

**SIMULACIJA PROPADA NAPONA U DISTRIBUTIVNOJ TEST MREŽI SA  
OBNOVLJIVIM IZVOROM ENERGIJE****SIMULATION OF VOLTAGE SAGS IN A DISTRIBUTION TEST GRID WITH A  
RENEWABLE ENERGY SOURCE**

Nikola Lučić, Vladimir A. Katić, Aleksandar M. Stanisavljević, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

**Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – *Uradu je posmatrana IEEE 33-bus test mreža u okviru koje su simulirani efekti propada napona, koristeći Typhoon HIL Control Center programski paket. Data je studija slučaja simulacije uticaja različitih vrsta kvarova, ako je dodata jedna solarna elektrana kao obnovljivi izvor energije. Posmatran je harmonijski otisak propada napona na pojedinim sabirnicama u toj test mreži. Studija slučaja pokazala je da se razne vrste kratkih spojeva manifestuju kroz različite karakteristike propada napona, odnosno harmonijskih otisaka. Uočen je i problem pojave višeg nivoa harmonika tokom propada uzrokovan ograničenjima kontrolnog sistema Typhoon-HIL-a.*

**Ključne reči:** *IEEE 33-bus test mreža, harmonijski otisak, propadi napona.*

**Abstract** – *The paper observes the IEEE 33-bus test grid in which the effects of voltage sags are simulated, using the Typhoon HIL Control Center software package. A case study of the simulation of the impact of different types of failures, if one solar power plant is added as a renewable energy source, is given. The harmonic footprints of the voltage sags on individual busbars in that test grid were observed. The case study showed that different types of failures are manifested through different characteristics of voltage sags, i.e., harmonic footprints. The problem of the appearance of higher levels of harmonics during the sags caused by the limitations of the Typhoon-HIL control system was also noticed.*

**Keywords:** *IEEE 33-bus test grid, harmonic footprint, voltage sags.*

**1. UVOD**

Nagli razvoj računarstva izazvao je veliki skok unapretku inženjerstva zasnovanog na modelima, uvođenjem različitih inoviranih softverskih paketa i alata, koji se koriste za ovu namenu, a koji su svoje utočište našli u različitim granama industrije. Nije teško zamisliti zbog čega su se računarski programi ove vrste pokazali dragocnim u istraživanjima i na polju elektroenergetike, gde je prelaskom sa fizičkih na testiranje virtuelnih sistema, ostvarena ne samo sloboda u pogledu opsega željenih ispitivanja i jednostavnosti izmena u test-sistemu,

**NAPOMENA:**

**Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Vladimir Katić, red.prof.**

nego i neprocenjiva dobit, uštedom vremena, materijalnih sredstava, ali i očuvanjem sigurnosti ljudskih života.

Iako sporijeg razvoja nego računarsvo, elektroenergetika se takođe unapređivala u svojim oblastima proizvodnje i distribucije, s tim da su ove oblasti ostale suštinski nepromenjene sve do kraja 90-ih godina prošlog veka, kada ulaze u period najvećih promena u kom se nalaze i danas. Kroz proces deregulacije došlo je do izmena u vlasničkoj strukturi elektroenergetskog sistema i razbijanja njegove tkzv. vertikalne organizacije. Tome su doprineli i sve veća zabrinutost za životnu sredinu, nagoveštaj skorog iscrpljavanja obnovljivih fosilnih goriva, pojava novih rešenja za ekonomičnije iskorišćavanje obnovljivih izvora električne energije, želja za smanjenjem emisije gasova staklene bašte i umanjenje efekata na klimatske promene. Tehničke podloge za ove promene dao je paralelni razvoj energetske elektronike, nove tehnologije snažnih poluprovodnika, kao i efikasna rešenja digitalne (mikroprocesorske) kontrole, metoda brze komunikacije i kvalitetni softverski alati.

