

**VERIFIKACIJA PRORAČUNA ZA DETEKCIJU I IDENTIFIKACIJU LOŠIH  
TELEMETRISANIH MERENJA U PRENOSNO-PROIZVODNIM MREŽAMA****CALCULATION VERIFICATION OF BAD DATA DETECTION AND IDENTIFICATION  
IN TRANSMISSION NETWORKS**

Aleksandra Spasić, Luka Strezoski, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

**Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – U radu su opisane teorijske osnove proračuna statičke estimacije stanja, zatim detekcije i identifikacije loših merenja za prenosno-proizvodne mreže. Urađena je verifikacija proračuna na mreži sa šest čvorova. Konačan cilj rada je da se detektuju sva loša merenja koja se javljaju usled starenja klase tačnosti mernih uređaja, pojave šumova prilikom prenosa mernih signala u dispečerski centar itd.

**Ključne reči:** Estimacija stanja, Prenos, Telemetrisana merenja, Detekcija loših merenja

**Abstract** – This paper presents the theoretical bases of static state estimation, bad data detection and identification for transmission networks. Calculation verification was done on a network with six nodes. The final goal of the paper is to detect all bad measurements that occur in the network due to the aging of the measuring devices, the appearance of noises during the transmission of the measurement signals to the dispatch centre, etc.

**Keywords:** State estimation, Transmission, Telemetered measurements, Bad data detection

**1. UVOD**

U radu sa elektroenergetskim sistemom (EES-om), osnovni zahtev koji se stavlja pred dispečera jeste poznavanje aktuelnog režima sistema. Cilj estimacije stanja je odrediti najbolju procenu stanja EES-a u zadatom trenutku [1]. To znači da glavni cilj nije dobijanje vrlo „tačne”, već u datom trenutku „najbolje” procene promenljivih stanja, čak i kada su merenja jako poremećena. Ovo omogućava pouzdanu bazu podataka za upravljanje i eksploataciju EES-a. Implementacija estimatora stanja predstavlja postupak koji omogućava obradu informacija iz EES-a u realnom vremenu.

Procena stanja se vrši na osnovu ulaznih podataka o topologiji mreži, kataloškim podacima elemenata i telemetrisanim merenjima. Da bi procena stanja sistema bila što preciznija potrebno je eliminisati sva loša merenja koja utiču na kvalitet proračuna [1, 2].

Loša merenja se u prenosnoj mreži mogu javiti usled starenja klase tačnosti mernih uređaja, kvarova komunikacionih linkova koji prenose merne signale, pojave šumova prilikom prenosa mernih signala do udaljenih terminalnih

jedinica (eng. *Remote Terminal Units*) pa do dispečerskih centara i čak pri samoj sinhronizaciji svih merenja koja stižu u dispečerske centre u bliskim, ali različitim vremenskim trenucima [3].

U ovom radu je urađen proračun statičke estimacije stanja i detekcije i identifikacije loših merenja, u prenosnoj mreži, na test mreži od 6 čvorova u programskom jeziku c++ i razvojnom okruženju Microsoft Visual Studio 2017 [4], a rezultati analize su prikazani tabelarno.

**2. TIPOVI MERENJA**

Sva merenja koja se koriste u estimaciji stanja mogu se klasifikovati u 3 grupe [1]:

- analogna merenja,
- pseudo-merenja,
- virtuelna merenja

Analogna merenja su merenja koja se dobijaju sa SCADA sistema. Ova merenja se u realnom vremenu prikupljaju sa terenskih mernih uređaja i šalju u centre upravljanja. Pseudo-merenja su pretpostavljene ili arhivske vrednosti nekih veličina, koja se temelje na iskustvu operatora ili prognozi opterećenja u pojedinim čvorovima koji nisu pokriveni mernim uređajima. Često služe da bi se neobservabilni delovi mreže učinili observabilnim. Virtuelna merenja nisu stvarna merenja, ali njihova vrednost je poznata u svakom trenutku sa velikom sigurnošću. Ta merenja se odnose na merenja injektiranja u prolaznim čvorovima.

