

# Analiza kvaliteta električne energije na satnom nivou kod priključenja elektrana na obnovljive izvore energije

## Power Quality Analysis for the RES Connection Using Hourly Resolution Data

Miroslav Žerajić\*, Milan Stojanović\*\*

\* AD Elektromreža Srbije

\*\* Elektroenergetski koordinacioni centar

**Rezime** - U okviru analiza potrebnih za procenu uticaja priključenja nove elektrane na obnovljive izvore električne energije, na simulacionom modelu se vrši analiza kvaliteta električne energije koja obuhvata: Procenu emisionih nivoa naponske nesimetrije u tački priključenja, procenu emisionih nivoa pojedinačnih komponenti viših harmonika u tački priključenja i procenu emisionih nivoa kratkotrajnih i dugotrajnih flikera u tački priključenja. Limiti za prethodno nabrojane parametre se definišu Pravilima o radu prenosnog sistema (na nacionalnom nivou) ili međunarodnim standardima. Prema međunarodnim standardima, limiti se smatraju narušenim ako je vrednost nekog od parametara iznad dozvoljene granice u više od 5% posmatranog perioda. Konvencionalni način izvršavanja analiza podrazumeva proračune za najkritičniji režim - kada je snaga tropolnog kratkog spoja u tački priključenja minimalna i kada je nova elektrana angažovana maksimalnom snagom. Ovakvom analizom se dobijaju rezultati na osnovu kojih se, u slučaju eventualne neusaglašenosti, definišu korektivne mere za njeno otklanjanje. Elektrana na obnovljive izvore energije nije angažovana maksimalnom snagom tokom cele godine, i zbog toga proizvođači opreme nivoa viših harmonika daju za pun opseg mogućeg angažovanja elektrane. U radu će biti predstavljeni rezultati analize koja se izvršava za svaki sat na periodu od jedne godine, uvažavajući realno angažovanje nove elektrane korišćenjem programskog jezika DPL (*DIgSILENT Programming Language*) u programskom paketu DIgSILENT PowerFactory. Time se dobija trajanje eventualne narušenosti limita nekog od parametara, a samim tim, mnogo realniji rezultati u odnosu na rezultate dobijene analizom na karakterističnom najkritičnijem režimu.

**Ključne reči** - kvalitet električne energije, DIgSILENT PowerFactory, DPL, 8760 sati

**Abstract** - Analyses necessary for the new power plant connection contain the following power quality analyses carried-out using the simulation model: Estimation of the emission level of the voltage waveform asymmetry at the point of connection, estimation of the high harmonic components at the connection point and estimation of the emission level of long-term and short-term flicker. Limits for the previously mentioned parameters

have been defined in the National Grid Code (at the national level) or in the international standards. According to the international standards, the limit is considered violated if the duration of the parameter value violation exceeds 5% of the monitored period. Conventional approach of power quality analysis through software tool assumes only analysis for the most critical regime: when the short-circuit power at the point of connection is the lowest and the new power plant produces maximum active power. Based on this approach mitigation measures for improving power quality supply are sometimes suggested to the plant investor. It should be noted that Renewable Energy Sources (RES) do not have maximum output power during the whole year, and consequently, power quality deterioration is much less than in the critical regime observed in the simulations. For power quality simulation purposes, technical sheets of the equipment contain high harmonic levels for the full operation range are used from which usually the worst (highest) harmonic injections are considered for modelling RES as a harmonic source. In this paper, the results of power quality analyses for the RES connection using hourly resolution data for the one-year period based on DPL (*DIgSILENT Programming Language*) in DIgSILENT PowerFactory software package will be presented. This approach gives the duration of the limit violation, and consequently, more reliable results in comparison with the results of the conventional approach.

