

Анализа квалитета електричне енергије на сабирницама Истраживачко-технолошког центра у Новом Саду

1. Јован Рајчевић

Катедра за електрична мерења,
Департман за енергетику,
електронику и телекомуникације
Факултет техничких наука
Нови Сад, Србија
rajcevic@uns.ac.rs

4. Ирена Новаковић

Катедра за енергетску електронику и
претвараче, Департман за
енергетику, електронику и
телекомуникације
Факултет техничких наука
Нови Сад, Србија
novakovic.e146.2023@uns.ac.rs

2. Сергеј Стајшић

Катедра за енергетску електронику и
претвараче, Департман за
енергетику, електронику и
телекомуникације
Факултет техничких наука
Нови Сад, Србија
stajsic.e170.2023@uns.ac.rs

5. Ивана Казимировић

Катедра за енергетску електронику и
претвараче, Департман за
енергетику, електронику и
телекомуникације
Факултет техничких наука
Нови Сад, Србија
kazimirovic.e133.2023@uns.ac.rs

3. Никола Папић

Катедра за енергетску електронику и
претвараче, Департман за
енергетику, електронику и
телекомуникације
Факултет техничких наука
Нови Сад, Србија
papic.e175.2023@uns.ac.rs

Апстракт— У овом раду се анализира квалитет електричне енергије на сабирницама Истраживачко-технолошког центра. Хармонијски састав струје и напона, фреквенција, активна и реактивна снага, фактор снаге и фактор помераја су показатељи квалитета на којима је фокус. Вршена је провера да ли показатељи, који су мерени и прорачунати, задовољавају стандард везан за квалитет електричне енергије. Стандард који се користи у Републици Србији је SRPS EN 50160:2023, чији је иницијатор Институт за стандардизацију Србије. Упоредивањем граница, прописаних стандардом, и вредности показатеља квалитета се утврђује да ли своје прописане обавезе испуњавају и потрошач и дистрибутер.

Кључне речи— квалитет електричне енергије; виши хармоници; анализатор квалитета електричне енергије; SRPS EN 50160:2023.

I. УВОД

У згради Истраживачко-технолошког центра, која је повезана на нисконапонску мрежу називног напона 0,4 kV, се изводе настава и истраживања. Узимајући у обзир да се у згради налазе учионице и канцеларије, са рачунарима и рачунарском опремом, очекује се утискивање једносмерних компоненти струје и разнолик хармонијски састав струје. Додатно што би могло да погорша хармонијски састав струје је осветљене у објекту, које је изведено помоћу флуо цеви, који су изразито нелинеарни потрошачи. Анализатор квалитета електричне енергије је мерни инструмент произвођача *Chauvin Arnoux*, ознаке *С.А 8332*. Мерење је вршено 7 дана, са усредњавањем резултата на сваких 10 минута. Резултати су складиштени у меморији самог мерног инструмента, па су касније пребачени на рачунар ради даље обраде. Мерно место је главни разводни ормар Истраживачко-технолошког центра.

Појам квалитета електричне енергије добија на значају тек у XX веку, због повећаног коришћења осетљиве опреме и уређаја, коришћења опреме и потрошача који доводе до „загађења“ електричне мреже, повећаног увезивања

електричних мрежа. У том смислу квалитет електричне енергије би се могао схватити као оквир, дефинисан стандардима, у којем се испоручена електрична енергија приближава идеалном случају. Овај оквир укључује и обавезе које требају испуњавати потрошачи, са циљем да не уносе поремећаје ван унапред утврђених граница.

II. ОПИС МЕРНЕ ОПРЕМЕ И МЕРНОГ МЕСТА

Истраживачко-технолошки центар се налази у Новом Саду, на адреси Трг Доситеја Обрадовића 7. Мерење показатеља квалитета електричне енергије је вршено у главном разводном ормару, преко ког је објекат повезан на јавну нисконапонску мрежу, на 0,4 kV напонском нивоу. На слици 1 је приказано мерно место са повезаним мерним инструментом.