Merenja koja se koriste u proračunu statičke estimacije stanja su merenja tokova aktivnih i reaktivnih snaga po granama, merenja modula tokova struja grana, merenja injektiranih aktivnih i reaktivnih snaga čvorova i merenja modula napona čvorova:

$$\mathbf{z} = [\mathbf{P}_i^T \mathbf{Q}_i^T \mathbf{I}_i^T \mathbf{P}^T \mathbf{Q}^T \mathbf{V}^T] \quad (1)$$

Vektor merenja ( $\mathbf{z}$ ) povezan je sa vektorom promenljivih stanja preko sledeće relacije:

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{e} \quad (2)$$

gde su:

$\mathbf{h}(\mathbf{x})$  –  $M$ -dimenzioni vektor estimiranih vrednosti merenja,  
 $\mathbf{x}$  –  $n$ -dimenzioni vektor promenljivih stanja,  
 $\mathbf{e}$  –  $M$ -dimenzioni slučajni vektor grešaka merenja.

**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Luka Strezoski.

### 3. PRORAČUN STATIČKE ESTIMACIJE

Za proračun estimacije korišćen je metod sume minimuma otežanih kvadrata odstupanja (eng. *Weighted Least Square*) [1, 3]. U ovom delu je prikazan dijagram statičke estimacije stanja na kojem su prikazani svi delovi proračuna. Takođe dat je i pregled modela koji je formiran koristeći pomenuti algoritam.

#### 3.1. Formulacija modela statičke estimacije

Metodom minimuma sume otežanih kvadrata odstupanja se minimizuje razlika merenih i estimiranih vrednosti veličina. Kriterijumska funkcija je definisana jednačinom 3 [1]. Na osnovu  $\sigma_m$  se određuje težinski faktor merenja koji predstavlja meru pouzdanosti tog merenja. Merenja čiji merni uređaji imaju bolju klasu tačnosti imaju manju varijansu, a veći težinski faktor.

$$\min\{J(x) = \sum_{m=1}^M \frac{(z_m - h_m(x))^2}{\sigma_m^2}\} \quad (3)$$

gde je:

- $J(x)$  - vrednost kriterijumske funkcije,
- $\sigma_m$  -varijansa merenja,
- $M$  -ukupan broj merenja,
- $m$  -tekuće razmatrano merenje.

U jednačini 3 razlika vrednosti merene i estimirane vrednosti merenja se naziva rezidualom merenja ( $r = z - h(x)$ ). Traženjem minimuma optimizacionog kriterijuma i linearizacijom svih funkcija  $h(x)$  dolazi se do linearnog modela statičke estimacije:

$$\begin{aligned} H(x^k)^T R^{-1} H(x^k) \Delta x^k &= H(x^k)^T R^{-1} \Delta z^k \\ x^{k+1} &= x^k + \Delta x^k \end{aligned} \quad (4)$$

gde su:

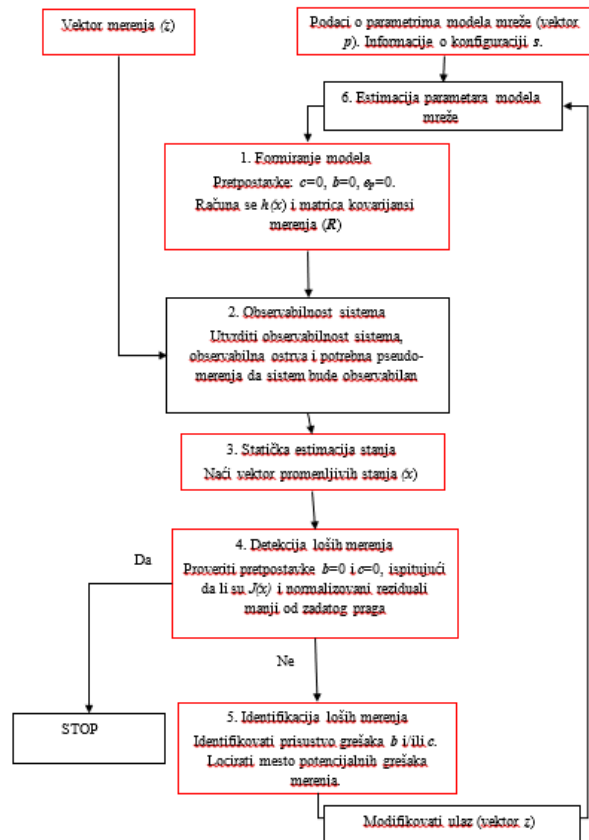
- $H(x^k)$  -matrica Jakobijana u tekućoj iteraciji,
- $R^{-1}$  -matrica težinskih faktora,
- $\Delta x^k$  -vektor korekcija u tekućoj iteraciji,
- $\Delta z^k$  -vektor reziduala u tekućoj iteraciji,
- $x^{k+1}$  -naredna aproksimacija rešenja.