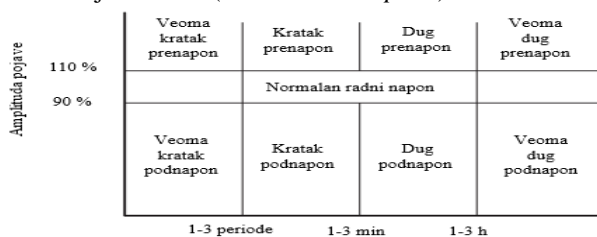
Kvalitet električne energije je oblast, koja se pojavila u ovom talasu promena. Po svojoj prirodi, ona je ta koja predstavlja odraz dinamike rada nelinearnih potrošača, poput uređaja električne elektronike i elektromotornih pogona, sa statikom elektroenergetskog sistema. Pojava distribuiranih izvora i mikromreža uvodi nova pitanja na ovakav način razumevanja, menja postojeće zahteve i postavlja nove [1].

Ovaj rad bavi se jednim od najozbiljnijih poremećaja kvaliteta električne energije – propadima napona. Cilj je da koristeći standardnu IEEE 33-bus test mrežu odgovori na pitanje uticaja kvarova u distributivnoj mreži na karakteristike propada napona na pojedinim sabirnicama koristeći najsavremeniji digitalni simulator za rad u realnom vremenu baziran na *Typhoon HIL Control Center* programskom paketu.

**2. PROPADI NAPONA**

Propadi napona predstavlja kratkotrajno smanjenje efektivne (RMS) vrednosti napona, koje je uzrokovano kvarovima u EES, njegovim preopterećenjem, a može se javiti i pri startovanju velikih opterećenja poput velikih motora. Prema IEEE standardu 1159-2009, propadi napona su definisani kao redukcija napona u rasponu od 10% do 90% nominalne vrednosti napona, kada je frekvencija sistema nominalna, i kada je trajanje poremećaja u rasponu od pola periode do jednog minuta [2]. Amplituda i trajanje pojave mogu da se koriste za klasifikaciju varijacija u naponu što je prikazano na slici 1.

Istraživanjem harmonijskog spektra tokom poremećaja napona u distributivnim mrežama, primećeno je da amplituda harmonika niskog frekventnog spektra ima gotovo trenutni porast, čija se promena amplitude daleko brže odvija od promene osnovne komponente napona (osnovnog harmonika) i brže se prenosi kroz mrežu od promene ukupne amplitude napona [2]. Nakon ovog saznanja, ispitivane su različite kombinacije harmonika, dok se nije došlo do one koja daje najbolje rezultate, a to je set od drugog, trećeg, petog i sedmog harmonika (HDU2357), koji je u radu [3] originalno nazvan Harmonijski otisak (*Harmonic Footprint*).



Sl. 1. Grafik amplituda-trajanje za klasifikaciju pojava kvaliteta električne energije [2]

### 3. DISTRIBUTIVNE TEST MREŽE

Test mreža je model realne distributivne mreže, koja reprodukuje ponašanje i karakteristike stvarne mreže, uključujući i specifične pojedinosti unutar lokaliteta u kom se mreža nalazi. Zahvaljujući njima, rezultati istraživanja se mogu jednostavno proveravati i upoređivati. Danas se u svetu koristi veliki broj test mreža, koje su propisali IEEE, CIGRE ili druga značajna elektroenergetska udruženja [4].

Za potrebe ovog rada, korišćena je *IEEE 33-bus* mreža. Ova mreža se često koristi za istraživanja u oblasti tokova snaga. Sastoji se od 33 sabirnice (trofazna čvora), raspoređenih na 4 glavna fidera. Čvorovi su povezani sa 32 trofazna voda. Potrošači (skupovi više sabranih potrošača) povezani su na svaki od 33 čvora sistema.