Слика 1 Фотографија мерног места са прикљученим мерним инструментом

Мерења су трајала 7 дана и коришћен је мерни инструмент *Chauvin Arnoux С.А 8332*, као анализатор квалитета. Поред

самог инструмента коришћене су напонске штитаљке, које се повезују на три фазна проводника, и струјне AmpFLEX сонде (предвиђене за мерење струје до 6500 А), које се постављају тако да свака обухвати по један проводник. Прикључење инструмента се врши док су проводници под напонам ефективне вредности 400 V, који је опасан по човека и његов живот, па је неопходно користити заштитну опрему (гумене рукавице и заштитне наочаре).

Инструмент има фреквенцију одабирања 12,8 kHz по каналу при фреквенцији напона напајања од 50 Hz (256 одабирака по периоди). Напонски прикључци инструмента имају радне опсеге 830 V RMS (фаза - фаза) и 480 V RMS (фаза - неутрални вод). Улазна импеданса напонских прикључака износи 340 k Ω између фазног и неутралног прикључка, док код струјних прикључака, када се користе AmpFLEX сонде, импеданса износи 12,4 k Ω .

Табела 1 Карактеристике коришћеног мерног инструмента

Величина	Опсег	Грешка
Фреквенција	40 Hz...69 Hz	$\pm 0,01$ Hz
Фазни напон	6 V...480 V	$\pm 0,5\%$
Међуфазни напон	10 V...830 V	$\pm 0,5\%$
DC компонента напона	6 V...100 V	$\pm 1\%$
Струја кроз AmpFLEX сонде	$I_{max}/1000...I_{max}$	$\pm 0,5\%$
DC компонента струје	$I_{max}/1000...I_{max}/10$	$\pm (1\% + 1 \text{ A})$
Фактор снаге	-1,000...1,000	$\pm 1,5\%$
THD	до 50. реда	$\pm 1\% + 5 \text{ pt}$
Фликери напона	0,00...9,99	$\pm 5\% + 5 \text{ pt}$
K-фактор	1...99,99	$\pm 5\%$

Називни опсег употребе инструмента Chauvin Arnoux C.A 8332 је дефинисан:

- Хармоници: $THDu = 40\%$ и $THDi = 20\%$,
- Магнетно поље: од 0 А/м до 400 А/м,
Електрично поље: од 0 V/м до 3 V/м.

Референтни услови коришћења инструмента дати су у табели 2.

Табела 2 Референтни услови мерног инструмента

Параметар	Референтни услов
Температура амбијента	23°C \pm 3 K
Влажност	45% RH
Атмосферски притисак	од 860 hPa до 1060 hPa
Фазни напон	230 V RMS или 110 V RMS \pm 2% без DC компоненте
Фреквенција електричне мреже	50 Hz или 60 Hz \pm 0,1 Hz
Фазни померај напона у односу на струју	0° или 90°
THD	< 0,1%

III. ПОКАЗАТЕЉИ КВАЛИТЕТА

A. Општи показатељи квалитета електричне енергије

С обзиром на то да се развојем електроенергетске мреже и електрификацијом погона појавила потреба за побољшањем квалитета електричне енергије, уведени су одређени појмови, односно индикатори, који имају улогу да опишу или квантификују одступање стања од жељеног или номиналног. Ови показатељи су дефинисани тако да се једноставно могу израчунати, коришћењем адекватних математичких формула. Неки од њих захтевају и статистичке податке о одређеним величинама, како би се могло доћи до коначне вредности тог показатеља квалитета. Неки од показатеља су :

- 1) Укупна хармонијска дисторзија напона и струје ($THDu$ и $THDi$)

Описује удео свих виших хармоника струје и напона (i_h и u_h , где h представља редни број хармоника), рачуна се према следећим формулама:

$$THDu = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} u_h^2}{u_1^2}} \quad (1)$$

$$THDi = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} i_h^2}{i_1^2}} \quad (2)$$

- 2) Фактор снаге (енг. Power Factor)

