

Monitoring potrošnje električne energije zasnovan na kontinualnom praćenju aktivne snage i snage izobličenja

Srdan Đorđević, Slobodan Bojanić, Dejan Stevanović, Marko Dimitrijević

Apstrakt—Najšire korišćeni postupak za određivanje potrošnje pojedinih električnih uređaja je neinvazivni monitoring potrošnje koji koristi samo jedan merni uređaj za celo domaćinstvo. Rad se fokusira na dva aspekta praćenja potrošnje električne energije: detekciju događaja i klasifikaciju električnih uređaja. Predložena tehnika za identifikaciju uređaja zasniva se na kontinualnom praćenju aktivne snage i snage izobličenja. Pokazano je da predloženi postupak predstavlja komplement standardnim algoritmima za identifikaciju rada uređaja. U radu je razmatrana efikasnost predloženog postupka u zavisnosti od kategorije električnog uređaja čiji se rad detektuje.

Ključne reči — monitoring potrošnje uređaja, analiza potrošača, snaga izobličenja

I. UVOD

U sklopu nastojanja da se smanji potrošnja električne energije pokrenuta su istraživanja postupaka koji bi korisnicima pružili uvid u potrošnju pojedinih električnih uređaja i omogućili im da lokalno upravljaju radom uređaja. Postoji više poznatih metoda za monitoring potrošnje uređaja (*Appliance Load Monitoring-ALM*). Zavisno od načina prikupljanja podataka postoje dve kategorije ALM metoda: intrusivni monitoring potrošnje (*Intrusive Load Monitoring - ILM*) i neinvazivni monitoring potrošnje (*Non-Intrusive Load Monitoring - NILM*). ILM metod se realizuje sa većim brojem senzora koji su postavljeni na svakom električnom uređaju čija se potrošnja prati. Za razliku od ILM metoda, NILM metod zahteva postojanje samo jednog mernog uređaja za celo domaćinstvo. Iako su ILM metodi tačniji, NILM metodi su znatno zastupljeniji u praksi jer su troškovi realizacije znatno manji.

U ovom radu biće razmotrena dopuna najstarijeg i najšire korišćenog metoda za neinvazivni monitoring potrošnje uređaja koji je predložio Hart [1]. Radi se o metodu kod kojeg se detekcija rada električnih aparata zasniva na praćenju

vrednosti srednje aktivne (P) i reaktivne (Q) komponente snage. Uređaj se karakteriše položajem tačke u PQ koordinatnom sistemu u kome je P na apscisi a Q na ordinati. U ovom radu predlaže se modifikacija metoda time što se uvodi, kao treći parametar, snaga izobličenja. Praktično, reaktivna snaga zamenjuje se snagom izobličenja. Ispitivanja na tipičnim potrošačima pokazuju da dolazi do značajnog poboljšanja karakteristika metoda.

Naredno poglavlje posvećeno je pregledu najpoznatijih NILM metoda. U trećem poglavlju ukratko je opisan predloženi postupak za monitoring potrošnje električne energije. Četvrto poglavlje daje prikaz eksperimentalnih rezultata.

II. NEINVAZIVNI MONITORING POTROŠNJE UREĐAJA

Realizacija NILM sistema sastoji se iz tri faze: akvizicije podataka, ekstrakcije parametara i klasifikacije uređaja. Prvi korak u realizaciji je akvizicija podataka koja se obavlja u meračima potrošnje električne energije. U ovoj fazi je neophodno obezbediti zadovoljavajuću brzinu odmeravanja podataka, a ona pre svega zavisi od toga koji se parametar električne energije analizira.

Nakom prikupljanja podataka obavlja se ekstrakcije odgovarajućeg parametra električne energije. Pored činjenice da trenutne i srednje vrednosti veličina mogu da pruže izvesne informacije o priključenim uređajima, uobičajeno je da se prate vremenske zavisnosti veličina, odnosno da se detektuju događaji na mreži.