### 4. MODELOVANJE PROPADA NAPONA

Za istraživanje uticaja propada napona u test mrežama do sada su korišćeni razni pristupi. U radu [5] razmatrani su propadi napona na *IEEE 3-bus* i *IEEE 9-bus* test mrežama uz korišćenje *DIGSILENT Power Factory* softverskog alata. Slična analiza uz primenu istog softverskog alata, ali na *IEEE 13-bus* test mreži prikazana je u [6]. U [7] su propadi napona razmatrani kroz *Matlab/Simulink* model *IEEE 13-bus* test mreže, dok su u [8] za ispitivanje korišćene neuralne mreže.

Za potrebe ovog rada, korišćen je *Typhoon HIL Control Center (THCC)* programski paket [9]. Osnovna mogućnost koju nudi je izrada modela i njihovo simuliranje u realnom vremenu. U okviru ovog rada korišćeni su *Schematic Editor* i *HIL SCADA*, pa je njima posvećena posebna pažnja.

*Schematic Editor* omogućava izradu modela visoke vernosti radi njihovog simuliranja u realnom vremenu. Kreiranje modela se odvija u grafičkom okruženju, gde korisnik može da kreira električne i kontrolne delove modela, parametrizuje njegove komponente i kompajlira gotove modele pomoću ugrađenog kompajlera.

*HIL SCADA* predstavlja grafičko okruženje koje omogućava interakciju sa simulacijom u realnom vremenu. *HIL SCADA* preuzima kompajlirane simulacione modele na *HIL* platformu i upravlja procesom simulacije, parametrima i izlazima.

Model mreže je napravljen koristeći primer modela *IEEE 33-bus* mreže. Nad ovim modelom izvršeno je niz modifikacija: eliminisani su spojni vodovi koji su u originalnom modelu omogućavali prelaz iz radijalne u upetljanu distributivnu mrežu (za potrebe ovog rada to nije bilo neophodno), uvedene su komponente za simuliranje kratkih spojeva i na nju je povezan DER u vidu fotona-ponske (FN) elektrane. Na slici 2 prikazan je konačni model sistema u *Schematic Editor*-u.

Za potrebe ovog rada, razvijen je blok za ekstrakciju viših harmonika iz talasnog oblika napona, kao i blok za računanje harmonijskog otiska.

Blok za ekstrakciju viših harmonika napravljen je pomoću *Harmonic Analyzer* komponente. Unutrašnjost bloka prikazana je na slici 3.

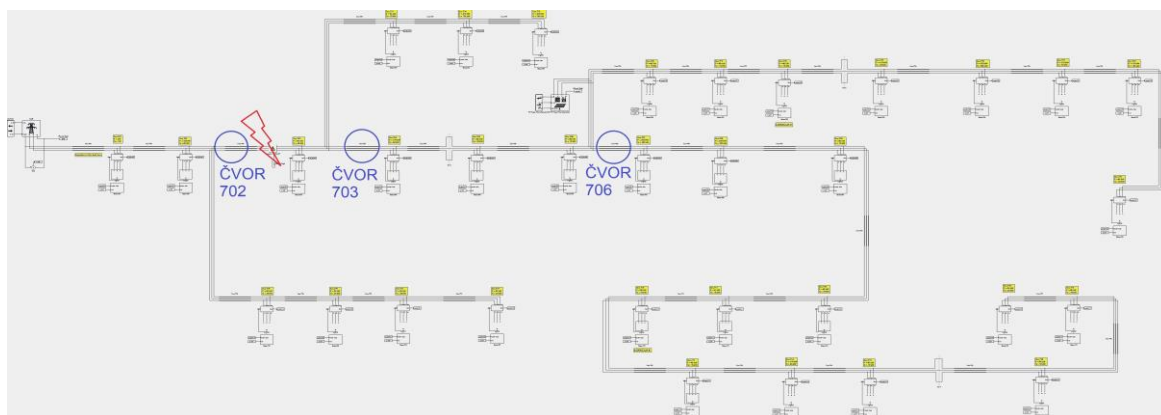
Blok za formiranje harmonijskog otiska napravljen je na osnovu formule harmonijskog otiska koja glasi [3]:

$$HDU2357 = \frac{\sqrt{\sum_{n=2,3,5,7} U_n^2}}{U_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

