

## MERE ZA POVEĆANJE ENERGETSKE EFIKASNOSTI U INDUSTRIJI PAPIRA ANALIZOM KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Aleksandar Nikolić

*Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd*

**Sadržaj:** U radu je prikazana analiza kvaliteta električne energije korišćena za određivanje mera za povećanje energetske efikasnosti u pogonu Fabrike hartije i drvenjače "Božo Tomić" Čačak. Analiza je sprovedena na osnovu rezultata dobijenih merenjem u okviru projekta Ministarstva za nauku i zaštitu životne sredine pod nazivom "Uvođenje gazdovanja energijom i primena mera energetske efikasnosti u papirnoj industriji".

**Ključne reči:** analiza, energetska efikasnost, kvalitet, merenje, papirna industrija

### 1. UVOD

Papirna industrija spada u velike potrošače energije. Iako je još od 70-tih godina prošlog veka smanjenje potrošnje energije trend u papirnoj industriji, prema podacima raznih istraživanja tržišta početkom 90-tih godina intenzitet energije po dolaru gotovog proizvoda je iznosio 21MJ [1], što papirnu industriju rangira kao drugu industrijsku grupu u proizvodnom sektoru po udelu energije u procesu proizvodnje.

Fabrika hartije i drvenjače "Božo Tomić" je jedan od najvećih potrošača energije u Čačku i okolini. Troškovi energije u ovoj fabrici učestvuju u ceni finalnog proizvoda sa preko 30%, dok je svetski prosek ispod 15% [1], a u zemljama evropske unije 8-12% [2]. To znači da postoji značajan prostor za uštedu energije, uprkos poznatim barijerama koje se javljaju pri implementaciji programa energetske efikasnosti i u svetu i kod nas [3].

U tom cilju je i pokrenut projekat kod Ministarstva za nauku i zaštitu životne sredine, pod nazivom "Uvođenje gazdovanja energijom i primena mera energetske efikasnosti u papirnoj industriji". Koordinator ovog projekta je Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" iz Beograda, dok je korisnik kod koga su implementirani rezultati projekta Fabrika hartije.

Cilj ovog istraživačko-demonstracionog projekta je određivanje primenljivih mera za povećanje energetske efikasnosti (kroz sprovedene energetske bilanse) i uvođenje sistema za gazdovanje energijom u fabrici hartije. Takođe, jedan deo predloženih mera energetske efikasnosti je i praktično primenjen (mere energetske efikasnosti koje se odnose na smanjenje potrošnje električne energije – uvođenje kompenzacije reaktivne energije na postrojenju vodozahvata na Zapadnoj Moravi i ugradnja sistema za monitoring potrošnje električne energije na papir mašini PM3).

U okviru rada su korišćeni rezultati predstavljeni u detaljnom elektro energetskom bilansu koji je sproveden u okviru objekata fabrike hartije u oktobru 2005. godine.

### 2. MERE ENERGETSKE EFIKASNOSTI

Mere koje se mogu preduzeti u cilju povećanja energetske efikasnosti u papirnoj industriji se prvenstveno odnose na popravljavanje postojećeg faktora snage u postrojenju

za napajanje električnom energijom, primeni novih tehnoloških rešenja u pokretanju, upravljanju i vođenju procesa koja vode ka smanjenju potrošnje električne energije, kao i u primeni savremenih sistema osvetljenja.

Koncept elektromotornih pogona za industriju papira podrazumeva upotrebu asinhronih motora (umesto dosadašnjih rešenja sa jednosmernim motorima) i savremenih mikroprocesorskih frekventnih pretvarača. Navedena rešenja se primenjuju na glavnim pogonima papir mašina, i to na:

- pogonu pumpe na former partiji,
- pogonu vakuum pumpe,
- pogonu kretanja former partije,
- pogonu kretanja sušnih grupa i
- pogonu kretanja u finalnoj obradi.

