

DOI: [10.46793/CIGRE37.C4.04](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.C4.04)

C4.04

**PQEL APLIKACIJA ZA ANALIZU PARAMETARA KVALITETA ELEKTRIČNE
ENERGIJE U PRENOSNOJ MREŽI****PQEL APPLICATION FOR POWER QUALITY PARAMETER ANALYSIS IN THE
TRANSMISSION NETWORK****Miroslav Žerajić, Borko Čupić, Srđan Subotić***

Kratak sadržaj: Parametri kvaliteta električne energije su propisani u Pravilima o radu prenosnog sistema u delu koji se odnosi na planske nivoe viših harmonika, flikera, i nesimetrije, dok su emisije vrednosti uređene Pravilima za priključenje objekata na prenosni sistem. Prilikom izrade potonjih pravila, operator prenosnog sistema u Srbiji je napustio raniju praksu da propisuje unapred određene emisije nivoe, već ih je sada potrebno proračunati za određeno mesto priključenja u skladu sa familijom standarda IEC 61000 koji se odnose na elektromagnetnu kompatibilnost. Kako se radi o složenim proračunima koji zahtevaju temeljno poznavanje ove oblasti, zaključeno je da je neophodno izraditi odgovarajući softver kako bi se ova aktivnost automatizovala. U skladu sa tim, a u okviru *EU Horizon* projekta R2D2 (*Reliability, Resilience and Defense technology for the grid*), korišćenjem programskog jezika Python, razvijena je aplikacija PQEL koja sadrži sledeće funkcionalnosti: 1. Proračun parametara kvaliteta električne energije u svim čvorištima prenosne mreže. Parametri koji se proračunavaju su: nivo pojedinačnih viših harmonika, nivo flikera, procenat nesimetrije, ekvivalentna impedansa prenosne mreže i minimalna snaga kratkog spoja. 2. Proračun limita emisijih vrednosti za odabrani čvor prenosne mreže, u skladu sa standardom IEC 61000. 3. Monitoring/praćenje usaglašenosti/ispunjenosti zahteva iz Pravila za priključenje na osnovu izmerenih vrednosti emisijih nivoa viših harmonika napona, flikera i naponske nesimetrije. U ovom radu će biti prikazan opis svake od funkcionalnosti ponaosob, a za prikaz rezultata će biti korišćeni test modeli u programskom paketu DIgSILENT PowerFactory.

Ključne reči: *PQEL, kvalitet električne energije, R2D2, Python*

Abstract: The parameters for electrical power quality are specified in the Transmission System Grid Code, particularly in the section relating to planned levels of higher harmonics, flicker, and asymmetry. Emission values are regulated by the Transmission Connection Code. In the development of these latter rules, the transmission system operator in Serbia moved away from the previous practice of setting predefined emission levels, opting instead for the calculation of emission levels at specific connection points in accordance with the IEC 61000 series of

* Miroslav Žerajić, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, zm235031p@student.etf.bg.ac.rs
Borko Čupić, Elektromreža Srbije, borko.cupic@ems.rs
Srđan Subotić, EMS, srdjan.subotic@ems.rs

standards on electromagnetic compatibility. Since these are complex calculations requiring a thorough understanding of the field, it was concluded that the development of appropriate software is necessary to automate this process. Accordingly, as part of the EU Horizon project R2D2 (Reliability, Resilience, and Defense Technology for the Grid), the PQEL application has been developed using Python to analyze power quality parameters in the transmission grid. The application provides the following features: 1. Calculation of power quality parameters at all nodes in the transmission network, including: Individual harmonic distortion levels, Flicker levels, Voltage unbalance percentage, Equivalent grid impedance, Minimum short-circuit power 2. Calculation of emission limit values for a selected transmission node in accordance with IEC 61000 standards. 3. Monitoring compliance with Grid Connection Code requirements based on measured values of voltage harmonic distortion, flicker, and voltage unbalance. This paper will present a detailed description of each functionality, with results demonstrated using test models in DIGSILENT PowerFactory.