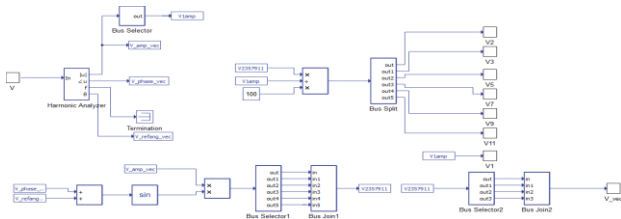
Unutrašnjost bloka za formiranje harmonijskog otiska prikazana je na slici 4.

### 5. SIMULACIJE PROPADA NAPONA

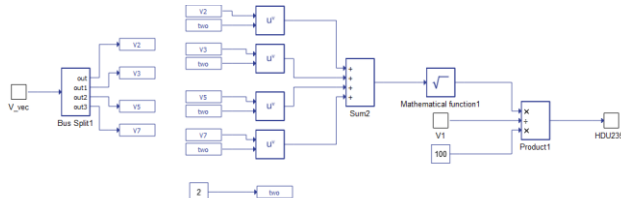
Korišćenjem *HIL SCADA* okruženja, simulirani su kratki spojevi i merene željene vrednosti. Posmatrane su trenutne vrednosti napona, efektivne vrednosti napona radi uvida u njihove propade, talasni oblici viših harmonika napona pogođenih faza (2-gi, 3-ći, 5-ti, 7-mi, 9-ti i 11-ti), kao i harmonijski otisci pogođenih faza.



Sl. 2. Model *IEEE 33-bus* test mreže u *Typhoon-HIL* paketu



Sl. 3. Blok za ekstrakciju viših harmonika



Sl. 4. Blok za formiranje harmonijskog otiska

Mesto kratkog spoja nalazi se na vodu, koji povezuje čvor (bus) #702 i čvor #703. Vreme snimanja na osciloskopu je iznosilo 1 s. Posmatrane su vrednosti u čvoru #706 (slika 2). U svim simulacijama, aktivna snaga FN elektrane iznosila je 1000 kW, odnosno 0,5 njene nominalne vrednosti, dok je reaktivna snaga iznosila 400 kVAR, odnosno 0,2 njene nominalne vrednosti. Temperatura u svim simulacijama je nepromenjena i iznosila je 25°C. Isto važi i za iradijaciju, koja je iznosila 1000 W/m<sup>2</sup>.

U okviru prve grupe simulacija, istraživani su tipski kratki spojevi. Simulirani su jednopolni kratak spoj faze A (A-N), zatim faze B, dvopolni kratak spoj faza A i B i kratak spoj faza A i B sa zemljom. Trajanje svakog od kratkih spojeva iznosilo je 0,3 s. Zbog ograničenja prostora, ovde će biti prikazani samo rezultati vezani za propad napona usled jednopolnog kratkog spoja A-N.

U okviru druge grupe simulacija, simulirani su neki složeniji tipovi kratkih spojeva. Iako je mogućnost njihove pojave manja u odnosu na slučajeve iz prve grupe, ona realno postoji. Mesto kratkog spoja, kao i mesto sa kog su posmatrane vrednosti ostalo je isto kao i u prvoj grupi simulacija. Ovde je prikazan samo jedan slučaj, tj. simuliran je složen kvar kroz nastanak jednopolnog kratkog spoja faze B, koji se dalje razvija u dvopolni kratak spoj faza A i B sa zemljom.