#### 3.2. Opšti dijagram statičke estimacije stanja

Kompletan proces statičke estimacije stanja u proizvodno-prenosnoj mreži se sastoji iz šest koraka [3] prikazanih na slici 1. Na toj slici su crvenom bojom uokvireni delovi algoritma koji se razmatraju u ovom radu. Ostatak algoritma su dodatne analize koje kompletiraju proračun i omogućavaju da izlaz iz ovog proračuna bude pouzdan i konzistentan.

Na slici su korišćene sledeće oznake:

- $c$  - vektor grešaka u konfiguraciji mreže,
- $b$  - vektor grešaka u vrednostima merenja iz EESa,
- $e_p$  - vektor grešaka u vrednostima parametara modela mreže,
- $p$  - vektor parametara modela mreže,
- $s$  - vektor informacija o konfiguraciji EESa.



Slika 1. Kompletan opšti dijagram toka statičke estimacije stanja [1]

Na slici 1 se vidi da je neophodno prvo uraditi proračun statičke estimacije, a tek onda uraditi detekciju pa identifikaciju loših merenja.

### 4. DETEKCIJA I IDENTIFIKACIJA LOŠIH MERENJA

Pretpostavka, koja se usvaja u fazi formiranja modela, da nema pogrešnih merenja ( $b = 0$ ) u ovom delu se ispituje.

#### 4.1. Algoritam detekcije loših merenja

Detekcija loših merenja se sprovodi kroz dva testa [1, 2].

**Test 1** - Poređenje optimizacionog kriterijuma ( $J(x)$ ) sa zadatim pragom ( $\alpha$ ). U slučaju da je vrednost kriterijumske funkcije koja se dobije iz statičke estimacije stanja manja od praga, test je zadovoljen:

$$\begin{aligned} J(x) &< \alpha \\ \alpha &= M - n - s + \lambda \sqrt{2(M - n - s)} \end{aligned} \quad (5)$$

gde su:

- $\lambda$  -parametar (standardna vrednost je  $\lambda=3$ ),
- $M-n-s$  -broj stepeni slobode,
- $s$  -broj eliminisanih merenja.

**Test 2**- Poređenje normalizovanih reziduala merenja ( $r_{Nm}$ ) sa odgovarajućim pragovima ( $\beta_m$ ).

$$r_{Nm} < \beta_m, m = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

Da bi mogao da se sprovede drugi test potrebno je prvo preračunati normalizovane rezidualne:

$$r_{Nm} = \frac{|r_m|}{\sigma_m \sqrt{S_{mm}}}, m = 1, 2, \dots, M \quad (7)$$

gde se prag poređenja definiše kao:

$$\beta_m = N_{(1-\frac{\alpha}{2})max} \frac{\sqrt{A_{mm}}}{\sigma_m} \quad (8)$$

gde je:

$\sigma_m^2$  - varijansa m-tog merenja,

$N_{(1-\frac{\alpha}{2})max}$  - tipična vrednost je 3,

$A_{mm}$  - dijagonalni element matrice kovarijansi estimiranih reziduala.

Da bi se došlo do dijagonalnih elemenata matrice kovarijansi koristi se LDU faktorizacija matrice pojačanja u cilju izbegavanja inverzije pomenute matrice. Time matrica pojačanja postaje  $G = LDU$ , a pošto je matrica  $G$  simetrična,  $G = LDL^T$ .

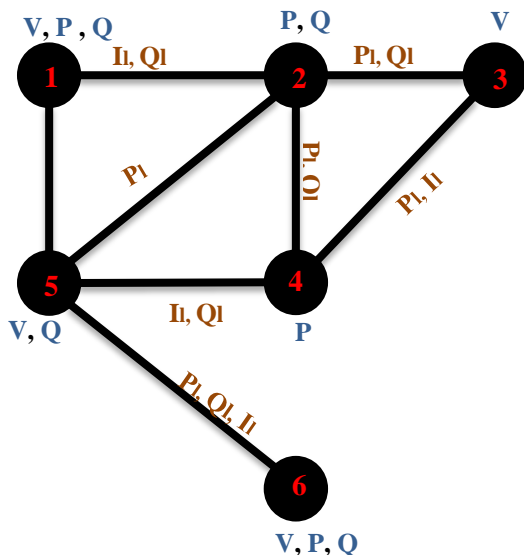
#### 4.2. Algoritam identifikacije loših merenja

Ako se u prethodnom koraku detekcije loših merenja identifikuje prisustvo pogrešnih podataka, prelazi se na identifikaciju loših merenja što je moguće uraditi raznim metodama. Metoda koja se koristi u ovom radu je metoda sukcesivnih eliminacija [1].

