



## KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE NA FTN – REZULTATI DUGOGODIŠNJEG PRAĆENJA

### POWER QUALITY AT THE FTS – RESULTS OF LONGTERM MONITORING

Vladimir A. Katić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija  
Zoltan J. Čorba, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija  
Marko Vekić Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

#### KRATAK SADRŽAJ

Fakultet tehničkih nauka (FTN), sa svojim nastavnim i naučnim kapacitetima, istraživačkim laboratorijama i instaliranim distribuiranim generatorima ima složenu mrežu u kojoj niz potrošača i generatora mogu da utiču na stanje kvaliteta električne energije. Iz tog razloga se jednom godišnje sprovode sveobuhvatna merenja svih ključnih parametara, a u skladu sa nacionalnim standardom SRPS EN 50160. To daje povoljnu osnovu za detaljniju analizu parametara kvaliteta električne energije, kao i za predlaganje odgovarajućih mera za eventualno poboljšanje stanja. Cilj ovog rada je da agregatno, u kratkoj formi predstavi pregled nekih, značajnijih dosadašnjih rezultata merenja, da se analiziraju njihove promene u dugogodišnjem periodu i ukaže na moguće trendove njihovog daljeg kretanja. Posebno detaljno su analizirani parametri kvaliteta zgrade Nastavnog bloka FTN, a rezultati su diskutovani poređenjem sa nacionalnim standardom SRPS EN 50160. Na bazi toga dati su opšti zaključci o stanju kvaliteta električne energije na FTN.

**Ključne reči:** Kvalitet električne energije, FTN, dugogodišnja merenja, analiza

#### ABSTRACT

The Faculty of Technical Sciences (FTS), with its teaching and scientific capacities, research laboratories and installed distributed generators, has a complex network in which loads and generators can influence the state of power quality. For this reason, comprehensive measurements of all key parameters are carried out once a year, in accordance with the national standard SRPS EN 50160. This provides a favorable basis for a more detailed analysis of power quality parameters, as well as proposing appropriate measures to improve it. The aim of this paper is to present in aggregate, in a short form, an overview of some, very important measurement results, to analyze their possible changes over a long period of time and to point out possible trends in their further movement. The power quality parameters of the Teaching block building of the FTS were analyzed in detail, and the results were discussed in comparison with national standard SRPS EN 50160. Based on that, general conclusions on the state of electricity quality at FTS were given.

**Key words:** Power Quality, FTS, Longterm monitoring, Analysis

Kontakt informacije o autorima: e-mail: Vladimir Katić: [katav@uns.ac.rs](mailto:katav@uns.ac.rs); Zoltan Čorba: [zobos@uns.ac.rs](mailto:zobos@uns.ac.rs); Marko Vekić: [vekmar@uns.ac.rs](mailto:vekmar@uns.ac.rs)

#### 1. UVOD

Poslednjih godina ponovo se aktuelizuje problematika i sve više pažnje posvećuje temama vezanim za kvalitet električne energije [1-4]. Tome naročito doprinosi široko korišćenje nelinearnih potrošača u vidu PC računara i opreme, računarski baziranih sistema, zabavne elektronike, mobilnih uređaja, regulisanih elektromotornih pogona, kao i priključenje distribuiranih izvora (*Distributed Generators*), električnih automobila i sistema za skladištenje električne energije (*Electrical Energy Storage Systems*). Ovi elementi se sve češće spominju u sklopu budućih pametnih mreža (*Smart Grids*), odnosno vezuju za mikromreže (*Microgrids*), kao novu organizacionu strukturu unutar EES-a, pa time ova tematika postaje još aktuelnija.