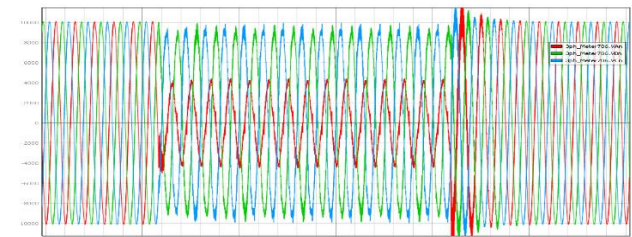
### 5.1 Jednopolni kratak spoj faze A (A-N)

U toku kvara javlja se značajno izobličenje talasnog oblika napona za sve tri faze, odnosno propad napona, a najviše faze A (slika 5). Prikaz promene efektivne (RMS) vrednosti napona dat je na slici 6. Vidi se da je propad faze A najizraženiji i iznosi 37,06% nominalnog. Propadi druge dve faze su manji i njihove vrednosti su 89,99% nominalnog za fazu B, odnosno 89,61% za fazu C.

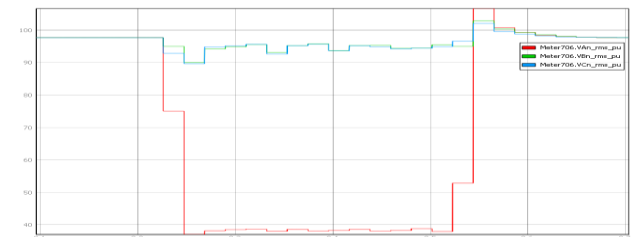
Tokom kvara javljaju se viši harmonici, koji su najizraženiji u tranzijentnim delovima propada, odnosno na početku i na kraju, i prikazani su na slici 7. Na početku propada izmerena je vrednost drugog harmonika od 20,94% osnovnog, odnosno vrednost trećeg od 5,43% osnovnog.

Može se primetiti da prisustvo harmonika postoji i tokom samog kvara, ali ovo se pripisuje FN elektrani, koja sadrži elektroenergetske pretvarače i uzrokovano je određenim ograničenjima kontrolnog Typhoon-HIL sistema. Na kraju propada drugi harmonik iznosi 21,68%, a treći 16,52%.

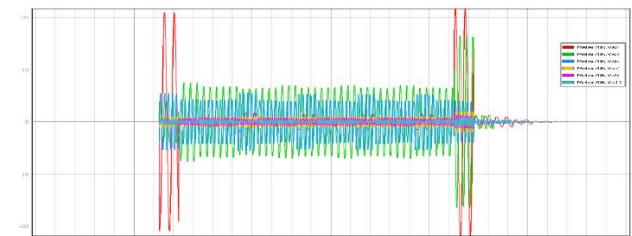
Harmonijski otisak propada napona prema (1) dat je na slici 8. Može se uočiti očekivani karakteristični oblik na početku i kraju propada, s tim da je na početku izmerena vrednost od 29,39% u pik, a na kraju 20,81% u pik.



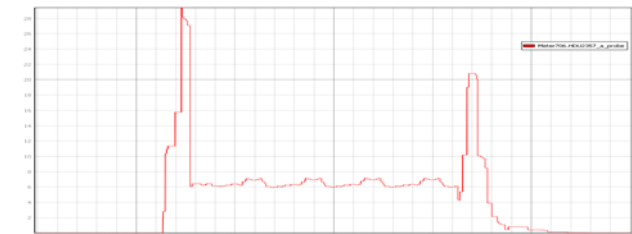
Sl. 5. Talasni oblici napona u prvoj simulaciji



Sl. 6. RMS vrednosti napona u prvoj simulaciji



Sl. 7. Harmonici napona pogođene faze prve simulacije



Sl. 8. Harmonijski otisak pogođene faze prve simulacije

### 5.2 Jednopolni (B-N) u dvopolni sa zemljom (A-B-N)

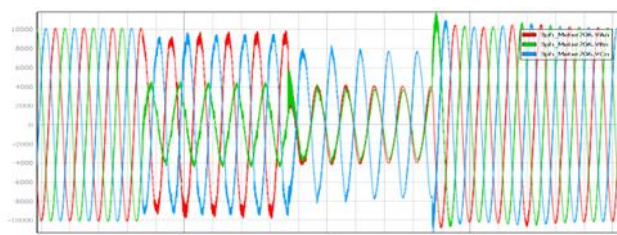
Simulacija je programirana tako da oba kratka spoja imaju trajanje od 0,1 s. Talasni oblici napona u drugoj simulaciji su prikazani na slici 9, gde se jasno mogu videti da jednopolni kvar u fazi B (B-N) prelazi u dvopolni faza A i B sa zemljom (A-B-N).

