

*Дипл. ел. инж. АЛЕКСАНДАР ЈОВИЋ*  
*ПД „Југоисток“ Ниш, Оџранак Електиродис трибуција Лесковац*  
*e-mail: aleksandar.jovic@jugoistok.com*

*Дипл. ел. инж. МИРОСЛАВ ДОЧИЋ*  
*ПД „Југоисток“ Ниш, Електиродис трибуција Лесковац*  
*e-mail: miroslav@edleskovac.co.yu*

*Дипл. ел. инж. МИОДРАГ СТОИЉКОВИЋ*  
*ПД „Југоисток“ Ниш, Електиродис трибуција Лесковац*  
*e-mail: miodrag@edleskovac.co.yu*

*Електироинженер САША ЦВЕТКОВИЋ*  
*ПД „Југоисток“ Ниш, Електиродис трибуција Лесковац*  
*e-mail: mhcvetkovic@hotmail.com*

## КВАЛИТЕТ ПРОИЗВЕДЕНЕ ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ ХИДРОЕЛЕКТРАНЕ У ВУЧЈУ

### THE QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY PRODUCED BY THE VUČJE HYDROELECTRIC POWER PLANT

САЖЕТАК: Синхрони генератори старије производње могу представљати значајан извор хармоника, с обзиром да није могуће постићи идеалну синусну расподелу поља. С обзиром на годину производње генератора који се користе у хидроелектрани Вучје (1935. год.), у овом раду се третирају параметри квалитета произведене електричне енергије. Мерење индикатора квалитета напона на генератору највеће снаге 800 kVA је извршено у периоду од недељу дана са периодом усредњавања у току мерења од 10 минута. Добијени резултати су дискутовани поређењем са познатим светским стандардима (IEEЕ). Дат је и преглед количине произведене електричне енергије у претходном периоду, а поменут је, такође, и став Ђорђа Станојевића из 1901. године о хидропотенцијалима реке Вучјанка.

**SUMMARY:** Synchronous generators of an older production year may serve as a significant source of harmonics, as it is not possible to achieve an ideal field distribution. Bearing in mind the production year of the generators used in the Vučje hydroelectric plant (1935), this paper studies the quality parameters of the electric energy it produces. The measurement of voltage quality parameters was performed on the generator with the greatest power of 800 kVA during one week with the average taken over a ten minute measurement period. The results obtained are discussed in comparison with the famous world standards (IEEE). The paper also provides a review of how much electric energy was produced in the preceding period and gives Đorđe Stanojević's opinion from 1901 on the hydro potential of the Vučjanka river.

## 1. УВОД

Демонополизација електропривреде и увођење конкуренције међу дистрибутерима електричне енергије довешће до тога да се електрична енергија третира као роба. Квалитет дистрибуције електричне енергије данас се најчешће сагледава кроз два основна аспекта: квалитет испоруке и квалитет испоручене енергије. Квалитет испоруке електричне енергије је основни задатак рада сваког електроенергетског система, док се квалитету испоручене енергије почела поклањати пажња тек са појавом такозваних осетљивих потрошача (рачунара, процесне опреме у индустрији, сложених уређаја и склопова управљаних микропроцесорима и др.). Међутим, дистрибутери у свету данас све више поклањају пажњу и на комерцијални квалитет дистрибуције електричне енергије, односно на квалитет услуга пружених потрошачима. Ту се пре свега мисли на: прикључивање потрошача (радови које дистрибутивно предузеће обавља код потрошача), затим обнављање напајања у случају квара који погађа једног потрошача (на пример замена осигурача на кућном прикључку потрошача), решавање притужби на квалитет напона и мерење електричне енергије, непосредни контакт са потрошачима, у писаној форми или преко телефона, као и годишњи број читавања бројила (наплата остварене потрошње) и достава рачуна (све чешће у коверти за сваког потрошача). Мерењем показатеља квалитета одређује се квалитет дистрибуције електричне енергије. У пракси европских земаља за показатеље квалитета углавном се узимају показатељи беспрекидног напајања, и то најчешће учестаност (SAIFI) и трајање (SAIDI) прекида напајања, а ређе се узима неиспоручена енергија (ENS).

При прекиду напајања електричном енергијом настају штете код дистрибутивне компаније и код потрошача. Штете код потрошача настају због ометања њихових нормалних активности као и због могућег стварања шкарта у производњи. Последица прекида напајања које трпи дистрибутивно предузеће огледа се у финансијском губитку због

неостварене добити од продаје електричне енергије и због евентуалног плаћања пенала потрошачима.<sup>1</sup>

Са стаповишта дистрибутивног предузећа, под квалитетом испоручене електричне енергије се подразумева квалитет испорученог напона, на чије карактеристике доминантан утицај имају нелинеарни потрошачи, транзијентне појаве услед комутација у електроенергетском систему, атмосферски пренапони, појаве кратких спојева, земљо-спојева и сл. као и рад електроенергетског система на границама могућности (напонске редуције, “слаба“ мрежа и сл.). Нарушавање квалитета напона манифестује се како у погледу деградације његових основних параметара (ефективне вредности, фреквенције, симетричности и сл.) у устаљеним или прелазним режимима (пропади, поскоци, пренапони, поднапони, безнапонске паузе и сл.), тако и у погледу изобличења његовог таласног облика (хармоници, краткотрајни поднапони, импулсни пренапони и сл.).