Key words: *PQEL, power quality, R2D2, Python*

1 UVOD

U periodu eksploatacije prenosne mreže, u cilju obezbeđivanja propisanog nivoa kvaliteta električne energije (kvalitet EE) u svim tačkama prenosne mreže, Operatori prenosnih sistema prate parametre kojima se opisuje kvalitet EE, kontinualno, preko sistema za praćenje/monitoring, ili periodično, postavljanjem mernih uređaja u odabrane tačke prenosne mreže. Oblast kvaliteta EE je ranije bila izražena dominantno kod priključenja industrijskih postrojenja složenog tehnološkog procesa. U prethodne dve decenije, povećanom integracijom obnovljivih izvora energije (OIE), koji se na mrežu priključuju preko elemenata energetske elektronike, kvalitet EE je postao neizbežna oblast kojoj se pridaje poseban značaj, kako bi se krajnjim korisnicima isporučio što kvalitetniji proizvod.

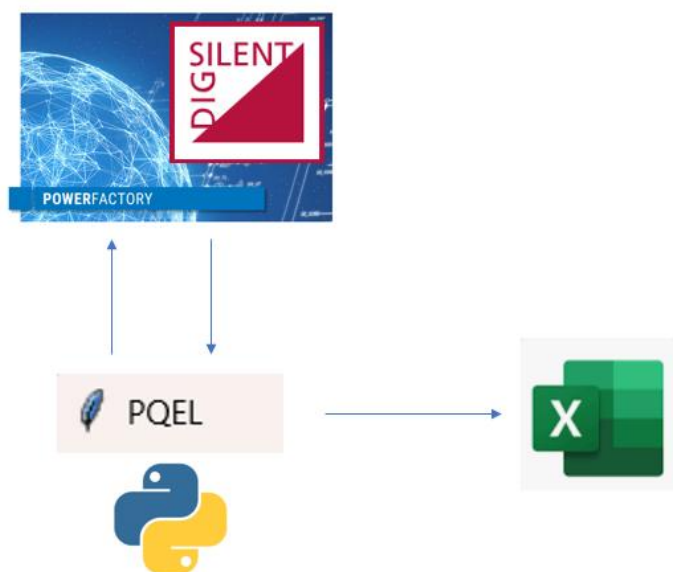
Parametri kvaliteta električne energije za prenosnu mrežu su propisani u Pravilima o radu prenosnog sistema [1] u delu koji se odnosi na planske nivoe viših harmonika, flikera, i nesimetrije, dok su emisione vrednosti uređene Pravilima za priključenje objekata na prenosni sistem [2]. Time se jasno razgraničavaju obaveze Operatora prenosnog sistema i obaveze (budućih) korisnika prenosnog sistema. Većina evropskih operatora prenosnog sistema se za definisanje planskih i emisijonih nivoa parametara kvaliteta EE poziva na familiju standarda IEC 61000 [3,4,5]. U ovim standardima (tehničkim preporukama) su jasno i jednoznačno definisani (preporučeni) limiti planskih nivoa parametara kvaliteta EE, prema naponskom nivou tačke priključenja novog objekta. Za limite emisijonih nivoa ovi standardi definišu algoritam prema kome se limit za planske nivoe raspodeljuje na limite maksimalno dozvoljenih emisijonih nivoa, u zavisnosti od instalisane snage novog objekta, jačine mreže u tački priključenja i faktora uticaja svih priključenih objekata na konkretnu tačku priključenja u prenosnoj mreži.

S obzirom na činjenicu da, ukoliko se prati familija standarda IEC 61000, limiti emisijonih nivoa nisu i ne mogu da budu jednoznačno definisani, postoji potreba za njihovim proračunavanjem svaki put kada se novi objekat priključuje na prenosni sistem. To znači da svaki objekat ima svoje maksimalno dozvoljene nivoe parametara kvaliteta EE koje ne sme da prekorači u toku svog eksploatacionog veka. Ovi limiti se definišu u fazi sprovođenja simulacione provere usaglašenosti, koja prethodi ishodovanju građevinske dozvole, kako bi se eventualne neusaglašenosti predupredile.

Proračun limita emisionih nivoa zahteva korišćenje programskih alata pomoću kojih se prvo modeluje prenosna mreža i postojanje isprogramiranog algoritma iz IEC 61000. U ovom radu će biti predstavljena aplikacija PQEL, pomoću koje se parametri kvaliteta EE proračunavaju za prenosnu mrežu Republike Srbije. Aplikacija je razvijena tako da se koristi i u fazi simulacione provere ispunjenosti sa tehničkim zahtevima iz Pravila za priključenje (u fazi priključenja) i u toku trajnog rada objekta (monitoring ispunjenosti tehničkih zahteva).