**Index Terms** - power quality, DIgSILENT PowerFactory, DPL, 8760 hours

### I UVOD

Kvalitet električne energije predstavlja jedan od najbitnijih aspekata u snabdevanju krajnjih kupaca električnom energijom. Izvori naponske nesimetrije, viših harmonika i flikera su prisutni na svim naponskim nivoima elektroenergetskog sistema, počevši od naponskog nivoa za priključak domaćinstava (potrošači koji sadrže komponente energetske elektronike i solarne elektrane na krovovima stambenih objekata), preko industrijskih potrošača i elektrana na obnovljive izvore koje su priključene na distributivni sistem, do velikih industrijskih potrošača i elektrana na obnovljive izvore velikih snaga koje su priključene na prenosni sistem. Dodatno, kao izvor naponske

nesimetrije, viših harmonika i flikera moguće je posmatrati i interkonektivne dalekovode, kada susedni elektroenergetski sistemi (EES) mogu doprineti pogoršanju kvaliteta električne energije na interkonektivnim transformatorskim stanicama (TS), kao i njima susednim TS. Međunarodni standardi [1-3], propisuju gornje dozvoljene granice parametara kojima se opisuje kvalitet električne energije u svakoj tački sistema (i distributivnog i prenosnog). Standardima su definisane dve vrste nivoa: planski i emisioni. Planski nivo podrazumeva uticaj svih objekata na kvalitet električne energije u nekoj tački sistema, dok emisioni nivo predstavlja uticaj svakog objekta pojedinačno na kvalitet električne energije u nekoj tački sistema. U Srbiji se kvalitet električne energije još uvek nedovoljno prati, što posebno dolazi do izražaja prilikom priključenja industrijskih objekata veće snage, koji strukturom svoje potrošnje mogu značajno da utiču na izobličenja naponskog talasa u tački priključenja. Izobličenja naponskog talasa koja nastaju kao posledica priključenja jednog objekta se dalje propagiraju i negativno utiču na rad susednih proizvodnih ili potrošačkih objekata. Da bi se potencijalni problem predvideo i na vreme sprečio, neophodno je još u ranoj fazi razvoja projekta izvršiti analize uticaja objekta koji se priključuje na kvalitet električne energije. U nastavku rada će biti prikazana nova metodologija za procenu uticaja novog proizvodnog objekta na harmonijska izobličenja u tački priključenja na prenosni sistem. Ova metodologija može da se koristi i kod priključenja proizvodnih objekata na distributivni sistem ukoliko postoji detaljan model distributivnog sistema. Pošto je do sada u procesu priključenja na prenosni sistem ovakva analiza rađena za slučaj priključenja vetroelektrana, zbog mogućnosti poređenja rezultata, primena nove metodologije će biti prikazana na njihovom primeru. Granične vrednosti pojedinačnih komponenti viših harmonika koje ne smeju da budu narušene priključenjem novog objekta na prenosni sistem su definisane Pravilima o radu prenosnog sistema [4].

## II OPIS DOSADAŠNJE METODOLOGIJE U PROCESU PRIKLJUČENJA VETROELEKTRANA NA PRENOSNI SISTEM

U procesu priključenja na prenosni sistem, sve analize stacionarnih stanja (tokovi snaga, analiza sigurnosti i proračun struja kratkih spojeva) su se do sada izvršavale na karakterističnim režimima rada EES: režim zimskog maksimalnog opterećenja, režim letnjeg maksimalnog opterećenja i režim minimalnog letnjeg opterećenja. Analiza uticaja nove vetroelektrane na nivoe viših harmonika se u dosadašnjim procesima priključenja izvršavala na jednom (najkritičnijem) karakterističnom režimu. To je po pravilu režim letnjeg minimalnog opterećenja, kada snaga trolnog kratkog spoja u subtranzijentnom režimu ( $S_k''$ ) u tački priključenja ima minimalnu vrednost. Takođe, princip modelovanja je takav da se detaljno modeluje samo kompleks vetroelektrane, dok se ostatak prenosnog sistema modeluje ekvivalentnom impedansom fiksnog odnosa  $X/R$ , minimalnom vrednošću snage trolnog kratkog spoja ( $S_k''$ ). Pretpostavka u procesu modelovanja je da u ostatku sistema ne postoje drugi izvori viših harmonika. Vrednosti viših harmonika koje proizvodi svaka vetroturbina su ulazni podatak i dobijaju se od proizvođača vetroturbina u obliku strujnih izvora izraženih procentualno u odnosu na osnovni harmonik. Vrednosti viših harmonika se od proizvođača vetroturbina dobijaju za pun

