

MODELOVANJE SAVREMENIH METODA SKLADIŠTENJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

MODELING OF MODERN ELECTRICAL ENERGY STORAGE SYSTEMS

Mirko Macanović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija*

Octavian Cornea, *Politehnički univerzitet u Temišvaru, Temišvar, Rumunija*

Vladimir Katić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija*

Oblast – Elektrotehnika i računarstvo

Kratak sadržaj – U radu je obrađeni model olovne baterije. Eksperimentalno su određeni njeni parametri. Prikazani su i upoređeni rezultati dobijeni eksperimentalno i u simulaciji. Takođe su obrađeni uprošćeni modeli litijum jonske baterije i superkondenzatora i prikazani su rezultati. Sve simulacije su pravljene u Matlabu/Simulinku.

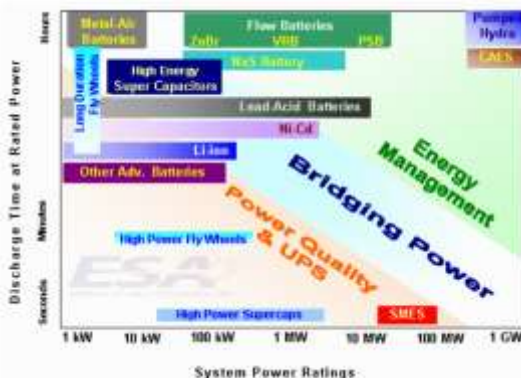
Ključne reči: Olovna baterija, litijum jonska baterija, Superkondenzator, Matlab/Simulink model baterije

Abstract – In this paper model of lead-acid battery in Matlab/Simulink is presented. Parameter identification is performed experimentally. Comparison of simulation and experimental results is done. Simplified model of supercapacitor and lithium ion battery and Matlab/Simulink simulation results are given, also.

Keywords: Lead acid battery, Lithium ion battery, Supercapacitor, Matlab/Simulink model of battery

1. UVOD

U današnje vreme sve više se razmatra upotreba električnih automobila, koji za skladištenje energije koriste baterije. Na slici 1 su prikazane različite vrste ovih sistema [1]. Sortiranje je izvršeno u odnosu na vreme pražnjenja pri nominalnoj snazi i snage. U nastavku će biti obrađene olovne i LI-Ion baterije i superkondenzatori.



Slika 1. Sistemi za skladištenje električne energije [1]

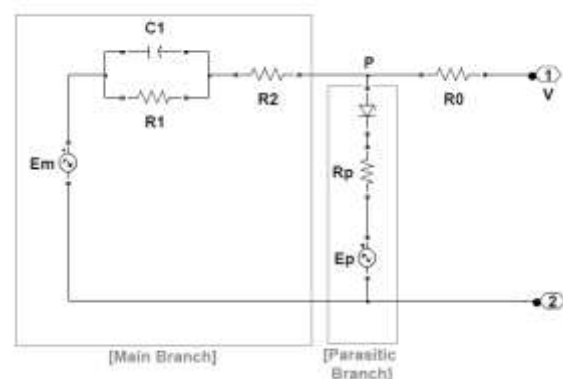
NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada, koji je raden na Politehničkom univerzitetu u Temišvaru i odbranjen na FTN u Novom Sadu u sklopu studentske razmene Erasmus+ projekta, a čiji supervizor je bio dr Octavian Cornea, a mentor dr Vladimir A. Katić, red. prof.

Modelovanjem baterija se simulira rad baterija u različitim uslovima i situacijama. U ovom radu prvo će biti dato ekvivalentno kolo olovne baterije, urađen eksperiment za određivanje njenih parametara, kao i neke simulacije. Zatim će biti opisani modeli litijum-jonske (Li-Ion) baterije i superkondenzatora i urađene odgovarajuće simulacije u Simulinku. Na kraju su rezultati i zaključak.