Последице некавалитетног напајања могу бити тешке, а најчешће су повезане са финансијским и материјалним штетама. Ресетовање рачунара, губљење меморије, појава погрешних података, прекиди у продукционим ланцима, појава напонске резонанције, заустављање погона, кварови кондензаторских батерија, отказивање управљачких склопова, краћи век електричних машина и каблова, сметње у телекомуникацијама, појава фликера и др. су неки од најчешће забележених. У циљу побољшања квалитета електричне енергије, многи потрошачи су спремни да уложе значајна средства у специјалну опрему или уређаје (системи беспрекидног напајања, филтри и сл.). Процењено је да се деведесетих година прошлог века утицало на побољшање квалитета 30.000 GWh електричне енергије годишње. С друге стране, реаговале су и дистрибутивне компаније, инвестирањем у опсежне пројекте истраживања параметара квалитета, усвајањем техничке регулативе за лимитирање нивоа хармоника и фликера, као и увођењем строжијих норми за прикључење нелинеарних потрошача.<sup>2</sup>

Хидроелектране су постројења у којима се потенцијална енергија воде претвара у електричну енергију. Оне користе “бесплатну енергију” и тако доприносе енергетској независности земље, па произвођачи електричне енергије који користе обновљиве изворе електричне енергије имају повлашћен статус. Мале хидроелектране имају позитиван и негативан утицај на животну околину. У позитиван утицај спадају боља контрола протока воде и смањење ризика од плављења, а веће акумула-

1 Милadin Тапасковић, Томислав Бојковић, Драгослав Перић, *Дистрибуција електричне енергије*, Београд 2006, 348-350.

2 Владимир Катић, *Преглед истраживања квалитета испоручене електричне енергије*, Прво југословенско саветовање о електродистрибутивним мрежама, 1998, Златибор, Р-2.02

ције су по правилу вишенаменске јер се вода користи за наводњавање или добијање пијаће воде. Мала хидроелектрана, такође, лакше може естетски да се уклопи у околину у односу на велику хидроелектрану, па чак и да обогати неке туристичке садржаје као што су нпр. риболов, рекреација и сл. У негативан утицај спадају: таложење и испуштање наноса (природних или од индустрије, укључујући и отровне материје) и промена квалитета воде због успоравања протока.<sup>3</sup>

## 2. ОСВРТ НА СТАВ ЂОРЂА СТАНОЈЕВИЋА О ХИДРОПОТЕНЦИЈАЛИМА РЕКЕ ВУЧЈАНКА

Ђорђе Станојевић се годинама бавио изучавањем могућности изградње електричних централа у Србији. Посебно су га интересовале могућности коришћења водених токова у ту сврху, па је између осталог помно изучавао хидроенергетске потенцијале реке Вучјанка, која у једном делу свог тока има велик пад. У својим предавањима на Физичком институту Велике школе, јуна 1901. године, Станојевић је заузео став да *“...Водопад који највише снаге у себи има, без сумње је водопад Вучјанског потока близу села Вучја, око 17 километара далеко од Лесковца. На том месту, вода пада у неколико скокова, који нису далеко један од другог и носе разне називе као: Дев Казан, Ђокин Вир итд, са висине веће од 100 метара. Количина воде износи при малој води око пола кубног метра, те и снага коју има водопад може да да, између око 500 парних коња. По жељи неколико угледних грађана Лесковца, просјудирао сам истраживање о доводу те снаге у Лесковац и нашао, да би се оно на сразмерно лак начин могло извести. За прво постројење имало би се узети 500 парних коња. На тај начин би према потреби радила само једна турбина, или обадве, а у извесним случајевима служиле би једна другој у резерву. По себи се разуме да би се употребиле профазна струга, генератори би непосредно давали струју од 5000 до 7000 волта, и та би се струја без даље трансформације пренела кроз три бакарна проводника од по 16 квадратна милиметра пресека, са губицима од 17% у Лесковац. Очеvidна ствар, да би се тај губицима могао смањити, употребом дебелих проводника или струје вишег потенцијала, према то није потребно. Ако се доцније показало да је та снага недовољна, могла би се накнадно поставити још једна турбина и динамомашина од 200 коња.”*

Могућност експлоатације водне снаге реке Вучјанка и улагања у потпуно нову привредну област убрзо је заинтересовала многе лесковачке индустријалце, те је исте, 1901. године основано Лесковачко

3 Миладин Танасковић, нав. дело, 441/443.

електрично друштво А.Д. На челу оснивачког одбора Лесковачког електричног друштва А.Д. био је Ђорђе Станојевић, професор Високе школе и председник Друштва, са још девет имућнијих и познатих грађана Лесковца. Статут Лесковачког електричног друштва израђен је у лето 1901. године а одобрен 31. октобра исте године, решењем министра народне привреде. Друштво је, према Статуту, основано у циљу унапређања “српске домаће индустрије”. Задатак овог акционарског друштва је да “водену снагу падова Вучјанске реке експлоатише у облику електричне енергије како за осветљење тако и за индустријске, пољопривредне и остале потребе”. За седиште Друштва је одређен Лесковац, док је Друштво, према потреби, могло имати своје филијале и заступнике и у другим местима у Србији.