2 OSNOVNE FUNKCIONALNOSTI APLIKACIJE PQEL

PQEL aplikacija je razvijena korišćenjem programskog jezika *Python* [6]. Za korišćenje aplikacije, neophodno je da postoji simulacioni model u programskom paketu *DIgSILENT PowerFactory* [7]. Model se aktivira iz PQEL aplikacije, dok se za ispis i čuvanje rezultata proračuna se koristi Microsoft Excel, kako je prikazano na Slici 1.



Slika 1: Prikaz komunikacije aplikacije PQEL sa softverom i Excel-om

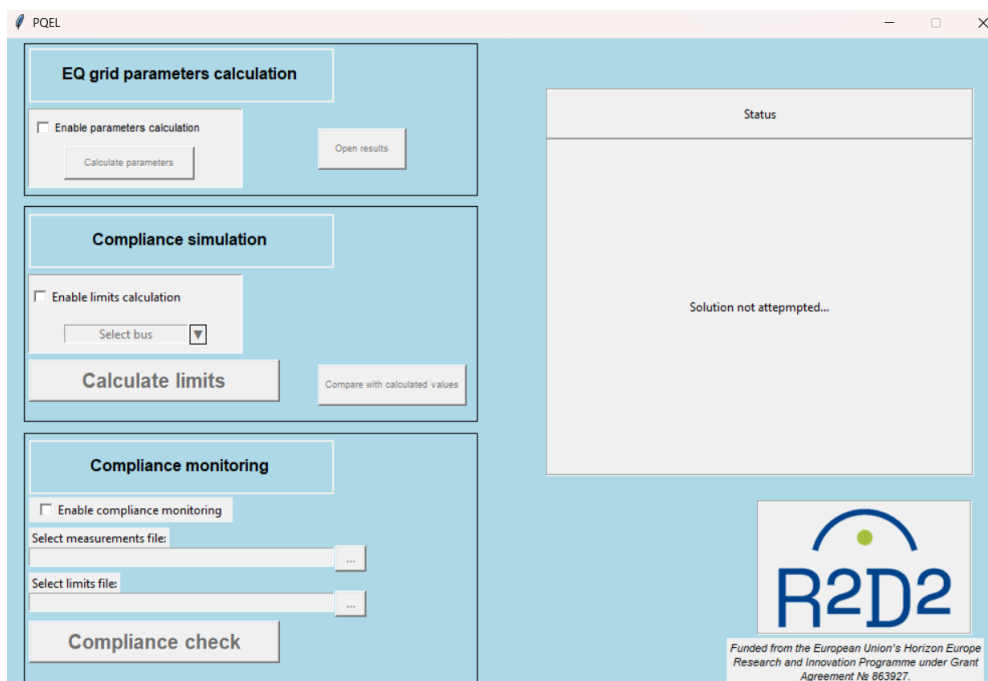
Pokretanjem aplikacije PQEL, korisnik na ekranu dobija prozor koji je prikazan na Slici 2. Aplikacija je podeljena na četiri glavne sekcije:

Proračun ekvivalentnih parametara mreže: Omogućava korisnicima izračunavanje ključnih parametara mreže:

Simulacija provera ispunjenosti: Omogućava proračun graničnih vrednosti emisionih nivoa parametara kvaliteta EE za odabrane sabirnice u prenosnoj mreži, koristeći *PowerFactory* softverski paket.

Monitoring ispunjenosti: Osigurava proveru ispunjenosti poređenjem merenja sa unapred definisanim graničnim vrednostima.

Status prozor: Omogućava ispis poruka tokom proračuna.



Slika 2: Korisnički interfejs aplikacije PQEL

3 PRORAČUN EKVIVALENTNIH PARAMETARA MREŽE

Izborom prve opcije „*EQ grid parameters calculation*“, korisniku je omogućen proračun sledećih parametara:

