



## PREGLED STANDARDA I DRUGE REGULATIVE O KVALITETU ELEKTRIČNE ENERGIJE

### REVIEW OF STANDARDS AND OTHER REGULATIONS ON THE QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY

Nikola Mitrović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

#### Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

**Kratak sadržaj** – U ovom radu su detaljno objašnjeni potreba za standardizacijom u oblasti kvaliteta električne energije i njena važnost. Prikazane su određene međunarodne organizacije i udruženja kao i uloga standarda koje one proizvode. Prikazana su međusobna poređenja standarda, kao i primer primene jednog ovakvog standarda iz oblasti kvaliteta električne energije u slučaju trofaznog polumostnog invertora.

**Ključne reči:** Standardi i preporuke, Pravilnici i propisi, Kvalitet električne energije

**Abstract** – In this paper, the need for standardization in the field of electricity quality and its importance are explained in detail. Certain international organizations and associations are presented, as well as the role of the standards they produce. Mutual comparisons of standards are shown, as well as an example of the application of such a standard in the field of electricity quality in the case of a three-phase half-bridge inverter.

**Keywords:** Standards and recommendations, Rules and regulations, Electric power quality

#### 1. UVOD

Električna energija treba da zadovoljava određeni kvalitet. U cilju postizanja određenog kvaliteta električne energije, fokus je stavljen na konstantan nadzor samog kvaliteta električne energije. Imajući u vidu ove činjenice, različiti termini i definicije se koriste za kvantifikaciju problema kvaliteta električne energije u smislu različitih indeksa performansi. Štaviše, razne organizacije i instituti su razvile brojne standarde koji se primenjuju na potrošače, proizvođače i komunalna preduzeća kako bi održali prihvatljiv nivo kvaliteta električne energije [1,2]. Celokupan elektroenergetski sistem proizvodnje, prenosa, distribucije i potrošnje električne energije danas predstavlja jedan od najsloženijih tehničko-ekonomskih sistema. Zbog postojanja različitih elemenata koji su sve češće aktivni elementi, u tim mrežama se javljaju viši harmonici. Pored toga, značajna je pojava različitih poremećaja u isporuci električne energije kao što su padovi, skokovi, propadi i prekidi napona, naponska izobličenja, brze prelazne promene, kao i ostale nepoželjne pojave koje mogu izazvati teže posledice kod

#### NAPOMENA:

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

posebno osetljivih potrošača. Imajući u vidu ove činjenice, različiti termini i definicije se koriste za kvantifikaciju problema kvaliteta električne energije u smislu različitih indeksa performansi. Štaviše, razne organizacije i instituti su razvile brojne standarde koji se primenjuju na potrošače, proizvođače i komunalna preduzeća kako bi održali prihvatljiv nivo kvaliteta električne energije

#### 2. KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE

Tema kvaliteta električne energije je po prirodi veoma široka. Pokriva sve aspekte inženjeringa elektroenergetskog sistema, od analiza nivoa prenosa i distribucije do problema krajnjih korisnika. Dakle, kvalitet električne energije je postala briga elektroprivrednih preduzeća, krajnjih korisnika, arhitekata, građevinskih inženjera kao i proizvođača. Problemi kvaliteta električne energije se mogu klasifikovati na sledeći način: tranzijenti, kratkotrajne naponske varijacije, dugotrajne naponske varijacije, neuravnoteženost, izobličenje talasnog oblika napona i struje, fluktuacije napona, fluktuacije struje.

#### 3. ORGANIZACIJE KOJE IZDAJU STANDARDE

Mnogi dokumenti za kontrolu kvaliteta električne energije generisali su različite organizacije i instituti. Ovi dokumenti dolaze u tri nivoa primenljivosti i validnosti: smernice, preporuke i standardi [3,4].

Međunarodne organizacije, koje izdaju standarde (neobavezujuće) su IEC (*International Electrotechnical Commission*), CENELEC (engl. *European Committee for Electrotechnical Standardization*), i ISO (engl. *International Standards Association*).