Za navedene pogone je pokazano da se mogu ostvariti uštede električne energije na nivou od oko 10% za pogonske motore, i od 15% do 20% za motore vakuum pumpe i pumpe former partije [4]. Osim primene frekventnih pretvarača kod ugradnje novih motora se preporučuje upotreba energetski efikasnih motora, koji prema EU standardima pripadaju grupi EFF 1 (visoko efikasni motori) ili EFF 2 (motori sa poboljšanom efikasnošću), pri čemu se za motore koji rade 2000 i više sati godišnje preporučuju oni iz grupe EFF 1.

Kvalitetno osvetljenje je neophodno sa stanovišta sigurnosti, poboljšane produktivnosti i uslova rada. Na osvetljenje pogona za proizvodnju papira obično otpada 2%-5% od ukupnih potreba za električnom energijom, međutim to može da odgovara električnom opterećenju od par stotina kilovata. Savremeni sistemi osvetljenja sa štedljivim svetiljkama visokog pritiska mogu da donesu uštede u opsegu od 50% do 80% u odnosu na postojeće svetiljke sa živinim sijalicama. Dodatna poboljšanja se mogu postići primenom automatske regulacije svetla u zavisnosti od zauzetosti prostorija, doba dana, itd.

### **3. ANALIZA KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Za primenu mera energetske efikasnosti koje se odnose na uštedu električne energije neophodno je izvršiti odgovarajuća merenja. Uz rezultate dobijene merenjima koriste se i mesečni računi za utrošenu električnu energiju i mesečni izveštaji o proizvodnji, kako bi se jasno odredio uticaj sezonskog rada i razlika pri promeni proizvodnog programa.

Merni instrument koji se koristi za merenje električnih veličina (napona i struja) i računanje ostalih veličina (snage, faktor snage, faktori izobličenja, viši harmonici napona i struja) na osnovu kojih se određuje kvalitet električne energije prema važećim svetskim standardima [5]-[7] je analizator kvaliteta električne energije. U okviru navedenog projekta korišćen je savremeni trofazni analizator firme Chauvin Arnoux, model 8334. Navedeni analizator je izabran na osnovu potrebne tačnosti merenja (0,5% stvarne efektivne vrednosti napona i struja, 1% energije), jednostavnosti korišćenja na terenu (jasni meniji, pregledni LCD ekran u boji, fleksibilni strujni senzori sa opsegom do 6500A) i kvalitetnog softvera DataView Pro (konfigurisanje uređaja, prikaz merenih vrednosti na PC računaru u realnom vremenu, preuzimanje merenih vrednosti serijskom vezom, obrada podataka i izrada izveštaja) [8].

#### **3.1. Merenja u pogonu**

Na sledećoj slici je dat snimak iz pogona, pri merenju na motorima pumpe i ventilatora u kotlarnici.



*Slika 1 – Merenja analizatorom kvaliteta električne energije*

Parametri koji su posmatrani na računaru u realnom vremenu su:

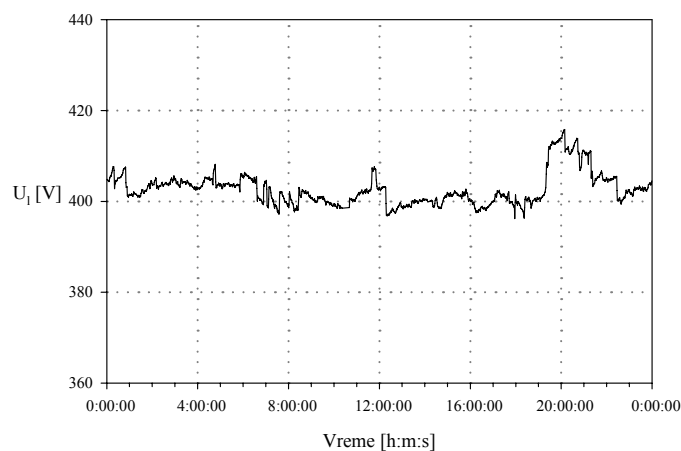
- stvarne efektivne vrednosti i talasni oblici međufaznih napona i linijskih struja,
- aktivna i reaktivna snaga,
- faktor snage,
- ukupni faktori izobličenja napona i struje.

