

MODEL BATERIJE SA TEMPERATURNIM EFEKTOM I EFEKTOM STARENJA BATTERY MODEL WITH TEMPERATURE AND AGING EFFECT

Nataša Panić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – U ovom radu opisan je matematički i simulacioni model litijum-jonske baterije u koji su uključeni temperaturni efekat i efekat starenja baterije. Na osnovu datog matematičkog modela, simulacioni model baterije pogodan za izvršenje u realnom vremenu je implementiran uz oslonac na softverski alat Typhoon HIL Control Center. Rezultati simulacije dobijenog modela sa dodatim efektima prikazani su grafički. Za testiranje i simulaciju modela korišćen je uređaj Typhoon HIL 402.

Ključne reči: model baterije, temperaturni efekat, efekat starenja, litijum-jonska baterija, simulacija u realnom vremenu, simulacija sa hardverom u petlji.

Abstract – This paper describes a model of a battery with temperature and aging effects that is simulated in real time with hardware-in-the-loop simulation. The mathematical model of the battery given in the paper is the basis of the battery model that includes both effects. Based on the given mathematical model, the battery was implemented in the Typhoon HIL Control Center with the signal processing tool in Schematic Editor. The simulation results of the obtained model with added effects are presented graphically. The device used for the testing and simulation was the Typhoon HIL 402.

Keywords: battery model, temperature effect, aging effect, lithium-ion battery, real-time simulation, hardware-in-the-loop.

1. UVOD

Baterije su najpoznatiji tip skladištenja energije koji je zasnovan na elektrohemijskoj tehnologiji. Pomoću napona i kapaciteta se ocenjuje sposobnost sistema da obavlja različite funkcije potrebne za mrežne aplikacije [1].

Za potrebe rada korišćen je softver Typhoon HIL Control Center, kompanije Typhoon HIL Inc., koji omogućava simulaciju modela u realnom vremenu. Prototip simulacije u realnom vremenu koji se ovde koristi je simulacija sa hardverom u petlji (engl. hardware-in-the-loop). Komponenta baterije koja postoji u Typhoon HIL Control Center-u nema mogućnost analize uticaja temperature i životnog veka baterije na performanse baterije.

Iz tog razloga je modelovana nova komponenta baterije koja će imati mogućnost uključivanja temperaturnog efekta i efekta starenja. Nova komponenta je modelovana

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Milan Rapaić, vanredni profesor i kao rezultat stručne prakse u kompaniji Typhoon HIL Inc. čiji je mentor bio M.Sc Adrien Genić.

za četiri tipa baterije koji se koriste u industriji, a efekti su realizovani za litijum-jonsku bateriju. Tipovi baterije koji se najčešće koriste u industriji su: baterije sa olovnom kiselinom (engl. Lead-Acid), litijum-jonske (engl. Lithium-Ion), nikl-kadmijum (engl. Nickel-Cadmium) i nikl-metal-hidrid (engl. Nickel-Metal-Hydride).

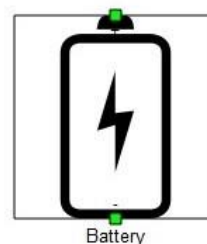
Još jedan od razloga za modelovanje ove komponente baterije sa pomenutim efektima je taj što je postojeća komponenta baterije zasnovana na tabelama za pretraživanje (engl. Look-Up tables) koje se koriste za simulaciju ponašanja nelinearnih elemenata. LUT tabele opterećuju FPGA (engl. Field Programmable Gate Array) procesor velikom brzinom i visokom rezolucijom. FPGA procesori se najčešće koriste prilikom simulacije u realnom vremenu [2]. Iz tog razloga se model baterije realizuje pomoću alata za obradu signala (engl. signal processing).

Rezultati modelovane baterije su posmatrani pomoću alata HIL SCADA, a testiranje je obavljeno uz pomoć Typhoon HIL 402 uređaja.

2. MODEL BATERIJE SA TEMPERATURNIM EFEKTOM I EFEKTOM STARENJA

2.1. Uopšteno o modelu baterije

Model baterije je predstavljen matematičkim modelom koji za cilj ima analizu ponašanja različitih tipova baterije u zavisnosti od ulazne veličine – struje. Na izlazu modela baterije dobija se napon čija je vrednost stvarna vrednost napona u bilo kom trenutku. Razvijen je model za četiri tipa baterije koji se najčešće koriste u industriji. Na slici 1 je prikazana komponenta baterije koja će se nalaziti u biblioteci Typhoon HIL Control Center-a.