Međunarodna stručna udruženja, koja postoje i izdaju preporuke ili standarde (neobavezujuće) su: IEEE (engl. *Institute of Electrical and Electronic Engineers – Standard Association*), CIGRE (franc. *Conseil International des Grands Reseaux Electriques*), CIRED (franc. *Congres International des Reseaux Electriques de Distribution*), UNIPEDE (franc. *Union internationale des producteurs et distributeurs d'énergie électrique*), CBEMA/ITIC (*Computer and Business Equipment Manufacturers Association/Information Technology Industry Council*) i dr.

Nacionalne standarde, izdaju nacionalne ili nadnacionalne organizacije za standardizaciju i oni predstavljaju obavezujuće norme, a u svetu su najpoznatiji standardi Evropske Unije - EN (engl. *European Norm*), nemački standardi - DIN (nem. *Deutsches Institut für Normung*), američki standardi - ANSI (engl. *American National*

Standards Institute), australijski standardi – AS (engl. *Australian Standards*), standardi Velike Britanije - BS (engl. *British Standard*), a kod nas srpski standardi – SRPS, koje izdaje Institut za standardizaciju Srbije sa sedištem u Beogradu [5, 6].

#### 4. MEĐUNARODNI STANDARDI

Većina razvijenih industrijskih zemalja sveta, kao i najznačajnije međunarodne organizacije su donele tehničke propise, preporuke ili standarde sa navođenjem graničnih vrednosti osnovnih parametara kvaliteta električne energije od kojih zavisi stabilnost rada elektroenergetskog sistema (efektivna vrednost napona, frekvencija, fazni pomeraj i sl.), kao i pravilan rad raznih električnih potrošača [5-8]. U tabeli 1 dat je pregled nekih najvažnijih iz oblasti kvaliteta električne energije, koje su donela međunarodne, odnosno nadnacionalne organizacije IEC, IEEE i EN [8]. U nastavku će širi osvrt biti dat samo za neke najčešće korišćene standarde.

Tabela 1: Pregled međunarodnih standarda vezanih za kvalitet električne energije [8]

Standards	Description
IEEE Standard 519-1992	Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems
IEEE Standard 1159-1995	Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality
IEEE Standard 1100-1999	Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment
IEEE Standard 1250-1995	Guide for Service to Equipment Sensitive to Momentary Voltage Disturbances
IEEE Standard 1366-2012	Electric Power Distribution Reliability Indices
IEC 61000-2-2	Compatibility Levels for Low-Frequency Conducted Disturbances and Signaling in Public Supply Systems
IEC 61000-2-4	Compatibility Levels in Industrial Plants for Low-Frequency Conducted Disturbances
IEC 61000-3-2	Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current Up to and Including 16 A Per Phase)
IEC 61000-4-15	Flicker Meter - Functional and Design Specifications
EN 50160	Voltage Characteristics of Public Distribution Systems
IEEE 519-1992	Permissible level of waveform distortion
IEEE Std 141-1993	Recommended Practice for Electrical Power Distribution for Industrial Plants.
IEEE Std 142-1991	Recommended Practice for Grounding of Industrial & Commercial Power System
IEEE Std 241-1990	Recommended Practice for Electric Power Systems in Commercial Buildings.
IEEE Std 242-2001	Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems
IEEE Std 446-1995	Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications
IEEE Std 493-1997	Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial & Commercial Power Systems
IEEE Std 1100-1999	Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment
IEEE Std 1250-1995	IE Equipment Disturbances, Sensitive to Guide for Service to Momentary Voltage
IEEE Std 1346-1998	Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment
IEEE Std 518-1982	IE Guide for the Installation of Electrical Equipment to Minimize Electrical Noise Inputs to Controllers from External Sources
IEEE C62.21-2003	IE Guide for the Application of Surge Voltage Protective Equipment on AC Rotating Machinery 1000 Volts and Greater
IEEE C62.22.1-1996 (R2003)	IE Guide for the Connection of Surge Arrestors to Protect Insulated, Shielded Electric Power Cable Systems
IEEE Std C62.22.1997	IE Guide for the Application of Metal Oxide Surge Arrestors for Alternating Current Systems
IEEE Std C62.41-1991	IE Recommended Practice on Surge Voltage in low Voltage AC Power Circuits.
IEEE C62.41.1-2002	IE Guide on the 'Surge Environment in Low Voltage (1000V and less) AC Power Circuits
IEEE C62.41.2-2002	IE Recommended Practice on Characterization of Surges in Low Voltage (1000V and less) AC Power Circuits
IEEE Std C62.42-1992	IE Guide for the Application of Gas-Tube and Air Gap Arrestor Low Voltage (Equal to or Less than 1000Vrms or 1200Vdc) Surge Protective Devices