opseg generisanja aktivne snage, obično u koracima od po 10% maksimalne aktivne snage. Konvencionalni način tretiranja pojedinačnih komponenti viših harmonika je takav da se u simulacionom modelu implementira najkritičniji mogući spektar, a vetroelektrana angažuje maksimalnom aktivnom snagom. Ovakvim pristupom se ide na stranu sigurnosti i jedino je moguće proračunati najkritičnije emisione nivoe komponenti viših harmonika, jer je ostatak sistema modelovan ekvivalentnom impedansom bez uticaja drugih izvora izobličenja u ostatku sistema. Takođe, ovakvim pristupom se dobiju rezultati samo za jedan vremenski trenutak, čime se gubi informacija o trajanju eventualnog narušenja limita. Trajanje narušenja limita je bitno jer međunarodni standardi definišu toleranciju narušenja limita u trajanju od 5% posmatranog perioda (perioda merenja). Ukoliko konvencionalni način analiziranja pokaže narušenje limita nekog višeg harmonika, ne može se odrediti koliko dugo to narušenje traje, i automatski se donosi preporuka da je neophodno izvršiti dodatna merenja kvaliteta električne energije u toku probnog rada elektrane kojim bi se preciznije utvrdio uticaj pomenutog objekta na kvalitet električne energije i eventualno predložile korektivne mere za otklanjanje narušenja. Mere koje se u tom slučaju definišu su najčešće ugradnja filtera reda višeg harmonika koji je narušen.

Dodatno na prethodne aproksimacije, ovakav način modelovanja ne uzima u obzir promenljivost vrednosti snage trolnog kratkog spoja u tački priključenja, koja se u realnom vremenu menja u toku godine.

## III OPIS NOVE METODOLOGIJE U PROCESU PRIKLJUČENJA VETROELEKTRANA NA PRENOSNI SISTEM

Zbog velikog broja novih zahteva za priključenje, u cilju optimizacije korišćenja postojećih prenosnih kapaciteta i definisanja neophodnih ojačanja prenosnog sistema u različitim scenarijima rada EES, očekuje se primena nove metodologije za izradu analiza stacionarnog stanja. Nova metodologija za izradu analiza stacionarnog stanja podrazumeva proračune koji se izvršavaju za svaki sat u godini, najmanje za period od jedne godine. Nova metodologija predviđa tzv. „tržišne i mrežne analize“, gde se kao ulazni podatak za analize stacionarnih stanja (mrežne analize) uzimaju rezultati tržišnih analiza koje na osnovu različitih klimatskih uslova, troškova angažovanja i vrednosti potrošnje kreiraju više mogućih scenarija, čime se napušta koncept analiziranja samo tri karakteristična režima već broj režima postaje značajno veći, a analize na novim režimima daju značajno realnije i tačnije rezultate od konvencionalnih karakterističnih režima. Prelaskom na ovakav način izrade studija priključenja, javlja se mogućnost primene nove metodologije i kod analize uticaja novih objekata na nivoe viših harmonika.

Nova metodologija za proračun harmonijskih izobličenja u tački priključenja podrazumeva izvršavanje analiza na satnom nivou, čime se:

1. uvažava realno angažovanje ne samo posmatrane vetroelektrane, nego i svih ostalih proizvodnih objekata u sistemu;
2. u zavisnosti od angažovanja vetroelektrane, uvažavaju vrednosti viših harmonika za dato angažovanje;

3. uvažava promena snage trolinog kratkog spoja u tački priključenja u svakom satu u skladu sa realnim stanjem u sistemu;
4. u slučaju eventualnog narušenja limita nekog višeg harmonik određuje trajanje tog narušenja;
5. u zavisnosti od tipa nivoa koji se računa (planski ili emisioni) uključuje ili isključuje uticaj ostalih izvora viših harmonika u sistemu.

Na ovaj način se značajno unapređuje konvencionalna metodologija jer se umesto rezultata za samo jedan vremenski trenutak dobijaju nivoi svakog višeg harmonika za najmanje 8760 sati.