U narednoj tabeli su dati rezultati merenja dobijeni u trafo stanici TS I na glavnom izvodu transformatora T1 10/0,4kV snage 1,25MVA koji napaja papir mašinu PM 3. Obzirom da je ovo najveća mašina u fabrici, izvršeno je nekoliko merenja i jedno u trajanju od 24 časa da bi se video eventualni uticaj smenskog rada i promene proizvodnog programa.

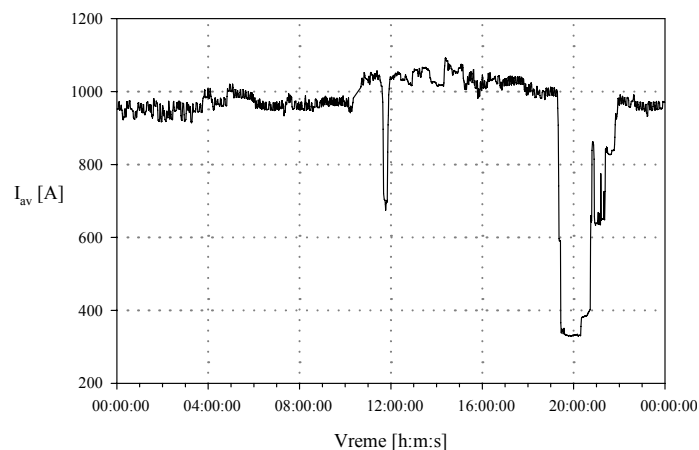
*Tabela 1 – Karakteristične merene vrednosti prema standardu EN 50160*

Veličina	Minimum	Maksimum	Srednja vrednost	Donji limit po EN50160	Gornji limit po EN50160
f (Hz)	49,94	50,06	49,99	49,9	50,1
$U_{sr}$ (V)	396,2	415,8	397,62	360	440
THD <sub>U</sub> (%)	1,4	2,2	1,8	-	8

Na sledećim slikama su prikazane srednje vrednosti linijskih napona i struja po fazama.



Slika 2 – Srednja vrednost međufaznih napona na T1 u trajanju od 24h



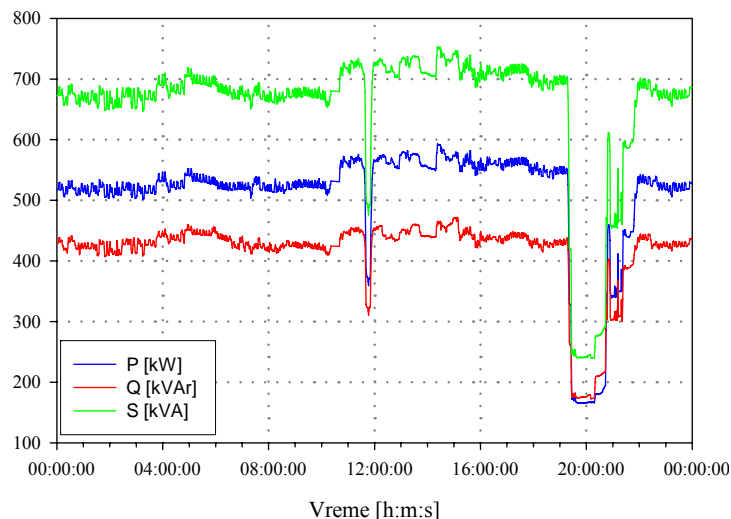
Slika 3 – Srednja vrednost linijskih struja na T1 u periodu od 24h