Slika 1: Komponenta baterije u Typhoon HIL Control Center-u

Realizacija modela baterije je započeta pomoću jednačine 1.1 za stanje napunjenosti (engl. State of charge – SOC). Stanje napunjenosti predstavlja napunjenost baterije izraženu u procentima pune napunjenosti i zavisi od ulazne struje i .

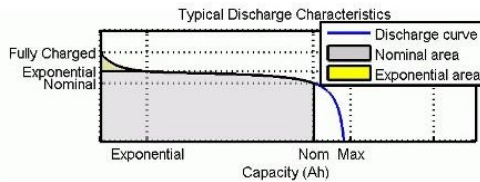
$$\text{SOC} = 100 * (1 - it / Q) [\%] \quad (1.1)$$

$$it = \int i * dt, \quad (1.2)$$

gde je Q kapacitivnost baterije [Ah], a it struja pražnjenja [Ah] (*engl. discharge current*). Struja pražnjenja je definirana kao integral struje po vremenu (jednačina 1.2) i to iz razloga što je za potrebe rada neophodno da se analizira stanje napunjenosti tokom vremena. Stanje napunjenosti nam pokazuje kako zadato opterećenje, struja, utiče na punjenje i pražnjenje baterije. Za male vrednosti zadatog opterećenja, baterija će se sporije puniti ili prazniti, što znači da će se za veće vrednosti opterećenja baterija brže puniti ili prazniti.

Parametri modela se modifikuju tako da predstavljaju specifičan tip baterije i njegove karakteristike pražnjenja. Karakteristika pražnjenja sastoji se iz tri zone (slika 2):

- 1) Eksponecijalna zona (*engl. Exponential zone*) - predstavlja pad napona kada je baterija puna. Širina pada napona zavisi od tipa baterije.
- 2) Nominalna zona (*engl. Nominal zone*) - predstavlja naelektrisanje koje može da se izvuče iz baterije sve dok napon ne padne ispod nominalnog napona baterije.
- 3) Zona pražnjenja (*engl. Discharge zone*) - predstavlja totalno pražnjenje baterije. Napon opada brzinom koja zavisi od kapacitivnosti baterije [3].



Slika 2: Karakteristika pražnjenja

Kontrolisani izvor napona, izražen u voltima, takođe zavisi od struje pražnjenja baterije it (jednačina 1.3).

$$E = E_0 - K * \left(\frac{Q}{Q-it}\right) + A * e^{(-B*it)}, \quad (1.3)$$

gde je A pad napona tokom ekspanencijalne zone [V], B inverzna vremenska konstanta ekspanencijalne zone [1/Ah], K polarizaciona naponska konstanta [V/Ah] i E_0 naponska konstanta [V/Ah].

Ovi parametri se računaju na sledeći način:

$$A = E_{full} - E_{exp} \quad (1.4)$$

$$B = \frac{3}{Q_{exp}} \quad (1.5)$$

$$K = \frac{(E_{full} - E_{nom} + A * (e^{-B * Q_{nom} - 1})) * (Q - Q_{nom})}{Q_{nom}} \quad (1.6)$$

$$E_0 = E_{full} - K + R_{internal} * i - A, \quad (1.7)$$

gde je E_{full} maksimalan napon punjenja baterije izražen u voltima, a E_{exp} napon ekspanencijalne zone. Q_{exp} je kapacitivnosti baterija u ekspanencijalnoj zoni izražen u procentima nominalne kapacitivnosti baterije Q_{nom} . $R_{internal}$ je unutrašnja otpornost baterije (Ω) [5]. Ekspanencijalni napon se povećava kada se baterija puni, bez obzira na stanje napunjenosti baterije, a odmah se smanjuje kada se baterija prazni.

2.2. Temperaturni efekat

Temperaturni efekat je najčešće vezan za litijum-jonske baterije. Većina temperaturnih efekata vezana je za hemijske reakcije koje se dešavaju u baterijama, kao i u materijalima koji se koriste za baterije.