U ovom metodu se vrši eliminacija jednog merenja čiji normalizovani rezidual najviše odstupa od odgovarajućeg praga. Nakon toga se ponovo pokreće statička estimacija stanja pa onda detekcija loših merenja. U slučaju da loša merenja i dalje postoje to će pokazati testovi kriterijumske funkcije i normalizovanih reziduala. Padom bar jednog od ova dva testa ponovo se eliminiše merenje sa najvećim odstupanjem i pokreće estimacija stanja. Ovaj proces se nastavlja sve dok se ne zadovolje oba testa.

### 5. VERIFIKACIJA DETEKCIJE I IDENTIFIKACIJE LOŠIH MERENJA

U ovom delu je izvršena verifikacija rešenja tako što je proračun pokrenut na mreži sa 6 čvorova sa slike 2.



Slika 2. Test mreža sa prikazanom topologijom i ulaznim skupom merenja

Merenja su dobijena proračunom tokova snaga [5] i kao takva se smatraju apsolutno tačnim. Prvo se analizira slučaj kada nema zašumljenih merenja, a zatim slučaj kada je zašumljeno po jedno merenje iz svake grupe merenja.

Ukupan broj merenja je 26 u mreži i ona su prikazana u tabeli 1.

Tabela 1. Dostupna merenja u mreži

| Čvor 1 | Čvor 2 | Tip merenja | Vrednost merenja [r.j.] | Tež. faktor |
|--------|--------|-------------|-------------------------|-------------|
| 1      | 1      | $P_i$       | 1.037                   | 1000        |
| 1      | 1      | $Q_i$       | 0.288                   | 1000        |
| 1      | 1      | $V_i$       | 1.062                   | 2500        |
| 1      | 2      | $Q_l$       | 0.196                   | 1000        |
| 1      | 2      | $I_l$       | 0.766                   | 800         |
| 2      | 2      | $P_i$       | -0.039                  | 1000        |
| 2      | 2      | $Q_i$       | -0.010                  | 1000        |
| 2      | 3      | $P_l$       | 0.467                   | 1000        |
| 2      | 3      | $Q_l$       | 0.122                   | 1000        |
| 2      | 4      | $P_l$       | 0.194                   | 1000        |
| 2      | 4      | $Q_l$       | 0.042                   | 1000        |
| 2      | 5      | $P_l$       | 0.068                   | 1000        |
| 3      | 3      | $V_i$       | 0.994                   | 2500        |
| 3      | 4      | $P_l$       | -0.322                  | 1000        |
| 3      | 4      | $I_l$       | 0.325                   | 800         |
| 4      | 4      | $P_i$       | -0.385                  | 1000        |
| 4      | 5      | $Q_l$       | -0.058                  | 1000        |
| 4      | 5      | $I_l$       | 0.516                   | 800         |
| 5      | 5      | $Q_i$       | -0.087                  | 1000        |
| 5      | 5      | $V_i$       | 1.028                   | 2500        |
| 5      | 6      | $P_l$       | 0.048                   | 1000        |
| 5      | 6      | $Q_l$       | -0.014                  | 1000        |
| 5      | 6      | $I_l$       | 0.049                   | 800         |
| 6      | 6      | $P_i$       | -0.048                  | 1000        |
| 6      | 6      | $Q_i$       | 0.010                   | 1000        |
| 6      | 6      | $V_i$       | 1.031                   | 2500        |

Redundansa sistema iznosi  $26/11=2.36$ , što odgovara vrednosti redundanse u realnoj prenosnoj mreži (1.8-2.8) [1]. Težinski faktori treba da oslikavaju koliko se veruje u određeno merenje. Parametri modela elemenata su prikazani u tabeli 2 [6].