Представља меру активне (P) и привидне (S) снаге са уделом виших хармоника, одређена као:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{U_{eff} I_{eff}} \quad (3)$$

- 3) K-сачинилац

Обухвата хармонијски састав струје (хармонијске струје су исказане у релативним јединицама у односу на струју основног хармоника) трансформатора у учешћу хармоника (h – редни број хармоника) у загревању трансформатора, рачуна се:

$$K = \sum h^2 \cdot I_h^2 \quad (4)$$

- 4) Треперење напона (фликери)

Поремећај који је изазван много мањим променама напона у односу на пропаде. Да би се измерило треперење треба узети у обзир психолошку компоненту, она се у прорачун укључује помоћу емпиријски утврђене криве треперења. Ова крива показује колико снажне флукуације светлости у просеку особа перципира. Треперење се описује помоћу два показатеља, који се добијају путем мерења, а то су Pst и Plt . Показатељ Pst који је мера краткотрајног треперења у оквиру 10 min и то је бездимензиона величина. Plt је мера дуготрајног треперења у року од 2 часа, а он се добија на основу 12 узастопних вредности Pst на следећи начин:

$$Plt = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^{12} P_{st,i}^3}{12}} \quad (5)$$

- 5) Вршни сачинилац (енг. Crest Factor)

Представља однос максималне вредности струје (I_{pk}) и ефективне вредности те струје (I_{eff}), изржава се као:

$$CF = \frac{I_{pk}}{I_{eff}} \quad (6)$$

6) Изобличење пуног терета (енг. *Total Demand Distorsion*)

Овај показатељ је дефинисан као однос основног хармоника дате струје терета (I_{1effd}) помножен са $THDi$ и основног хармоника номиналне струје терета (I_{1effdn}):

$$TDD = \frac{I_{1effd}}{I_{1effdn}} \cdot THDi \quad (7)$$

7) Количник изобличења (енг. *Distorsion Index*)

Говори колики је однос виших хармоника дате струје (I_h) у односу на ефективну вредност те струје (I_{eff}):

$$DIN^2 = \frac{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}{I_{eff}^2} \quad (8)$$

V. Стандард SRPS EN 50160:2023

Улога овог стандарда јесте да опише особине напона дистрибутивног система на месту предаје енергије потрошачу у јавним нисконапонским (NN) и средњенапонским (SN) мрежама при нормалним погонским условима. Овим стандардом су прецизно дефинисане карактеристике напона с обзиром на фреквенцију, величину, таласни облик и симетрију трофазног напона. Границе које прописује овај стандард за поједине показатеље напона дате су у табелама 3, 4 и 5. Проверавано је да ли резултати мерења задовољавају овај стандард.

Табела 3 Лимити дисторзије напона у односу на напонски ниво одређени одабраним стандардом

ЛИМИТИ ДИСТОРЗИЈЕ НАПОНА		
Напон на сабирницама	Индивидуална дисторзија %	Укупна дисторзија %
< 1 kV	5,0	8,0
1 kV ÷ 69 kV	3,0	5,0
69 kV ÷ 161 kV	1,5	2,5
> 161 kV	1,0	1,5

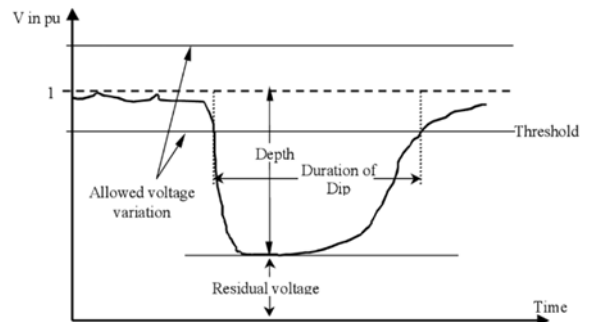
Табела 4 Лимити одабраних величина према одабраним стандарду

