

PRORAČUN STRUJE KRATKOG SPOJA I KOORDINACIJA PREKOSTRUJNE RELEJNE ZAŠTITE U MIKROMREŽAMA**SHORT-CIRCUIT CALCULATION AND OVERCURRENT RELAY PROTECTION COORDINATION IN MICROGRIDS**

Aleksej Žilović, Luka Strezoski, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ENERGETIKA, ELEKTRINIKA I TELEKOMUNIKACIJE

Kratak sadržaj – Mikromreže, kao lokalni i fleksibilni energetske sistemi koji mogu raditi povezano s mrežom ili u ostrvskom režimu, donose izazove u analizi zbog prisustva distribuiranih energetskih resursa (DER). Posebni problemi javljaju se pri proračunu struja kratkog spoja i koordinaciji relejne zaštite, gde tradicionalne metode nisu dovoljne zbog dvosmernih tokova energije i invertorskih izvora. Ovaj rad prikazuje postojeće pristupe ovim problemima, analizira njihove prednosti i ograničenja, te kroz simulacije u ETAP-u ocenjuje najperspektivnije metode i pravce daljeg razvoja relejne zaštite mikromreža.

Ključne reči: Distribuirani energetske resursi (DER), Mikromreže, proračun struje kratkog spoja, podešavanje i koordinacija relejne zaštite, ETAP.

Abstract – Microgrids, as local and flexible energy systems capable of operating both grid-connected and islanded, present challenges in analysis due to the presence of distributed energy resources (DER). Specific issues arise in short-circuit current calculation and relay protection coordination, where traditional methods are often insufficient because of bidirectional power flows and inverter-based sources. This paper reviews existing approaches to these problems, analyzes their advantages and limitations, and evaluates the most promising methods through simulations in ETAP, providing insights into their effectiveness and directions for further development of microgrid protection.

Keywords: Distributed Energy Resources (DER), Microgrids, Short-circuit calculation, Relay protection setting and coordination, ETAP.

1. UVOD

Globalna potražnja za električnom energijom stalno raste, dok fosilni izvori i tradicionalne elektrane ne mogu dugoročno zadovoljiti potrebe. Integracija distribuiranih energetskih resursa (DER) u mreže omogućava prelazak sa pasivnih na aktivne distributivne sisteme, čiji se manji delovi nazivaju mikromreže.

NAPOMENA:

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

Mikromreže nude prednosti poput smanjenja emisija, veće pouzdanosti i efikasnijeg upravljanja energijom, u skladu s konceptom „3D“ – dekarbonizacija, digitalizacija i decentralizacija. Ipak, one donose i tehničke, pravne i bezbednosne izazove [1,2].

Ovaj rad obrađuje dve ključne teme: proračun kratkih spojeva i koordinaciju relejne zaštite u mikromrežama sa velikim prisustvom DER-ova. Metode su analizirane teorijski i verifikovane simulacijama na primeru mikromreže univerzitetskog kampusa Case Western Reserve University u softveru ETAP.

2. DISTRIBUIRANI ENERGETSKI RESURSI (DER)

Distribuirani energetske resursi (DER) obuhvataju lokalne izvore i skladišta energije koji omogućavaju efikasniju, pouzdaniju i ekološki prihvatljiviju proizvodnju i potrošnju električne energije. U DER spadaju fotonaponske i vetroelektrane, mikroturbine i skladišta energije.

Fotonaponske elektrane pretvaraju sunčevu energiju u električnu pomoću invertera i MPPT algoritama, dok vetroelektrane koriste kinetičku energiju vetra, pri čemu savremeni inverter-based sistemi omogućavaju potpunu kontrolu snage. Mikroturbine koriste fosilna goriva u kogeneraciji i povezuju se na mrežu preko energetske elektronike. Skladišta energije (najčešće baterije i zamašnjaci) omogućavaju balansiranje sistema i podršku mreži putem dvosmernih pretvarača [3,4].

DER sistemi doprinose smanjenju emisija, povećanju fleksibilnosti i formiranju održivih mikromreža.