Nakon ekstrakcije parametara obavlja se analiza podataka radi identifikacije potrošača. Većina poznatih metoda za identifikaciju uređaja primenjuje neuronske mreže sa nadgledanim obučavanjem (*supervised training*) [2-4]. Algoritmi za obučavanje ovih neuronskih mreža uglavnom se mogu svrstati u dve kategorije: algoritme zasnovane na optimizaciji i algoritme zasnovane na prepoznavanju oblika (*pattern recognition*).

Optimizacioni pristup ima za cilj da se odredi kombinacija električnih uređaja čija suma snaga što približnije odgovara izmerenoj vrednosti snage. Realizacija ovog postupka je moguća jedino ukoliko se poseduje baza podataka sa zapisom odgovarajućih energetskih parametara za svaki električni uređaj. Sledi da je metod primenjiv na ograničen skup potrošača, što predstavlja njegov značajan nedostatak. Algoritmi zasnovani na prepoznavanju oblika identifikuju uređaje na osnovu karakteristika potrošača određenog tipa

Srdan Đorđević– Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: srdjan.djordjevic@elfak.ni.ac.rs).

Slobodan Bojanić – Escuela Técnica Superior de Ing. de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Španija (e-mail: slobodan@die.upm.es).

Dejan Stevanović - Inovacioni centar naprednih tehnologija CNT d.o.o, Vojvode Mišića 58/2, 18000 Niš, Srbija (e-mail: dejan.stevanovic@icnt.rs).

Marko Dimitrijević– Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14,18000 Niš, Srbija (e-mail: marko.dimitrijevic@elfak.ni.ac.rs).

koje se nazivaju "potpis uređaja" (Load signature). Ovaj metod se više koristi jer njegova primena nije striktno vezana za određeni skup uređaja.

Metodi za neinvazivni monitoring potrošnje (NILM) se kao i karakteristike potrošača mogu svrstati u dve najznačajnije kategorije: stacionarne i tranzicione. NILM metodi zasnovani na stacionarnoj analizi razmatraju stacionarna stanja, dok metodi zasnovani na tranzicionoj analizi razmatraju prelazna stanja u radu uređaja. U nastavku će biti dat prikaz najznačajnijih stacionarnih NILM metoda.

Najstariji i najšire korišćeni stacionarni NILM metod se zasniva na praćenju skokovitih promena aktivne i reaktivne snage [1]. Najznačajnije prednosti ovog postupka su što efikasno identifikuje rezistivne potrošače velike snage i što za njegovu realizaciju nije potrebna velika frekvencija odmeravanja. Ovim postupkom se ne može uočiti rad uređaja kod kojih se snaga kontinualno menja ili uređaja koji su stalno uključeni. Veći nedostatak metoda predstavlja otežano međusobno razdvajanje uređaja koji imaju slične vrednosti aktivne i reaktivne snage. Ovaj problem se jednostavno može uočiti kada se formiraju "dvodimenzionalni potpisi potrošača" (load signature) u PQ ravni.

Usled nastojanja da se prevaziđu nedostaci koje poseduje metod zasnovan na praćenju aktivne i reaktivne snage razvijen je niz metoda koji analizira karakteristike talasnog oblika struje ili napona [5] kao što su: amplituda struje ili napona, srednja vrednost struje ili napona, fazna razlika i dr.

NILM metodi koji se zasnivaju na analizi frekvencijske karakteristike struje su veoma efikasni pri detekciji nelinearnih potrošača [6]. Prilikom realizacije najčešće se kombinuju sa metodom koji prati aktivnu i reaktivnu snagu. Nedostatak ovog postupka je što je za realizaciju neophodna visoka frekvencija semplovanja struje. Osim toga postupak zahteva posedovanje baze podataka sa vrednostima harmonika struja kako za pojedine uređaje tako i za kombinacije uređaja.

