

MODELIRANJE SUSTAVA OBNOVE KINETIČKE ENERGIJE BOLIDA FORMULE 1

Marko Majcenić, Toni Bjažić

Tehničko veleučilište u Zagrebu

Sažetak

U radu su objašnjeni principi rada i parametri elektromotora u bolidu Formule 1 potrebni za modeliranje istoga, te je također ukratko objašnjeno kako se upravlja dotičnim elektromotorom. Napravljen je model elektromotora na temelju prijenosnih funkcija elektromotora. Model je izrađen u skladu sa danim tehničkim regulacijama bolida Formule 1. Nadalje, napravljen je i model elektromotora s baterijom na temelju jednadžbi stanja elektromotora, model koji se koristi za prikazivanje utjecaja baterije na rad elektromotora i utjecaja sklapanja na armaturnu struju. prikazana je energija koju koristi elektromotor. Simulacije su napravljene u programskom paketu *Matlab-Simulink*.

Ključne riječi: *Sustav obnove kinetičke energije, istosmjerni stroj, prijenosna funkcija elektromotora, Theveninova baterija, energija elektromotora.*

Abstract

Principles of operation and parameters of Formula 1 racing car electric motor required for modeling are given in this thesis and furthermore, how to control such an electric motor is explained. Based on the electric motor transfer functions, a model of electric motor is created. Model was created in accordance to previously defined technical regulations of Formula 1 racing car. Furthermore, an electric motor with a battery model is created, based on state equations of electric motor. This model is used to demonstrate the influence of the battery on the electric motor operation and influence of the switching on armature current. An energy used by the electric motor is presented. The simulations are carried out in program package *Matlab -Simulink*.

Key words: *Kinetic energy recovery system, DC electric motor, transfer function of electric motor, Thevenin battery, energy of electric motor.*

1. Uvod

Ovaj rad obuhvaća temeljne pojmove i principe rada neophodne kako bi se shvatilo na koji način sustav obnove kinetičke energije (KERS) funkcionira i nadalje, kako bi se modeliranje takvog sustava i upravljanje istim moglo izvesti. Takvi sustavi su sve popularniji zbog ušteda energija koje omogućuju, odnosno povoljnih ekoloških svojstava koja su veoma cijenjena u društvu koje se brine za okoliš. Budući da je FIA svojevremeno izjavila da podupire odgovorna rješenja na zahtjeve svjetskog okoliša, odobrila je korištenje sustava obnove kinetičke energije za sezonu 2009., u kojoj je bolid sa KERS-om ostvario i prvu pobjedu. U sezoni 2014., KERS je sadržan u MGU-K komponenti sustava obnove energije (ERS). Kako se takvi sustavi zasad koriste samo u Formuli 1 (F1), parametri koji se koriste u ovom radu su odabrani na temelju FIA tehničkih regulacija. Elektromotor koji je korišten u modeliranju je istosmjerni motor s nezavisnom uzbudom. Iako se takvi elektromotori ne koriste u F1, svi se drugi modeli elektromotora mogu aproksimirati sa istosmjernim modelom, samo što onda parametri modela imaju drugačije značenje. Principi rada neophodni za modeliranje sustava i određivanje određenih parametara potrebnih za dotično modeliranje su prikazani u poglavlju 2, gdje je također i pojašnjeno koji se problem javlja pri regenerativnom kočenju i ukratko je pojašnjeno kako se upravlja elektromotorom. Samo modeliranje je objašnjeno u poglavlju 3, gdje se koriste prijenosne funkcije dinamičkih karakteristika i prikazana je simulacija dotičnog modela gdje se vidi odziv armaturne struje i kutne brzine elektromotora prilikom rada na stazi, te se pritom vidi i potrošnja energije. U četvrtom poglavlju je objašnjeno kako se izrađuje model s baterijom, kako bi se vidio utjecaj baterije. Ovaj model se koristi i za prikaz utjecaja sklapanja, objašnjenog u prvom poglavlju. Iako tehnologije poput ERS-a nisu prisutne u

svakodnevnim, običnim automobilima, veoma je vjerojatno da se takve tehnologije nađu i na komercijalnom tržištu u budućnosti, jer kako se to često pokazuje, inovacije, posebno ekološke naravi, iz F1 brzo nađu svoje mjesto u svakodnevnom životu. I upravo iz tog razloga, bitno je za buduće inženjere da razumiju takvu tehnologiju.