3. PRORAČUN KRATKIH SPOJEVA

Proračun kratkih spojeva omogućava analizu ponašanja elektroenergetskog sistema tokom kvara i služi za dimenzionisanje opreme i podešavanje relejne zaštite. Tradicionalne metode, zasnovane na matrici admitanse i Njtn–Rafsonovom postupku, pogodne su za prenosne mreže, ali ne i za radijalne distributivne sisteme sa velikim brojem čvorova i prisustvom DER-ova. Zbog toga su razvijeni efikasniji algoritmi, poput admitantno–impedantnog, modifikovanog “Backward–Forward Sweep” i kompenzacionog metoda, prilagođeni distributivnim mrežama.

U mikromrežama, prisustvo DER-ova menja topologiju i doprinosi ukupnoj struji kratkog spoja, pa korišćenje standarda IEC 60909 za modelovanje DER-ova u uslovima

kvara više nije adekvatno. DER-ovi povezani preko uređaja energetske elektronike (posebno inverter-based izvori) zahtevaju preciznije modele koji uključuju *Grid Code* standard, tačnije zahteve Fault Ride Through (FRT) i Reactive Current Injection (RCI), unutar njega. Oni određuju koliko dugo i u kom obimu DER ostaje priključen tokom kvara i kolika treba da bude reaktivna komponenta injektirane struje kako bi se popravile naponske prilike [5].

Savremene metode za proračun kratkih spojeva u mikromrežama koje se mogu naći u aktuelnoj literaturi ne uzimaju u obzir sve vrste kratkih spojeva, kao ni oba radna režima mikromreže. Stoga, u sledećem podpoglavlju je opisana već postojeća metoda za proračun kratkih spojeva u mikromrežama [3,6,7] koja sa visokom efikasnošću računa sve vrste kratkih spojeva u oba radna režima.

3.1. Izdvojena metoda za proračun kratkih spojeva u mikromrežama

U [3] je testirana metoda proračuna kratkih spojeva u mikromreži sa visokim udelom IBDER-ova, uz poređenje sa standardom IEC 60909 u oba režima rada. Pokazano je da pojednostavljeni modeli mogu izazvati greške i do 36% tokom ostrvskog rada, što dovodi do nepreciznog podešavanja relejne zaštite. Zato je neophodno modelovanje svih elemenata mikromreže u skladu sa *Grid Code* zahtevima.

Na slici 1 prikazan je modul kvara generalizovanog Δ -kola, pomoću kog je izveden kompletan matematički model generalizovanog Δ -kola mikromreže sa kvarom prikazan u sledećem izrazu

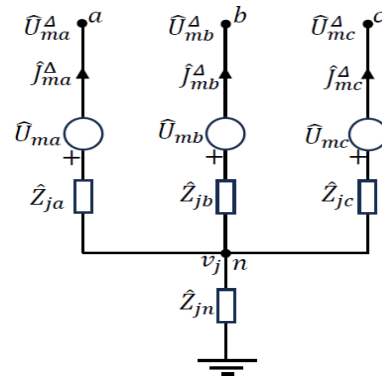
$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{Y}}^{dio} & \hat{\mathbf{T}} & \mathbf{0} \\ \hat{\mathbf{A}}^{U,dio} & \hat{\mathbf{A}}^{J,dio} & \hat{\mathbf{A}}^{v,dio} \\ \mathbf{0} & \hat{\mathbf{C}}^{J,dio} & \hat{\mathbf{C}}^v \end{bmatrix} \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{U}}_K^{A,dio} \\ \hat{\mathbf{J}}_F^{A,dio} \\ \hat{\mathbf{V}}^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{J}}_{INJ} \\ \hat{\mathbf{A}}^0 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

Gde su:

- $\hat{\mathbf{J}}_{INJ}^{A,dio}$ predstavlja vektor injektiranih struja u domenu simetričnih komponenti u generalizovanom Δ -kolu,
- $\hat{\mathbf{Y}}^{dio}$ predstavlja matricu admitansi mikromreže u domenu simetričnih komponenti,
- $\hat{\mathbf{U}}_K^{A,dio}$ predstavlja vektor napona čvorova mikromreže u domenu simetričnih komponenti,
- $\mathbf{T}$ predstavlja matricu incidencije, i
- $\hat{\mathbf{J}}_F^{A,dio}$ predstavlja vektor struja svih modula kvarova unutar mikromreže.