Metod koji se zasniva na V-I trajektoriji identifikuje uređaje na osnovu prikaza trenutnih vrednosti struja i napona u ravni čija je jedna osa napona a druga struje [7]. Pokazano je da se ovim metodom mogu efikasnije rasčlaniti pojedini uređaji u odnosu na metod zasnovan na praćenju snaga. Realizaciju ovog postupka karakteriše intenzivna obrada podataka.

Detektovanje rada električnih uređaja se može realizovati i analizom šuma napona [8]. Primena ovog metoda je ograničena na uređaje koji imaju ugrađene prekidačke izvore napajanja (*switched-mode power supplies*). Samo merenje zahteva primenu specijalizovanog hardvera.

Osnovne komponente svakog NILM sistema čine algoritmi i "potpisi uređaja" (load signatures). Imajući ovu činjenicu u vidu, u nastavku će biti dat pregled električnih karakteristika uređaja koji se sreću u domaćinstvu. S obzirom da bi bilo nepraktično posedovati potrebne parametre električne energije svih mogućih uređaja, obično se pristupa njihovoj klasifikaciji. Jedna od standardnih podela potrošača u domaćinstvu je na: otporne potrošače, elektronske potrošače, uređaje sa elektromotorom i induktivne potrošače [9].

Otporni potrošači imaju faktor snage blizu jedinice dok su

viši harmonici struje zanemarivi. Ovoj kategoriji potrošača pripadaju uređaji namenjeni grejanju ili osvetljenju kao što su sijalice sa užarenim vlaknom, štednjaci, bojleri, i dr.

Kategoriji elektronskih potrošača pripadaju raznovrsni uređaji za koje je zajedničko da sadrže elektronske izvore napajanja. Najšire korišćeni elektronski izvori napajanja su prekidački izvori napajanja zbog velikog koeficijenta iskorišćenja snage. Osnovne odlike ovih potrošača su visok nivo ukupnog harmonijskog izobličenja struje kao i izraženo prisustvo neparnih harmonika struje, pre svega trećeg i petog. Najzastupljeniji uređaji ove kategorije su personalni računari, monitori, televizijski uređaji, fluorescentne lampe sa elektronskim balastom.

Uređaji koji sadrže elektro-motore prilikom rada troše veću količinu reaktivne snage i unose izvesna izobličenja struje koja su ipak manja u odnosu na elektronske uređaje. Ovoj grupi kućnih uređaja pripadaju frižideri, usisivači, ventilatori i dr.

Poslednja kategorija potrošača su induktivni potrošači koji slično, kao uređaji sa motorima, imaju izraženo induktivno opterećenje. Razlika se ogleda u tome da kod elektromotora postoji karakterističan proces pokretanja koji se kod induktivnih potrošača ne pojavljuje. Ovoj grupi potrošača pripadaju fluorescentne sijalice sa elektromagnetnim balastom i mikroaladne pećnice.

III. MONITORING POTROŠNJE ZASNOVAN NA PRAĆENJU AKTIVNE SNAGE I SNAGE IZOBLIČENJA

Usled prisustva nelinearnih potrošača, talasni oblik struje i napona u elektroenergetskoj mreži nije sinusoidalno već sadrži više harmonike. Nelinearni potrošači tokom rada uvode više harmonijske komponente struje koje mogu da prouzrokuju izobličenje napona.

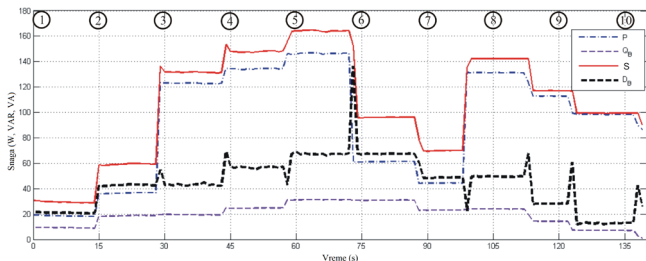
Harmonijska izobličenja napona i struje sadrže značajne informacije o nelinearnim potrošačima priključenim na elektroenergetsku mrežu. Imajući u vidu sve veće prisustvo nelinearnih potrošača u domaćinstvima logično se nameće potreba da se harmonijska izobličenja iskoriste za monitoringa potrošnje uređaja.