2. Opis sustava obnove energije

Sustav obnove energije, u bolidu Formule 1 se sastoji od dva dijela, gdje prvi, toplinski dio pretvara toplinsku energiju ispušnih plinova u električnu energiju, pomoću turbopuhala (MGU-H, Motor Generator Unit- Heat). Drugi dio kinetičku energiju tijekom kočenja pretvara u električnu. U daljnjem radu detaljno je obrađen drugi dio ERS-a, koji se može zvati KERS (Kinetic Energy Recovery System) ili Motor Generator Unit- Kinetic (MGU-K). FIA regulacije [1] određuju koliko energije smije proteći kroz ERS sustav tokom ubrzavanja ili kočenja, te su te regulacije grafički prikazane na slici 1.

Modeliranje elektromotora u KERS-u je objašnjeno na primjeru istosmjernog stroja, iako se takav elektromotor najvjerojatnije ne koristi u bolidima. Izvjesno je da se koriste elektromotori pogonjeni izmjeničnom strujom, poput sinkronih motora s permanentnim magnetima ili elektronički komutiranih istosmjernih motora. No model za izmjenične strojeve je isti kao i za istosmjerne, samo parametri modela imaju drugačije značenje [2].

Principi rada istosmjernog motora su dobro poznati [3], no bitno je napomenuti da prilikom regenerativnog kočenja postoji povećana opasnost od iskrenja, koje može oštetiti četkice.

Do iskrenja dolazi zbog promjene smjera djelovanja magnetskog polja armature u režimu regenerativnog kočenja, promjene koja uzrokuje pomicanje neutralne zone u kojoj se nalaze četkice.

Za modeliranje je bilo potrebno odrediti nazivnu, ujedno i maksimalnu, struju armature na temelju pretpostavljenih parametara očitanih iz FIA regulacija:

- učinkovitost, $\eta = 0,95$,
- maksimalna snaga, $P_n = 120 \text{ kW}$,
- maksimalni moment, $M_n = 200 \text{ Nm}$.

Također je bilo potrebno pretpostaviti da je:

- otpor armature, $R_a = 0,1 \Omega$,
- napon armature, $U_{an} = 800 \text{ V}$
- induktivitet armature, $L_a = 1 \text{ mH}$
- snaga uzbudnog kruga, $P_{un} = 0,015P_n$.

Armatura struja je izračunata prema izrazu:

$$I_{an} = \frac{P_n}{U_{an}} \left(\frac{1}{\eta} - 0,015 \right) \quad (2.1)$$

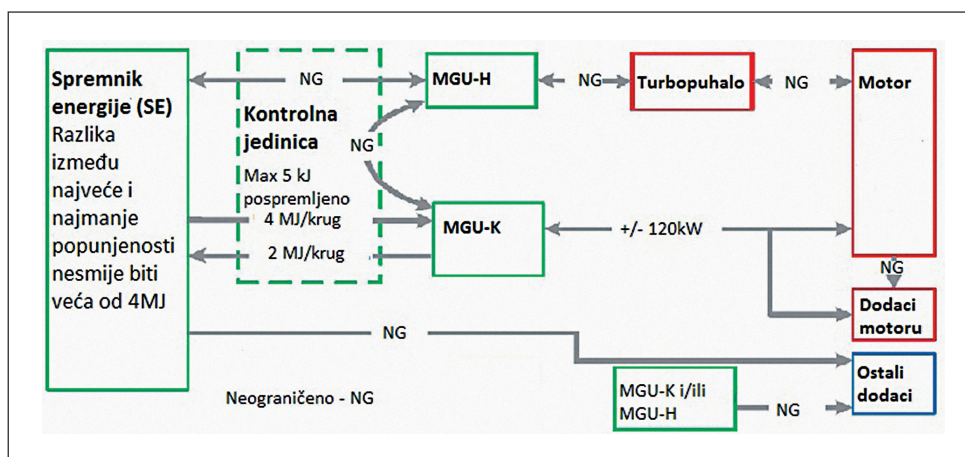
Struja praznog hoda je izračunata prema izrazu:

$$I_{a0} = I_{an} - \frac{M_n}{K} \quad (2.2)$$

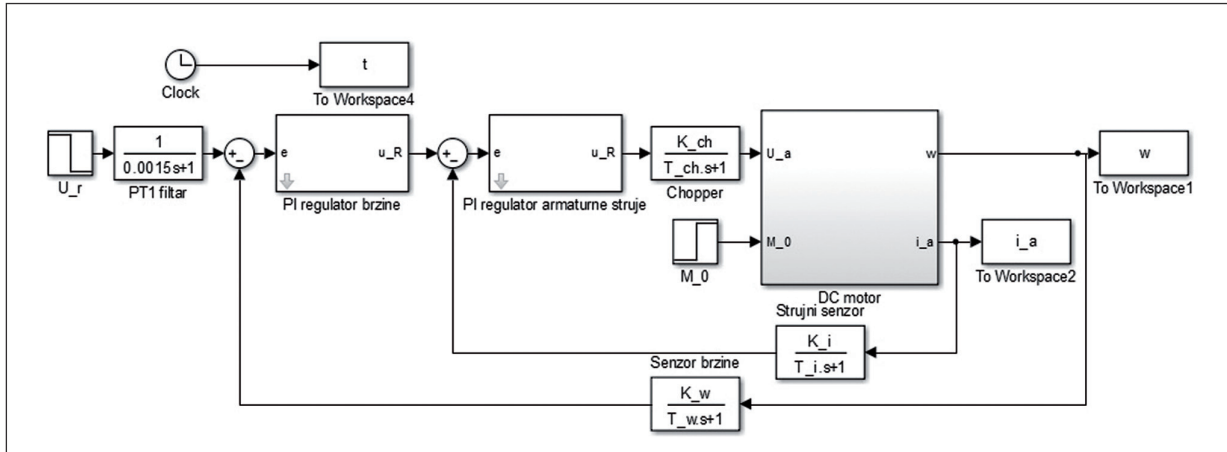
Konstanta motora se računa prema izrazu:

$$K = \frac{U_{an} - I_{an}R_a}{\Omega_n} \quad (2.3)$$

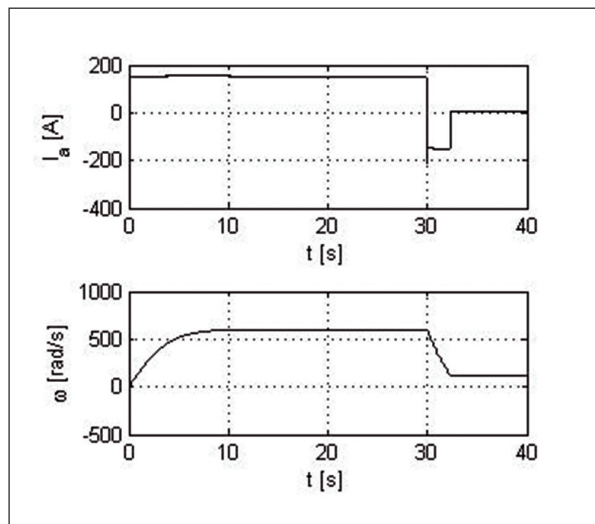
Elektromotorom se upravlja koristeći tranzistorsko pojačalo snage [4], chopper, odnosno istosmjerni pretvarač koji može