Изградња хидроцентрале текла је убрзаним ритмом, па су током 1903. године изграђени доводни канал, водозахватна брана, зграда хидроцентрале и “турбинска зграда”. Инсталиране су турбине и генератори а до Лесковца је изграђен далековод.<sup>4</sup>

### **3. ТЕХНИЧКИ ПОДАЦИ И ОСТВАРЕНА ПРОИЗВОДЊА ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ ХИДРОЦЕНТРАЛЕ У ВУЧЈУ**

Хидроцентрала у Вучју је почела са радом децембра 1903. године и до данашњег дана производи електричну енергију. У то време била је трећа електрана у Србији, али је своје претходнице надмашила по инсталисаној снази и количини произведене електричне енергије коју је тада понудила младој лесковачкој индустрији. Настала на истуреној тачки једног индустријског басена, који се тада зачињао, и чије је производне потребе требало снабдети енергијом, хидроелектрана у Вучју је Србији подарила први далековод напонског нивоа 7 kV, дужине 17 километара, од Вучја до Лесковца. За тај временски период главни задатак Лесковачког електричног друштва био је испорука електричне енергије до потрошача. Из овог разлога је потпуно оправдана чињеница да се проблематика квалитета електричне енергије тада није третираола на начин на који се то у свету ради данас.

Хидроелектрана (ХЕ) Вучје са аспекта хидролошких карактеристика спада у тип деривационих електрана, са водозахватом, деривационим каналом, водном комором и деривационим цевоводом. Водозахват електране је “тиролског” типа. Река Вучјанка, из које се захвата вода за рад електране, десна је притока реке Ветерница, која протиче кроз град Лесковац. У Вучјанку се сливају воде са северних падина планине Кукавица, чији највиши врх има 1441 метар надморске висине. Површина

4 Небојша Станковић, *Хидроелектрана Вучје - свейска башићина електриојехнике*, Лесковац 2005, 47/56.

слива Вучјанке до места водозахвата износи 45,5 км<sup>2</sup>, а дужина тока реке до тог места је 13 километара. Река има прилично уједначен пад од 5.73 одсто. Канал за довођење воде из Вучјанке до хидроелектране, преко водне коморе и цевовода, изграђен је 1902-1903. године. Канал је дужине 986 метара а његова ширина, у просеку око једног метра, варира у зависности од подлоге на којој се налази. Од коморе, где се завршава канал и акумулира вода, почиње доводна цев која воду спроводи до турбина. Цев је дужине 235 метара и пречника 520 мм. Максимални проток воде кроз доводну цев износи 1.1м<sup>3</sup> у секунди. Висинска разлика, од места на водној комори где почиње доводна цев до нивоа на којем вода покреће турбине, износи 139 метара.<sup>5</sup>

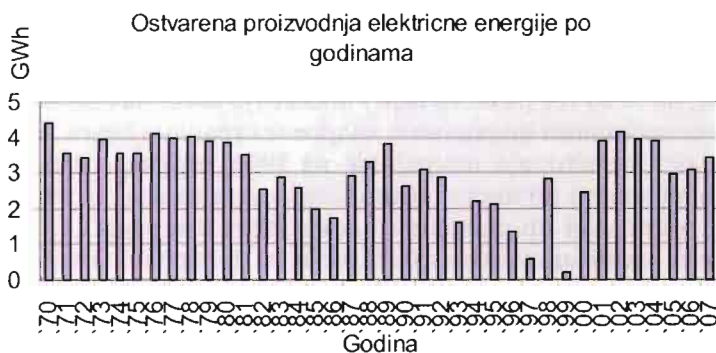
Данас хидроцентрала у Вучју у склопу производних капацитета има три генератора са укупно инсталисаном снагом од 1.08 МВА. Први и највећи генератор (Г1) произведен у Шведској фирми *Asea* (једна од претеча данашњег концерна АББ) из 1935. године, је следећих карактеристика: снага 800 kVA, фреквенција 50 Hz, међуфазни напон 400 V, фактор снаге  $\cos\varphi = 0.8$ , број обртаја  $n = 500$  обр/мин. Друга два генератора су много старија, произведена 1903. године. Произведени су од стране фирме *Siemens&Halske* и снаге су од 139 kVA, фреквенције 50 Hz, међуфазног напона 400 V, фактора снаге  $\cos\varphi = 0.8$ , броја обртаја  $n = 700$  обр/мин. С обзиром на највећу снагу првог генератора, и његово учешће у производњи електричне енергије је најзначајније. За пренос произведене електричне енергије 10 kV далеководом постоје два трансформатора напонског нивоа 10/0.4 kV. Генератор Г1 је прикључен на први трансформатор снаге 1000 kVA, спреге Ду5, напон кратког споја  $u_k=4.5\%$ . Друга два генератора су прикључена на трансформатор снаге 630 kVA, спреге Ду5 и  $u_k=4.2\%$ .

Према доступним подацима о произведеној електричној енергији у претходном периоду од 37 година у хидроелектрани, углавном је одржан континуитет у раду. Годишња производња електричне енергије најчешће је превазилазила ниво од 3 GWh. Међутим, у појединим сушним годинама производња је значајно смањивана, понекад мање од 2 GWh. На слици 1. су приказане вредности произведене електричне енергије у периоду од 1970. до 2007. године.