Sa slike 2 se može zaključiti da je napon prilično stabilan i u okviru dozvoljenih tolerancija definisanih standardom EN 50160 [5]. Na slici 3 na kojoj je prikazana srednja vrednost linijskih struja po fazama vidi se da je opterećenje prilično ustaljeno (maksimalno 1090A), uz nekoliko nižih vrednosti koje su očitane u trenucima zastoja mašine pri promeni proizvodnog programa. Prema podacima iz proizvodnje, u navedenom periodu od 24 časa na PM3 je proizvedeno 39,3 tone papira iz 4 proizvodna programa (superior, risenšlak, pekarski papir i šrenc).

### 3.2. Analiza rezultata i predlog rešenja

Nakon snimanja izmerenih vrednosti izvršena je detaljna obrada podataka i izrađen finalni izveštaj. Pored analize proizvodnog procesa sa aspekta strujnog opterećenja, za predlog mera energetske efikasnosti koje podrazumevaju popravku faktora snage potrebno je analizirati snage, naročito nivo reaktivne snage koju treba kompenzovati kao i faktor snage. U gore navedenom periodu ustanovljeno je da je ukupni faktor snage na PM3 bio 0,761, dok je maksimalna vrednost reaktivne energije iznosila 470kvar. Prema podacima dobijenim od nadležne službe fabrike, ukupni faktor snage za celu

fabriku je u navedenom periodu iznosio 0,69. Na sledećoj slici su prikazane prividna, aktivna i reaktivna snaga za navedeni period, odakle je zaključeno da bi za izvod T1 trebalo predvideti automatsku kompenzaciju reaktivne energije u ukupnom iznosu od 495kvar (11x45kvar) [9] ili 500kvar (10x50kvar) [10].

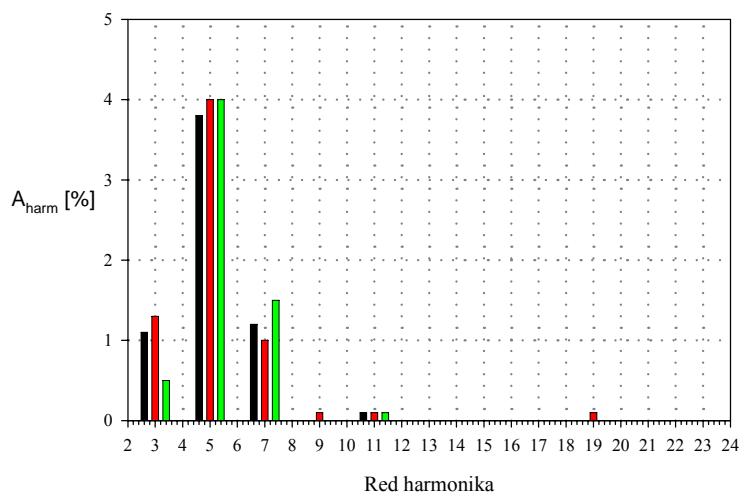
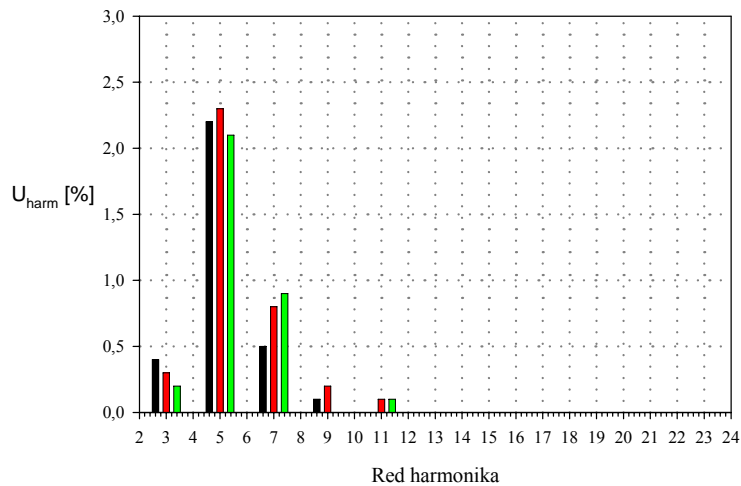