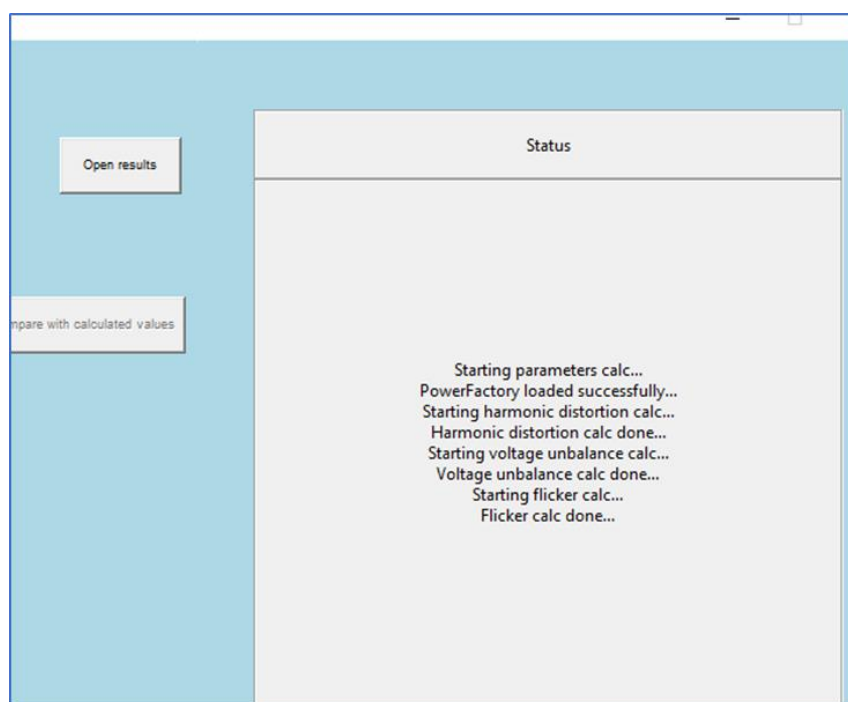
- **$R(\Omega)$, $X(\Omega)$, $Z(\Omega)$** – ekvivalentna otpornost, reaktansa i impedansa za sve sabirnice u simulacionom modelu, za sve harmonike do 50. reda;
- **S_k'' (MVA)** – snaga trolnog kratkog spoja na svim sabirnicama u simulacionom modelu;
- **THD (%)** – planski nivo ukupne harmonijske distorzije na svim sabirnicama u simulacionom modelu;
- **I_h (%)** – planski nivoi struja viših harmonika izraženih kao procenat osnovnog harmonika, na svim sabirnicama u simulacionom modelu za sve harmonike do 50. reda;
- **Pst** – planski nivo koeficijenta kratkoročnog flikera na svim sabirnicama u simulacionom modelu;
- **Plt** – planski nivo koeficijenta dugoročnog flikera na svim sabirnicama u simulacionom modelu;
- **u (%)** – planski nivo nesimetrije napona na svim sabirnicama u simulacionom modelu.

Čekiranjem polja „*Enable parameters calculation*“ aktivira se dugme „*Calculate parameters*“.

Klikom na dugme „*Calculate parameters*“ započinje se proračun parametara. Nakon završetka proračuna, dugme „*Open results*“ se aktivira, a njegovim klikom omogućava se pristup folderu sa rezultatima, što je prikazano na Slici 3. Tokom proračuna, ispisuju se poruke u *Status* prozoru, kao što je prikazano na Slici 4.

 SkMIN_results.xlsx	12/6/2024 1:43 PM	Microsoft Excel W...	5 KB
 Impedance_R_results.xlsx	12/6/2024 1:43 PM	Microsoft Excel W...	12 KB
 Impedance_X_results.xlsx	12/6/2024 1:43 PM	Microsoft Excel W...	12 KB
 Impedance_Z_results.xlsx	12/6/2024 1:43 PM	Microsoft Excel W...	12 KB
 flicker_and_THD_results.xlsx	12/6/2024 1:43 PM	Microsoft Excel W...	6 KB
 unbalance_results.xlsx	12/6/2024 1:43 PM	Microsoft Excel W...	5 KB
 harmonic_distortion_results.xlsx	12/6/2024 1:43 PM	Microsoft Excel W...	10 KB

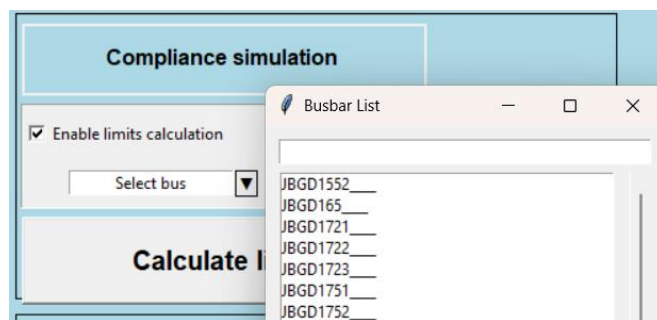
Slika 3: Prikaz foldera sa rezultatima proračuna ekvivalentnih parametara mreže