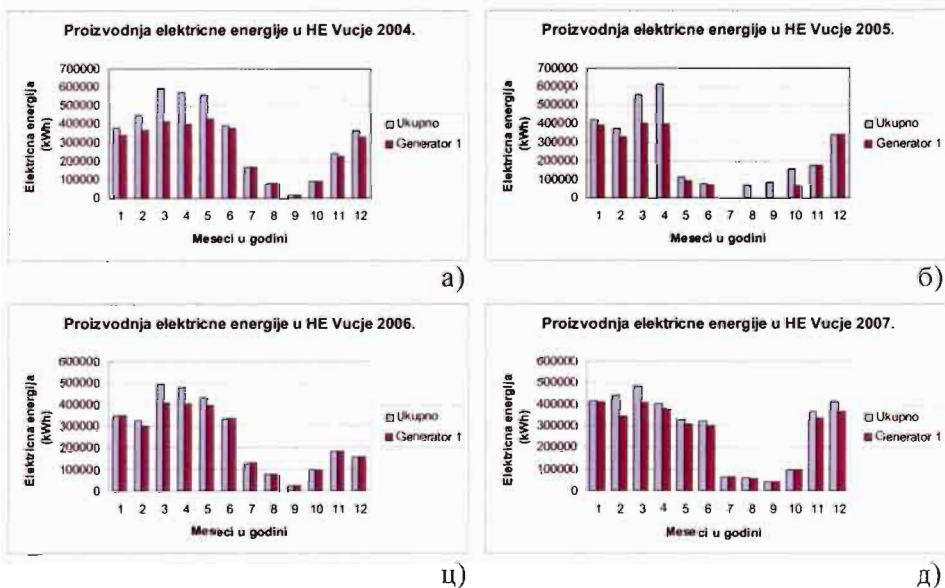
На представљеном дијаграму карактеристичне су две године, у којима је из објективних разлога производња електричне енергије била практично обустављена. 1997. године, због извођења обимних радова на санацији водне коморе, био је онемогућен нормалан рад генератора, па се са производњом почело након завршетка радова. 1999. г. је због бомбардовања СР Југославије производња електричне енергије била обустављена, такође и због одсуства кадра упошљеног на хидроелектрани. У

<sup>5</sup> Небојша Станковић, нав. дело, 29/31.

делу 2000. године, због опсежнијих радова на санацији дела канала који је био оштећен, производни капацитети нису све време били ангажовани. Такође, са слике 1. се може уочити циклус од десетак година у којем се смењују кишне и године у којима је падавина било знатно мање. У периоду кишних година производња је близу 4 GWh, док је у сушним годинама производња много мања, у просеку до 2 GWh.



Слика 1. Остварена производња електричне енергије у ХЕ Вучје од 1970. до 2007. године



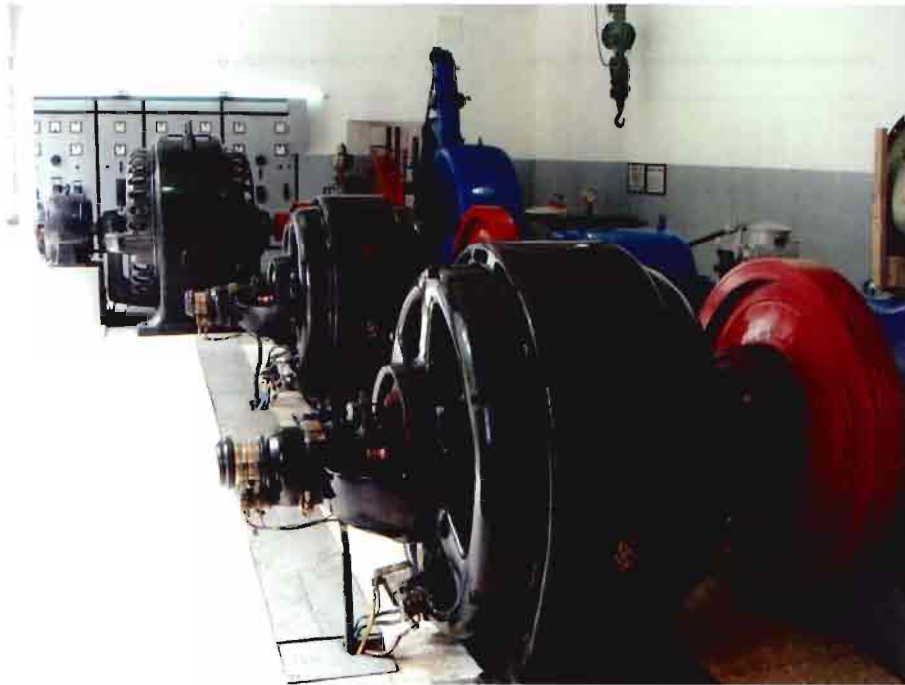
Слика 2. Укупна производња електричне енергије и производња остварена генератором Г1 у ХЕ Вучје у периоду од 2004. до 2007. године

Подаци о произведеној активној електричној енергији у протекле четири године представљени су на слици 2. а), б), ц) и д) и, поређења ради,

приказују укупну месечну производњу и производњу коју је остварио генератор највеће снаге Г1.

Са слике 2. а), б), ц) и д) може се видети да се највећа производња остварује током пролећних месеци, након отапања снега и обилнијих киша, док се најмање струје производи крајем лета, због суше и периода редовног одржавања и ремонта постројења. У протекле четири године остварена је укупна производња од 13.426 GWh и то 3.904 GWh, 2.976 GWh, 3.100 GWh и 3.441 GWh, респективно по годинама. Највеће учешће у производњи има генератор Г1 са просечним временом рада од око 8000 х годишње, па се из тог разлога њему посвећује посебна пажња у анализи.