Fakultet tehničkih nauka (FTN), sa svojim razuđenim nastavnim i naučnim kapacitetima raspoređenim u sedam zgrada, istraživačkim laboratorijama i instalisanim distribuiranim generatorima (tri solarne fotonaponske elektrane) ima električnu strukturu sličnu nekoj mikromreži [5]. Mada električna mreža fakulteta nije originalno projektovana i pravljena u tom vidu, ona ipak daje povoljnu osnovu za merenje i analizu parametara kvaliteta električne energije u takvoj jednoj sredini. Ovakva merenja na fakultetu se već sprovode u dužem vremenskom periodu u sklopu predmeta „Kvalitet električne energije“ na master akademskim studijama. Mere se osnovni parametri kvaliteta električne energije u skladu sa srpskim standardom SRPS EN 50160, a koriste se profesionalni merni uređaj “Power Quality Analyser“ modeli C.A 8332B, C.A 8334B i C.A 8336 firme Chauvin Arnoux (Paris, France), zatim „Power Quality Analyser 43B“ firme Fluke (Everett, WA, USA), kao i termovizijska kamera “Flir E6“, firme Flir (Boston, MA, USA). Posmatra se stanje kvaliteta električne energije na nekoliko karakterističnih sabirnica na transformatorima i razvodnim ormanima u sklopu sistema za napajanje kompleksa zgrada fakulteta.

Na prethodnim savetovanjima i u literaturi prikazani su neki, parcijalni rezultati ovih merenja u kojima su objašnjena metodologija, opisana neka merna mesta i analizirani rezultati [6-9]. Uglavnom su posmatrani viši harmonici i njihov uticaj i efekti na druge potrošače. U ovom radu će biti predstavljen veći broj parametara, kao i njihovo kretanje u poslednjih deset godina. Cilj je da se agregatno, u kratkoj formi predstavi pregled dosadašnjih rezultata merenja, da analiziraju njihove eventualne promene u ovom dugogodišnjem periodu i da se ukaže na moguće trendove njihovog daljeg kretanja. Posebno detaljno će biti analizirani parametri kvaliteta električne energije na priključcima računarskog centra i FN elektrane, a rezultati će biti diskutovani poređenjem sa postojećim nacionalnim standardom SRPS EN 50160 [10]. Na bazi toga biće dati su opšti zaključci o stanju kvaliteta električne energije na FTN.

## 2. MERENJE KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Pojam kvaliteta električne energije obuhvata više aspekata od kojih su najznačajniji kvalitet isporuke, kvalitet isporučene električne energije i komercijalni kvalitet električne energije. U ovom radu će se razmatrati ovaj drugi aspekt, jer je on direktno vezan za osnovne parametre rada elektroenergetskog sistema, obuhvata i posledice uticaja nelinearnih potrošača, ali reflektuje i neke poremećaje u radu pre svega distributivnog, a i prenosnog električnog sistema. Negativne posledice nedovoljnog kvaliteta isporučene energije su brojne i idu od povećanih gubitaka u industriji i prenosu, pojavi rezonancije i nestabilnosti, do prorade zaštite i prekida u napajanju i radu potrošača (posedno onih baziranih na digitalnim tehnikama upravljanja), te ispada distribuiranih izvora i dr., a što je sve praćeno značajnim finansijskim gubicima [1-4].

Merenje parametara kvaliteta električne energije, koja se isporučuje potrošačima u FTN mreži vršena su na karakterističnim sabirnicama (PCC – *Point of Common Coupling*) u skladu sa srpskim standardom SRPS EN 50160, koje je identičan sa evropskim standardom EN 50160 [10]. Merenja su trajala najmanje 7 dana, a vrednosti su uzimane u intervalima od 10 minuta. U toku merenja posmatrani su svi ključni parametri (indikatori) kvaliteta električne energije, kao što su frekvencija, efektivna vrednost napona i struje, snaga (prividna (S), aktivna (P), reaktiva (Q) i snaga distorzije (D)), faktor snage, viši harmonici, k-faktor, fliker (kratkotrajni i dugotrajni), propadi i poskoci napona, prenaponi i podnaponi i razna izobličenja napona (impulsna i dr.).

