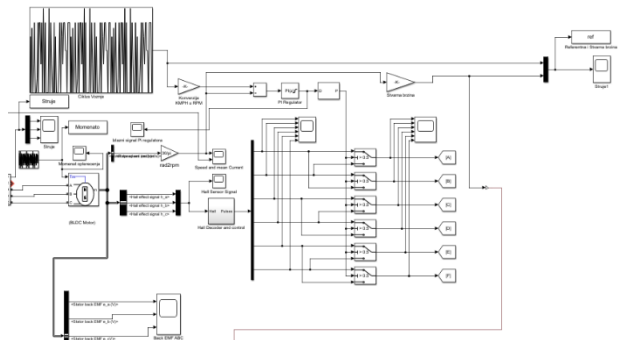
Tabela 2. Mehanički moment u zavisnosti od brzine

v [km/h]	5	10	15	20	25	30
T_m [Nm]	1.68	2.35	3.19	4.36	5.88	7.67

3.3 Upravljački podsistem

Na slici 5 prikazan je upravljački podsistem koji se sastoji od:

- bloka sa referencom brzine, tj. ciklusa vožnje u trajanju od 508 sekundi pomoću kojeg se zadaje željena brzina. Maksimalna brzina iznosi 30 km/h, jer su takve specifikacije električnog trotineta.
- PI regulator-a, koji poredi stvarnu i referentnu brzinu, te na taj način vrši upravljanje brzinom električnog trotineta. Vrednost proporcionalnog dejstva iznosi 15, dok vrednost integralnog dejstva iznosi 20. Takođe, regulator ima podešenu opciju *anti wind-up*, kako ne bi ušao u ograničenje.

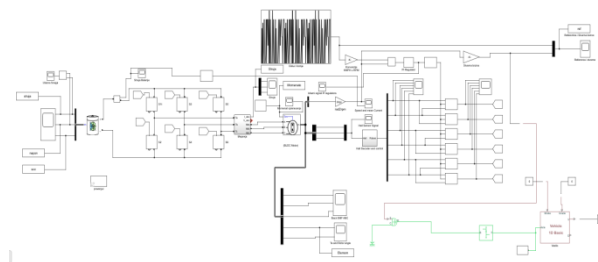


Sl. 5. Upravljački podsistem

Logika upravljanja poredi signale sa Hall dekodera i izlaza PI regulatora i na osnovu razlike parametara proračunava upravljačke signale za gejtove trofaznog invertora, koji se potom pomoću *Goto* blokova šalju na ulaze gejtova parova MOSFET/Dioda.

3.4 Mehanički podsistem

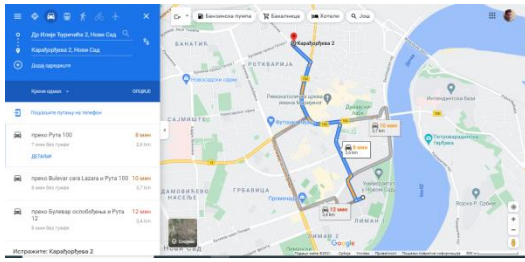
Mehanički podsistem sastoji se od samog tela vozila, bloka *Ideal Torque Source*, koji momenat na ulazu prosleđuje ka izlazu bez promene, menjača sa fiksnim prenosnim odnosom i osciloskopa za posmatranje izlaznih veličina. Masa vozila i vozača ukupno iznose 85 kg, pogonski momenat doveden je na prednji točak trotineta, a frontalni udari vetra i nagibni ugao su zanemareni. Kompletan model električnog trotineta dat je na slici 6.



Sl. 6. Model električnog trotineta

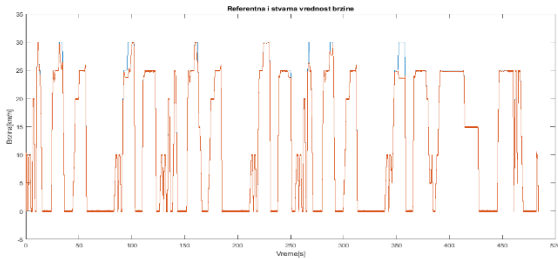
4. REZULTATI SIMULACIJE

Zamišljena putanja kretanja, kojom je simulirana trasa vožnje električnog trotineta, data je na slici 7. Predviđena je gradska vožnja po ulicama Novog Sada i to od lokacije u delu grada Podbara do cilja na Limanu I. Ciklus vožnje traje 508 sekundi i u sebi uvažava zaustavljanja na semaforima i raskrscnicama. Za vreme trajanja ciklusa vožnje električni trotinet prelazi rastojanje od 2,6 km i završava u neposrednoj blizini Fakulteta Tehničkih Nauka u Novom Sadu.