Према званичним подацима о хидроелектранама снаге до 10 000 kW у Србији, без територија покрајина, из 1990. године, хидроелектрана Вучје је била девета по инсталисаној снази, али на знатно вишем, петом месту по годишњој производњи електричне енергије. Према плану производње, заснованом поред осталог и на дугорочним хидрометеоролошким прогнозама, у наредних десетак година планира се одржавање нивоа производње у распону од 3.5-4.5 GWh активне енергије годишње.<sup>6</sup> На слици 3. приказани су генератори у погону у ХЕ Вучје.



Слика 3. Генератори у Хидроелектрани Вучје

6 Небојша Станковић, нав. дело, 31.



#### 4. ИНДИКАТОРИ КВАЛИТЕТА НАПОНА

Дистрибутивни системи су пројектовани за напоне и струје синусоидалног таласног облика. Несинусоидалне струје могу настати због несинусоидалног напона генератора, рада нелинеарних уређаја у мрежи и нелинеарних пријемника. Уопштено говорећи, генерисани напон који се потом трансформише на преносни ниво веома је близак синусоиди и има малу деформацију. Преносни водови и трансформатори су прилично линеарни и узрокују малу деформацију таласних облика напона или струја. Међутим, погони са регулисаном брзином, извори непрекидног напајања и неки пријемници су нелинеарни. Они могу узроковати озбиљне проблеме, као што су пораст губитака снаге и енергије у водовима и трансформаторима, кварове кондензатора, неправилан рад електронске опреме и прекидача.

Генерално, сваки несинусоидални периодични таласни облик се може представити сумом једносмерне компоненте и синусоидалних таласних облика различитих амплитуда и фазних померања и фреквенција које су целобројни умношци основне фреквенције – хармоника. Тако се сваки периодични напон  $U(t)$  може изразити сумом:

$$U(t) = U_0 + \sum_{h=1}^N U_h \sin(h\omega t + \theta_h) \quad (1)$$

За описивање нивоа виших хармоника, у раду је коришћена укупна хармонијска дисторзија напона и струје,

$$THDU = \frac{\left[ \sum_{h=2}^N (U_h)^2 \right]^{1/2}}{U_1} 100\% \quad THDI = \frac{\left[ \sum_{h=2}^N (I_h)^2 \right]^{1/2}}{I_1} 100\% \quad (2)$$

Индивидуална хармонијска дисторзија,

$$HDI_h = \frac{U_h}{U_1} 100\% \quad HDI_h = \frac{I_h}{I_1} 100\% \quad (3)$$

Крест фактори напона и струје,

$$CFU = \frac{U_{\max}}{U_{\text{eff}}} \quad CFI = \frac{I_{\max}}{I_{\text{eff}}} \quad (4)$$

Несиметрија трофазних мрежа је приказана фактором несиметрије напона и струје,

$$U_{\text{unb}} = \frac{|U_s|}{|U_d|} \quad I_{\text{unb}} = \frac{|I_s|}{|I_d|} \quad (5)$$

где индекс означава инверзну, а индекс директну компоненту напона, односно струје.<sup>7</sup>

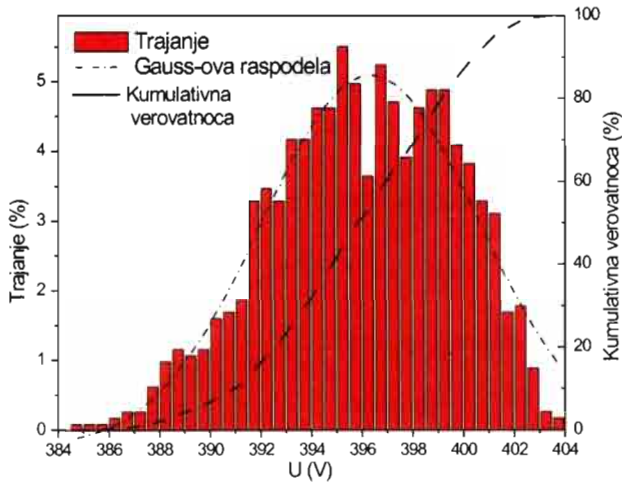
*K*- фактор:

$$K = \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} h^2 I_{h(pu)}^2$$

где је  $I_{h(pu)}$  удео струје *h*-тог хармоника у ефективној вредности струје оптерећења.

## 5. ПРИКАЗ РЕЗУЛТАТА МЕРЕЊА

Анализа квалитета произведене електричне енергије у хидро-електрани Вучје је урађена из разлога што никада раније таква анализа није урађена па су резултати јавности још увек непознати. Један од главних разлога за то био је недостатак адекватне мерне опреме на овом подручју, којом би се једна опсежнија анализа урадила. Данас, са постојањем одговарајуће мерне опреме, извршено је мерење квалитета произведене електричне енергије а добијени резултати су овде представљени. Мерења су извршена током недељу дана, априла 2008. године, на генератору Г1 када је производња на највишем нивоу. Може се слободно рећи да су забележене прилике које су владале на генератору Г1 приближно исте за све време нормалне експлоатације.