U ovom radu prikazani su rezultati merenja u periodu 2013 – 2021. god., s tim da su zbog preglednosti prikazani rezultati samo neparnih godina, dopunjenih sa 2018. god. Treba napomenuti da 2020. god. nisu rađena merenja zbog ograničenja usled pandemije Korona-19 virusa, pa su na slikama za 2020. god. prikazani rezultati iz 2019. god.

### 2.1 Organizacija merenja

U sklopu merenja obuhvaćeno je pet od sedam zgrada koje zauzima FTN. U njima se uglavnom nalaze električni potrošači vezani za osvetljenje prostora, instalacije grejanja, centralne i pojedinačne jedinice klima uređaja, kao i veliki broj računara i prateće računarske i laboratorijske opreme. Pored toga, na krovovima FTN instalisane su dve fotonaponske elektrane (FNE), koje generišu električnu energiju direktno u mrežu.

Električni potrošači u ovim zgradama FTN-a napajaju se iz distributivne mreže preko tri distributivna transformatora TS 10/0,4 kV „ZKI“, TS 10/0,4 kV „FTN“ i TS 10/0,4 kV „MI“, a koji su dalje vezani na trafostanicu TS 35/10kV LIMAN. Više detalja o kompletnom delu distributivne mreže preko kojeg se napaja FTN, može se naći u [6].

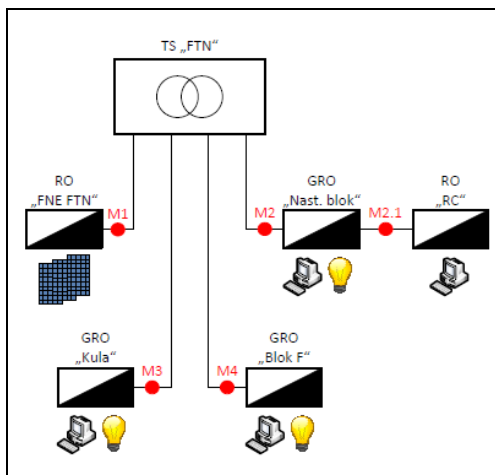
Merenja su rađena na devet karakterističnih tačaka električnih instalacija FTN-a i to:

1. Izlaznim sabirnicama FNE 8 kW „FTN Novi Sad“,
2. Razvodnom ormanu sa kog se napaja Nastavni blok,
3. Razvodnom ormaru, koji napaja računarski centar FTN,
4. Razvodnom ormanu sa kog se napaja Kula FTN-a,
5. Razvodnom ormanu sa kog se napaja Blok F,
6. Razvodnom ormanu sa kog se napajaju amfiteatri FTN-a,
7. Razvodnom ormanu sa kog se napaja zgrade mašinskih instituta (MI),
8. Izlaznim sabirnicama FNE 16,2 kW „FTN MI“,
9. Razvodnom ormanu sa kog se napaja zgrada ITC-a.

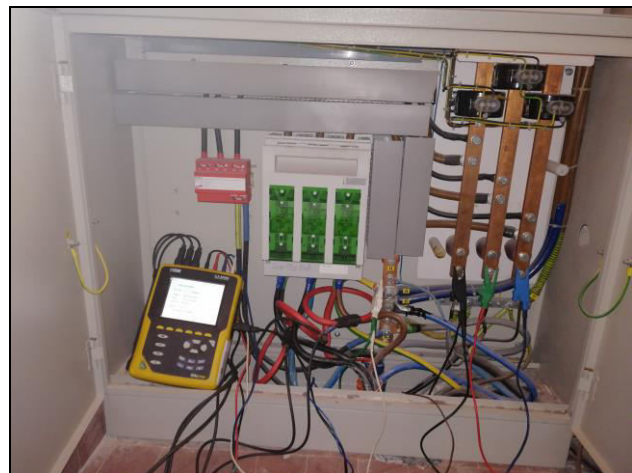
Zbog ograničenog prostora, u radu će biti prikazani i analizirani samo rezultati dobijeni merenjem na sabirnicama razvodnog ormana sa kog se napaja Nastavni blok. Neki rezultati merenja na ostalim tačkama mogu se naći u [6-9].