#### 4.1. IEEE Standardi

Problemi kvaliteta elektricne energije se u ovom udruženju razmatraju dugi niz godina i to preko ciljanih projekata i posebnih radnih grupa. Sve oblasti kvaliteta su obuhvaćene, ali je najviše urađeno u oblasti viših harmonika, merenja i praćenja, kao i propada napona (IEEE Standard 519, IEEE Standard 1159) [9, 10]. Međutim, značajni rezultati su i iz oblasti uzemljenja, telekomunikacione opreme, pouzdanosti i dr., koje takođe utiču na kvalitet [5].

#### 4.2. CENELEC - EN 50160

Standard EN 50160 daje definicije i opisuje bitne osobine distributivnog napona na mestu predaje potrošaču u javnim niskonaponskim (NN) i sredjenaponskim (SN) mrežama pri normalnim pogonskim uslovima. Cilj standarda je da se utvrde karakteristike distributivnog napona s obzirom na frekvenciju, velicinu, talasni oblik i simetriju trofaznog napona [5]. Ovaj standard se koristi u svim zemljama Evropske Unije, kao i zemljama kandidatima, a doslovno je preveden i prihvaćen u Srbiji kao SRPS EN 50160 [11].

#### 4.3. IEC Standard serije 61000

IEC 61000 je serija standarda, koja se naziva Elektromagnetna kompatibilnost (EMC). Ona obuhvataju kompletnu problematiku EMC – kondukovane smetnje, smetnje zračenjem, električna i magnetna polja, elektrostatička pražnjenja i impulsne nuklearne elektromagnetne smetnje i izdaje se sukcesivno (do sada još nisu izdati svi planirani standardi, mada su neki doživeli i više izdanja) [12]. Ovi standardi su takođe prihvaćeni u mnogim zemljama kao nacionalni. U Srbiji se koristi niz ovih standarda (na prim. SRPS EN IEC 61000-4-3:2021), kao i odgovarajući iz Evropske Unije [13]

### 5. MEĐUNARODNE PREPORUKE, PRAVILNICI I PROPISI

Međunarodne organizacije se bave limitiranjem uticaja energetskih pretvarača na okolinu, a posebno pojavom "zagađenja" mreže višim harmonicima. Najvažnije od njih su IEC (Međunarodna elektrotehnička komisija), CENELEC (Evropski komitet za elektrotehnicku standardizaciju). Isto se naglašava važnost i drugih organizacija, a to su: IEEE (Institut inženjera elektrotehnike i elektronike) i CIGRE (Međunarodna konferencija za velike električne mreže) [5-7].

### 6. DOMAĆI STANDARDI I PREPORUKE

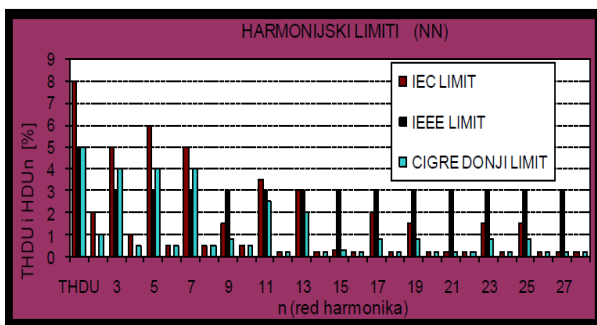
U Srbiji se koristi standard SRPS EN 50160, koji je usaglašen sa evropskim standardom EN 50160. On u stvari predstavlja doslovni prevod ovog standarda na srpski jezik i na taj način se vrši harmonizacija srpske standardizacije sa evropskom. Ovaj standard daje glavne karakteristike napona na priključcima za napajanje potrošača na javne niskonaponske i sredjenaponske sisteme distribucije električne energije u uslovima normalnog rada. Ovaj standard daje granice ili vrednosti u kojima bilo koji potrošač može očekivati da budu karakteristike napona i ne opisuje tipičnu situaciju priključenja potrošača na javnu mrežu za napajanje [11].