Slika 4 – Prividna, aktivna i reaktivna energija u periodu od 24h

U posmatranom 24 časovnom periodu utrošena aktivna energija je iznosila 12MWh, dok je reaktivna energija 9,8Mvarh odnosno 20% od ukupne reaktivne energije cele fabrike za ovaj period (48,92Mvarh) To znači da pri važećem tarifnom sistemu (0,6din/kvarh) dnevni troškovi za reaktivnu energiju izvoda T1 iznose oko 6000din. odnosno 180.000 din. na mesečnom nivou. Kompenzacijom reaktivne energije, odnosno poboljšanjem faktora snage sa postojećeg od 0,761 na vrednosti bliskim jedinici (0,99) postigle bi se značajne uštede energije i rasteretili postojeći napojni kablovi.

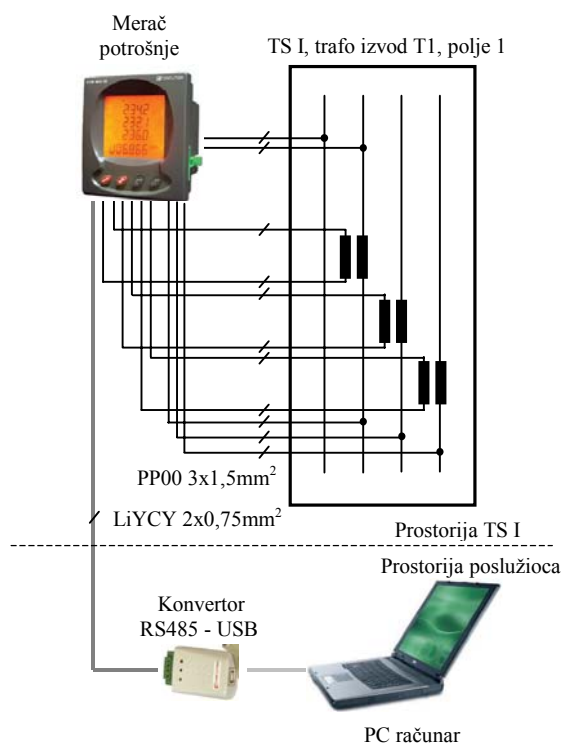
Na osnovu dobijenih vrednosti za ukupna izobličenja napona i struja zaključuje se da nije potrebna primena kondenzatorskih baterija za otežane uslove ili filtra viših harmonika [9],[10], jer su ove vrednosti daleko ispod granica definisanih važećim standardima [6],[7] ( $THD_U = 1,8\% < 8\%$ ,  $THD_I = 3\% < 12\%$ ).

Harmonijska analiza je izvršena u skladu sa standardom IEEE 519, koji vodi računa o višim harmonicima do 50-tog reda kao i o vrednostima za ukupni faktor izobličenja napona i struja, dok standard EN 50160 uvažava harmonike samo do 25-tog reda. Na slici 5 su prikazani harmonici napona i struja u sve tri faze do 25-tog reda obzirom da je merenjem utvrđeno da su harmonici napona iznad 11-tog reda i harmonici struje iznad 19-tog reda zanemarljivi. Proverom nivoa harmonika u skladu sa važećim standardima [5]-[7] ustanovljeno je da nema potrebe za ugradnjom filtra viših harmonika kojima bi se sprečavala pojava rezonance u mreži.