### 3.2 Opis mernog mesta Nastavni blok

Merno mesto GRO Nastavni blok nalazi se u prizemlju zgrade Nastavni blok i električno je povezano, tj. napaja se sa TS 10/0,4 kV FTN, kako je prikazano na slici 1 [9]. Sa ove GRO napajaju se svi potrošači u ovoj zgradi, koja ima četiri sprata, potkrovlje i suteren. Radi se o osvetljenju, klima uređajima, instalaciji grejanja, studentskoj kuhni, te nizu računara i računarske opreme. Pored toga, posebnim kablom, sa iste GRO napaja se i računarski centar FTN (RO „RC“) u kom se nalazi oko 130 računara. Merenja su vršena direktno na sabirnicama, a način postavljanja i povezivanja prikazan je na slici 2.



Sl. 1. Blok šema instalacije FTN u kojoj se nalazi merno mesto GRO Nastavni blok (M2) [9]



Sl. 2. Način priključenja mernog uređaja na mernom mestu GRO Nastavni blok (M2)

## 3. PRIKAZ REZULTATA

Zbog velikog broja mernih rezultata i ograničenog prostora fokus će biti usmeren na osnovne parametre (frekvenciju i napon), te na izobličenje talasnog oblika napona (više harmonike), kao posledicu rada raznih potrošača. Izobličenje će biti predstavljeno preko ukupne harmonijske distorzije napona (THDU). Sve veličine (parametri) će biti prikazani u vidu tri dijagrama:

- vremenske promene parametra tokom jednog ciklusa merenja od sedam dana (prikazani su rezultati za 2019. god.)
- statističke obrade u vidu kumulativne raspodele rezultata merenja sa indikacijom maksimalne, 95%, srednje i minimalne vrednosti, i
- pregleda rezultata statističke obrade za merenja od 2013. god. do 2021. god.

### 3.1 Frekvencija

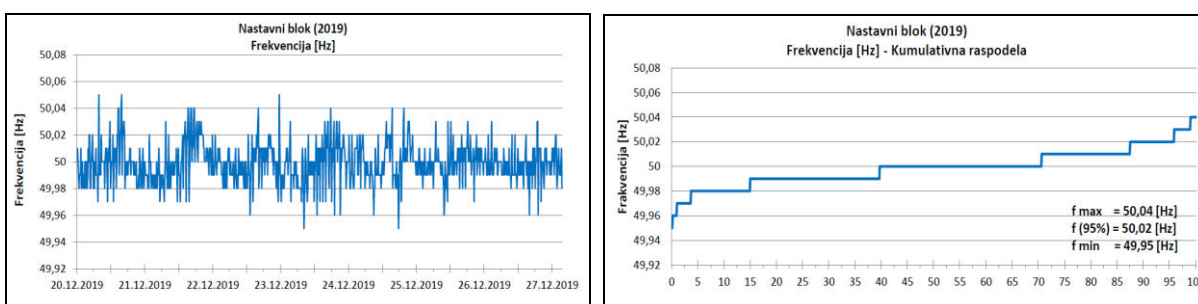
Frekvencija je osnovna karakteristika električnog sistema i parametar za definisanje njegove stabilnosti. Na slici 1 prikazani su rezultati merenja iz 2019. god. Može se uočiti varijacija vrednosti tokom merenja (slika 3 – levo), odnosno statističke vrednosti za kumulativnu raspodelu (slika 3 – desno). Rezultati za period merenja od 2013. god. do 2021. god. prikazani su na slici 4.

Pregledom rezultata može se videti da minimalna vrednost frekvencije nije bila manja od 49,88 Hz, da se 95% vrednost kretala od 49,99 Hz do 50,03 Hz, dok maksimalna nije prelazila vrednost 50,09 Hz. To znači da su relativne vrednosti odstupanja od nominalne vrednosti bila +0,18%, odnosno -0,24%, odnosno ukazuju na visoku stabilnost frekvencije (standardom SRPS EN 50160 dozvoljeno je odstupanje od  $\pm 1\%$  [10]).