#### IV PROGRAMSKI PAKET I POMOĆNI ALATI ZA IZVRŠAVANJE PRORAČUNA

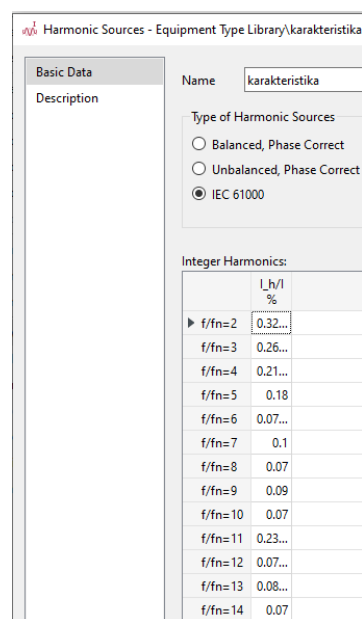
Za proračune harmonijskih tokova snaga se koristi programski paket DIGSILENT PowerFactory [5] koji pruža mogućnost unosa spektra viših harmonika u obliku koji dostavlja proizvođač vetroturbin. Za potrebe ove analize, proizvodnja vetroelektrane je proračunata na osnovu realnih, izmerenih brzina vetra na lokaciji posmatrane vetroelektrane i krive snage vetroagregata koji će biti izgrađeni na datoj lokaciji. Na Slici 1 je prikazan standardni format u kojem proizvođač dostavlja ulazne podatke o višim harmonicima, dok je na Slici 2 prikazan unos spektra (karakteristike) viših harmonika u programski paket DIGSILENT PowerFactory. S obzirom na to da se u ovom radu analiziraju emisioni nivoi viših harmonika vetroelektrane, simulacion model na kome su izvršene analize se sastoji od detaljnog modela vetroelektrane (vetroagregati, blok transformatori 0.69/33 kV/kV, srednjenaponski kablovi i mrežni transformatori 110/33 kV/kV. Ostatak prenosnog sistema je modelovan ekvivalentnom Tevenenovom impedansom, za obe metodologije čiji se rezultati upoređuju.

P <sub>bin</sub> (%)	%										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
H	ln(%)	ln(%)	ln(%)	ln(%)	ln(%)	ln(%)	ln(%)	ln(%)	ln(%)	ln(%)	ln(%)
2	0.1195	0.1016	0.1135	0.1135	0.1255	0.1613	0.1434	0.1673	0.1792	0.1972	0.1972
3	0.1756	0.1672	0.1756	0.1672	0.1589	0.1756	0.1756	0.1923	0.2091	0.2258	0.2091
4	0.0644	0.0537	0.0591	0.0644	0.0698	0.0805	0.0966	0.1074	0.1181	0.1181	
5	0.1945	0.1331	0.1024	0.1126	0.1536	0.1638	0.1638	0.1741	0.1843	0.1843	0.1843
6	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07	0.08	0.07	0.07
7	0.0793	0.0617	0.0705	0.0617	0.0617	0.0705	0.0705	0.0793	0.0881	0.0881	0.0881
8	0.0357	0.0357	0.0429	0.0429	0.0429	0.0429	0.0357	0.0429	0.05	0.05	0.05
9	0.0632	0.0553	0.0553	0.0711	0.0711	0.0791	0.0711	0.0711	0.0711	0.0711	0.0791
10	0.0514	0.0514	0.0514	0.0514	0.0514	0.0514	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
11	0.0841	0.1682	0.1229	0.11	0.0776	0.0906	0.0971	0.1424	0.1747	0.1488	0.1424
12	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.0525	0.0525	0.0525	0.06	0.0525	0.06
13	0.0693	0.13	0.0867	0.0693	0.0693	0.078	0.078	0.0953	0.1213	0.0693	0.0867
14	0.0506	0.0422	0.0422	0.0422	0.0422	0.0422	0.0422	0.0591	0.0591	0.0591	0.0591
15	0.0552	0.0631	0.0631	0.0631	0.0631	0.0631	0.071	0.071	0.0631	0.0631	0.071
16	0.0806	0.0691	0.0806	0.0806	0.0691	0.0691	0.0691	0.0806	0.0806	0.0691	0.0691
17	0.1665	0.0999	0.0999	0.1332	0.111	0.111	0.1332	0.1443	0.1554	0.1332	0.1443
18	0.0591	0.0492	0.0492	0.0492	0.0492	0.0492	0.0492	0.0591	0.0591	0.0591	0.0591
19	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
20	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.04	0.04	0.04	0.04	0.032	0.04
21	0.0613	0.0491	0.0491	0.0491	0.0491	0.0491	0.0491	0.0491	0.0491	0.0491	0.0491