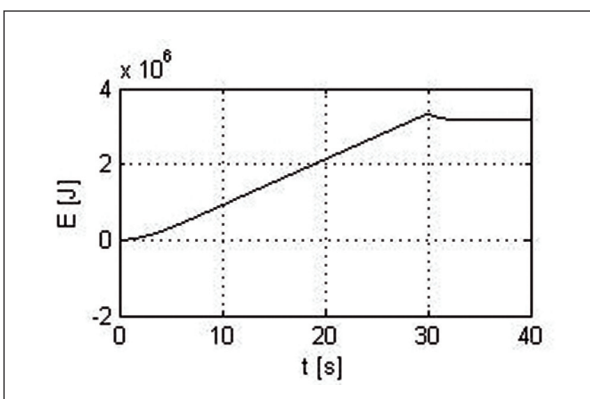
Slika 1. Tok i ograničenja energije u pogonskom sustavu



Slika 4. Simulink model reguliranog istosmjernog motora



Slika 5. Rezultat simulacije rada na stazi



Slika 6. Prikaz promjene energije u elektromotoru

nastao viskoznom trenjem linearno povećava od momenta nastalog Coulombovim trenjem, M_c .

Model prikazan na slici 2 je podsustav 'DC motor' modela na slici 4, koji sadrži projektirane senzore i regulatore armature

struje i brzine. Regulator armature struje je projektiran koristeći tehnički optimum, a regulator brzine pomoću simetričnih frekvencijskih karakteristika [6]. Radi postizanja optimalnog odziva s obzirom na referentnu i poremećajnu veličinu, model uz optimalno projektirane PI regulatore sadrži i PT1 filtar u grani referentne vrijednosti (slika 4). Dotični model također sadrži i aproksimaciju choppera PT1 elementom. Budući da je upravljački napon U_r u rasponu od 0 do 10 V, a napon armature do 800 V, koeficijent pojačanja PT1 aproksimacije choppera iznosi 80. Frekvencija sklapanja je 20 kHz, prema čemu je vremenska konstanta $T_{ch} = 25 \mu s$.

Simulacija predstavlja ubrzanje bolida do 100 m/s za 10 s, pri čemu je kutna brzina elektromotora 600 rad/s, te zatim kočenje kroz 2.4 s na petinu stečene brzine, odnosno 20 m/s je onda brzina bolida ili 120 rad/s kutna brzina elektromotora. Usporedbom sa statističkim ubrzanjima i usporavanjima bolida na stazi se zaključuje da je takva simulacija realna, te je prikazana na slici 5.

Pri tome je prilikom ubrzanja potrošeno 3.33 MJ, a tokom usporavanja je regenerirano otprilike 150 kJ, što je očitano sa prikaza promjene energije u elektromotoru, slika 6.

4. Model s baterijom

Za modeliranje istosmjernog stroja s nezavisnom uzbudom i baterijom, koja je u biti spremnik energije (ES) prikazan na slici 1, odabrana je Theveninova baterija, te je električna shema s Theveninovom baterijom prikazana na slici 7.

Otpor R_{b1} na slici 7 predstavlja otpor polarizaciji, otpor R_{b2} je unutrašnji otpor baterije, a kondenzator C_b se koristi kako bi se opisale prijelazne pojave u bateriji. Napon na kondenzatoru je U_b , te je u rasponu od 0 do 400 V, a napon U_{dc} je konstantni izvor napajanja od 400 V.