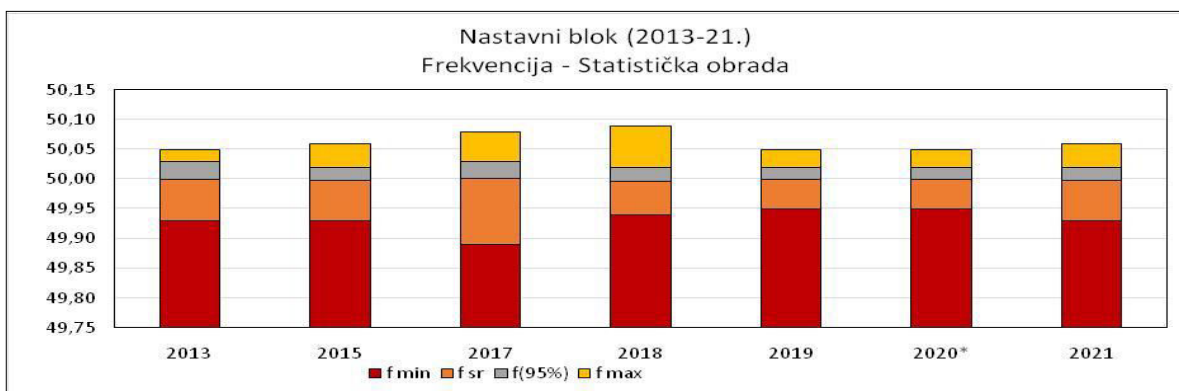
### 3.2 Napon

Efektivna vrednost napona takođe je jedna od ključnih karakteristika sistema, a na mernom mestu posmatran je međufazni (linijski) napon, čija nominalna vrednost je 400 V. Na slici 5 (levo) prikazana je vremenska promena napona tokom merenja u 2019. god., a na slici 5 (desno) kumulativna raspodela dobijena statističkom obradom. Rezultati za period merenja od 2013. god. do 2021. god. prikazani su na slici 6.

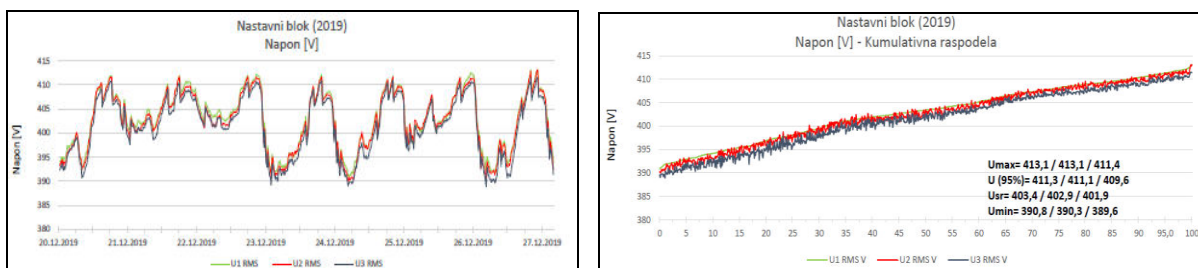
Analizom rezultata sa slike 5 može se uočiti da maksimalna varijacija efektivne vrednosti napona iznosi između 399 V i 413 V, odnosno -0,25% i +3,25%, što je u skladu sa SRPS EN 50160 standardom, koji propisuje odstupanje od  $\pm 10\%$  [10]. U standard se uklapa i 95% vrednost za sva tri međufazna napona (411,3 V; 411,1 ; 409,6 V). Ako se posmatraju višegodišnja merenja (slika 6) opseg varijacije je nešto širi i iznosi 387,5 V – 416 V, odnosno od -3,13% do +4,0%, ali i to je unutar propisane tolerancije.