Prihvatljiva temperatura litijum-jonskih baterija je od -20°C do 60°C . Optimalna radna temperatura se obično nalazi u opsegu od 15°C do 35°C . Ako se vrednost

temperature ne nalazi u optimalnom opsegu baterija će brzo degradirati i tako će se povećati rizik sa sigurnosnim problemima koji uključuju požar i eksploziju.

Visoka unutrašnja temperatura baterije može dovesti do pogoršanja performansi, gde se to najviše odnosi na gubitak kapaciteta i snage. Do gubitka kapaciteta i energije dolazi jer se pri visokim temperaturama gubi litijum i smanjuju se aktivne materije. U nekim slučajevima ovakva situacija može dovesti do samozapaljivanja ili eksplozije i zbog čega je neophodno pravilno upravljati radnom temperaturom baterija.

Temperaturni efekat se definiše sledećom jednačinom izlaznog napona u zavisnosti od temperature:

$$E(T) = E_0(T) - K(T) * \left(\frac{Q(T)}{Q(T)-it}\right) + A(T) * e^{(-B*it)} \quad (1.8)$$

Kapacitivnost baterije Q se smanjuje sa povećanjem temperature T koja utiče na bateriju. Temperatura T je temperatura okoline, odnosno ambijenta koja je promenljiva. Kapacitivnost Q takođe varira u zavisnosti od struje pražnjenja it , što znači da temperatura utiče i na unutrašnju otpornost baterije. Degradacije kapacitivnosti se moraju prvo utvrditi pre izračunavanja konstanti degradacije. Konstante degradacije utiču na parametre jednačine (1.8) i zbog toga se parametri računaju na sledeći način:

$$E_0(T) = E_0 * (1 + k_{vt1} * (T - T_{ref})) \quad (1.9)$$

$$K(T) = K * (1 + k_{kt1} * (T - T_{ref})) \quad (1.10)$$

$$Q(T) = Q * (1 + k_{qt1} * (T - T_{ref}) + k_{qt2} * (T - T_{ref})) \quad (1.11)$$

$$A(T) = A * (1 + k_{at1} * (T - T_{ref})) \quad (1.12)$$

T_{ref} je referentna temperatura i njena vrednost iznosi 25°C . k_{xt1} je konstanta degradacije prvog reda, a k_{xt2} je konstanta degradacije drugog reda gde je x parametar koji zavisi od temperature. [4] U ovom modelu baterije konstantne degradacije smo proglasili konstantnim vrednostima za svaki tip litijum-jonske baterije.

2.3. Efekat starenja

Efekat starenja je predstavljen kao životni ciklus baterije koji nam opisuje posledice uticaja perioda korišćenja baterije. Taj period nazivamo *životni ciklus* koji podrazumeva punjenje ili pražnjenje baterije. Starenje u zavisnosti od životnog ciklusa uključuje mnogo varijabli koje su međusobno zavisne, poput temperature i napona. Ove promenljive su povezane sa spoljašnjim uslovima i potrebom baterija. Glavni faktori koji se razmatraju su temperatura, SOC, napon i broj životnih ciklusa. Rad baterije se tokom životnog veka pogoršava zbog degradacije njegovih elektrohemijskih sastojaka, što dovodi do pogoršanja performansi i potrošnje.

Realizacija efekta starenja je zasnovana na životnom ciklusu baterije n . Životni ciklus je ciklus punjenja i pražnjenja baterije koji počinje od pražnjenja baterije do potpuno ispražnjenog stanja i zatim punjenje baterije do potpuno napunjenog stanja baterije. Efekat starenja dovodi do gubitka nominalnog kapaciteta, bržeg porasta temperature tokom rada, manjeg prihvatanja punjenja, nižeg napona, kao i do čestog samopražnjenja baterije.