Slika 5 – Harmonici napona (gore) i struja (dole) u sve tri faze

Da bi navedena mera bila u potpunosti verifikovana, predviđena je ugradnja merača potrošnje električne energije sa mogućnošću snimanja izmerenih vrednosti na PC računar. Predloženo je rešenje sa meračem Circutor CVM-NRG96 montiranim u orman izvoda T1 i priključenim na strujne transformatore postojećih ampermetara. Ovaj merač ima displej za prikaz merenih vrednosti po fazama (naponi, struje, snage, faktor snage i faktor izobličenja), a za komunikaciju sa PC računarom koristi serijsku vezu po RS485 protokolu [11]. Merač se sa PC računarom povezuje preko USB-RS485 konvertora, a za snimanje merenih vrednosti i obradu podataka koristi se program PowerStudio 1.2. Šema povezivanja je data na sledećoj slici.



Slika 6 – Način ugradnje merača potrošnje električne energije

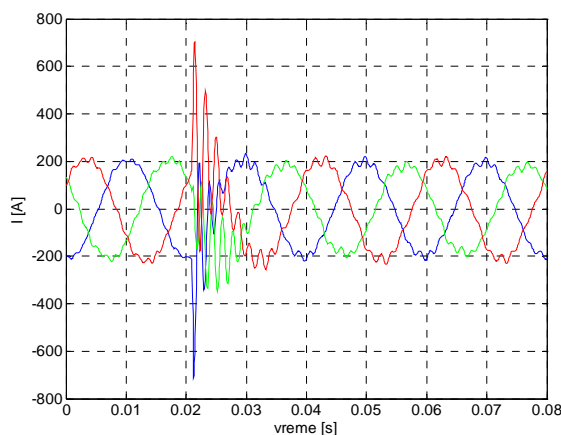
Ugradnja jednog ovakvog merača predstavlja polaznu osnovu za formiranje kompletnog sistema za menadžment energijom, koji bi omogućio bolje praćenje energetske potrebe tehnološkog procesa i mogućnosti da se izvrši uticaj u cilju smanjenja potrošnje energije (pomeranje uključivanja pojedinih potrošača u period niže tarife, isključenje pojedinih potrošača kako se ne bi prekoračila maksimalna angažovana snaga, itd.). Osim predložene mere za povećanje faktora snage i praćenja rezultata u dužem vremenskom periodu, sugerisano je da se ugradi frekventni regulator na motoru snage 55kW pumpe za vodu na gasnom kotlu prikazanom na narednoj slici.



Slika 7 - Pumpa 55kW sa regulacionim ventilom

Razlozi za ugradnju frekventnog regulatora na ovom motoru su:

- Veliki nivo polaznih struja motora (slika 8), što direktno utiče na veću vrednost obračunske snage i kraći radni vek motora,
- Rad motora sa manjim opterećenjem od nominalnog,
- Regulacija protoka vode sa ventilom (slika 7) koji se ciklično otvara/zatvara komandom preko kontaktora, čiji je vek zbog velikog broja uključenja značajno smanjen i zahteva redovno održavanje.



Slika 8 – Tranzijenti struje pri uključenju motora pumpi energane

Pored sprečavanja pojave velikih tranzijentnih struja pri uključenju motora, savremeni frekventni regulatori omogućavaju direktno zadavanje brzine na osnovu merene veličine iz procesa (npr. pritisak, temperatura, protok). Na ovaj način je moguće signal sa merača temperature vode u kotlu direktno dovesti u frekventni regulator koji bi, osim funkcije upravljanja motorom i njegovog boljeg iskorišćenja, vršio i funkciju regulacije dotoka vode u kotao. Tako bi, ukoliko je potrebno smanjiti protok vode, frekventni regulator odredio potrebnu vrednost brzine motora, nižu od nominalne kojom se motor obrće pri direktnom napajanju sa mreže. Kako je karakteristika pumpe kao opterećenja kvadratnog tipa, to je odnos snaga motora pri različitim brzinama jednak trećem stepenu odnosa brzina, što znači da bi smanjenje brzine (protoka) za npr. 20% dovelo do smanjenja snage od 50%, odnosno značajne uštede u električnoj energiji. Eliminisanjem regulacionog ventila se dodatno smanjuje utrošak energije za iznos koji potiče usled pada pritiska na ventilu. U sledećoj tabeli je data komparativna analiza utrošene električne energije za slučaj bez i sa frekventnim regulatorom.