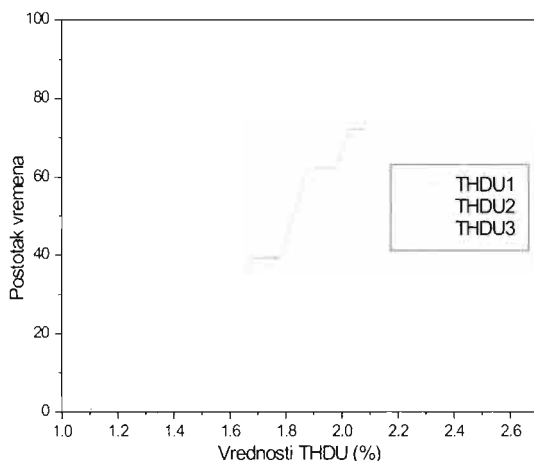


Слика 4. Трајање, Гаусс-ова расподела и кумулативна вероватноћа напона на генератору Г1

7 Лидија Корунковић, Добривоје Стојановић, *Индикациони квалитети напона неких нелинеарних појршача на подручју ЈП "Електродистрибуција" Ниш*, Електропривреда, Београд 2005, 72/73.

За време мерења ниво напона на генератору се кретао у границама од 384.4V до 404.2V, што показује да су варијације напона биле између -3.9% и +1.05% од номиналне вредности. Граничне вредности су одређене као  $\pm 10\% U_n$  у току 95% недеље (160 сати). Средња вредност напона је износила 395.99V. На слици 4. приказана је средња вредност трајања сва три међуфазна напона у периоду мерења, као и Gauss-ова расподела и кумулативна вероватноћа те вредности.

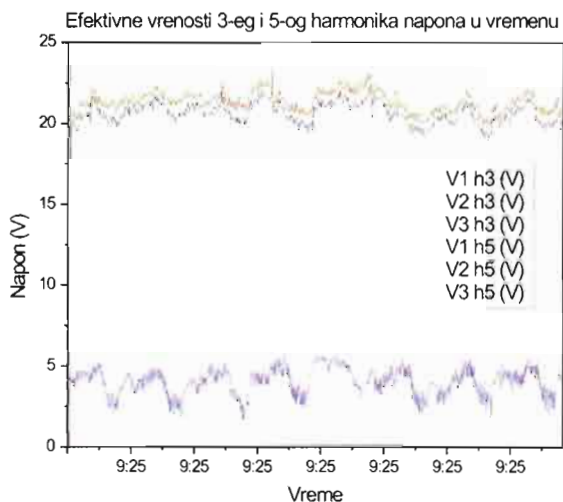
Медијана Gauss-ове расподеле се налази на вредности 396,34 V, са одступањем од 8.55V. Коефицијент корелације је 0.931, што указује на јаку корелациону везу. Према искуству сматра се да је корелациона веза између две променљиве величине врло јака ако је апсолутна вредност коефицијента корелације  $1 > |r| > 0.9$ , јака ако је  $0.9 > |r| > 0.7$ , слаба ако је  $0.7 > |r| > 0.5$  и врло слаба ако је  $0.5 > |r| > 0.8$ . Несиметрија напона је износила највише  $U_{umb} = 0.3\%$ . Средња вредност параметра THDU за време мерења је била 1.85% а максимална 2.56%, што је у складу са већином националних стандарда за нисконапонске мреже тј. <5%. Минимална забележена вредност је износила 1%. Спектри виших хармоника линијских напона доминантно садрже пети хармоник. Средње процентуалне вредности 5-ог ( $HDU_5$ ) у односу на основни хармоник у току мерења су износиле 1.713%, 1.787% и 1.795% респективно по фазама, (IEEE лимит је 3%). На слици 5. је приказана кумулативна вероватноћа појављивања параметра THDU. Статистичком обрадом резултата добија се да у 95% времена THD напона није прелазио вредност 2,4%. Параметар CFU се у току мерења кретао у границама од 1.42 до 1.453, са средњом вредношћу од 1.439.



Слика 5. Кумулативна вероватноћа појављивања параметра THDU

8 Светозар Вукадиновић, Елементи теорије вероватноће и математичке статистике, Београд 1990, 415/456.

Фазни напони на генератору су изобличени у већој мери, па је тако средња вредност THDV била велика, 9.4%, са највећом и најмањом регистрованој вредношћу дисторзије од 10.5% тј. 8.33%. Генератор ради са уземљеним звездиштем, иако то није неопходно. С обзиром на чињеницу да се објекат хидроелектране за сопствене потребе електричном енергијом напаја из мреже средњег напона издвојеним струјним колима, потврђује се непотребност уземљења звездишта. Последица рада генератора са уземљеним звездиштем је протицање струје у неутралном проводнику, која садржи хармонике чији је ред дељив са три. Анализом спектра напона између фазног проводника и неутралног проводника кроз који протиче извесна струја показало се да трећи хармоници имају високе ефективне вредности. Поред израженог присуства трећег хармоника фазног напона, мање али не и занемарљиво учешће има пети хармоник фазног напона. Средња процентуална вредност присуства трећег хармоника по фазама је 8.93%, 9.26%, 9.28% а петог 1.71%, 1.78% и 1.79%, респективно. На слици 6. приказане су промене ефективне вредности 3. и 5. хармоника напона свих фаза у времену.