Dok se preostali vektori u izrazu (1) izračunavaju na osnovu tipa kratkog spoja, tačnije vrednosti impedansi grana sa slike 1.

Metoda proračuna kratkog spoja u mikromreži sastoji se iz dva koraka. U prvom koraku određuju se ekscesne struje svih DER-ova. Najpre se proračunavaju naponi u čvorovima njihovog priključenja u trenutku kvara, jer ti naponi definišu veličinu struje prema *Grid Code* standardu.



Slika 1. Modul kvara u generalizovanom Δ -kolu [3].

Pretpostavlja se da invertori još nisu detektovali kvar, pa DER-ovi u tom trenutku injektiraju istu struju kao pre kvara, dok su ekscesne struje u generalizovanom Δ -kolu jednake nuli. Nakon toga se naponi svih čvorova određuju superpozicijom napona pre i tokom kvara, a ekscesne struje dobijaju kao razlika ukupne i prethodne struje DER-a.

U drugom koraku, poznate ekscesne struje se unose u model, čime vektor injektiranih struja postaje nenulti i omogućava proračun kompletnog stanja mikromreže sa kvarom. Konačno stanje dobija se superpozicijom generalizovanog Δ -kola i kola pre kvara.

Ovakav pristup precizno modeluje IBDER-ove, ne zahteva koren mreže i omogućava brze i tačne proračune za sve tipove kvarova u oba režima rada mikromreže. Upravo iz tog razloga je uzeta za analizu među ostalim metodama iz aktuelne literature.

4. PODEŠAVANJE I KOORDINACIJA PREKOSTRUJNE RELEJNE ZAŠTITE U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA

Relejna zaštita obezbeđuje selektivno isključenje kvara i pravilno funkcionisanje mreže. U distributivnim sistemima najčešće se primenjuju trenutna prekostrujna zaštita ($I >>$), prekostrujna zaštita ($I >$) i prekostrujna zaštita sa relejom nulte komponente ($I_0 >$), koje štite elemente mreže od međufaznih i zemljospojnih kvarova. Releji mogu imati strujno nezavisnu ili zavisnu karakteristiku, pri čemu se selektivnost postiže podešavanjem struje i vremena delovanja [8].

Sa integracijom DER-ova, distributivne mreže postaju aktivne, a tokovi snage dvosmerni. To menja vrednosti i smerove struja kratkog spoja, što može izazvati pogrešno ili zakašnjelo delovanje releja i narušiti koordinaciju zaštite. Poseban problem javlja se između reklozera i osigurača, gde prisustvo DER-a može promeniti redosled reagovanja. Zbog toga je neophodno prilagoditi tradicionalne šeme zaštite novim uslovima rada kako bi se očuvala selektivnost i pouzdanost sistema.

4.1. Adaptivna relejna zaštita sa visokim prisustvom DER-ova

Adaptivna metoda koordinacije prekostrujne zaštite razvijena je u [5,9] radi rešavanja problema koje donosi integracija DER-ova u distributivne mreže. Za razliku od tradicionalnih pristupa, ova metoda uvodi vremenske intervale između trenutka nastanka kvara i reagovanja

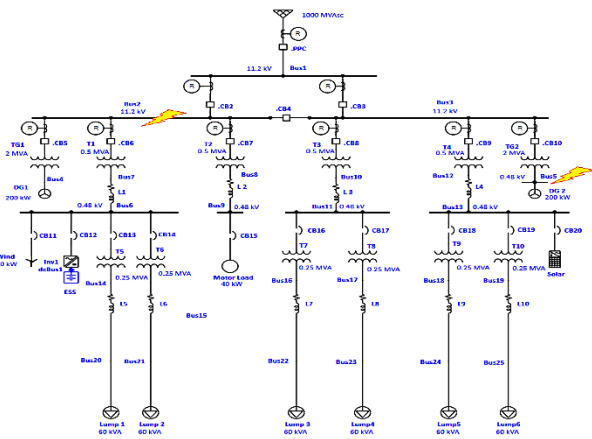
releja, koji se određuju prema vremenu isključenja DER-ova iz mreže u skladu sa FRT zahtevima.