Jednačina izlaznog napona u zavisnosti od životnog ciklusa baterije n (1.13) se koristi za realizaciju efekta starenja.

$$E(n) = E_0(n) - K(n) * \left(\frac{Q(n)}{Q(n)-it}\right) + A(n) * e^{(-B*it)} \quad (1.13)$$

Ovde su takođe iskorišćene modifikovane jednačine sa konstantama degradacije za realizaciju efekta starenja. U sledećim jednačinama možemo uvideti kako životni ciklus baterije utiče na sve parametre:

$$E0(n) = E0 * (1 + k_{vn1} * (n - 1)) \quad (1.14)$$

$$K(n) = K * (1 + k_{kn1} * (n - 1)) \quad (1.15)$$

$$Q(n) = Q * (1 + k_{qn1} * (n - 1) + k_{qn2} * (n - 1)) \quad (1.16)$$

$$A(n) = A * (1 + k_{an1} * (n - 1)) \quad (1.17)$$

k_{xn1} je konstanta degradacije prvog reda, a k_{xn2} je konstanta degradacije drugog reda gde je x parametar koji zavisi od životnog ciklusa baterije [4].

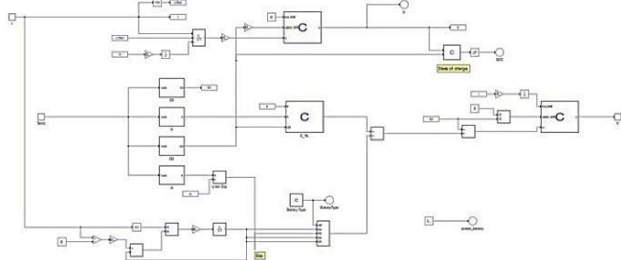
Zaključno sa temperaturnim efektom i efektom starenja jednačina izlaznog napona modela baterije glasi:

$$E(T, n) = E0(T, n) - K(T, n) * \frac{Q(T, n)}{Q(T, n) - it} + A(T, n) * e^{(-B * it)} \quad (1.18)$$

3. IMPLEMENTACIJA MODELA BATERIJE SA TEMPERATURNIM EFEKTOM I EFEKTOM STARENJA

Ovaj model baterije je modelovan na osnovu već postojeće komponente baterije u *Typhoon HIL Control Center*-u i na osnovu komponente baterije iz MATLAB-a. Cilj modelovanja baterije je da se uključe temperaturni efekat i efekat starenja, kao i poboljšanje performansi već postojeće komponente.

Na osnovu datog matematičkog modela iz drugog poglavlja model baterije je implementiran u *Typhoon HIL Control Center*-u uz pomoć alata za obradu signala (engl. *signal processing*) u *Schematic Editor*-u. Model baterije je modelovan za četiri osnovna tipa baterije koji se najčešće koriste u industriji: baterija sa olovnom kiselinom, litijum-jonska, niki-kadmijum i niki-metal-hidrid baterija. Na slici 3 prikazana je interna struktura modela baterije.



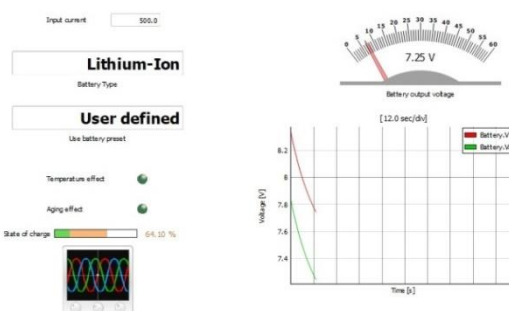
Slika 3. Interna struktura modela baterije

Osnovni model baterije i temperaturni efekat su implementirani u *Schematic Editor*-u, a efekat starenja je definisan u *Mask Editor*-u. Pored efekta starenja u *Mask Editor*-u su definisane sve konstantne promenljive, kao i nominalne vrednosti za svaki tip baterije i definisan je sam izgled maske komponente. Ovde je takođe definisano povezivanje interne strukture i maske komponente.

4. REZULTATI SIMULACIJE MODELOVANE BATERIJE

4.1. SCADA sistem i rezultati simulacije

Model baterije sa temperaturnim efektom i efektom starenja je simuliran pomoću alata *HIL SCADA* na uređaju *Typhoon HIL 402*. Na slici 4. prikazan je moguć SCADA sistem za nadzor i upravljanje komponentom baterije.