2. EKVIVALENTNO KOLO OLOVNE BATERIJE

Ekvivalentno kolo olovne baterije predstavlja se sa otpornikom na red sa RC paralelnom granom i sa naponskim izvorom koji simulira napon praznog hoda i sa paralelnom granom u vidu redne veze otpornika i naponskog izvora koji predstavlja napon praznog hoda parazitne grane (slika 2).



Slika 2. Ekvivalentno kolo olovne baterije [2]

Naponom glavne grane se računa tako da se pretpostavlja da je elektromotorna sila konstantna kada je baterija napunjena 100%. Napon zavisi od temperature i od stanja napunjenosti baterije (*state of charge - SOC*):

$$E_m = E_{m0} - K_E(273 + \theta)(1 - SOC) \quad (1)$$

gde je E_m – napon praznog hoda u [V]; E_{m0} – napon praznog hoda pune baterije u [V]; K_E – konstanta u V/°C; θ – temperatura elektrolita u °C.

Unutrašnji otpor baterije se opisuje pomoću (2) gde je pretpostavljeno da je otpor konstantan na svim temperaturama i da zavisi samo od *SOC*:

$$R_0 = R_{00}[1 + A_0(1 - SOC)] \quad (2)$$

gde je R_0 – otpor u [Ω]; R_{00} – vrednost R_0 za *SOC*=1 u [Ω]; A_0 – konstanta.

Otpor glavne grane R_1 opisuje se pomoću (3) i zavisi od dubine punjenja (*depth of charge - DOC*). *DOC* predstavlja suprotnost od *SOC*, tj. kada je baterija puna

$DOC=0$, a kada je prazna $DOC=1$. Ovaj parametar se koristi pri diskusiji o životnom veku baterije. Otpor raste eksponencijalno kako se baterija prazni i dat je sa:

$$R_1 = -R_{10} \ln(DOC) \quad (3)$$

gde je R_1 – otpor glavne grane [Ω]; R_{10} – konstanta u [Ω]. Kapacitivnost glavne grane ili vremensko kašnjenje je dato sa (4), s tim da vremenska konstanta modeluje kašnjenje napona kada se promeni struja baterije.

$$C_1 = \tau_1 / R_1 \quad (4)$$

gde je C_1 – kapacitivnost glavne grane u faradima; τ_1 – vremenska konstanta glavne grane u sekundama. Otpor glavne grane R_2 se računa preko (5) i raste eksponencijalno kako se SOC povećava. Vrednost varira u zavisnosti od struje glavne grane. Ovaj otpor je značajan prilikom punjenja baterije, dok prilikom pražnjenja baterije nije toliko važan i može se zanemariti.

$$R_2 = R_{20} \frac{\exp[A_{21}(1-SOC)]}{1 + \exp(A_{22}I_m/I^*)} \quad (5)$$

gde je R_2 – otpor glavne grane u [Ω]; R_{20} – konstanta u [Ω]; A_{21} – konstanta; A_{22} – konstanta; I_m – struja glavne grane u [A]; I^* – nominalna struja baterije u [A].

Strujom parazitne grane se opisuju gubitci struje kada je baterija napunjena. Parazitna struja je data jednačinom (6). Struja zavisi od temperature elektrolita kao i od napona parazitne grane. Ova struja uglavnom ima male vrednosti, osim u slučajevima kada se baterija puni pri visokoj vrednosti SOC :

$$I_p = V_{PN} G_{p0} \exp\left(\frac{V_{PN}/(\tau_p s + 1)}{V_{p0}} + A_p \left(1 - \frac{\theta}{\theta_f}\right)\right) \quad (6)$$

gde je I_p – struja parazitne grane; V_{PN} – napon parazitne grane; G_{p0} – konstanta u [s]; τ_p – vremenska konstanta parazitne grane u [s]; V_{p0} – konstanta u [V]; A_p – konstanta; θ_f – temperatura zaleđivanja elektrolita u $^{\circ}C$. Količina naelektrisanja koja se oslobodi iz baterije je data izrazom (7). Ona se računa tako što se integrali struja koja protiče kroz ili iz glavne grane.

$$Q_e(t) = Q_{e_{init}} + \int_0^t -I_m(\tau) d\tau \quad (7)$$

gde je Q_e – energija koju je baterija odala; $Q_{e_{init}}$ – energija koja je inicijalno odata; I_m – struja glavne grane u [A]; t – vreme simulacije u [s].