Posmatranjem RMS vrednosti napona, u prvom delu izmereno je da propad faze B iznosi 37,26% nominalnog napona, dok su ostale dve faze na granici dozvoljenog (propad za fazu A iznosi 90,15% nominalnog, dok za fazu C 89,88%). U drugom delu dolazi do intenziviranja propada, koji sada iznosi 32,93% nominalnog za fazu B, 37,29% za fazu A, te 72,6% za fazu C. Pri povratku u normalno stanje primećen je kratkotrajan porast napona od par procenata dok se napon ne ustali na vrednost pre kvara. RMS vrednosti napona sve tri faze prikazane su na slici 10.

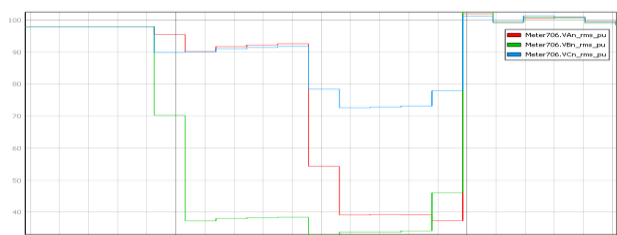
Za posmatranje viših harmonika kao i harmonijskog otiska izabrana je faza B (slika 11). Pri nastanku kvara, izmerena je amplituda drugog harmonika u iznosu od 27,59% osnovnog harmonika. U ovom delu zapaženo je i

prisustvo trećeg harmonika, čija vrednost iznosi 11,93%. Pri prelasku iz jednopolnog u dvopolni kratak spoj sa zemljom, vrednost amplitude drugog harmonika je 23,13%, dok se od ostalih ističe peti harmonik sa 6,46%. Pri povratku u normalno stanje, opet se javlja drugi harmonik sa vrednošću od 35,86%.

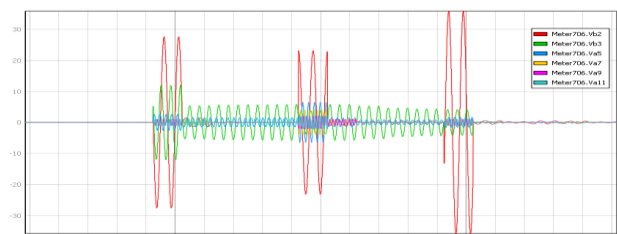
Harmonijski otisak prikazan je na slici 12. Mogu se primetiti tri otiska (skoka), koji odgovaraju trenutku nastanka, prelaska iz jednog kvara u drugi i trenutku prestanka propada. U trenutku nastanka kvara, izmerena je vrednost otiska od 38,12% u pikou. Na narednom skoku, koji odgovara prelasku iz jednopolnog u dvopolni kratak spoj sa zemljom, izmerena je vrednost u pikou od 18,01%. Na poslednjem skoku, koji odgovara prelasku iz dvopolnog kratkog spoja u stanje pre kvara, u pikou je izmereno 25,98%.



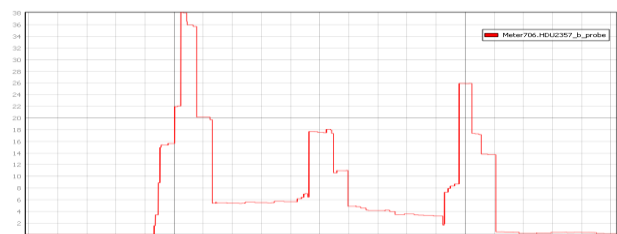
Sl. 9. Talasni oblici napona u drugoj simulaciji