Tabela 2. Parametri modela elemenata mreže [6]

| Čvor 1 | Čvor 2 | Tip | $r$ [r.j.] | $x$ [r.j.] | $b$ [r.j.] | $g$ [r.j.] |
|--------|--------|-----|------------|------------|------------|------------|
| 1      | 2      | vod | 0.0194     | 0.0591     | 0.0264     | 0          |
| 1      | 5      | vod | 0.0540     | 0.2230     | 0.0204     | 0          |
| 2      | 3      | vod | 0.0469     | 0.1980     | 0.0184     | 0          |
| 2      | 4      | vod | 0.0581     | 0.1763     | 0.0042     | 0          |
| 2      | 5      | vod | 0.0569     | 0.1739     | 0.0209     | 0          |
| 3      | 4      | vod | 0.0670     | 0.1710     | 0.0187     | 0          |
| 4      | 5      | vod | 0.0133     | 0.0421     | 0.0045     | 0          |
| 5      | 6      | vod | 0.0000     | 0.2520     | 0.0045     | 0          |

#### 5.1. Slučaj bez loših merenja

U ovom slučaju sva merenja su dobijena proračunom tokova snaga i smatraju se apsolutno tačnim.

Proračunom estimacije stanja izračunato je da je vrednost  $J(x)=0.0263$ , a proračunom praga optimizacionog kriterijuma ( $\alpha$ ) dobijena je vrednost 31.4317. Kako je  $0.0263 < 31.4317$ , prvi test detekcije je zadovoljen.

Proračunato je 26 normalizovanih reziduala, po izrazu 7, i dobijene su vrednosti u opsegu  $[18 \times 10^{-5}, 15.8 \times 10^{-2}]$ . Proračunato je 26 vrednosti koje odgovaraju pragovima  $\beta_m$  i dobijene su vrednosti u opsegu  $[1.36, 2.86]$ . Iz ovoga se zaključuje da je i drugi test zadovoljen i samim tim se zaključuje da ne postoje loša merenja. Ovakav rezultat je očekivan jer merenja nisu zašumljena.

## 5.2. Postoji po jedno loše merenje za svaki tip merenja

U ovom primeru će merenja prikazana u tabeli 3 da budu poremećena. Skup merenja ostaje isti kao u delu 5.1, samo se menjaju vrednosti iz tabele 3.

Tabela 3. Vrednosti merenja nakon zašumljenja

| Merenje         | Tačna vrednost [r.j.] | Poremećena vrednost [r.j.] |
|-----------------|-----------------------|----------------------------|
| V <sub>6</sub>  | 1.031                 | 1.300                      |
| P <sub>4</sub>  | -0.385                | -0.900                     |
| Q <sub>1</sub>  | 0.288                 | 1.500                      |
| P <sub>24</sub> | 0.194                 | 0.900                      |
| Q <sub>12</sub> | 0.196                 | 0.700                      |
| I <sub>56</sub> | 0.049                 | 0.400                      |

Prva iteracija:

Test 1 -  $J = 973.56$  dok je  $\alpha = 31.43$ , pošto je  $J > \alpha$ , prvi test nije zadovoljen.

Test 2 - Ukupno 21 merenje ne zadovoljava uslov da je  $r_n < \beta_n$  od kojih se najveće odstupanje dobija za merenje  $P_{24}$  za koje je  $r_n = 18.995$  a  $\beta_n = 2.853$ . Merenje  $P_{24}$  se izbacuje iz skupa merenja i nastavlja se sa sledećom iteracijom.

Druga iteracija:

Test 1 -  $J = 609.37$  dok je  $\alpha = 29.87$ , pošto je  $J > \alpha$ , prvi test nije zadovoljen.

Test 2 - Ukupno 14 merenja ne zadovoljavaju uslov da je  $r_n < \beta_n$  od kojih se najveće odstupanje dobija za merenje  $Q_1$  za koje je  $r_n = 15.70$  a  $\beta_n = 1.97$ . Merenje  $Q_1$  se izbacuje iz skupa merenja i nastavlja se sa sledećom iteracijom.

Treća iteracija:

Test 1 -  $J = 362.12$  dok je  $\alpha = 28.30$ , pošto je  $J > \alpha$ , prvi test nije zadovoljen.

Test 2 - Ukupno 19 merenja ne zadovoljavaju uslov da je  $r_n < \beta_n$  od kojih se najveće odstupanje dobija za merenje  $V_6$  za koje je  $r_n = 10.97$  a  $\beta_n = 2.54$ . Merenje  $V_6$  se izbacuje iz skupa merenja i nastavlja se sa sledećom iteracijom.

Četvrta iteracija:

Test 1 -  $J = 237.58$  dok je  $\alpha = 26.70$ , pošto je  $J > \alpha$ , prvi test nije zadovoljen.