Totalni kapacitet baterije zavisi od struje pražnjenja baterije i od temperature elektrolita (jednačina (8)). Zavisnost kapaciteta baterije je samo od struje pražnjenja. Prilikom punjenja struja pražnjenja u (8) jednaka nuli:

$$C(I, \theta) = \frac{K_c C_0^*}{1 + (K_c - 1) \left(\frac{I}{I^*}\right)^{\delta}} \left(1 - \frac{\theta}{\theta_f}\right)^{\varepsilon} \quad (8)$$

gde je C_0^* – kapacitet neopterećene baterije na $0^{\circ}C$ u $A \cdot s$; I – struja pražnjenja u [A]; K_c , δ i ε – konstante.

SOC i DOC se računaju kao količnik dostupne količine napunjenosti baterije i ukupnog kapaciteta baterije. SOC baterije se izražava deo punjenja koji je na raspolaganju u bateriji (izraz (9)). DOC baterije izražava deo korisnog kapaciteta baterije pri nominalnoj struji pražnjenja (izraz (10)). Veće struje pražnjenja čine da se baterija brže prazni, zbog čega je uvek DOC manji ili jednak od SOC :

$$SOC = 1 - \frac{Q_e}{C(0, \theta)} \quad (9)$$

$$DOC = 1 - \frac{Q_e}{C(I_{avg}, \theta)} \quad (10)$$

gde je Q_e – napunjenost baterije u $A \cdot s$; C – kapacitet baterije u $A \cdot s$; I_{avg} – srednja vrednost struje pražnjenja [A]. Srednja vrednost struje pražnjenja (I_{avg}) se računa kao:

$$I_{avg} = \frac{I_m}{(\tau_1 s + 1)} \quad (11)$$

gde je τ_1 – vremenska konstanta glavne grane u [s].

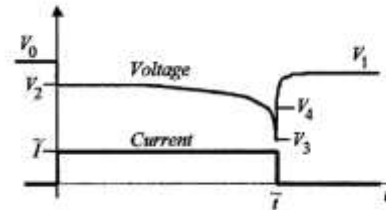
Termalnim modelom se modeluje temperatura elektrolita baterije, odnosno promena temperature elektrolita, usled gubitaka na unutrašnjim otpornostima i usled temperature ambijenta – izraz (12):

$$\theta(t) = \theta_{init} + \int_0^t \frac{(P_s - \frac{\theta - \theta_a}{R_{\theta}})}{C_{\theta}} d\tau \quad (12)$$

gde je θ_a – temperatura ambijenta u $^{\circ}C$; θ_{init} – početna temperatura baterije u $^{\circ}C$ (pretpostavljeno $\theta_{init} = \theta_a$); P_s – Džulovi gubitci na R_0 i R_2 u W; R_{θ} – termalni otpor u $^{\circ}C/W$; C_{θ} – termalni kapacitet u $J/^{\circ}C$.

3. POSTAVKA EKSPERIMENTA

Da bi se odredile konstante u prethodno navedenim jednačinama, mora se izvesti eksperiment sa slike 3.