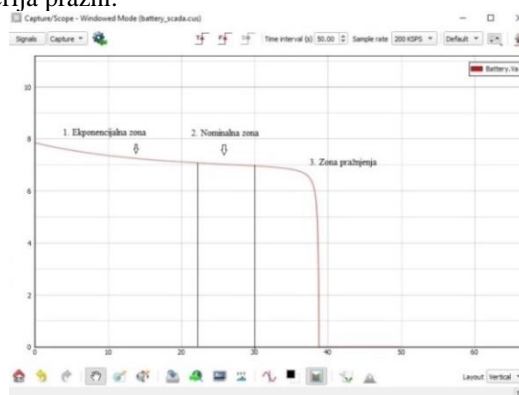


Slika 4. SCADA komponente baterije

SCADA sistem se sastoji od *HIL SCADA* kontrolnih elemenata (engl. *HIL SCADA widgets*) pomoću kojih se unosi ulazna struja, prikazuje tip baterije, kao i tip litijum-jonske baterije, signalizira nam da li su efekti uključeni, takođe nam pokazuje koliko je baterija puna ili prazna, a možemo videti i vrednost izlaznog napona baterije u bilo kom trenutku.

Rezultati simulacije su dobijeni tako što je korisnik zahtevao da se baterija isprazni. Iz tog razloga ulazna struja je pozitivna i iznosi 500A. Izabrani tip baterije je litijum-jonska baterija i njen tip definiše sam korisnik (engl. *User defined*). Ulazna struja je male vrednosti, pa se baterija sporije prazni.

Na slici 5. je grafički predstavljena karakteristika pražnjenja baterije sa obeleženim zonama. Prema grafiku se može zaključiti da se pri ulaznoj struji od 500A litijum-jonska baterija prazni nakon 38s. Kada vrednost izlaznog napona padne ispod vrednosti nominalnog napona, tada se baterija prazni.



Slika 5. Karakteristika pražnjenja litijum-jonske baterije

Za dalju analizu modela, biće uključena oba efekta. Za tip litijum-jonske baterije je odabran tip **7.4V 5.4Ah (LiCoO2)**, što znači da je nominalni napon ove baterije 7.4V, a nominalna kapacitivnost 5.4Ah. Pošto je uključen temperaturni efekat, zadata temperatura ambijenta je 30°C. Kako je ambijentalna temperatura u opsegu optimalne ambijentalne temperature, kapacitivnost baterije ne opada, ali se baterija sporije prazni. U slučaju da ambijentalna temperatura nije u optimalnom opsegu, došlo bi do pogoršanja performansi.

Pored temperaturnog efekta, uključen je i efekat starenja. Životni vek koji je zadat je 10. Promene u kapacitetu i naponu će nastati tek nakon 10 ciklusa punjenja i pražnjenja baterije. Promene koje mogu nastati su: snižavanje napona, gubitak nominalnog kapaciteta, brži porast temperature tokom rada, često samopražnjenje baterije, kao i povećanja unutrašnje otpornosti baterije.

4.2. Poređenje postojeće komponente baterije sa komponentom baterije koja je modelovana sa temperaturnim efektom i efektom starenja

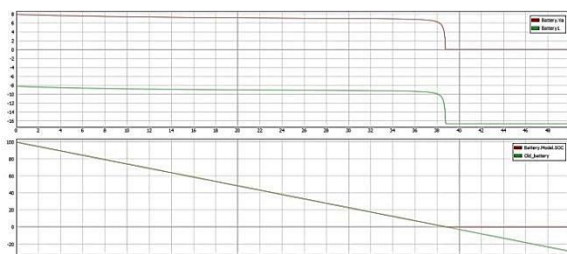
Neophodno je uporediti već postojeću komponentu baterije sa komponentom koja je modelovana sa temperaturnim efektom i efektom starenja. Kako bi se ove dve komponente poredile, nova komponenta neće imati nijedan efekat uključen.

Obe komponente su priključene na kontrolisani strujni izvor. Za obe komponente je izabrana litijum-jonska baterija. Nominalni napon je 7.2V, a nominalna kapacitivnost baterije je 5.4Ah. Obe baterije su pune jer im je inicijalno stanje napunjenosti postavljeno na 100%. Posmatra se kako se baterije prazne pri ulaznoj struji od 500A.