Postupak se zasniva na analizi parova glavni–rezervni relej. Nakon pojave kvara, svi DER-ovi ostaju priključeni određeno vreme (u radu se koristio FRT zahtev Nemačke, u kom je ovo vreme jednako 150 ms), tokom kojeg se proračunavaju struje kratkog spoja i vremena reagovanja oba releja. Ako glavni relej reaguje pre isteka tog perioda, proračun se završava. Ukoliko ne, prelazi se u sledeći interval u kojem se uzima u obzir postepeno isključenje DER-ova u zavisnosti od pada napona. Za svaki novi interval ponovo se izračunavaju struje kratkog spoja i vremena delovanja releja, uz korekciju prethodnih vrednosti.

Postupak se ponavlja sve dok nijedan DER ne ostane priključen pre reakcije glavnog releja, čime se obezbeđuje tačna koordinacija i selektivnost zaštite. Ova metoda omogućava dinamičko prilagođavanje podešavanja releja promenljivom broju aktivnih DER-ova i predstavlja pouzdano rešenje za mreže sa visokim udelom distribuiranih izvora, uključujući i mikromreže.

5. NUMERIČKA ANALIZA REZULTATA

Na slici 2 prikazana je jednopolna šema mikromreže univerzitetskog kampusa *Case Western Reserve (CWRU)* iz Klivlenda, Ohajo, modelovana u softveru ETAP. Mikromreža obuhvata 28 trofaznih čvorova sa više distribuiranih izvora energije: dva dizel-generatora po 200 kW , vetrogenerator od 60 kVA , sistem za skladištenje energije od 40 kVA i solarni izvor od 40 kVA , kao i više potrošača snage od 60 kVA po čvoru.



Slika 2. Jednopolna šema CWRU mikromreže.

Simulacije kratkih spojeva sprovedene su u čvorovima 2 i 3 (dve žute munjice na slici 2). Simulirani su jednopolni i trolpolni kratak spoj, u povezanom i ostrvskom režimu rada, radi procene ponašanja mikromreže u različitim uslovima.

U naredna dva potpoglavlja prikazane su analize rezultata kratkih spojeva i koordinacije relejne zaštite.

5.1. Simulacija kratkih spojeva u čvorovima 2 i 5

Simulacije kratkih spojeva sprovedene su u čvorovima 2 i 5 mikromreže CWRU, kako bi se procenilo ponašanje sistema u povezanom i ostrvskom režimu rada. Na slici 2 prikazana je jednopolna šema mikromreže modelovane u ETAP-u, dok su rezultati kratkih spojeva dati u tabelama

1–4. U čvoru 2, koji je najbliži tački zajedničkog priključenja (*PCC*), izvedene su simulacije trolpolnog i jednopolnog kratkog spoja. Kod trolpolnog kratkog spoja, struja kratkog spoja u povezanom režimu iznosila je oko 52 kA , dok je u ostrvskom bila svega 260 A , što predstavlja razliku od gotovo 200 puta (tabela 1). Slično, kod jednopolnog kratkog spoja struja je pala sa 25 kA u povezanom na 380 A u ostrvskom režimu (tabela 2). Ovi rezultati jasno pokazuju da u ovom delu sistema gotovo celokupnu struju kratkog spoja obezbeđuje Utility grid, dok je doprinos DER-ova zanemarljiv.

Tabela 1. Rezultati za trolpolni kratak spoj u čvoru 2.

Režim rada	TROPOLNI KRATAK SPOJ			
	Povezan sa mrežom		Ostrvski	
Veličine	$I_f[\text{kA}]$	$V_f[\%]$	$I_f[\text{kA}]$	$V_f[\%]$
Bus 2	51.807	0	0.262	0
Bus 5	1.776	4.17	1.776	4.17
Bus 6	1.097	12.33	1.097	12.33
Bus 13	0.62	7.47	0.62	7.47

Tabela 2. Rezultati za jednopolni kratak spoj u čvoru 2.