Slika 4: Prikaz *Status* prozora tokom proračuna

4 SIMULACIONA PROVERA ISPUNJENOSTI

Čekiranjem polja „*Enable limits calculation*“ aktivira se polje „*Select bus*“, gde korisnik može odabrati sabirnicu za proračun maksimalno dozvoljenih limita emisionih nivoa (Slika 5). Nakon izbora sabirnice, aktivira se dugme „*Calculate limits*“. Klikom na ovo dugme počinje proračun maksimalno dozvoljenih limita emisionih nivoa u skladu sa standardom IEC 61000. Tokom proračuna u *Status* prozoru prikazuju se poruke o toku proračuna. Po završetku proračuna, aktivira se dugme „*Compare with calculated values*“, a njegovim klikom omogućava se pristup folderu sa rezultatima (Slika 6).



Slika 5: Izbor sabirnice za proračun maksimalno dozvoljenih limita emisionih nivoa

Limits for bus_JA46311___.xlsx	16.08.2024 13:04	Microsoft Excel W...	5 KB
Limits for bus_JA46331___.xlsx	15.08.2024 14:56	Microsoft Excel W...	5 KB
Limits for bus_JADA 5___.xlsx	15.08.2024 13:12	Microsoft Excel W...	5 KB
Limits for bus_JALEKC5___.xlsx	15.08.2024 14:22	Microsoft Excel W...	5 KB
Limits for bus_JALEKD5___.xlsx	15.08.2024 14:56	Microsoft Excel W...	6 KB

Slika 6: Prikaz foldera sa rezultatima proračuna maksimalno dozvoljenih limita emisionih nivoa za izabranu sabirnicu

Kao što je ranije napomenuto, proračun maksimalno dozvoljenih limita emisionih nivoa se sprovodi u skladu sa standardom IEC 61000.

Granične procentualne vrednosti planskih nivoa pojedinačnih harmonika napona koje su propisane u [1], date su u Tabeli 1.

Tabela 1: Granične procentualne vrednosti planskih nivoa pojedinačnih harmonika napona

Neparni harmonici koji nisu deljivi sa 3		Neparni harmonici (umnožak broja 3)		Parni harmonici	
Red harmonika	Napon (%)	Red harmonika	Napon (%)	Red harmonika	Napon (%)
5	2	3	2	2	1,4
7	2	9	1	4	0,8
11	1,5	15	0,3	6	0,4
13	1,5	21	0,2	8	0,4
$17 \leq h \leq 49$	$1,9 \cdot 17/h - 0,2$	$21 < h \leq 45$	0,2	$10 < h \leq 50$	$0,19 \cdot 10/h - 0,16$

Pri priključenju nove instalacije, najpre treba proveriti odnos instalisane snage i snage kratkog spoja. Ukoliko je ispunjen uslov:

$$\frac{S_i}{S_{sc}} \cdot 100 \leq 0,2\%, \quad (1)$$

nema potrebe za daljom proverom kompatibilnosti instalacije sa aspekta emisije viših harmonika. Ukoliko ovaj uslov nije zadovoljen, pristupa se proračunu maksimalne dozvoljenog nivoa viših harmonika napona usled priključenja nove instalacije. nema potrebe za daljom proverom kompatibilnosti instalacije sa aspekta emisije viših harmonika.

Ukoliko ovaj uslov nije zadovoljen, pristupa se proračunu maksimalne dozvoljenog nivoa viših harmonika napona usled priključenja nove instalacije.

Ulazni podaci potrebni za proračun su:

- ukupne instalisane snage po sabirnicama..... S_{ij}
- ulazne impedanse svih sabirnica za sve harmonike od interesa..... Z_{hj}
- faktori uticaja između posmatranih sabirnica (i) i ostalih sabirnica (j)..... k_{hji}

Vrednosti snaga instalacija na sabirnicama su poznate iz simulacionog modela, a vrednosti faktora uticaja se proračunavaju i ispisuju u Excel tabelu, koja se kasnije koristi dalje u proračunu.