Test 2 - Ukupno 12 merenja ne zadovoljavaju uslov da je  $r_n < \beta_n$  od kojih se najveće odstupanje dobija za merenje  $Q_{12}$  za koje je  $r_n = 8.70$  a  $\beta_n = 1.77$ . Merenje  $Q_{12}$  se izbacuje iz skupa merenja i nastavlja se sa sledećom iteracijom.

Peta iteracija:

Test 1 -  $J = 162.40$  dok je  $\alpha = 25.07$ , pošto je  $J > \alpha$ , prvi test nije zadovoljen.

Test 2 - Ukupno 8 merenja ne zadovoljavaju uslov da je  $r_n < \beta_n$  od kojih se najveće odstupanje dobija za merenje  $P_4$  za koje je  $r_n = 8.51$  a  $\beta_n = 1.68$ . Merenje  $P_4$  se izbacuje iz skupa merenja i nastavlja se sa sledećom iteracijom.

Šesta iteracija:

Test 1 -  $J = 88.34$  dok je  $\alpha = 23.42$ , pošto je  $J > \alpha$ , prvi test nije zadovoljen.

Test 2 - Samo 1 merenje ne zadovoljava uslov da je  $r_n < \beta_n$  i to merenje  $I_{56}$  za koje je  $r_n = 9.40$  a  $\beta_n = 2.98$ . Merenje  $I_{56}$  se izbacuje iz skupa merenja i nastavlja se sa sledećom iteracijom.

Sedma iteracija:

Test 1 -  $J = 0.023$  dok je  $\alpha = 21.73$ , pošto je  $J < \alpha$ , prvi test je zadovoljen.

Test 2 - Sva merenja zadovoljavaju uslov da je  $r_n < \beta_n$ . Kraj iterativnog postupka.

Na osnovu prikazanih rezultata, jasno se vidi da je proračun uspeo da detektuje svih šest merenja i izbaci ih iz skupa merenja. Na kraju proračuna skup merenja čini 20, umesto početnih 26, merenja.

## 6. ZAKLJUČAK

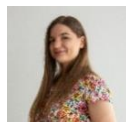
Statička estimacija stanja predstavlja osnovnu funkciju za eksploataciju i upravljanje EES-om. Samim tim da bi se omogućilo pravilno funkcionisanje ovog proračuna potrebno je eliminisati sva merenja koja narušavaju kvalitet proračuna.

U radu je korišten WLS algoritam za rešavanje statičke estimacije stanja. Na raspolaganju su merenja napona, injeckiranja aktivnih i reaktivnih snaga, tokovi aktivnih i reaktivnih snaga i struja u sekciji. Za detekciju i identifikaciju loših merenja je korišten metod sukcesivnih eliminacija i prikazano je da ovaj metod precizno određuje postojanje loših merenja, a potom ih identifikuje i odbacuje. Mana proračuna je neoptimalan dolazak do konačnog rešenja jer se odbacivanjem merenja narušava struktura matrice Jakobijana.

## 7. LITERATURA

- [1] A.T.Sarić, M.S.Čalović: *Statička estimacija stanja u elektroenergetskim sistema*, Tehnički fakultet Čačak, Kraljevo 2008.
- [2] A.Monticelli: *State estimation in electric power systems, a generalized approach*, University of Campinas, Norwell, Massachusetts U.S.A, 1999.
- [3] G.Švenda: *Specijalizovani softveri u elektroenergetici*, materijali sa predavanja, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2020.
- [4] <https://visualstudio.microsoft.com/vs/older-downloads/>
- [5] V.Strezoski: *Osnovni proračuni elektroenergetskih sistema II*, skripta, Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, 2011.
- [6] [https://www.pscad.com/knowledge-base/download/ieee\\_14\\_bus\\_technical\\_note.pdf](https://www.pscad.com/knowledge-base/download/ieee_14_bus_technical_note.pdf)

### Kratka biografija:



**Aleksandra Spasić** rođena je u Novom Sadu 1998. god. Osnovne studije na Fakultetu tehničkih nauka na odseku elektroenergetski sistemi završila je 2021. godine.

kontakt: [aspasic998@gmail.com](mailto:aspasic998@gmail.com)



**Dr Luka Strezoski** rođen je u Novom Sadu 1990. Doktorirao je na Fakultetu tehničkih nauka 2017. god., a od 2020 je izabran za šefa katedre. Oblast interesovanja su elektroenergetski sistemi.