U prehodnom poglavlju navedena su neka od rešenja za neinvazivni monitoring potrošnje koja uzimaju u obzir harmonijska izobličenja. Ono što odlikuje ova rešenja je da za identifikaciju uređaja primenjuju prilično složene karakteristike struja i napona potrošača (harmonici struje, napon šuma).

U nastojanju da se informacije o harmonijskim izobličenjima nelinearnih potrošača još potpunije iskoriste za monitoring potrošnje u ovom radu se predlaže dopuna Hart-ijevog NILM metoda [1]. Suština dopune je u tome da se pored dva postojeća parametra u originalnom metodu, odnosno aktivne i reaktivne snage, kao treći parametar uvede snaga izobličenja, jer ova veličina kvantitativno opisuje harmonijska izobličenja.

Postupak za praćenje rada grupe električnih aprata u Hart-ovom i predloženom postupku je identičan i realizuje se u dva koraka. Najpre se primenom procedure za detekciju ivice nad

vremenskom zavisnošću snage identifikuje da je došlo do uključenja ili isključenja uređaja. Nakon toga se nastali priraštaj snage upoređuje sa “dvodimenzionalnim potpisom“ svakog od uređaja u PQ ili PD ravni. Slika 1 ilustruje skokovite promene snaga koje su nastale usled promene režima rada pojedinih potrošača. U ovom slučaju radi se o različitim tipovima sijalica koje su uključivane ili isključivane u pravilnim vremenskim intervalima.



Sl. 1. Skokovite promene aktivne, reaktivne, prividne i distorzionne snage usled uključenja ili isključenja pojedinih potrošača.

Da bi se precizno izračunale vrednosti aktivne i reaktivne snage u prisustvu nelinearnih potrošača neophodno je odrediti vrednosti harmonika struja i napona. Aktivna i reaktivna snaga se u slučaju složenoperiodičnog signala mogu izraziti u funkciji snaga pojedinih harmonika na sledeći način:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} P_h \approx \sum_{h=1}^M V_{RMS h} I_{RMS h} \cos(\theta_h) \quad (1)$$

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h \approx \sum_{h=1}^M V_{RMS h} I_{RMS h} \sin(\theta_h) \quad (2)$$

Gde su: P_h i Q_h aktivna i reaktivna snaga h -tog harmonika, $V_{RMS h}$ i $I_{RMS h}$ efektivna vrednost napona i struje h -tog harmonika, θ_h fazna razlika napona i struje h -tog harmonika.

Prividna snaga koja predstavlja proizvod efektivnih vrednosti napona i struje se takođe može izraziti u funkciji od efektivnih vrednosti pojedinih harmonika na sledeći način:

$$S = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \approx \sqrt{\left(\sum_{h=1}^M V_{RMS h}^2 \right)} \cdot \sqrt{\left(\sum_{h=1}^M I_{RMS h}^2 \right)} \quad (3)$$

Snaga izobličenja, D se može primenom Budeanu-ove definicije [10] izraziti u funkciji prividne, aktivne i reaktivne snage:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (4)$$

Očigledno je da se snaga izobličenja može jednostavno izračunati na osnovu podataka koje daje bilo koji savremeni merač potrošnje električne energije.