**Slika 1.** Prikaz ulaznih podataka o višim harmonicima u zavisnosti od angažovanja vetroelektrane

Za ovakvu vrstu proračuna, zbog velikog broja ponavljanja proračuna, neophodno je kvalitetno pripremiti ulazne podatke. Za uređivanje ulaznih podataka, korišćen je Microsoft Excel, gde se na osnovu angažovanja vetroelektrane za 8760 sati, maksimalne snage vetroturbin (P<sub>max</sub>) i na osnovu nivoa viših harmonika za pun opseg angažovanja kreiraju spektri viših harmonika do 50.

reda za svih 8760 sati. Na Slici 3 je prikazan koncept pripreme ulaznih podataka sa automatizovanim kreiranjem karakteristika za svih 8760 sati korišćenjem Excel VBA (*Visual Basic for Applications*)



**Slika 2.** Prikaz unosa spektra viših harmonika u programski paket DIGSILENT PowerFactory

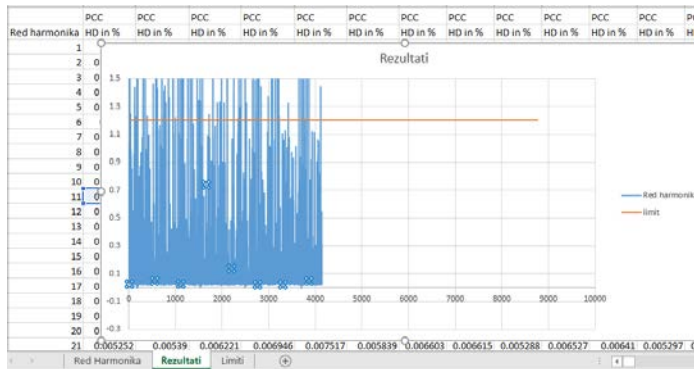
Proizvodnja u MW	% u odnosu na P <sub>max</sub>	P <sub>max</sub>
1	1.767	31
2	2.337	41
3	1.824	32
4	1.767	31
5	2.337	41
6	1.881	33
7	1.995	35
8	1.71	30
9	1.254	22
10	0.57	10
11	0.399	7
12	0.342	6
13	0.342	6
14	0.342	6
15	0.342	6
16	0.456	8
17	0.57	10
18	1.482	26
19	1.539	27
20	1.71	30
21	1.824	32
22	1.197	21

**Slika 3.** Priprema ulaznih podataka – angažovanje za 8760 sati i automatsko kreiranje karakteristika za 8760 sati

Za učitavanje spektra za svaki sat, izvršavanje proračuna za svaki sat i ispis rezultata nazad u Microsoft Excel je kreirana skripta korišćenjem programskog jezika DPL (*DIGSILENT Programming Language*) [6] u programskom paketu DIGSILENT PowerFactory.

Nakon izvršavanja proračuna, jednostavnom obradom dobijenih rezultata se utvrđuje da li je limit nekog višeg harmonika narušen, što je prikazano na Slici 4. U slučaju da je limit narušen, računa se trajanje narušenosti. Ukoliko je trajanje narušenosti

veće od 5% posmatranog perioda, indikativno se dobija dobar pokazatelj da će i u realnosti taj limit biti narušen, nakon čega se pristupa definisanju korektivnih mera.