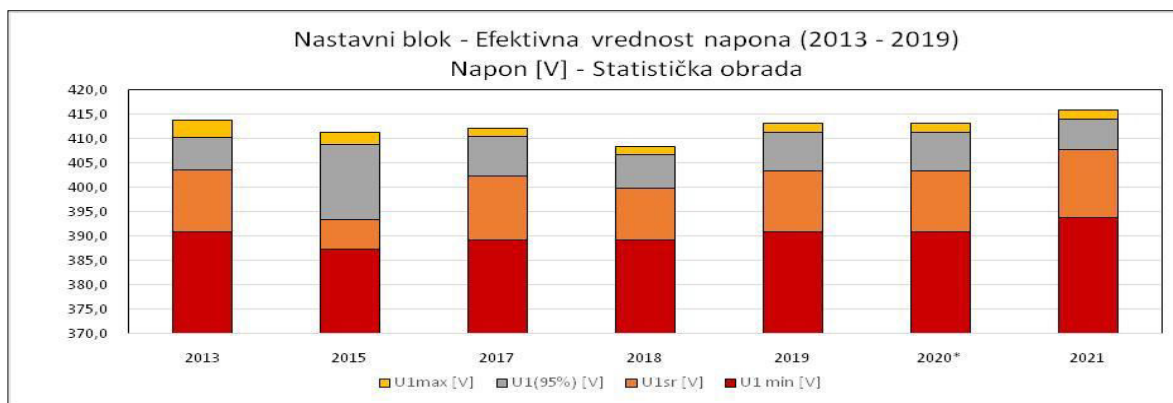
Slika 3. Vremenska promena frekvencije (levo) i njena statistička obrada (desno) za merenje iz 2019. god.



Slika 4. Prikaz opsega varijacije frekvencije po godinama (2013-2021): minimalna ( $f_{min}$ ), srednja ( $f_{sr}$ ), 95% ( $f_{95\%}$ ) i maksimalna ( $f_{max}$ ) vrednost



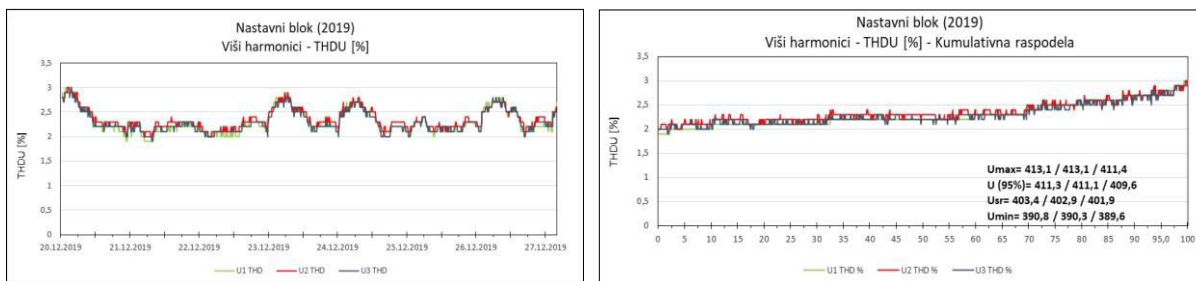
Slika 5. Vremenska promena efektivne vrednosti međufaznog napona (levo) i njena statistička obrada (desno) za merenje iz 2019. god.