Ukoliko se zanemari prisustvo viših harmonika napona, s obzirom da su nelinearna izobličenja napona za uređaje u domaćinstvu najčešće zanemariva, dolazi se do sledećeg izraza za snagu izobličenja:

$$D = V_{RMS1} \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{RMS h}^2} \quad (5)$$

Priraštaj snage izobličenja usled uključenja ili isključenja određenog potrošača se ne može direktno dovesti u vezu sa određenim uređajem kao u slučaju aktivne ili reaktivne snage. Da bi se promena snage izobličenja, koja je definisana izrazom (5), dovela u vezu sa snagom izobličenja koja se razvija na određenom potrošaču neophodno je uzeti u obzir dodatne veličine.

Jedna mogućnost je da se prilikom identifikovanja potrošača osim snage izobličenja iskoristi i vrednosti efektivne struje, koja predstavlja jednu od veličina koje se obavezno mere u svakom meraču potrošnje električne energije. Potrebno je posedovati informacije o snazi izobličenja i efektivnoj struji u tri slučaja: pre promene, nakon promene (uključenja ili isključenja potrošača) i o vrednosti veličina kada je priključen samo jedan potrošač.

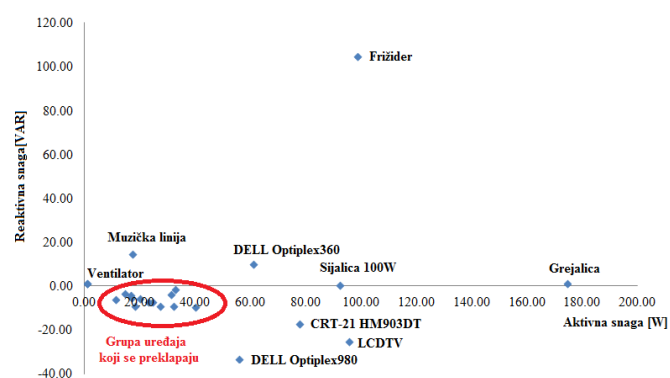
IV. REZULTATI MERENJA

Merenja električnih signala sprovedena su na mernoj grupi koja ispunjava standarde IEC 62052-22 (proizvod firme EWG iz Niša). Ova merna grupa namenjena je merenju aktivne i reaktivne snage kao i efektivnih vrednosti napona i struje.

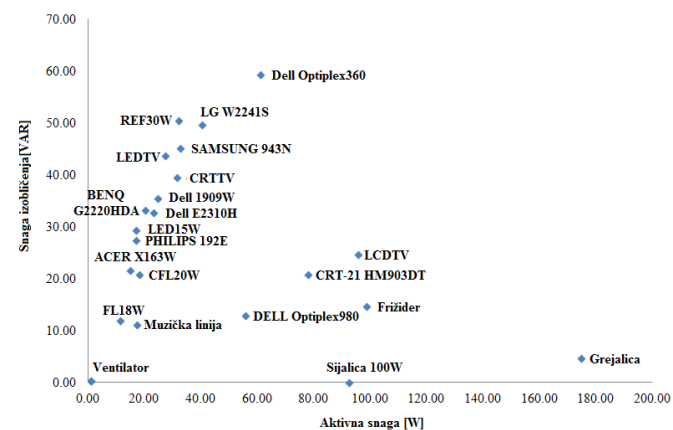
TABELA I

	Potrošač	$I_{RMS}[A]$	$P[W]$	$Q[VAR]$	$D[VAR]$
Sijalice	Sijalica 100W	0.42	92.32	0.74	2.54
	FL18W	0.08	11.33	-5.80	11.99
	ES20Wbulb	0.13	18.30	-8.81	20.79
	LED15W	0.16	16.90	-3.87	29.38
	REF 30W	0.27	32.23	-8.96	50.51
Monitori	CRT-21 M903DT	0.37	77.84	-17.11	20.94
	Dell 1909W	0.20	24.69	-7.15	35.61
	Dell E2310H	0.18	23.33	-7.06	32.86
	BENQ 2220HDA	0.176	20.13	-5.46	33.32
	LG W2241S	0.289	40.28	-9.40	49.75
	ACER X163W	0.117	14.8	-3.37	21.62
	PHILIPS 192E	0.145	17.12	-5.02	27.57
	SAMSUNG 943N	0.247	32.75	-1.24	45.22
PC	DELLoptiplex980	0.30	55.83	-33.05	12.92
	DELL-ptiplex360	0.39	61.09	10.24	59.37
TV	LCD TV	0.436	95.61	-24.86	24.82
	CRT TV	0.217	31.44	-3.73	39.56
	LED TV	0.224	27.36	-8.87	43.77
	Muzička linija	0.109	17.3	14.85	11.17
	Frižider	0.641	98.64	104.78	14.77
	Ventilator	0.008	1.19	1.32	0.42
	Grejalica	0.793	174.60	1.39	4.67