## 7. MEĐUSOBNO POREĐENJE

U ovom poglavlju dato je poređenje različitih standarda, gde se posmatraju harmonici napona, harmonici struje i varijacije napona.

### 7.1. Harmonici napona

Kao mera kvaliteta koristi se standard IEEE-519. Ostali standardi koji se upoređuju su IEC i CIGRE preporuke. CIGRE daje dva nivoa graničnih vrednosti, a to su gornji i donji. Postoje i gornji limiti i u IEC-u koji su dati u standard IEC 61000-2-2 i viši su od limita koji su zadati u standardz IEEE-519. Ovi limiti se retko dostižu u mreži, s tim da donose više negativnih efekata, ako se te vrednosti premaše. Donji limiti CIGRE-a imaju manju verovatnoću negativnih efekata i nešto viši od limita koji su zadati u standardu IEEE-519 za harmonike od reda  $n \leq 7$ , ali su strožiji za harmonike većih redova.



Sl.1. Poređenje IEC, IEEE-519 i CIGRE (donjeg) limita za NN mrežu [5]

### 7.2. Harmonici struje

Kao mera kvalitete kod harmonika struja ponovo se koristi standard IEEE-519 koji se poredi sa standardom IEC 61000-3-2 [5, 14]. Kod IEC 61000-3-2 treba napomenuti da se merenje strujnih harmonika vrši na linijskom provodniku, a ne na neutralnom. Međutim, za jednofazne aplikacije to se može uraditi na neutralnom provodniku, ali ne i u trofaznim aplikacijama [14].

### 7.3. Varijacije napona

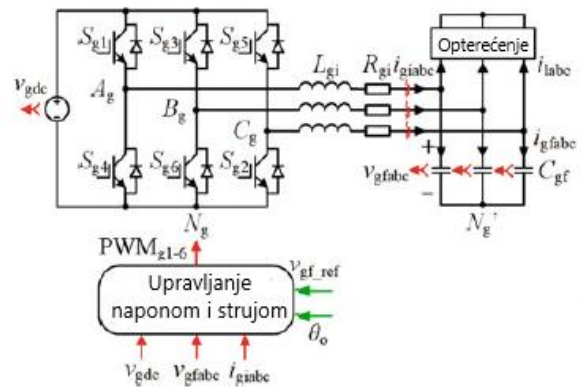
Kod standarda IEC 61000-4-30 pad napona je definisan kao kratko smanjenje efektivnog napona od 10% ili više ispod preporučenog opsega u periodu od 1/2 ciklusa do 1 min. Uzrok tome je iznenadna velika promena opterećenja kroz impedansu izvora, kao što je pokretanje motora ili događaji kratkog spoja. Rast napona kod standard IEC 61000-4-30 definisan je kao definisano kao trenutno povećanje efektivne vrednosti (R.M.S., engl. *Root Mean Square*) napona za 10% ili više iznad preporučenog opsega napona opreme za period od 1/2 ciklusa do 1 min. Povećanja, poskoci napona su manje uobičajena od padova, propada napona i obično su povezana sa uslovima kvara u sistemu ili rasterećenja velikih potrošača.

## 8. PRIMER REALIZACIJE

U ovoj glavi će biti detaljno objašnjeno aktivno rešenje, tj. jedan inverter koji je simuliran u Matlab/Simulink okruženju i njegovi odzivi će biti detaljno pojašnjeni. Koristiće se standard IEEE-519 za harmonike napona i struje.

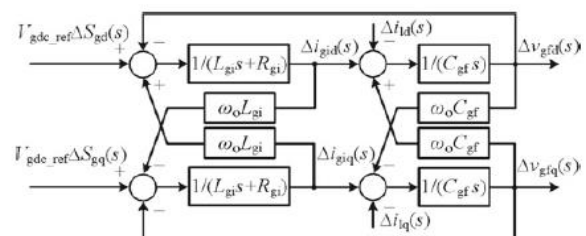
## 8.1. Fundamentalni principi

Uređaj za neprekidno (besprekidno) napajanje - UPS (engl. *Uninterruptable Power Supplies*) obezbeđuju visokokvalitetno napajanje čak i kada su električne mreže isključene. Generalno, UPS-ovi imaju ulogu i kod poboljšanja problema kvaliteta napona, uključujući odstupanja amplitude napona, harmonike napona i/ili neravnoteže napona [15]. Ovde se koristi jedan trofazni mostni inverter čija je šema i način upravljanja prikazana na slici 2.