Režim rada	JEDNOPOLNI KRATAK SPOJ			
	Povezan sa mrežom		Ostrvski	
Veličine	$I_f[\text{kA}]$	$V_f[\%]$	$I_f[\text{kA}]$	$V_f[\%]$
Bus 2	25.529	0	0.384	0
Bus 5	0.489	50.21	1.513	32.29
Bus 6	0	88.26	0.035	56.87
Bus 13	0.138	87.42	0.051	55.76

Analiza čvora 5, na kojem je priključen dizel-generator DG2, pokazuje veći doprinos lokalne proizvodnje. Kod trolpolnog kratkog spoja struja kratkog spoja u povezanom režimu iznosila je oko 45 kA , dok je u ostrvskom bila 5 kA (tabela 3). Za jednopolni kratki spoj vrednosti su bile približno 11 kA i 5 kA (tabela 4). Razlika između režima je manja nego u čvoru 2, jer lokalni DER doprinosi napajanju kratkog spoja u ostrvskom radu.

Tabela 3. Rezultati za trolpolni kratak spoj u čvoru 5.

Režim rada	TROPOLNI KRATAK SPOJ			
	Povezan sa mrežom		Ostrvski	
Veličine	$I_f[\text{kA}]$	$V_f[\%]$	$I_f[\text{kA}]$	$V_f[\%]$
Bus 5	45.568	0	5.564	0
Bus 4	0.064	101.43	1.554	8.84
Bus 6	0.038	101.47	0.506	19.79
Bus 13	0.066	101.51	0.549	15.42

Tabela 4. Rezultati za jednopolni kratak spoj u čvoru 5.

Režim rada	JEDNOPOLNI KRATAK SPOJ			
	Povezan sa mrežom		Ostrvski	
Veličine	$I_f[\text{kA}]$	$V_f[\%]$	$I_f[\text{kA}]$	$V_f[\%]$
Bus 5	11.768	0	5.283	0
Bus 4	0.011	104.74	1	38.75
Bus 6	0.007	104.39	0.579	51.07
Bus 13	0.05	104.58	0.371	48.96

Zaključno, rezultati potvrđuju da tip kratkog spoja, lokacija i režim rada značajno utiču na vrednost struje kratkog spoja. Tropolni kratki spojevi izazivaju najveće struje, dok su one najmanje u udaljenim tačkama tokom ostrvskog rada. Primenjena metoda proračuna pokazala je visoku tačnost i pouzdanost u svim analiziranim slučajevima, čime je potvrđena njena primenljivost u realnim mikromrežama.

5.2. Koordinacija relejne zaštite za kratke spojeve u čvorovima 2 i 5

Studija koordinacije relejne zaštite sprovedena je u softveru ETAP korišćenjem modula *Star – Protection and Coordination*, namenjenog analizi i podešavanju zaštitnih uređaja. Simuliran je trofazi kratki spoj u čvorovima 2 i 5, kao i u prethodnim analizama, ali samo u povezanom režimu rada, zbog ograničenja standardne metode koja ne obuhvata ostrvski rad mikromreže. Bitno je napomenuti da *Star – Protection and Coordination* modul ne uvažava implementiranje matematičkih funkcija, već da koristi standard IEC kao referencu. Upravo zato, u narednom pasusu kada se bude govorilo o “korigovanim vrednostima”, odnosiće se na upotrebu opisane adaptivne metode za koordinaciju relejne zaštite za korigovanje vremena reagovanja dobijenih u softveru ETAP.

U čvoru 2 relej je reagovao nakon 20 ms, što je unutar prvog FRT intervala dok su svi DER-ovi još priključeni na mrežu, pa dalji proračun nije bio potreban. U čvoru 5 vreme reagovanja releja iznosilo je 390 ms, što prema FRT zahtevima prelazi prvi interval od 150 ms, te je analiza nastavljena u sledećem vremenskom koraku. U drugom intervalu, kada se deo DER-ova isključuje zbog pada napona, proračun je korigovan i dobijena su nova vremena delovanja releja – za glavni relej 10 vreme je povećano na 508 ms, dok je za rezervni relej 3 smanjeno na 1280 ms. Ovi rezultati potvrđuju da adaptivna metoda pruža veću preciznost jer dinamički prati promene u mreži i usklađuje podešavanja prema stvarnim uslovima rada.