Na slici 6 su prikazani rezultati poređenja komponenti. Prvi grafik prikazuje izlazne napone sa padom napona na unutrašnjoj otpornosti obe komponente. Crveni signal je izlazni napon novomodelovane baterije, a zeleni već postojeće baterije u *Typhoon HIL Control Center*-u. Može se primetiti da su signali jednaki što se tiče oblika signala, ali takođe se može uočiti da izlazni napon već postojeće komponente ima amplitudu u početnom trenutku -8V, a ne 8V kao kod novomodelovane komponente.

Kod novomodelovane baterije je u implementaciji interne strukture pre samog izlaza postavljen blok „C function“ koji predstavlja ograničenje signala. Gornja granica je ulazna struja koja je pomnožena sa vrednošću unutrašnje otpornosti baterije i zatim ova vrednost prolazi kroz „Unit Delay“ blok koji odlaže signal za jedan period uzorkovanja.

Donja granica je dvostruka vrednost naponske konstante E0. Takođe, može se uočiti da je novom komponentom dobijena željena karakteristika pražnjenja.



Slika 6. Rezultati poređenja komponenti

Na drugom grafiku je predstavljeno stanje napunjenosti obe baterije. Crveni signal je stanje napunjenosti novomodelovane baterije, a zeleni već postojeće baterije. Signali stanja napunjenosti su jednaki dok se baterija ne isprazni. Uočava se da signal nove komponente ostaje na 0 kada se baterija isprazni, dok signal stare komponente linearno opada tokom vremena bez obzira što je baterija prazna. Kod nove komponente je uvedeno ograničenje za vrednost signala stanja napunjenosti, gde je donja granica 0, a gornja 100.

Obe baterije rade na sličnom principu, sa istim vrednostima parametara, a na osnovu grafika se vidi da se u istom vremenskom trenutku one isprazne.

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu modela baterije iz MATLAB-a i *Typhoon HIL Control Center*-a dobijen je novi model baterije koji ima mogućnost uključivanja temperaturnog efekta i efekta starenja. Efekti omogućavaju klijentima da analize, koje su njima neophodne, budu potpune.

Ova komponenta baterije je modelovana uz pomoć alata za obradu signala i na taj način je obezbeđeno da FPGA procesor ne bude opterećen, kao što je to slučaj sa tabelama za pretraživanje (*engl. Look-Up tables*). Prilikom testiranja na uređaju HIL 402, ova komponenta je opteretila procesor samo 51%. Takođe, na ovaj način su smanjeni troškovi komponente baterije.

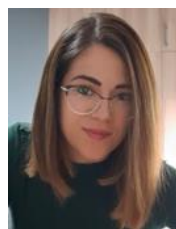
Prilikom modelovanja, u internu strukturu baterije su postavljeni integratori, filtri i ograničenja na određene signale kako bi se na izlazu dobili signali koji su u opsegu optimalnih vrednosti i koji nam daju sve korisne informacije. Za signal koji simulira stanje napunjenosti baterije uvedeno je takvo ograničenje da kada se baterija isprazni, dok ne krene ponovo da se puni, signal ima vrednost 0, a kada je puna izlazni signal ne može da pređe 100% napunjenosti baterije. Takođe, izlazni signal napona je stvarna vrednost napona u bilo kom trenutku i kriva pražnjenja baterije neće biti prikazana ispod x ose u negativnim vrednostima.

Svi tipovi baterije koji su implementirani u ovom modelu daju očekivanu karakteristiku pražnjenja. U rezultatima je pokazana očekivana karakteristika pražnjenja litijum-jonske baterije i karakteristika pražnjenja koja je dobijena ovim modelom baterije.

6. LITERATURA

- [1] Andrei Ter-Gazarian. *Energy storage for power systems*. Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom.
- [2] <https://www.typhoon-hil.com/fpga-powered-emulation/>
- [3] <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/-powersys/ref/battery.html#References>
- [4] D. Song, C. Sun, Q. Wang, D. Jang. *A Generic Battery Model and Its Parameter Identification*. Energy, Ming and Environment Research Centre, National Research Council of Canada, Vancouver, Canada.
- [5] Typhoon HIL Control Center/ Documentation Hub/ *Battery – Modeling and Application*. T-TN003(v1.1) June 12, 2013.

Kratka biografija:



Nataša Panić rođena je u Novom Sadu 1995. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Adaptivno i napredno upravljanje odbranila je 2020.god.

Kontakt: natasap1995@gmail.com