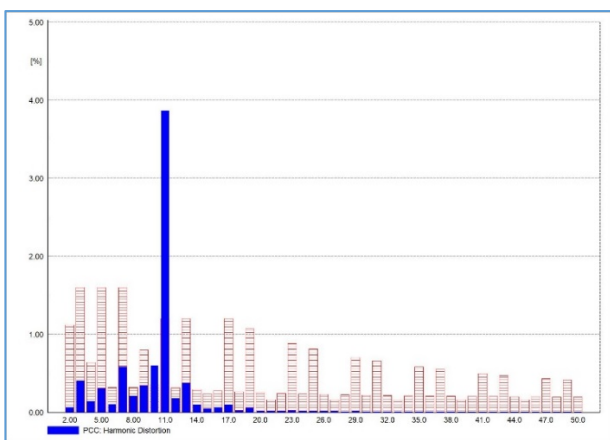


**Slika 4.** Prikaz rezultata proračuna sa naznačenim limitom izabranog reda višeg harmonika

V POREĐENJE REZULTATA KONVENCIONALNE I NOVE METODOLOGIJE NA PRIMERU PRIKLJUČENJA VETROELEKTRANE

U cilju boljeg razumevanja značaja nove metodologije, u ovom poglavlju će biti dat primer primene konvencionalne i nove metodologije na analizu emisionih nivoa vetroelektrane koja se priključuje na prenosni sistem naponskog nivoa 110 kV.

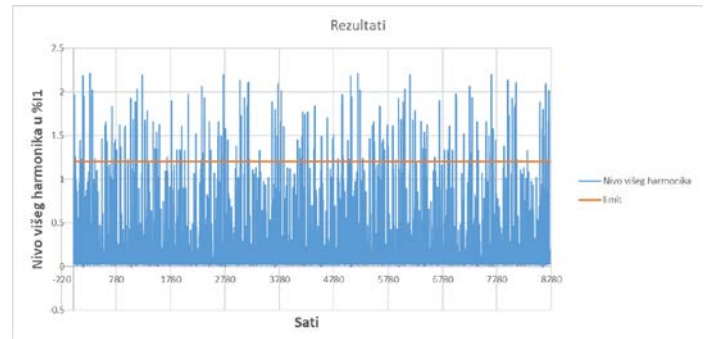
Konvencionalnom metodom, ulazni podatak minimalne vrednosti snage kratkog spoja u tački priključenja je 915 MVA. Maksimalna snaga vetroturbinne iznosi 5,7 MW. Proračunom harmonijskih tokova snaga za najkritičniji režim, kao rezultat se dobija narušen nivo 11. harmonika u tački priključenja posmatrane vetroelektrane. Na Slici 5 su plavom bojom označeni rezultati analize – nivoi svih pojedinačnih viših harmonika do reda 50., dok su isprekidanim bar dijagramima naznačeni limiti definisani Pravilima o radu prenosnog sistema.



**Slika 5.** Rezultati analize konvencionalnom metodom – nivo viših harmonika (plava boja) i limiti definisani Pravilima o radu prenosnog sistema (isprekidani bar dijagrami)

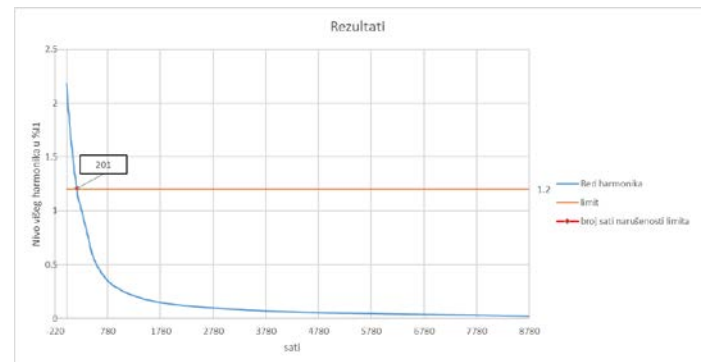
Za istu vetroelektranu, izvršen je proračun za 8760 sati, za različita (realna) angažovanja i vrednosti snage trolnog kratkog spoja u tački priključenja. Ulazni podatak minimalne

vrednosti snage kratkog spoja u tački priključenja je niz od 8760 vrednosti snaga trolnog kratkog spoja prethodno proračunat na modelu celog prenosnog sistema Srbije, za svaki sat, korišćenjem programskog jezika DPL. Maksimalna snaga vetroturbinne iznosi 5,7 MW. Rezultati primenom nove metodologije su prikazani na Slici 6.