Na osnovu izmerenih veličina, koje se očitavaju svake sekunde, sračunavaju se prividna snaga i snaga izobličenja primenom izraza (3) i (4) respektivno. Obarada podataka obavlja se u personalnom računaru koji je preko serijskog porta povezan sa mernom grupom. Urađena su merenja na nizu savremenih uređaja manje snage. Glavni kriterijum pri izboru potrošača je bio da se pokaže da predloženi metod može da posluži kao komplement standardnom NILM metodu koji ima izražene nedostatke prilikom raspoznavanja rada većeg broja uređaja manje snage. Kao što se iz tabele 1 može videti merenja su izvršena na različitim tipovima sijalica, TV aparatima, računarima, monitorima i još nekim standardnim kućnim i kancelarijskim uređajima. Tabela prikazuje vrednosti aktivne, reaktivne i snage izobličenja koje se razvijaju na svakom od potrošača pojedinačno kada se priključe na električnu mrežu [11,12].



Sl. 2. Raspodela parametara analiziranog skupa potrošača u PQ ravni



Sl. 3. Raspodela parametara analiziranog skupa potrošača u PD ravni

Standardni NILM metod analizira dva parametra elektroenergetske mreže, aktivnu i reaktivnu snagu. Stepenn efikasnosti ovog metoda da rasčlani ili raspozna rad jednog od uređaja se najbolje može ilustrovati ukoliko se aktivna i reaktivna snaga svakog pojedinačnog potrošača istovremeno prikažu u jednoj ravni (PQ ravan). Raspodela analiziranog skupa potrošača u PQ ravni data je na slici 2. Slika 3 prikazuje raspodelu istog skupa uređaja u ravni koja prikazuje aktivnu snagu i snagu izobličenja svakog pojedinačnog potrošača (PD

ravan). Kada se uporedi raspodela potrošača po početnim parametrima u standardnom metodu (PQ ravan) i u predloženom metodu (PD ravan) jasno se može uočiti da je predloženim postupkom otklonjeno preklapanje koje postoji u skupu uređaja čija je aktivna snaga u opsegu od 20 do 50 W.

V. ZAKLJUČAK

Jedan od najznačajnijih nedostataka Hart-ijev metoda za neinvazivni monitoring potrošnje ogleda se u otežanom raspoznavanju rada nelinearnih potrošača male snage. Rezultati merenja pokazuju da se ovaj nedostatak može uspešno otkloniti ukoliko se kao dodatni parameter uvede snaga izobličenja.

Optimalno rešenje za monitoring potrošnje uključivalo bi aktivnu snagu, reaktivnu snagu i snagu izobličenja. Razlog za ovakav stav je u činjenici da kontinualno praćenje aktivne snage i snage izobličenja ne daje dobre rezultate u registrovanju rada linearnih potrošača.

Predloženim rešenjem ostvaruje se poboljšanje u monitoringu potrošnje uređaja male snage. Iako svaki od ovih potrošača pojedinačno ne utiče značajno na ukupnu potrošnju smatramo da njihov udeo u ukupnoj potrošnji domaćinstava nije zanemariv imajući u vidu njihovu brojnost raznovrsnost i sve veću zastupljenost.