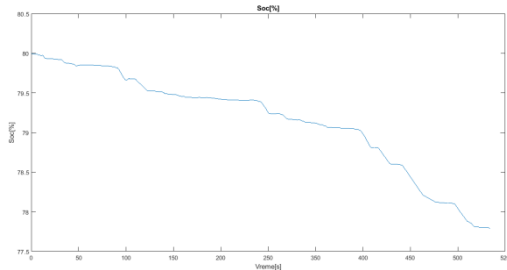
Sl. 7. Putanja kretanja zamišljenog ciklusa vožnje

Slika 8 prikazuje poređenje stvarne i referentne vrednosti brzine električnog trotineta izrežene u km/h. Sa grafika se može primetiti da električni trotinet dobro prati zadatu referencu brzine (referentna brzina označena je plavom dok je stvarna brzina označena crvenom bojom).



Sl. 8. Referentna i stvarna vrednost brzine

Na slici 9 prikazano je stanje napunjenosti baterije (*State of Charge, SOC*). Inicijalna popunjenost baterije iznosi 80% i po kretanju grafika mogu se primetiti nagla ubrzanja (pad SOC), ali i kratki periodi rekuperacije električne energije.



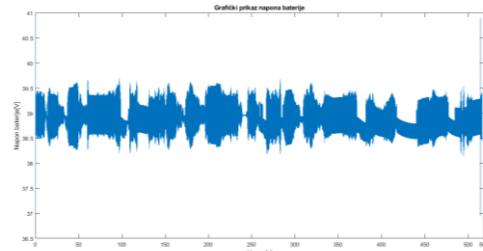
Sl. 9. Stanje SOC tokom ciklusa vožnje u [%]

Na slikama 10 i 11 prikazani su napon i struja baterije za vreme trajanja simulacije, respektivno. Može se uočiti da napona varira od 38,4 V do 39,7 V, dok struja od 0 do 12 A.

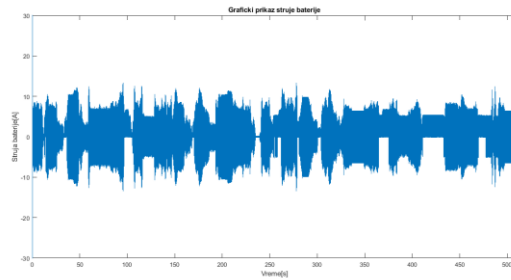
5. ZAKLJUČAK

Iz priložene simulacije može se primetiti da model u *Matlab-u* prilično verodostojno predstavlja stvarni električni trotinet. MBDS (*Model Based Development System*) se pokazao kao koristan princip pri modelovanju vozila i njihovom testiranju pre nego što uđu u fazu proizvodnje. Iz rezultata simulacije može se zaključiti da su odzivi dobri i da se model ponaša veoma slično trotinetu u stvarnosti uz naravno idealizacije poput zanemarivanje frontalnog vetra i nagibnog ugla kretanja. Kroz rezultate je pokazano da se i električna energije rekuperiše.

Električni trotineti su najjednostavniji i najpogodniji za brzi transport u gradskim uslovima. Stoga u bliskoj budućnosti možemo očekivati još veći broj električnih trotineta na našim ulicama.



Sl. 10. Napon baterije



Sl. 11. Struja baterije

6. LITERATURA

- [1] History of the Electric vehicle, https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_electric_vehicle
- [2] <https://www.rutronik.com/suppliers/infineon/light-electric-vehicles/>
- [3] Segway_Inc, https://en.wikipedia.org/wiki/Segway_Inc.
- [4] Electric scooters market, <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/electric-scooters-market>
- [5] Ninebot ES4, <https://store.segway-ninebot-kickscooter-es4>
- [6] How to calculate drag coefficient for motorcycle, <https://info.simuleon.com/blog/how-to-calculate-drag-coefficient-for-motorcycle>

Kratka biografija:



Filip Ačanski rođen je 1993. god. u Somboru. Osnovne studije završio je na Fakultetu tehničkih nauka 2019. god., a master 2021. god. iz oblasti Elektrotehnike i računarstva.



Vladimir A. Katić rođen je 1954. god. u Novom Sadu. Doktorirao je na Univerzitetu u Beogradu 1991. god. Od 2002. god. je redovni profesor Univerziteta u Novom Sadu. Oblasti interesovanja su mu energetska elektronika, kvalitet električne energije, obnovljivi izvori električne energije i električna vozila.