Iako metoda uspešno modeluje ponašanje IBDER sistema i ispunjava FRT zahteve, njeno ograničenje je primena isključivo u povezanom režimu mikromreže. U ostrvskom režimu, gde su struje kratkog spoja znatno manje, potrebna su dodatna istraživanja i razvoj naprednijih rešenja koja bi omogućila pouzdano delovanje zaštite u svim režimima rada mikromreže. Ovo predstavlja osnovu za zaključke i preporuke iz narednog poglavlja.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazan je pregled i analiza metoda za proračun kratkih spojeva i nadstrujnu relejnu zaštitu u mikromrežama, sa fokusom na njihove mogućnosti i ograničenja. Pokazano je da konvencionalne metode često koriste pojednostavljene modele DER-ova, zavise od postojanja korena mreže i ne opisuju precizno ostrvski režim rada, što dovodi do grešaka u proračunima i nepouzdanog funkcionisanja zaštite.

Za analizu su odabrane po jedna reprezentativna metoda iz obe oblasti. Simulacije na mikromreži Univerziteta Case Western Reserve pokazale su da metoda zasnovana na generalizovanom Δ -kolu, usklađena sa FRT i RCI zahtevima, obezbeđuje visoku tačnost, dok adaptivna

relejna zaštita pokazuje ograničenja u ostrvskim uslovima sa malim strujama kratkog spoja.

Rezultati ukazuju na potrebu razvoja naprednih, adaptivnih metoda zaštite koje dinamički prate promene u radu mikromreže. Buduća istraživanja treba da budu usmerena na razvoj robustne, ekonomične i pouzdane nadstrujne zaštite, koja bi:

- uvažavala FRT i RCI standarde,
- bila primenljiva u oba režima rada,
- bila nezavisna od postojanja korena mreže,
- adaptivno menjala podešavanja u zavisnosti od režima,
- radila stabilno i tokom prelaznih stanja.

Razvoj takve metode biće predmet daljih istraživanja autora i mentora.

7. LITERATURA

- [1] [1] Л. Стрезоски, „Моделовање и фундаментални прорачуни активних дистрибутивних мрежа“, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2021.
- [2] L. Mariam, M. Basu, M.F. Colon “Microgrid: Architecture, policy and future trends”, vol 64, 2016, pp 477-489. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.037>
- [3] Strezoski, L., Prica, M., Loparo, K. A. "Generalized Δ -Circuit Concept for Integration of Distributed Generation in Real-Time Short-Circuit Calculations." *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 4, 2017, pp. 3237–3245. [doi:10.1109/TPWRS.2016.2617158](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2617158)
- [4] Uddin, M., Mo, H., Dong, D., Elsayed, S., Zhu, J., Guerrero, J. M. "Microgrids: A Review, Outstanding Issues and Future Trends." *Energy Strategy Reviews*, vol. 49, 2023, 101127. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101127>.
- [5] Luka Strezoski, Izabela Stefani, Dusko Bekut, Novel method for adaptive relay protection in distribution systems with electronically-coupled DERs, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 116, 2020, 105551, ISSN 0142-0615. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105551>.
- [6] L. V. Strezoski, N. G. Simic and K. A. Loparo, "A Robust Short-circuit Calculation Method for Islanded, Grid-connected, and Utility Microgrids," in *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 13, no. 1, pp. 325-337, January 2025, [doi: 10.35833/MPCE.2023.001041](https://doi.org/10.35833/MPCE.2023.001041)
- [7] Strezoski, V., Bekut, D., “A canonical model for the study of faults in power systems”, *IEEE*, vol. 6, no. 4, 1991, pp. 1493-1499. [doi: 10.1109/59.116995](https://doi.org/10.1109/59.116995)
- [8] Поповић, Д., Бекут, Д., Тресканица, В. „Специјализовани ДМС алгоритми“, Нови Сад, 2004.
- [9] И.Стефани,“Прорачун подешавања и координације релејне заштите у дистрибутивним системима са дистрибуираним енергетским ресурсима заснованим на уређајима енергетске електронике“, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2021.

Kratka biografija:



Aleksej Žilović rođen u Novom Sadu 2001. god. Osnovne studije upisuje 2020. god. i iste završava 2024. Odmah nakon toga upisuje master akademske studije, smer Elektroenergetski sistemi. Kontakt: aleksej.zilovic@uns.ac.rs



Prof. Dr. Luka Strezoski rođen je 1976. god. Redovni je profesor, dekan i šef katedre za Energetsku elektroniku i pretvarače.