**Slika 6.** Rezultati primenom nove metodologije – prikaz nivoa 11. harmonika

Kada se dobijeni rezultati poredaju u opadajućem redosledu, jednostavno se može dobiti broj sati narušenosti limita, što je prikazano na Slici 7.



**Slika 7.** Broj sati narušenosti limita

Od ukupno analiziranih 8760 sati, nivo 11. višeg harmonika je bio narušen u 201 satu, što iznosi oko 2,3% ukupnog analiziranog perioda.

To znači da je trajanje narušenosti limita manje od 5% ukupnog analiziranog perioda, i indikativno pokazuje da nije neophodno definisati korektivne mere.

VI ZAKLJUČAK

Cilj rada je prikaz nove metodologije za analizu kvaliteta električne energije korišćenjem ulaznih podataka sa satnom rezolucijom. U odnosu na konvencionalnu metodologiju, nova metodologija pruža mogućnost određivanja trajanja eventualne narušenosti limita, čime je značajno olakšana procena o definisanju korektivnih mera za otklanjanje primećene narušenosti (neusaglašenosti). Nova metodologija može da se primenjuje i za proračun planskih i za proračun emisionih nivoa, u zavisnosti od simulacionog modela na kojem se primenjuje. Proračun planskih nivoa je značajan za operatora prenosnog i

distributivnog sistema, dok je proračun emisionih nivoa značajan kod priključenja objekata na sistem. Prednost prikazane metodologije u odnosu na dosadašnji način analize kvaliteta električne energije je u tome što je ona znatno približnija terenskim merenjima kvaliteta električne energije koja se mogu izvršiti tek kada proizvodni objekat uđe u probni rad. Primenom ove metodologije mogu se dobiti znatno pouzdaniji pokazatelji parametara kvaliteta električne energije u periodu pre izgradnje samog objekta. Sam način na koji je nova metodologija osmišljena zahteva dodatno poboljšanje u budućnosti u vidu optimizacije brzine izvršavanja proračuna i obrade ulaznih podataka i rezultata, što će je učiniti još lakše primenljivom. Takođe, potrebno je uporediti rezultate analize kvaliteta električne energije dobijene novom metodologijom sa rezultatima terenskih merenja kako bi se potvrdila njena tačnost i pouzdanost.

#### LITERATURA/REFERENCES

[1] Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-6: Limits - Assessment of

emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems, Edition 2.0, IEC/TR 61000-3-6, 2008.

- [2] Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-7: Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems, Edition 2.0, IEC/TR 61000-3-7, 2008.
- [3] Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-13: Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems, Edition 1.0, IEC/TR 61000-3-13, 2008.
- [4] Pravila o radu prenosnog sistema, 2020.  
[http://ems.rs/media/uploads/PRAVILA\\_O\\_RADU\\_PRENOSNOG\\_SISTEMA.pdf](http://ems.rs/media/uploads/PRAVILA_O_RADU_PRENOSNOG_SISTEMA.pdf) [pristupljeno 03.03.2022]
- [5] U. Manual, PowerFactory 2019, 2019
- [6] D. Gmbh, PowerFactory - DPL Function Reference, 2019.

#### AUTORI/AUTHORS

**msr Miroslav Žerajić** - master inženjer elektrotehnike i računarstva, Stručnjak za razvoj prenosnog sistema, Elektromreža Srbije, miroslav.zerajic@ems.rs, ORCID [0000-0001-9601-9045](https://orcid.org/0000-0001-9601-9045)

**msr Milan Stojanović** - master inženjer elektrotehnike i računarstva, Rukovodilac tima za elektromerenja i kvalitet električne energije, Electricity Coordinating Center Ltd., Belgrade, milan.stojanovic@ekc-ltd.com, ORCID [0000-0003-4029-8991](https://orcid.org/0000-0003-4029-8991)