U nastavku istraživanja očekuje se verifikacija predloženog postupka na NILM sistemu koji bi uključivao prepoznavanje potrošača primenom veštačke neuronske mreže.

ZAHVALNICA

Rezultati prikazani u ovom radu ostvareni su u okviru projekta TR 32004 čiju realizaciju finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] G. W. Hart, "Residential energy monitoring and computerized surveillance via utility power flows," *IEEE Technology and Society Magazine*, vol. 8, no. 2, pp. 12–16, 1989.
- [2] M. B. Figueiredo, A. D. Almeida, and B. Ribeiro, "An Experimental Study on Electrical Signature Identification of Non-Intrusive Load Monitoring (NILM) Systems," in *Proceedings of the 10th International Conference on Adaptive and Natural Computing Algorithms (ICANNGA'11)*, pp. 31–40, 2011.
- [3] H.-h. Chang, C.-l. Lin, and J.-k. Lee, "Load identification in nonintrusive load monitoring using steady-state and turn-on transient energy algorithms," *14th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design*, IEEE, pp. 27–32, Apr. 2010.
- [4] H.-h. Chang, H.-t. Yang, and C.-l. Lin, "Load Identification in Neural Networks for a Non-intrusive Monitoring of Industrial Electrical Loads," in *Proceedings of the 11th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design 2007 (CSCWD '07)*, pp. 664–674, 2008.
- [5] A.G. Ruzzelli, C. Nicolas, A. Schoofs, G.M.P. O'Hare, "Real-Time Recognition and Profiling of Appliances through a Single Electricity Sensor," In *Proceedings of the 7th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh, and Ad Hoc Communications and Networks*, Boston, MA, USA, pp. 1–9, 21–25 June 2010.
- [6] C. Laughman, D. Lee, R. Cox, S. Shaw, S. Leeb, L. Norford, and P. Armstrong, "Advanced Nonintrusive Monitoring of Electric Loads," *IEEE Power and Energy*, pp. 56–63, 2003.

- [7] H.Y. Lam, G.S.K. Fung, W.K. A Lee, "A Novel method to construct taxonomy electrical appliances based on load signatures," *IEEE Trans. Consum. Electron*, vol. 53, no. 2, pp. 653–660, 2007.
- [8] S. Gupta, M. S. Reynolds, S. N. Patel, "ElectriSense: Single-Point Sensing Using EMI for Electrical Event Detection and Classification in the Home," In Proceedings of the 12th ACM International Conference on Ubiquitous Computing, Copenhagen, Denmark, pp. 139–148, 26–29 September 2010.
- [9] F. Sultanem, "Using appliance signatures for monitoring residential loads at meter panel level," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 4, pp. 1380–1385, 1991.
- [10] C. I. Budeanu, "Reactive and Fictitious Powers," Rumanian National Institute, No. 2, 1927.
- [11] D. Stevanović, P. Petković, "Sistem za detekciju monofaznih potrošača koji unose harmonijska izobličenja," Zbornik LVIII konferencije ETRAN, Vrnjačka Banja, ISBN 978-86-80509-70-9
- [12] D. Stevanović, P. Petković, "Unapređenje sistema za registrovanje potrošnje električne energije Zbornik LVII konferencije ETRAN, Zlatibor

ABSTRACT

The most common method used to detect the operation state of individual electric appliances is Non-Intrusive Load Monitoring which exploits only aggregate power consumption signals. This paper focuses on event detection and appliance event classification which are integral part of the load monitoring. The load identification technique proposed in this paper uses the step changes in active and distortion power. This method could be a complement to the commonly used load identification algorithms. We consider the efficiency of the proposed procedure with respect to the category of appliances.

A load monitoring technique based on observing the step changes in active and distortion power

Srdjan Djordjević, Slobodan Bojanić,
Dejan Stevanović, Marko Dimitrijević