Sl.2. Šema upravljanja trofaznog polumostnog invertora sa opterećenjem

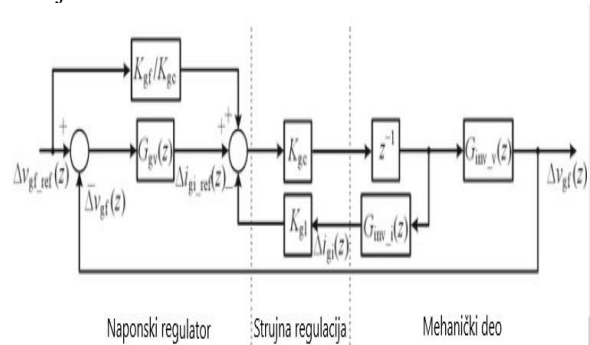
Model postrojenja UPS sistema je prikazan na slici 3., gde su termini unakrsnog spajanja uvedeni transformacijama okvira. Takvi termini unakrsne sprege će uticati na stabilnost sistema.



Sl.3. Model postrojenja UPS-a

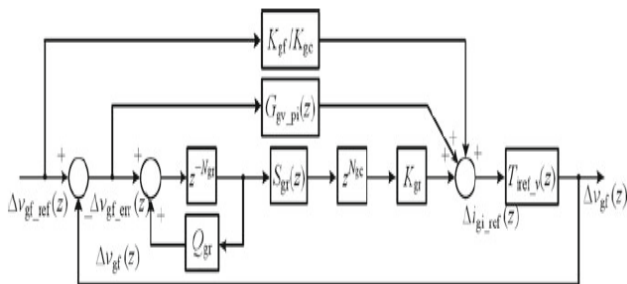
## 8.2. Simulacija modela

Strujni regulator ima za cilj da ograniči struje pretvarača i preoblikuje sisteme, posebno za prigušivanje LC rezonancija, tako da se regulator napona može bolje dizajnirati.



Sl.4. Blok dijagram strujne regulacije u z-domenu

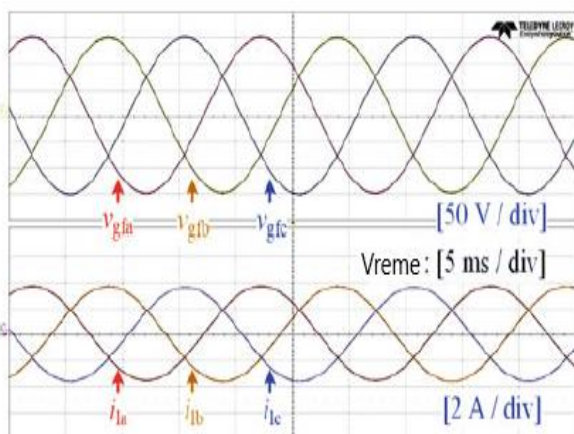
U tom smislu, trebalo bi da se uzme slučaj prenosne funkcije sa trenutne reference  $\Delta I_{gi\_ref}$  na napon kondenzatora  $\Delta v_{gi}$ . Na slici 5. prikazana je detaljna blok šema naponskog regulatora kod ovakvog rešavanja problema kvaliteta energije. Kontroler napona ima za cilj da eliminiše greške praćenja napona i odbaci smetnje. S obzirom da je referenca napona konstanta u d-osi i nula na k-osi, PI kontroler je dovoljan za praćenje napona bez ikakve greške. Ovaj model sadrži i osnovnu jedinicu kašnjenja perioda  $z^{N_{gr}}$ , konstantu oko jedan  $K_{gr}$ , niskopropusni filter  $S_{gr}(z)$  koji je ograničen na 500 Hz prema standardu IEEE 519, jedinicu fazne kompenzacije  $z^{N_{gc}}$  i proporcionalno pojačanje  $K_{gr}$  [15].