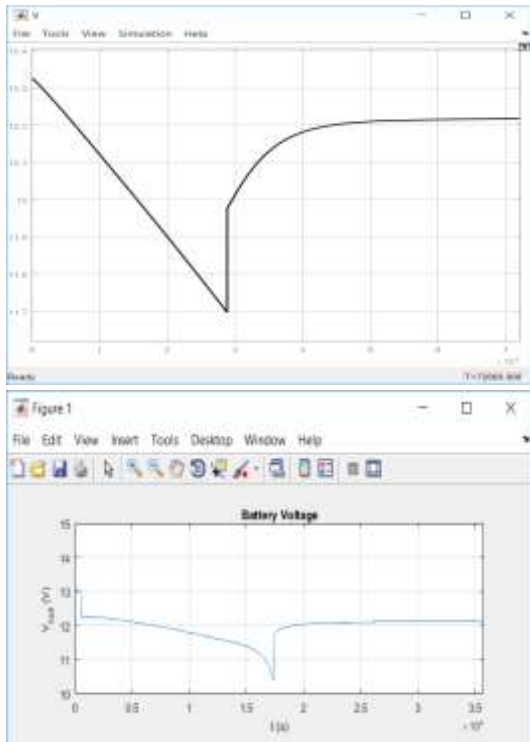
Slika 3. Eksperiment za određivanje parametara [3]

Ovaj test koji se izvodi u prostoriji u kojoj je temperatura ograničena po sledećem redosledu.

- 1) Prvo, baterija se napuni do 100%.
- 2) Zatim se baterija raskiči sa bilo kakvih spoljnih kola da bi se napon stabilizovao napona (ova faza može da potraje i nekoliko sati).
- 3) Stvarni test se sastoji od merenja početnog napona V_0 (za koji se može pretpostaviti da je jednak elektromotornoj sili koja odgovara stanju punjenja baterije i stvarnoj temperaturi elektrolita).
- 4) Baterija se prazni konstantnom strujom pražnjenja vremenski interval t .
- 5) Regstruje se tranzijentni odgovor baterije dok se napon ne stabilizuje na vrednosti V_1 jednakoj elektromotornoj sili baterije [3].

4. REZULTATI

Napon dobijen simulacijom ima slične vrednosti kao napon dobijen eksperimentalnim putem. Razlika se javlja u vrednosti pada napona koja je u simulaciji išla od 12,3 - 11,7 V dok je u eksperimentu bila od 12,2 - 10,5 V. Ta razlika se javlja zbog loših karakteristika baterije prilikom velikog broja punjenja i pražnjenja gde dolazi do smanjenja njenog kapaciteta. Takođe razlike ima i u tranzijentnom periodu baterije, gde se na simuliranom naponu primećuje koleno kojeg nema u eksperimentalnim rezultatima. To je rezultat činjenice da je korišćena samo jedna RC grana, da ih je korišćeno više bili bi bolji rezultati, ali bi i model bio dosta složeniji i teži za modelovanje. Sa ovakvim modelom se postižu dosta dobri rezultati. Nakon uspešno obavljenog eksperimenta dobijaju se parametri baterije prikazani u tabeli 1.



a)

b)

Slika 4. a) rezultati simulacije b) rezultati eksperimenta

Tabela 1. Parametri baterije potrebni za simulaciju rada

Parametri koji se odnose na kapacitet baterije	$I^*=49A$ $C_0^*=261,9 Ah$ $K_c=1,18$ $\theta_f=-40 ^\circ C$ $\varepsilon=1,29$ $\delta=1,4$
Parametri koji se odnose na glavnu granu ekvivalentnog kola baterije	$\tau_1=5000s$ $E_{m0}=2,135V$ $K_E=0,58e^{-3} V/^{\circ}C$ $R_{00}=2 m\Omega$ $R_{10}=0.7 m\Omega$ $A_0=-0.3$ $R_{20}=15 m\Omega$ $A_{21}=-8$ $A_{22}=-8,45$
Parametri koji se odnose na reakciju parazitne grane ekvivalentnog kola baterije	$E_p=1,95V$ $V_{p0}=0,1V$ $G_{p0}=2 \cdot 10^{-12}s$ $A_p=2$
Parametri koji se odnose na termalni model baterije	$C_0=15 Wh/^{\circ}C$ $R_0=0,2 ^{\circ}C/W$

5. MODELOVANJE Li-Ion BATERIJA

Pored modela olovnih baterija, napravljen je model i litijum jonskih baterija. Model se sastoji od jednačina kojima se određuje vrednost elemenata ekvivalentnog kola čime se dobija dobra simulacija rada baterije. Model ekvivalentnog kola je prikazan na slici 5. U simulaciji je korišćena pulsirajuća strija pražnjenja od 1,3 A. Perioda struje je bila 5000 s, a napon je počeo blago da opada, dok je SOC pao na 40%.