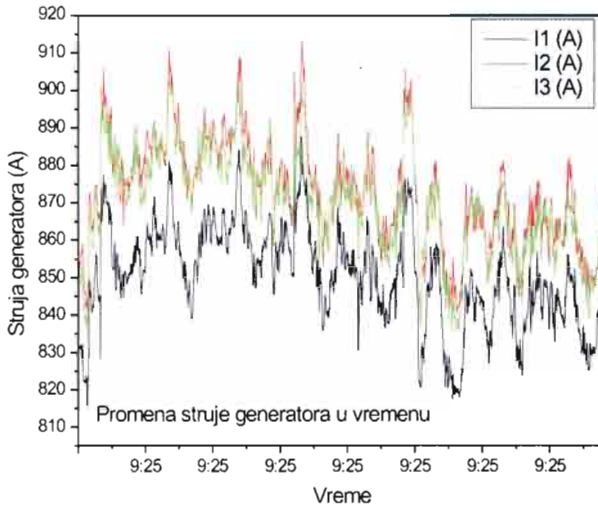


Слика 6. Промена 3. и 5. хармоника фазног напона у времену

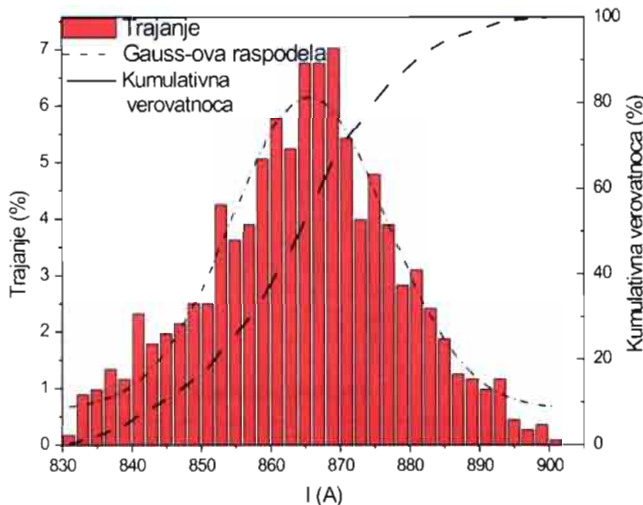
CFV фазног напона се у току мерења кретао од 1.35 до 1.51, што указује на присуство виших хармоника. Забележено је и присуство краткотрајног фликер-фактора напона. У периоду мерења највећа и најмања вредност су износиле 1.573, тј. 0.163, док је средња вредност била 0.599. За период усредњавања од 10 минута, горња гранична вредност фликера напона је 1. У овом случају 95% времена фликер напона је имао вредност мању од 1. Брзе промене напона (фликери) изазивају треперење осветљења које смета људима у радном окружењу изазивајући

главобоље, депресије, проблеме са видом и слично. Интензитет треперења има вредност 1 када га у просторији у којој борави 100 људи уочи њих 50.<sup>9</sup>

Фреквенција се мењала од 49.94 Hz до 50.09 Hz, тј. одступања су била мања од  $\pm 0.18\%$ , што је мање од  $\pm 1\%$ , што је у оквиру граничних вредности. Средња вредност фреквенције је износила 49.99 Hz.



Слика 7. Временски дијаграм струје у току мерења на генератору

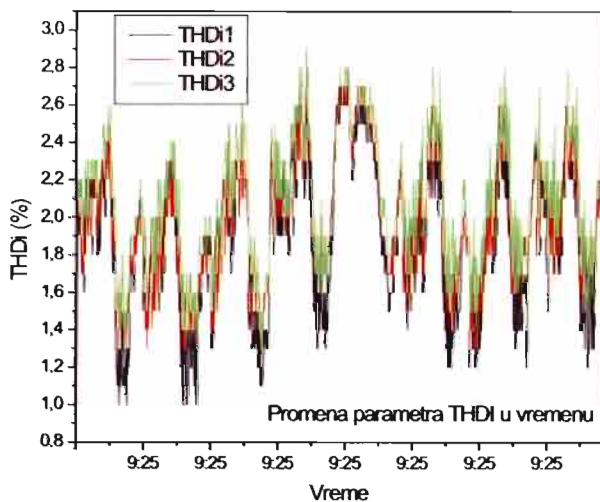


Слика 8. Трајање, Gauss-ова расподела и кумулативна вероватноћа струје на генератору Г1

9 Миладин Танасковић, Томислав Бојковић, Драгослав Перић, нав. дело, 372.

На слици 7. приказана је промена струје генератора у времену, док су на слици 8. приказани трајање струје оптерећења генератора и статистички подаци који прате дијаграм трајања. Приказане су кумулативна вероватноћа појављивања струје генератора и Gauss-ова расподела трајања струје. Медијана Gauss-ове расподеле трајања оптерећења генератора налази се на вредности 865,599 А, са одступањем од 22.423А. Коефицијент корелације је 0.936, што поново указује на јаку корелациону везу.

Просечно оптерећење генератора по фазама за време мерења је било 850.47А, 873.05А, 870.18А, док је максимална и минимална средња вредност фазних струја генератора износила 900.26А и 830.33А, респективно. На слици 9. су приказане временске промене параметра THDI. Средње вредности параметра THDI су износиле 1.89%, 1.98% и 2.09%. Измерене вредности THDI су повољне, јер задовољавају лимите за хармонике струје које прописује IEEE-519 (УСА). Према овом стандарду, сви генератори код којих је однос максималне струје кратког споја на сабирницама према максималној струји потрошача (основни хармоник) на сабирници мањи од 20, имају лимит THDI од 5%. Максимална средња вредност овог параметра свих фаза износила је 2.8%, док је минимална вредност била 1.2%. Просечно повећање Цулових губитака због присуства виших хармоника у струјама генератора је веома мало и износи 0.04%. Параметар CFI је достигао максималну вредност од 1.52, док је средња вредност изосила 1.42.