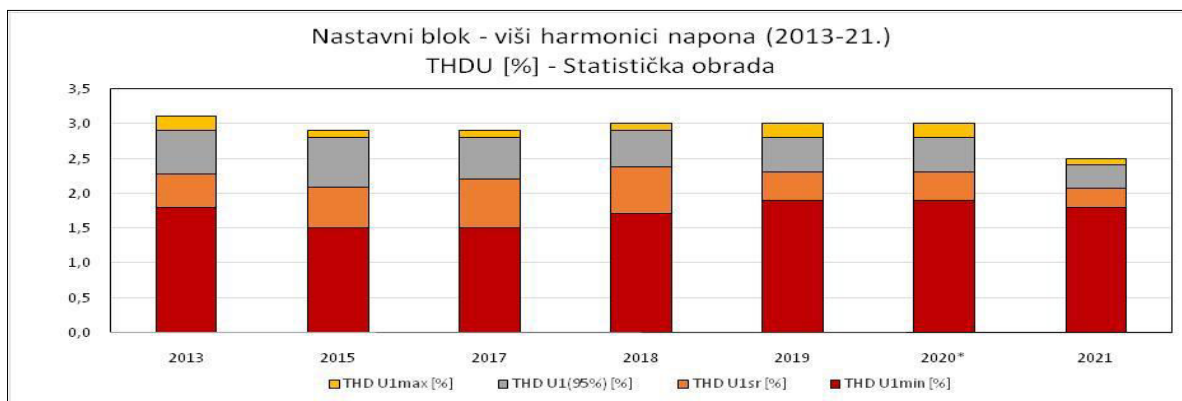
Slika 6. Prikaz opsega varijacije efektivne vrednosti napona (u [V]) po godinama (2013-2021): maksimalna ( $U_{1max}$ ), 95% ( $U_{1(95\%)}$ ), srednja ( $U_{1sr}$ ) i minimalna ( $U_{1min}$ ) vrednost

### 3.3 Viši harmonici napona

Izobličenje talasnog oblika napona posledica je pojave viših harmonika, a definiše se preko individualne i ukupne harmonijske distorzije, odnosno  $HDU_n$  [%] ( $n=2,3,..N$ ) i THDU [%], respektivno, gde je  $n$  red harmonika, a  $N=40$  [1, 10]. Izobličenje napona vezano je za rad nelinearnih potrošača, od kojih su na FTN najzastupljeniji računari i računarska oprema (monitori, štampači, skeneri i sl.). Ovi uređaji povlače iz mreže struju koja značajno odstupa od sinusnog talasnog oblika, odnosno „bogata“ je višim harmonicima, što na impedansi mreže izaziva padove napona, odnosno preslikava se na odgovarajuće izobličenje (više harmonike) napona. Postoji i odgovarajući pozadinski nivo viših harmonika napona, koji je rezultat rada drugih potrošača (van FTN) ili čak nekih generatora. Prilikom merenja, praćeno je ukupno izobličenje, a pozadinski nivo može se naslutiti u neradnim periodima ili tokom vikenda. Na slici 7 (levo) predstavljena je promena THDU tokom perioda merenja zabeležena 2019. god., a na slici 7 (desno) kumulativna raspodela ovih rezultata za THDU. Može se uočiti nizak nivo izobličenja, između 2% i 3%, što je znatno manje od SRPS EN 50160 standardom dozvoljenih 8% [1,10]. Na slici 8 predstavljene su rezultati za THDU za širi period merenja, odnosno od 2013. god. do 2021. god. Može se uočiti da je sada varijacija između minimalne i maksimalne vrednosti THDU nešto veća i kreće se između 1,1% i 3,1%. Opseg kretanja 95% vrednosti, što je u stvari najvažniji parametar, je između 2,1% i 2,9%, odnosno opet značajno ispod dozvoljenih granica.



Slika 7. Vremenska promena THDU (levo) i njena statistička obrada (desno) za merenje iz 2019. god.



Slika 8. Prikaz opsega varijacije THDU (u [%]) po godinama (2013-2021): maksimalna (THD  $U_{1max}$ ), 95% (THD  $U_{1(95\%)}$ ), srednja (THD  $U_{1sr}$ ) i minimalna (THD  $U_{1min}$ ) vrednost

#### 4. ZAKLJUČAK

Praćenje parametara kvaliteta isporučene električne energije je veoma značajan faktor kod konstatovanja stanja kvaliteta na pojedinim sabirnicama ili unutar nekog kompleksa (mikromreže). Na FTN se već niz godina prati i meri nivo većeg broja parametara kvaliteta u sklopu redovne nastave na master akademskim studijama. Rezultati merenja ukazuju na stanje na pojedinim, karakterističnim sabirnicama, a ako ono izađe van standardom definisanim granicama, onda to ukazuje na povećanu mogućnost pojave nekih od negativnih efekata i zahteva preduzimanje određenih korektivnih mera i akcija.