Sl. 10. RMS vrednosti napona u drugoj simulaciji



Sl. 11. Viši harmonici napona u drugoj simulaciji



Sl. 12. Harmonijski otisak u drugoj simulaciji

## 6. ZAKLJUČAK

Posmatrajući set odabranih viših harmonika napona, utvrđeno je da su, kako nastanak kratkog spoja, tako i povratak sistema u stanje nakon kvara, praćeni skokovitim porastom određenih viših harmonika napona pogođene faze. U nekim slučajevima, u tranzijentnim delovima su izmereni pikovi harmonijskog otiska koji dostižu skoro 40%, što može imati izuzetno negativne posledice po rad sistema. Posmatranjem složenijih tipova

kvarova, pokazano je da su oni, pošto izazivaju više tranzijentna tokom trajanja kvara, a samim tim i više skokova viših harmonika, još „opasniji“, tj. negativni efekti na elemente u mreži su izraženiji.

## 7. LITERATURA

- [1] “Power Quality in Modern Power Systems”, Editors: P. Sanjeevikumar, C. Sharmeela, J.B. Holm-Nielsen, P. Sivaraman, Academic Press, London, 2020.
- [2] A.M. Stanisavljević, “Nova metoda detekcije propada napona u mreži sa distribuiranim generatorima”, Dokt.diser., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2018, <https://nardus.mpn.gov.rs/handle/123456789/11090>
- [3] V.A. Katic, A.M. Stanisavljevic, “Smart Detection of Voltage Dips Using Voltage Harmonics Footprint”, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.54, No.5, Sep./Oct. 2018, pp.5331-5342.
- [4] A.M. Stanisavljević, V.A. Katić, B. Dumnić, B. Popadić, “A Brief Overview of the Distribution Test Grids with a Distributed Generation Inclusion Case Study”, Serbian Journal of Electrical Engineering, Vol.15, No.1, 2018, pp.115-129.
- [5] J. Toholj, V.A. Katić, A.M. Stanisavljević, „Modelovanje i analiza uticaja propada napona primjenom test mreža sa distribuiranim generatorima”, Zbornik radova FTN, God.36, br.1, 2021, pp.123-126.
- [6] P. Perge, V.A. Katić, A.M. Stanisavljević, „Ispitivanje uticaja obnovljivih izvora primenom test mreže”, Zbornik radova FTN, God.36, br.3, 2021, pp.480-483.
- [7] V. Vidačić, V. Katić, “Uticaj obnovljivih izvora energije na propade napona u distributivnim mrežama”, Zbornik radova FTN, God.36, br.7, 2021, pp.1287-1290.
- [8] I. Vasić, V. Katić, A. Stanisavljević, „Primena neuralnih mreža za detekciju propada napona na primeru rada test mreža”, Zbornik radova FTN, God. 36, br.3, 2021, pp.436-439
- [9] Priručnik za korišćenje Typhoon HIL Control Center, [https://www.typhoon-hil.com/documentation/typhoon-hil-software-manual/topics/software\\_manual\\_introduction.html](https://www.typhoon-hil.com/documentation/typhoon-hil-software-manual/topics/software_manual_introduction.html)

### Kratka biografija:



**Nikola Lučić** rođen je 1996. god. u Subotici. Osnovne studije završio je na Fakultetu tehničkih nauka 2019. god., a master 2021. god. iz oblasti Elektrotehnike i računarstva.



**Vladimir A. Katić** rođen je 1954. god. u Novom Sadu. Doktorirao je na Univerzitetu u Beogradu 1991. god. Od 2002. god. je redovni profesor Univerziteta u Novom Sadu. Oblasti interesovanja su mu energetska elektronika, kvalitet električne energije, obnovljivi izvori električne energije i električna vozila.



**Aleksandar M. Stanisavljević**, rođen je u Beogradu 1988. god. Doktorirao ne na Univerzitetu u Novom Sadu 2019. god. gde je trenutno u zvanju docenta. Oblast interesovanja su mu integracija obnovljivih izvora energije na mrežu i kvalitet električne energije.