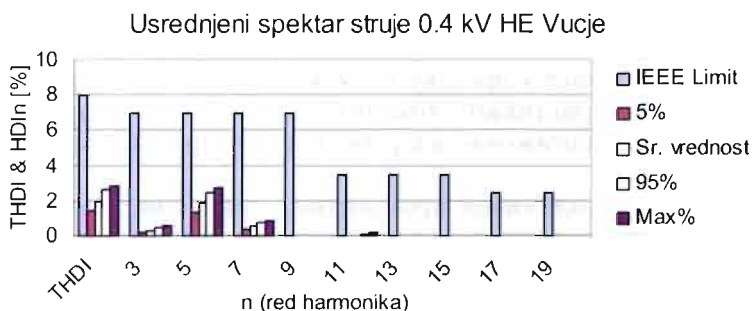


Слика 9. Временски дијаграм параметра THDI у току мерења

Највећи утицај у хармонијској дисторзији таласног облика струје има пети хармоник који може да се преноси кроз мрежу. Средње ефек-

тивне вредности петих хармоника струја износиле су 15.64А, 16.54А и 17.14А. Трећи хармоници струје су такође присутни, али са знатно мањом средњом ефективном вредношћу: 1.76А, 1.99А и 4.28А, респективно по фазама.

Као последица несиметричних струја по фазама, кроз уземљено звездиште генератора протиче извесна струја. Максимално и минимално забележене вредности струје су 15.9А и 12.4А, респективно. Средња вредност учешћа трећег хармоника у струји неутралног проводника је 57.13%. Средња вредност струјне несиметрије по фазама је износила  $I_{unb}=1.42\%$ . Спектар струје оптерећења генератора приказан је на слици 10. Показује се да је тотална хармонијска дисторзија таласног облика струје и индивидуална хармонијска дисторзија појединих хармонијских компонената у оквиру дозвољених граничних вредности, које прописује стандард IEEE.



Слика 10. Статистичка обрада хармонијског спектра струје

На појаву струје у уземљеном звездишту поред несиметрије фазних струја утичу и хармоници чији је ред дељив са три, који представљају нулту компоненту несиметричног трофазног система. У звездишту генератора ови хармоници се аритметички сабирају. Присуство трећег хармоника струје огледа се у фазном напону у којем је, такође, трећи хармоник доминантан. Спрега трансформатора је таква да се трећи хармоник струје задржава у примарном намотају, тј. не преноси се даље у мрежу средњег напона. Међутим, негативна последица задржавања хармоника, чији је ред дељив са три у спреси троугао примарног намотаја трансформатора, може бити повећање губитака и додатно загревање трансформатора. Прекомерно загревање може утицати на смањење животног века трансформатора. Овде то није случај, јер је максимално оптерећење којим генератор напаја мрежу тек близу 60% назначене струје трансформатора. За разлику од трећег, пети хармоник се пресликава у преносну мрежу јер је представник инверзне компоненте у несиметричном систему. Средња вредност струје уземљеног звездишта износила је 14.57А одређено са стандардном девијацијом од 0.44.

Фактор снаге у току мерења задржавао је релативно високу вредност, са малим одступањем. Средња вредност је износила 0.988, а максимална и минимална вредност су 0.994 и 0.97. К-фактор је имао врло ниску вредност, као и границе у којима се његова вредност мењала (од 1 до 1.01). Средња вредност је износила 1.003. Овај параметар одређује меру повећања губитака у трансформатору. Ниска регистрована вредност указује на то да се у трансформатору не јављају значајни допунски губици услед вртложних струја.

## 6. ЗАКЉУЧАК

Хидроелектрану у Вучју је 2005. године извршни комитет IEEE уврстио у програм "Milestone", односно листу објеката, проналазака и достигнућа од општег значаја за развој и историју електротехнике у свету. Тиме она постаје званично признати део светске баштине из историје електротехнике. И поред тога, њен практичан значај није умањен јер се годишње у просеку произведе преко 3 GWh. У складу са природним карактеристикама локалитета на којем је хидроелектрана изграђена, највећа ангажованост агрегата је у пролећним месецима а најмања у летњим.

Постизани високи нивои производње електричне енергије остварени су коришћењем погодних временских прилика. Међутим, не треба оставити по страни ни максималну спремност постројења, да правовремено и адекватно одговори захтевима који омогућавају максималну искоришћеност ресурса. Ово је постигнуто благовремено обављеним ремонтима инсталираних агрегата и несебичним ангажовањем свих запослених у ХЕ Вучје.

Квалитет произведене електричне енергије је на високом нивоу, ако се има у виду старост произведених генератора који се користе. Изражено је присуство 3. и 5. хармоника напона, али је укупно изобличење таласног облика испод дозвољене границе. Вредности измерених параметара су задовољавајуће и у границама признатих међународних стандарда, који третирају карактеристике напојних напона јавних дистрибутивних система.