Elementi ekvivalentnog kola se modeluju sa polinomskom zavisnošću od stanja napunjenosti baterije. Formula za napon praznog hoda je:

$$OCV(SOC) = K_0 + K_1 \cdot SOC + K_2 \cdot SOC^2 + K_3 \cdot SOC^3 + K_4 \cdot SOC^4 + K_5 \cdot SOC^5 + K_6 \cdot SOC^6 \quad (13)$$

gde su $K_0, K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ - su konstante. Unutrašnja otpornost baterije se dobija preko formule:

$$R_0(SOC) = A_0 + A_1 \cdot SOC + A_2 \cdot SOC^2 + A_3 \cdot SOC^3 + A_4 \cdot SOC^4 + A_5 \cdot SOC^5 + A_6 \cdot SOC^6 + A_7 \cdot SOC^7 + A_8 \cdot SOC^8 \quad (14)$$

gde su $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8$ - konstante. Formule za izračunavanje elemenata prve RC paralelne grane su:

$$R_1(SOC) = a_{r1} + b_{r1} \cdot \exp(c_{r1} \cdot SOC) \quad (15)$$

$$C_1(SOC) = a_{c1} \cdot SOC^2 + b_{c1} \cdot SOC + c_{c1} \quad (16)$$

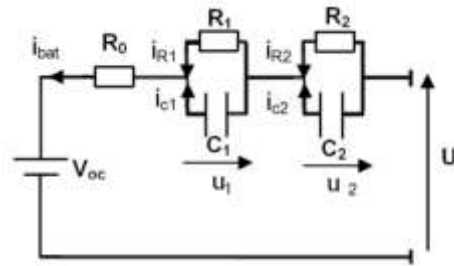
Formule za izračunavanje elemenata druge RC paralelne grane su:

$$R_2(SOC) = a_{r2} + b_{r2} \cdot \exp(c_{r2} \cdot SOC) \quad (17)$$

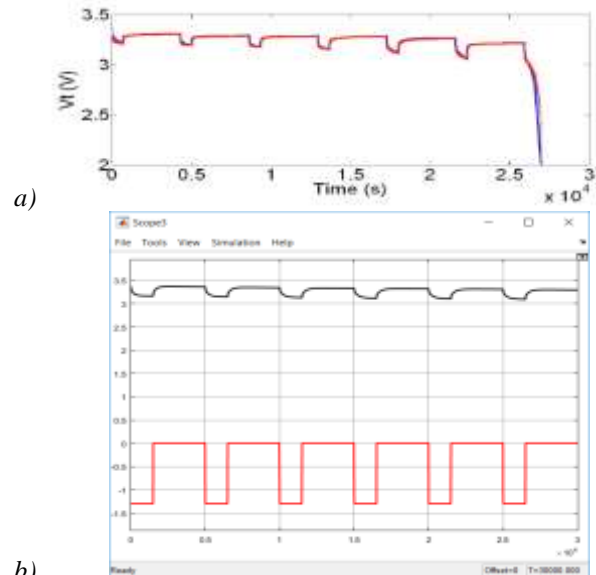
$$C_2(SOC) = a_{c2} \cdot SOC^4 + b_{c2} \cdot SOC^3 + c_{c2} \cdot SOC^2 + d_{c2} \cdot SOC + e_{c2} \quad (18)$$

6. REZULTATI SIMULACIJE

Rezultati simulacije i eksperimenta su prikazani na slici 6. Upoređivanjem rezultata se vidi da eksperimentalno dobijeni rezultati ne odstupaju puno od onih dobijenih simulacijom. Zbog jednostavnosti litijum jonske baterije smo dobili mnogo bolje rezultate nego u slučaju olovne baterije. Razlog za to je da je ekvivalentno kolo litijum jonske baterije jednostavnije i da ga je samim tim i lakše i bolje modelovati u Simulinku.