Величина	Границе	Посматрање (% времена)
Фреквенција	49,5 Hz - 50,5 Hz	7 дана (95%)
Напон	230 V ± 10%	7 дана (95%)
Виши хармоници	THDu < 8%	7 дана (95%)
Пропади напона краћи од 1 min	10 ÷ 10000 пута, U < 0,85Un	1 година
Кратки прекиди краћи од 3 min	10 ÷ 100 пута, U < 0,01Un	1 година
Прекиди дужи од 3 min	10 ÷ 50 пута, U < 0,01Un	1 година
Повремени пренапони	U < 1,5 kV	/ (100%)
Транзијентни пренапони	U < 6 kV	/ (100%)
Несиметрија	2%	7 дана (95%)

Табела 5 Дозвољени удео појединих хармоника у напону према одабраним стандарду

Непарни хармоници				Парни хармоници	
Нису умножак броја 3		Умножак броја 3			
Редни број	%	Редни број	%	Редни број	%
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3,0	21	0,5	/	/
17	2,0	/	/	/	/
19	1,5	/	/	/	/
23	1,5	/	/	/	/
25	1,5	/	/	/	/

- Ефективна вредност називног напона нисконапонске мреже мора да буде у опсегу $U_n \pm 10\%$, током сваког седмодневног интервала.
- Називна фреквенција у систему је 50 Hz, која сме да одступа $\pm 0,5$ Hz у току седмодневног интервала, док је систем у нормалном погону.
- Несиметрија напона не сме да пређе границу од 2%, а та граница се односи на инверзну компоненту напона.
- Пренапони представљају појаву када напон порасте изнад 110% номиналне вредности.
- Пропад напона (слика 2) је појава када напон падне испод 85% номиналне вредности у трајању не мањем од 10 ms, то је дводимензионални поремећај кога описују преостали напон и време трајања.
- Прекиди напајања дефинишу се као краћи и дужи у доносу на границу од 3 min, то је специјални случај пропада напона, када напон падне испод допуштене вредности преосталог напона.

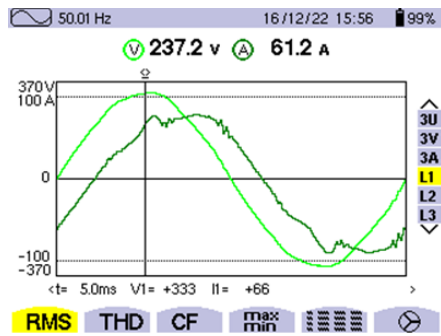


Слика 2 Пример изгледа пропада напона

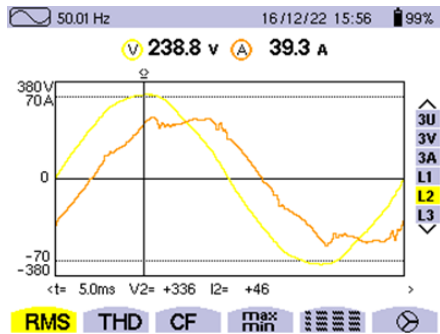
IV. РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА И АНАЛИЗА ПОКАЗАТЕЉА КВАЛИТЕТА ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ

A. Тренутне вредности напона и струја на дан прикључења мерног инструмента

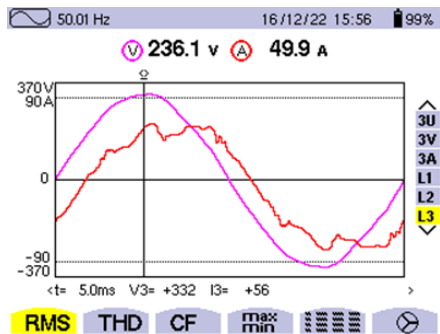
На сликама 3, 4 и 5 приказани су снимци дисплеја мерног инструмента, на којима се виде тренутне ефективне вредности и таласни облици фазних напона и струја.