Prvi korak u proračunu graničnih vrednosti naponskih harmonijskih izobličenja je proračun maksimalnog dozvoljenog globalnog doprinosa instalacija priključenih na posmatranim sabirnicama harmonijskom izobličenju napona. Ovaj doprinos se definiše za svaki pojedinačni harmonik. Njegova maksimalna vrednost definisana je planiranim nivoima harmonijskih izobličenja datim u Tab. 1 i udelom instalacija u posmatranom čvoru u ukupnoj snazi svih instalacija u analiziranom sistemu:

$$G_{hBi} = \sqrt{\frac{S_{ti}}{S_{ti} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N k_{hji}^\alpha S_{tj}}} \cdot L_{hHV}, \quad (2)$$

gde je L_{hHV} granični nivo harmonijskog izobličenja napona u VN mreži za posmatrani harmonik (Tabela 2), a α eksponent za sumiranje harmonika, čija vrednost zavisi od reda harmonika, kao što je prikazano u Tabeli 2.

Tabela 2: Vrednosti sumacionog koeficijenta za različite redove harmonika

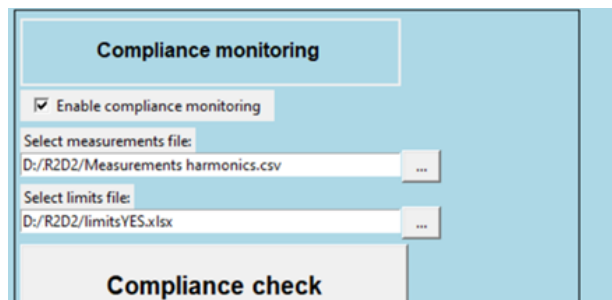
Red harmonika	α
$h < 5$	1
$5 \leq h \leq 10$	1,4
$h > 10$	2

Kada su poznate vrednosti dozvoljenih globalnih doprinosa u posmatranom čvoru, moguće je odrediti dozvoljene nivoe harmonika napona. Ove vrednosti se određuju uz pretpostavku da je učešće nove instalacije u emisiji harmonika srazmerno njenoj snazi, uz uvažavanje sumacionog faktora α koji uzima u obzir očekivani fazni pomeraj između pojedinačnih harmonika:

$$E_{Uhi} = G_{hBi} \cdot \sqrt[\alpha]{S_i / S_{ti}}. \quad (3)$$

5 PRAĆENJE ISPUNJENOSTI U TRAJNOM RADU

Čekiranjem polja „Enable compliance monitoring“ aktiviraju se polja za izbor datoteke sa merenjima i datoteke sa graničnim vrednostima (Slika 7).



Slika 7: Izbor datoteke sa merenjima i datoteke sa limitima za konkretnu tačku u prenosnoj mreži

Klikom na dugme „*Compliance check*“ počinje poređenje ovih datoteka, a u *Status* prozoru se prikazuje poruka koja ukazuje na eventualne neusaglašenosti (Slika 8).



Slika 8: Prikaz rezultata provere ispunjenosti u trajnom radu

6 ZAKLJUČAK

Aplikacija PQEL predstavlja pouzdan alat za analizu parametara kvaliteta EE, omogućavajući automatizovan proračun ključnih parametara prema standardu IEC 61000. Integracijom naprednih algoritama u *Python* okruženju, aplikacija omogućava Njena funkcionalnost obuhvata tri ključna segmenta: proračun mrežnih parametara, simulacionu proveru ispunjenosti i monitoring u realnom vremenu, čime se obezbeđuje sveobuhvatan pristup proceni i detekciji potencijalnih odstupanja od dozvoljenih vrednosti.

Primena PQEL aplikacije doprinosi efikasnijem procesu priključenja novih objekata na prenosni sistem, omogućavajući proračun maksimalno dozvoljenih limita emisionih nivoa, kao i poređenje proračunatih vrednosti sa stvarnim merenjima. Funkcionalnost monitoringa u realnom vremenu osigurava brzu identifikaciju prekoračenja limita, čime se omogućava pravovremeno preduzimanje korektivnih mera. Ovakav sistemski pristup unapređuje pouzdanost elektroenergetskog sistema, smanjuje rizik od negativnih uticaja harmonijskih izobličenja i omogućava dosledno poštovanje zahteva u domenu kvaliteta električne energije.

Zahvalnost

Ovaj dokument je izrađen na osnovu rada koji se odvija u okviru projekta koji se finansira uz pomoć Evropske unije. Sadržaj ovog dokumenta je isključiva odgovornost autora i ni pod kojim okolnostima se ne može smatrati da odražava stav Evropske unije.

7 LITERATURA

- [1] Pravila o radu prenosnog sistema, novembar, 2023. godine.
- [2] Pravila za priključenje objekata na prenosni sistem, novembar, 2023. godine.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Python, <https://www.python.org/>
- [7] U. Manual, PowerFactory 2022, 2022