Tabela 2 – Ušteda električne energije na pumpi primenom frekventnog regulatora

Protok (%)	Sati (%)	Radni sati (čas)	Snaga (kW)		Energija za napajanje motora 55kW	
			Sa ventilom	Frekventnim	Sa ventilom	Frekventnim
60	20	1752	45	13	78.840	22.776
70	25	2190	45	18	98.550	39.420
80	35	3066	45	26	137.970	79.716
90	15	1314	45	37	59.130	48.618
100	5	438	45	50	19.710	21.900
	<b>100</b>	<b>8760</b>			<b>394.200</b>	<b>212.430</b>



#### 4. ZAKLJUČAK

U radu su prikazane neke od mera za povećanje energetske efikasnosti u papirnoj industriji, zasnovane na prethodnoj analizi potrošnje i kvaliteta električne energije. Primenom savremenih analizatora kvaliteta električne energije moguće je na osnovu izmerenih vrednosti i posmatranih režima rada pojedinih pogona izvršiti projektovanje kvalitetnih sistema za povećanje faktora snage i sniženje vrednosti reaktivne energije. Pored toga, analizom prelaznih (tranzijentnih) režima i pojava, kao što su start motora pumpi, propadi napona, nagli skokovi struja usled preopterećenja i sl., mogu se detektovati problemi u radu procesa i na osnovu toga dati predlozi za njihovo otklanjanje (npr. primena frekventih pretvarača za upravljanje motora pumpi). Sve predložene mere imaju za cilj kvalitetnije vođenje tehnološkog procesa uz povećanu energetska efikasnost i uštede energije i finansijskih sredstava.

#### LITERATURA

- [1] Lars J. Nilsson, Eric D. Larson, Kenneth Gilbreath, and Ashok Gupta, "Energy Efficiency and the Pulp and Paper Industry", *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry*, New York, August 1995
- [2] "Energy Efficiency Technologies for the European Paper and Board Industry", European Commission – Directorate General for Energy, A Summary of Energy Technologies for the Sector, Bruxelles, Belgium, January 1995
- [3] Jalel Chabchoub, "Frequent Barriers for ESCO Implementation", *Econoler International Canada*, October 2004
- [4] Borislav Jeftenić, "Novi koncept elektromotornog pogona za karton i papir mašine", *Štručni skup Nacionalnog programa energetske efikasnosti*, Beograd, Jun 2004.
- [5] Power Quality Standard EN 50160:2000, "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems", 2000
- [6] Harmonic Emission Standard IEC 61000-3-2
- [7] Harmonic Standard IEEE 519, Revision 1992
- [8] Chauvin Arnoux, *Three Phase Power Quality Analyzer C.A 8334 User's Guide*, France 2002
- [9] Schneider Electric, *Low voltage expert guides No 4 and No 6*, France, 2000
- [10] ABB, *Low Voltage Application Guides*, 1998-2005.
- [11] Circutor, *CVM NRG96 User's Guide*, Spain, 2004

**Abstract:** In the paper the power quality analysis used for energy efficiency improvement in Paper Mill in Čačak is presented. The analysis performed is based on the results obtained from measurements that are part of the project funded by the Ministry of science and environmental protection of Serbia under the title "Energy Management Introduction and Application of the Energy Efficiency Measures in the Paper Industry".

**Key words:** analysys, energy efficiency, power quality, measurements, paper industry

**MEASURES FOR IMPROVING ENERGY EFFICIENCY IN PAPER  
INDUSTRY BASED ON POWER QUALITY ANALYSIS**

Aleksandar Nikolić