Слика 3 Изглед дисплеја са приказаним таласним облицима струје и напона фазе L1



Слика 4 Изглед дисплеја са приказаним таласним облицима струје и напона фазе L2



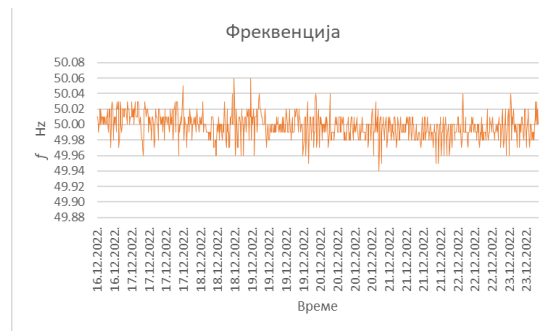
Слика 5 Изглед дисплеја са приказаним таласним облицима струје и напона фазе L3

Фазни напони све три фазе су приближно синусоидалног облика, што значи да је присуство виших хармоника мало, а ефективне вредности фазних напона све три фазе се разликују за пар стотина mV, па их можемо сматрати симетричним.

У таласном облику фазних струја се примећује велико присуство виших хармоника, такође у тренутку прикључења мерног инструмента оптерећење по фазама се драстично разликује.

V. Фреквенција

За седмодневни мерни период, највећа измерена фреквенција износи 50,06 Hz, а најмања 49,94 Hz. Упоредивањем резултата са лимитима из табеле 2, долази се до закључка да је стандард задовољен у погледу фреквенције.



Слика 6 Промена фреквенције у току мерног периода

C. Ефективне вредности напона

График промене ефективних вредности међуфазних напона показује да највећа ефективна вредност која се јавља у сва три напона износи 415,8 V, а најмања 399,4 V. Напони нису премашили границу дефинисану стандардом, тако да је овај параметар задовољно стандард.



Слика 7 График промене ефективних вредности међуфазних напона у току мерног периода

D. Ефективне вредности струја

С обзиром на то да су на хоризонталној оси графика представљени датуми, не може се експлицитно читати које су биле ефективне вредности струја у ком тренутку, али се може пратити ток промене струје. Током радних дана, види се периодично понављање ефективних вредности струја, јер се тада одвија настава, а током викенда струје су приближно 0, јер нема активности у објекту.



Слика 8 График промене ефективних вредности фазних струја у току мерног периода

E. Укупна хармонијска дисторзија напона и струје

Тоталном хармонијском дисторзијом је описан удео виших хармоника у неком сигналу. Ово је један од најбитнијих показатеља квалитета електричне енергије, јер

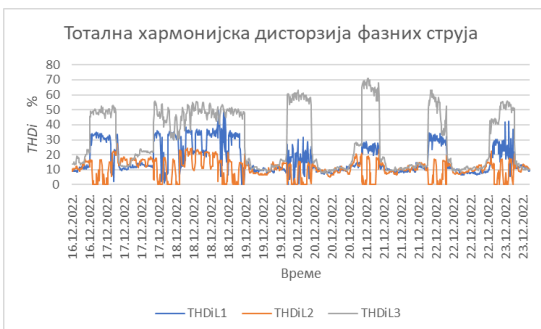
се уделом виших хармоника могу појавити велике нежељене последице, па је овоме битно посветити посебну пажњу.

С обзиром на то да укупна хармонијска дисторзија напона не прелази вредност од 2,5 % ни у једној фази, закључено је да је стандард задовољен и да Електродистрибуција поштује ставке уговора везане за таласни облик напона на сабирницама потрошача.

Укупна хармонијска дисторзија струје није дефинисана у стандарду, али постоје одређене препоруке које су дефинисане у односу на струју кратког споја. Непознавањем струје кратког споја на сабирницама, не може се експлицитно рећи да ли је препорука испоштована од стране потрошача.