U radu je prikazan postupak i rezultati merenja u mikromreži FTN-a i to u jednom dužem vremenskom intervalu (2013.-2021. god.). Zbog ograničenog prostora detaljno su razmatrani samo osnovni parametri, frekvencija, napon i izobličenje napona (kroz THDU). Rezultati su prikazani u vidu dijagrama vremenskih promena, kumulativne raspodele i prikaza statističkih podataka za posmatrani vremenski period.

Poređenjem sa graničnim vrednostima datim u relevantnom standardu (SRPS EN 50160), može se zaključiti da su svi rezultati bili unutar propisanih granica (limita), te da tokom vremena nije došlo do njihove značajnije degradacije ili pojave nekog trenda, koji bi ukazivao na moguće pojave „iskakanja“ iz datih limita u budućnosti.

#### LITERATURA

- [1] Katić V.A., 2002, “Kvalitet električne energije – viši harmonici”, Monografija, Univerzitet u Novom Sadu – Fakultet tehničkih nauka, Edicija: Tehničke nauke–Monografije, Br.6, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.
- [2] \*\*\*, 2017, „Power Quality in Future Electrical Power Systems“, Edited by: Ahmed F. Zobaa; Shady H. Abdel Aleem, IET Digital Library, IET Press, London.
- [3] \*\*\*, 2019, „Power Quality in Microgrids Based on Distributed Generation“, Edited by A. Chandra and H. Geng, MDPI, Basel, Switzerland.
- [4] \*\*\*, 2020, „Power Quality in Modern Power Systems“, Edited by: P. Sanjeevikumar, C. Sharmeela, J.B. Holm-Nielsen, P. Sivaraman, Academic Press - Elsevier, London, U.K.
- [5] Savić N.S., Katić V.A., Katić N.A., Dumnić B., Milićević D., Čorba Z., 2018, “Techno-economic and environmental analysis of a microgrid concept in the university campus”, Inter. Symp. on Industrial Electronics (INDEL), Banja Luka, pp.1-6. DOI: [10.1109/INDEL.2018.8637613](https://doi.org/10.1109/INDEL.2018.8637613)
- [6] Vekić M., Katić V., Ivanović Z., 2006, “Effects of Computer Centre Operation on Harmonics in Distribution Network”, 2<sup>nd</sup> Regional Conference on Electricity Distribution i V Jugoslovensko savetovanje o elektrodistributivnim mrežama, JUKO CIRED, Zlatibor, R.2.9.
- [7] Katić V., Mujović S., 2010, „Uticaj grupisanih malih potrošača na kvalitet električne energije”, *Tehnika-Elektrotehnika*, God. LXV, br.3, pp.63-70.
- [8] Katić V., Čorba Z., Mujović S., Dimitrijević I., Denić M., 2010, “Viši harmonici u električnoj mreži FTN-a: merenja i analize uticaja rada računarskog centra”, VII Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije i Crne Gore sa regionalnim učešćem - CIRED SRB. 2010, Vrnjačka Banja, 26.09 - 01.10. 2010., Paper No.R.2.5, CD ROM.
- [9] Katić V.A., Čorba Z., Milićević D., Dumnić B., Popadić B., 2016, “Merenje viših harmonika na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu”, X Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama sa regionalnim učešćem - CIRED Srbije 2016, Vrnjačka Banja, 26-30. 09. 2016., USB Elektronski zbornik, Rad br. R-2.07, pp. 1–8.
- [10] \*\*\*, 2020, SRPS EN 50160:2012/A2:2020, „Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks”, Institute for Standardization of Serbia, Belgrade.