Otpor R_{b1} iznosi 100 k Ω , a otpor R_{b2} 10 m Ω . Kapacitet kondenzatora C_b je određen ograničenjem energije iz MGU-K (slika 1), prema izrazu:

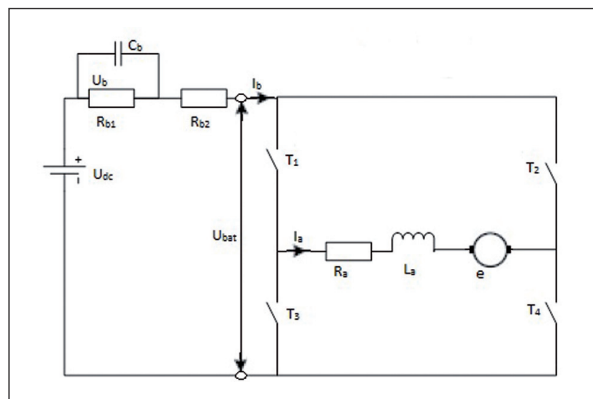
$$C_b = \frac{2E}{U_{bmax}^2} = 50 F \tag{4.1}$$

Jednadžbe stanja koje opisuju električnu shemu na slici 7 se mijenjaju u ovisnosti u priključenosti na izvor napajanja, odnosno o tome koje su sklopke tranzistorskog pojačala uključene.

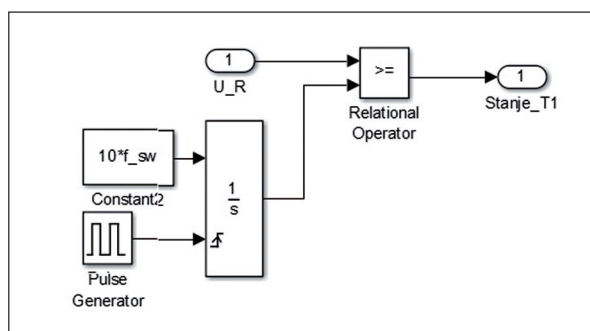
Kada je sustav spojen na konstantni izvor napajanja, jednadžbe su:

$$L_a \frac{di_a}{dt} = U_{ac} + U_b - R_{b2}i_a - R_a i_a - e \tag{4.2}$$

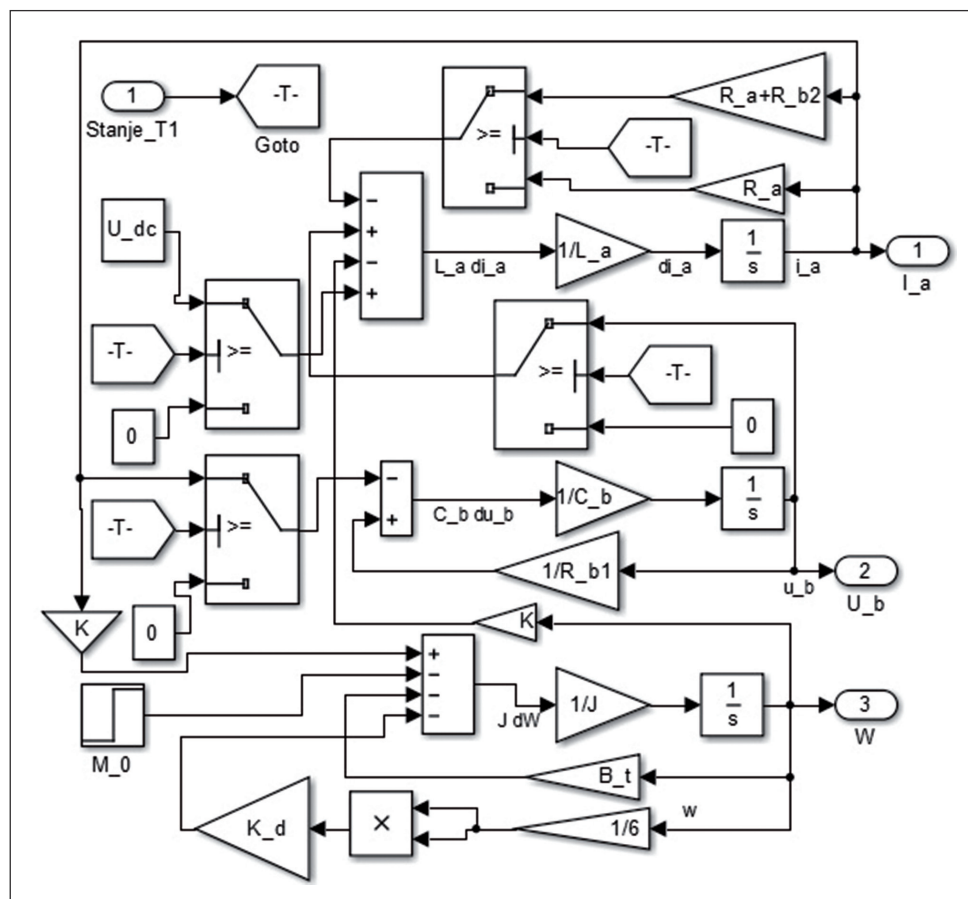
$$C_b \frac{du_b}{dt} = \frac{u_b}{R_{b1}} - i_a \tag{4.3}$$