Slika 5. Ekvivalentno kolo baterije[4]



a)

b)

Slika 6. a) Rezultati eksperimenta [5] b) Rezultati simulacije (struja - crveno, napon crnom bojom)

7. MODELOVANJE SUPERKONDEZATORA

Za modelovanje superkondenzatora se mogu koristiti različita ekvivalentna kola. Ovde je korišćeno kolo koje je osmislio Faranda (slika 7).

Faranda predlaže metodu za određivanje parametara u modelu zasnovanu na merenjima. S obzirom na dve tačke $P_1(t_1, V_1)$ i $P_2(t_2, V_2)$ na krivi napon-vreme tokom punjenja sa konstantnom strujom, C_0 i k_v se mogu odrediti pomoću:

$$C_0 = \left\{ \frac{t_1}{V_1} - \frac{V_1 \cdot t_2 - V_2 \cdot t_1}{V_2^2 - V_1 \cdot V_2} \right\} \cdot I_c \quad (19)$$

$$k_v = 2 \cdot \left\{ \frac{V_1 \cdot t_2 - V_2 \cdot t_1}{V_1 \cdot V_2^2 - V_1^2 \cdot V_2} \right\} \cdot I_c \quad (20)$$

Parametri druge RC grane određuju se analizom ponovnog ponašanja napona praznog hoda nakon punjenja do određenog naponskog nivoa. Analizirajući propad napona praznog hoda u srednjem vremenu (do 500 s), mogla bi se naći vremenska konstanta ovog približno eksponencijalnog propada, koja bi trebala biti približno jednaka vremenskoj konstanti srednje grane $\tau_2 = R_2 C_2$. Nakon dve vremenske konstante pretpostavlja se da je napon V_{2f} preko obe kapacitivnosti isti, pri čemu se za izračunavanje C_2 može koristiti ukupno stanje napunjenosti, dato jednačinom:

$$Q_{tot} = I_c \cdot T_c = C_2 \cdot V_{2f} + (C_0 + \frac{k_v}{2} \cdot V_{2f}) \cdot V_{2f} \quad (21)$$

gde je I_c konstantna struja punjenja pre prekida struje; T_c vreme punjenja; C_0 i k_v opisuju promenljivu kapacitivnost C (V). R_2 se zatim računa kao $R_2 = \tau_2 / C_2$.

8. REZULTATI SIMULACIJE

Simulacija je trajala 2.000 s i napravljena tako da je prvo korišćena struja punjenja od 40 A u vremenu od 220 s, nakon toga struja pada na nulu i ostaje nula do 1.100 s, gde se događa struja pražnjenja od -40 A do 1.300 s i onda struja opet pada na nulu do kraja vremena simulacije. Nakon struje punjenja i pražnjenja od 40 A dobija izgled napona i struje superkondenzatora kao na slici 8. Na slici 6 se vidi da kada struja padne na 0, prvo dolazi do pada napona zbog unutrašnje omske otpornosti, a zatim i do eksponencijalnog pada usled vremenskog kašnjenja na kapacitivnostima. I nakon toga dolazi do struje pražnjenja i tada je pad napona veoma izražen. Bitno je primetiti da se napon superkondenzatora menja izuzetno brzo, i da je zbog toga njegova velika prednost kada se ima potreba za brzim čuvanjem ili isporukom energije.

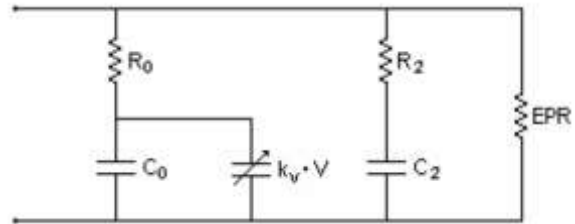
9. ZAKLJUČAK

Rezultati dobijeni eksperimentalno se nešto razlikuju od rezultata dobijenih simulacijom zbog lošijih karakteristika baterije, koje su posledica velikog broja ciklusa punjenja i pražnjenja. Takođe, i izgled dobijenog napona nije isti. Dodavanjem još RC paralelnih grana mogu se dobiti bolji rezultati, ali to povećava složenost i otežava izračunavanje elemenata ekvivalentnog kola potrebnih za simulaciju rada baterije.