Sl.5. Detaljna blok šema naponskog regulatora

### 8.3. Rezultati simulacije

Na slici 6. prikazani su odzivi struje i napona linearnog rezistivnog opterećenja, gde se primećuje da su odzivi sinusoidalnog oblika, što je bilo i očekivano. THD ovde iznosi 1.39%, što je u skladu sa standardom IEEE-519, gde ograničenje iznosi 3% [15].



Sl.6. Odzivi napona linearnog rezistivnog opterećenja

## 9. ZAKLJUČAK

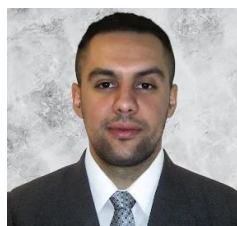
Za ograničenje i pravilan rad u distributivnim i elektroenergetskim sistemima postoje različite organizacije i udruženja koja izdaju standarde za poboljšanje kvaliteta električne energije, kao što su IEC, IEEE, CENELEC, CIGRE, ISO, CEE itd. Njihovi standardi postavljaju ograničenja za određene probleme koje pogoršavaju kvalitet električne energije. Rešenja za probleme kvaliteta električne energije ukratko su klasifikovana na pasivna i aktivna rešenja. Pasivna rešenja koriste pasivne komponente za poboljšanje kvaliteta električne energije.

Alternativno, aktivna rešenja uključuju energetske elektronske uređaje ili opremu. U energetske sistemima sa više elektronike, aktivna rešenja igraju sve važniju ulogu u kondicioniranju kvaliteta električne energije.

## 10. LITERATURA

- [1] D.A. Paice, „Power Electronic Converter Harmonics”, IEEE Press, Piscataway, USA, 1996
- [2] J. Arrillaga, B.C. Smith, N.R. Watson, A.R. Wood, “Power System Harmonic Analysis,” John Wiley and Sons, Chichester, U.K., 1997
- [3] M.A.S. Masoum, E.F. Fuchs, ”Power Quality in Power Systems and Electrical Machines”, 2<sup>nd</sup> Edition, Elsevier Science, Amsterdam, 2015.
- [4] G.T. Heydt, ”Electric Power Quality“, Star in a Circle Publications, 1991.
- [5] V. Katić, “Kvalitet električne energije – viši harmonici”, Monografija, Univerzitet u Novom Sadu - Fakultet tehničkih nauka, Br. 6, Novi Sad, 2002
- [6] V. Katić, A. Tokić, T. Konjić, “Kvalitet električne energije”, TEMPUS-CEFES, FTN, Novi Sad, 2007
- [7] V.Katić, "Network Harmonic Pollution - A Review and Discussion of International Standards and Recommendations", IEEE International Power Electronic Congress - CIEP'94, Puebla (Mexico), 21-25 Aug. 1994, pp.145-151,
- [8] V.A. Deshmukh, “A general review of power quality standards and terminologies”, Journal of University of Shanghai for Science and Technology, Vol. 23, Issue 9, Sep.2021, pp.864-901.
- [9] IEEE Std 1159-2019: “Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”, IEEE, New York, 2019.
- [10] IEEE Standard 519-1992: “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems”, IEEE, New York, 1993.
- [11] SRPS EN 50160 2012 / A2:2020, “Karakteristike napona napajanja električne energije javnom distributivnom mrežom”, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, 2020.
- [12] <http://www.iec.com>
- [13] \*\*, „Spisak srpskih standarda iz oblasti elektromagnetske kompatibilnosti“, Sl. glasnik RS, br. 37, 2019.
- [14] M.N.Z. Abidin, “IEC 61000-3-2 Harmonics Standards Overview”, Schaffner EMC Inc., Edison, NJ, USA
- [15] J. Fang, “More-Electronics Power Systems: Power Quality and Stability”, Springer, Germany, 2021

### Kratka biografija:



**Nikola Mitrović** rođen je u Loznici 1992. god. Osnovne studije završio je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu 2020. godine iz oblasti Elektrotehnika i računarstvo, smer Elektroenergetski sistemi. Master rad, na istom fakultetu odbranio je septembra 2022. god.

Kontakt:

[nikolamitrovicftn@gmail.com](mailto:nikolamitrovicftn@gmail.com)