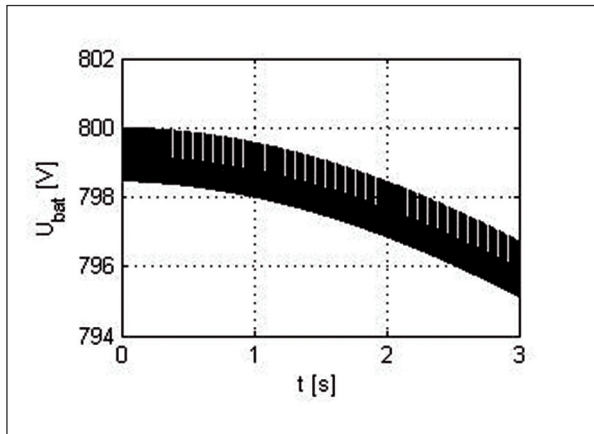
Slika 7. Osnovna električna shema istosmjernog stroja s baterijom



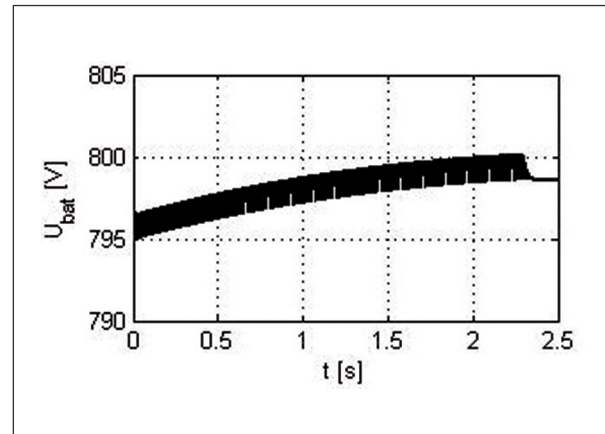
Slika 8. Upravljanje sklopkom



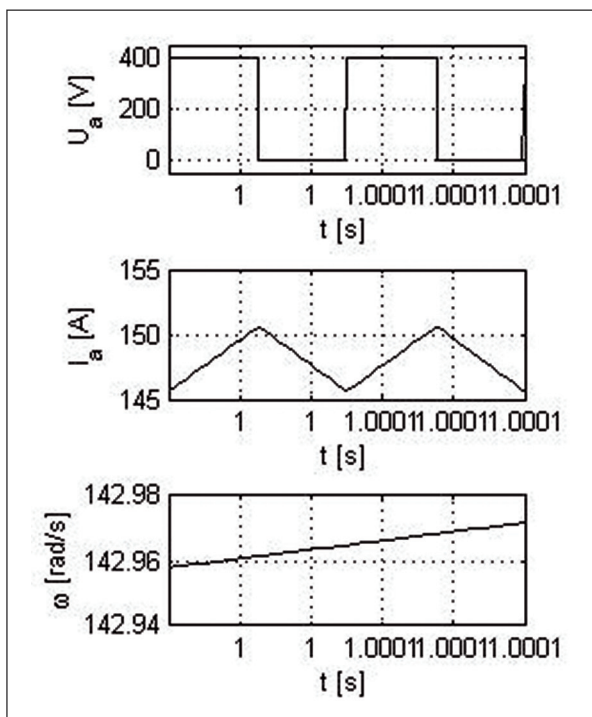
Slika 9. Model istosmjernog motora s baterijom