Слика 9 График промене укупне хармонијске дисторзије међуфазних напона у току мерног периода



Слика 10 График промене укупне хармонијске дисторзије фазних струја у току мерног периода

F. Фактор снаге

Фактор снаге (енг. *Power factor*) узима у обзир све више хармонике, док фактор помераја (енг. *Displacement factor*) узима у обзир само основни хармоник. Фактор помераја је величина која се иначе у литератури означава и са $\cos\varphi$. Очекивано је да вредност фактора снаге буде мања од фактора помераја у сваком тренутку, евентуално да су једнаки, уколико не постоји удео виших хармоника. Вредности фактора снаге су мали у току ноћи и током викенда, јер је потрошња активне снаге мала, а током радних дана његова вредност је 0,8 капацитивни, због типа потрошача који се налазе унутар објекта. Капацитивни фактор снаге је добар за мрежу, због компензације реактивне снаге, јер су индустријски електромоторни погони претежно индуктивни потрошачи.



Слика 11 График промене фактора снаге у току мерног периода

V. ЗАКЉУЧАК

Мерења су вршена 7 дана узастопно, на сваких 10 минута инструмент је меморисао у интерну меморију, усредњене вредности величина од интереса. Описана је поставка мерног инструмента на мерно место. Вршено је мерење више величина, као што су фреквенција, ефективне вредности међуфазних напона и фазних струја, хармоници струја и напона до 25. реда, фактор снаге, $THDu$, $THDi$, K -фактор, активна, реактивна и привидна снага. Инструмент је након тога уклоњен са мерног места и резултати су послати на рачунар на даљу обраду, у софтверском алату Microsoft Excel.

Прегледом графика утврђено је како потрошња варира у односу на доба дана и да ли се ради о радном дану или викенду. Варијације у ефективној вредности напона су мале, као и изобличење самог напона, па их можемо сматрати симетричним и може се доћи до закључка да дистрибутер поштује ставке уговора везане за квалитет испоручене енергије.

Потрошачи у објекту су углавном рачунари и рачунарска опрема, па долази до великих изобличења струја. Изобличена струја ствара изобличени пад напона, што на крају доводи до изобличења напона, али у овом случају то изобличење напона је мало и не прави проблеме мрежи, па није потребно прибегавати неким решењима попут компензатора и уређајима енергетске електронике.

Праћење показатеља квалитета електричне енергије је веома битно, због све већег коришћења скупе и осетљиве електроничке опреме, која захтева стабилно напајање. Такође, са становишта потрошача, не сме се „прљати“ мрежа, јер постоји још много других потрошача, који ће осетити то „загађење“. Ићи у корак с временом и поштовати стандарде је веома битно, јер што је бољи квалитет електричне енергије, то је дужи животни век потрошача и већа новчана уштеда.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Марко С. Векић, Владимир А. Катић, Золтан Чорба – „Квалитет електричне енергије: рачунске и лабораторијске вежбе : помоћни уџбеник“ (2018).
- [2] Surya Santoso, H. Wayne Beaty, Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan - Electrical Power Systems Quality(2004).
- [3] Alexander Kusko, Marc Thompson - Power Quality in Electrical Systems-McGraw-Hill Professional (2007).
- [4] Zbigniew Łukasik, Zbigniew Olczykowski – “Quality and reliability of electricity supply” (2020).

- [5] Elvisa Becirovic, Meliha Dzizic, Snjezana Tepavcevic – “Quality of electricity supply indices - JP Elektroprivreda BiH” (2009).
- [6] C.A 8332 доступно на: https://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/download/nf-ca_8332_ca_8334_gb.pdf

ABSTRACT

This paper analyzes the quality of electrical energy at the busbars of the Research and Technological Center. Harmonic composition of current and voltage, frequency, active and reactive power, power factor, and displacement factor are indicators of focus. Verification was performed to determine whether the measured and calculated indicators meet the standards related to the quality of electrical energy. The standard used in the Republic of Serbia is SRPS EN 50160:2023, initiated by the Institute for Standardization of Serbia. By comparing the limits prescribed by the standard with the values of quality indicators, it is determined whether both the consumer and the distributor fulfill their prescribed obligations.

Analysis of the quality of electrical energy at the busbars of the Research and Technological Center in Novi Sad

Jovan Rajčević, Sergej Stajšić, Nikola Papić, Irena Novaković,
Ivana Kazimirović.