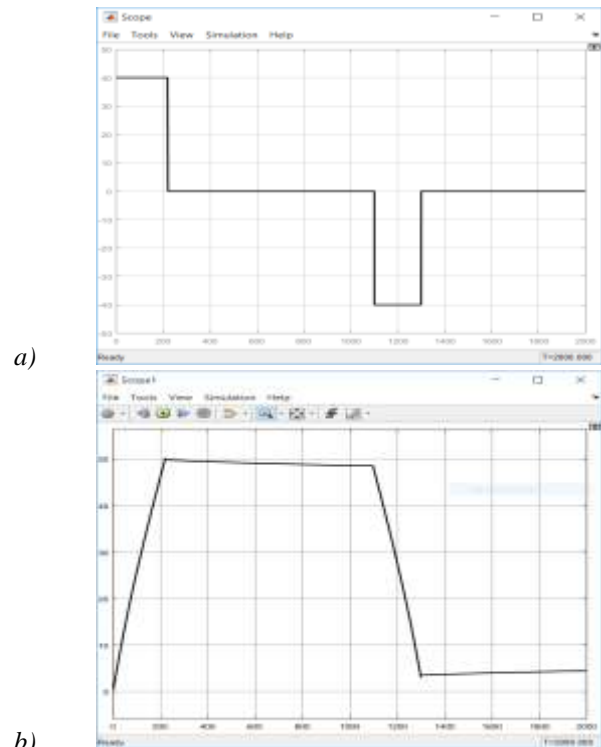
10. LITERATURA

- [1] <http://zebu.uoregon.edu/disted/ph162/18.html>
- [2] R.A. Jackey, "A Simple, Effective Lead-Acid Battery Modeling Process for Electrical System Component Selection", The MathWorks, 2007.
- [3] M. Ceraolo, "New Dynamical Models of Lead-Acid Batteries", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15, No. 4, Nov. 2000, pp.1184-1190.
- [4] L.W. Yao, J.A. Aziz, P.Y. Kong, N.R.N. Idris „Modeling of Lithium-Ion Battery Using MATLAB /Simulink“, IECON 2013, Nov.2013, Vienna.
- [5] Y. Diab, F. Auger, E. Schaeffer, M. Wahbeh „Estimating Lithium-Ion Battery State of Charge and Parameters Using a Continuous-Discrete Extended Kalman Filter“, Energies, 2017, 10, 1075; doi:10.3390/en10081075
- [6] L.H. Seim, „Modeling, Control and Experimental Testing of a Supercapacitor/Battery Hybrid System - Passive and

Semi-Active Topologies”, Norwegian Institute of Life Sciences, M.Sc. Thesis, 2011.



Slika 7. Ekvivalentno kolo superkondenzatora [6]



Slika 8. a) Izgled struje prilikom simulacije b) Izgled napona prilikom punjenja i pražnjenja strujom od 40 A.

Kratka biografija:



Mirko Macanović rođen je u Novom Sadu 1994. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetska elektronika i električne mašine odbranio je 2018.god. kontakt: mirkomacanovic@yahoo.com



Octavian Cornea završio je osnovne, master i doktorske studije na Politehničkom Univerzitetu u Temišvaru 1996., 1997. i 2007. god., respektivno. Bavi se obnovljivim izvorima električne energije i mikro mrežama.



Vladimir A. Katić, red.prof. rođen je 1954. god. u Novom Sadu. Diplomirao je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu 1978. god., a magistrirao i doktorirao na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu 1981. i 1991. god., respektivno. Oblasiti interesovanja su energetska elektronika, obnovljivi izvori i kvalitet električne energije, i električna vozila.