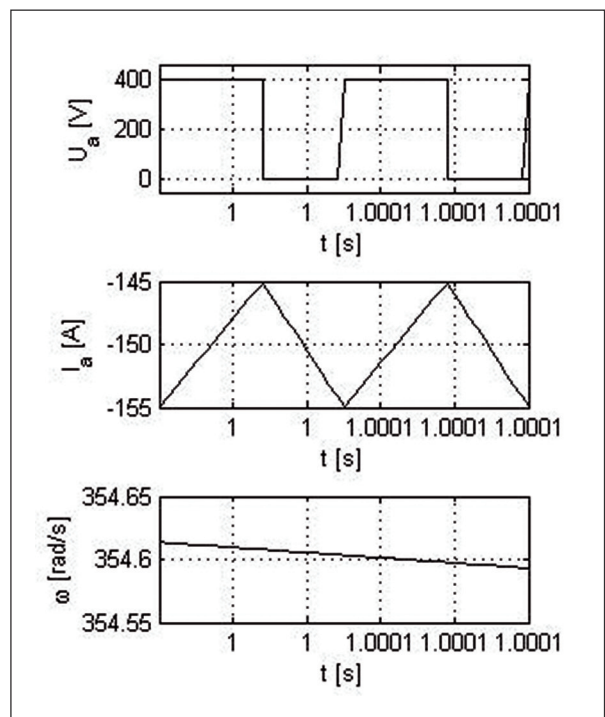
Slika 10. Pražnjenje baterije



Slika 11. Punjenje baterije



Slika 12. Efekt sklapanja u motorskom režimu rada



Slika 13. Efekt sklapanja u generatorskom režimu rada

$$J \frac{d\omega}{dt} = K i_a - M_t - B_t \omega \quad (4.4)$$

Kada sustav nije spojen na konstantni izvor napajanja, jednadžbe su:

$$L_a \frac{di_a}{dt} = -R_a i_a - e \quad (4.5)$$

$$C_b \frac{du_b}{dt} = \frac{u_b}{R_{b1}} \quad (4.6)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = K i_a - M_t - B_t \omega \quad (4.7)$$

Aproksimacija choppera PT1 elementom prethodnog modela je zamijenjena blokovima prikazanim na slici 8.

Matlab-Simulink [7] model koji implementira jednadžbe od 4.2 do 4.7 je prikazan na slici 9, te dotični model zamjenjuje podsustav 'DC motor' u prethodnom modelu, gdje je napon $U_b=400$ V, odnosno baterija je puna. Model s baterijom se koristi se prikazivanje pražnjenja baterije u motorskom režimu rada (slika 10) i punjenje u generatorskom režimu rada (slika 11).

Model s baterijom se također koristi za prikazivanje efekta sklapanja.

Na slici 12, snimljeno za motorski režim rada, se vidi da armaturna struja pada dok sustav nije spojen na izvor napajanja.

Na slici 13, snimljeno za generatorski režim rada, se vidi da armaturna struja raste u apsolutnom iznosu dok sustav nije spojen na izvor napajanja.

5. Zaključak

U članku je prikazan proces modeliranja sustava obnove kinetičke energije u Formuli 1 za dvije vrste modela, te su oba dva modela modelirana u skladu sa prethodno objašnjenim tehničkim regulacijama, što je prikazano simulacijama. Kroz simulacije je prikazano ubrzavanje bolida do 100 m/s, čemu je ekvivalentna brzina vrtnje elektromotora od 600 rad/s, zatim održavanje dotične brzine do 30 sekunde od početka simulacije (ubrzavanje na ravnoj stazi), te nakon usporavanje na 20 m/s, pri čemu je brzina vrtnje elektromotora

120 m/s (kočenje u zavojima). U prvom poglavlju su prikazane tehničke regulacije i parametri izvedeni iz tehničkih regulacija, koji čine modeliranje elektromotora korištenog u bolidu drugačijim od standardnih modela istosmjernog motora, te su opisane potencijalne poteškoće prilikom regenerativnog kočenja i ukratko je opisan način upravljanja elektromotorom. U sljedećem poglavlju je prikazan model istosmjernog stroja izrađen na temelju dinamičkih karakteristika stroja, odnosno prijenosnih funkcija izvedenih iz dinamičkih karakteristika, uz to da je i aerodinamičko trenje uzeto u obzir tokom izrade modela, te su snimljeni odzivi koji opisuju ponašanje bolida na stazi, a i potrošnju energije pritom, te su odzivi konzistentni sa tehničkim regulacijama. U četvrtom poglavlju je opisano modeliranje s baterijom, te se dotični model koristio za prikazivanje procesa pražnjenja ili punjenja baterije i za detaljniji uvid u opisani način upravljanja elektromotorom.

6. Reference

- [1] FIA. *2014 FORMULA ONE TECHNICAL REGULATIONS*. FIA internet stranice, 2014.
- [2] Marija Dragojević. *Izvedba algoritma upravljanja i regenerativnog kočenja sinkronog motora s permanentnim magnetima*. Diplomski rad, 2012. Fakultet elektrotehnike i računarstva.
- [3] Petar Crnošija, Toni Bjažić. *Statičke i dinamičke karakteristike istosmjernih strojeva*. Bilješke predavanja iz predmeta Elektromotorni pogoni u mehatronici, 2012.
- [4] Toni Bjažić. *Laboratorijske vježbe iz predmeta ELEMENTI AUTOMATIZACIJE*. Laboratorijske vježbe, 2013.
- [5] Petar Crnošija, Toni Bjažić. *Osnove automatike i. dio: Analiza i sinteza kontinuiranih sustava - teorija i primjena*, 2011., ISBN 978-953-197-683-1, Stranice 190-198
- [6] Marko Majcenić. *Modeliranje sustava obnove kinetičke energije bolida Formule 1*, Završni rad, 2014., Tehničko veleučilište u Zagrebu
- [7] www.mathworks.com/products/matlab/; 18.8.2014

AUTORI**Marko Majcenić**

Marko Majcenić rođen je 19. kolovoza 1992. u Zagrebu. Osnovnu školu je završio u Zagrebu, kao i srednju tehničku školu, gdje je stekao status tehničara mehatronike.

Sve razrede završio je s vrlo dobrim uspjehom. Nakon maturiranja odlučio se za studiranje na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu, na stručnom studiju mehatronike koji je upisao 2011. godine. Tokom studiranja osvojio je dvije nagrade pročelnice za istaknuti uspjeh u studiju. Stručni studij je završio 2014. godine.

Toni Bjažić

Toni Bjažić (1980) diplomirao je 2004. i doktorirao 2010. na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, Sveučilišta u Zagrebu. Od 2004. do 2012. radio je kao asistent i viši asistent na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, a od 2012. radi na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu kao

viši predavač. Bavi se znanstvenim istraživanjem na područjima optimalnog i adaptivnog upravljanja procesima, posebno elektromotornim pogonima, zatim naprednim upravljanjem sustavima s obnovljivim izvorima energije i električnim energetske pretvaračima.