

Razdvajanje potrošača zasnovano na neinvazivnom praćenju potrošnje

Miloš Daković¹, Budimir Lutovac¹, Tomislav Šekara²

¹ Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet, Podgorica, Crna Gora,

² Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija
milos@ac.me, budo@ac.me, tomi@etf.rs

Sažetak—Predložen je metod za neinvazivno praćenje rada potrošača u složenom sistemu. Polazna informacija je signal ukupne aktivne snage u zavisnosti od vremena. Razdvajanje potrošača je izvršeno analizom promjena snage u susjednim mjernim trenucima. Metod je primijenjen na simulirane i realne podatke.

Ključne riječi—Neinvazivno praćenje potrošnje, Razdvajanje potrošača, Analiza efikasnosti, Elektroenergetski sistem, Digitalna obrada signala

I. UVOD

Razdvajanje i analiza rada pojedinačnih potrošača neinvazivnim metodama je aktuelna istraživačka tema u oblasti energetske efikasnosti već dugi niz godina [1]–[4]. Razvojem metoda digitalne obrade signala [5], mjernih uređaja i računarskih sistema za analizu podataka omogućena je praktična implementacija sistema za monitoring i analizu potrošnje. Ovakvi sistemi daju informacije koje se mogu iskoristiti u planskom smanjenju potrošnje i povećavanju energetske efikasnosti potrošača električne energije.

Primjenom klasičnih metoda digitalne obrade signala predložena je jednostavna i efikasna procedura za analizu signala snage i razdvajanja potrošnje pojedinih potrošača iz zbirnog signala. U radovima [3], [4] za rješavanje ovog problema korišćeni su metodi teorije grafova.

U odjeljku II je uveden model signala snage. Predložena procedura je uvedena u odjeljku III. Rezultati dobijeni primjenom predložene metode na simulirane i realne podatke su dati u odjeljku IV.

II. MODEL SIGNALA

Signal dobijen mjerenjem angažovane snage se može modelovati funkcijom koja je po djelovima ravna, a promjene vrijednosti se dešavaju u trenucima uključivanja, (porast funkcije) odnosno isključivanja (pad funkcije) potrošača. Ovaj model podrazumijeva da svi potrošači imaju konstantnu snagu.

Angažovana aktivna snaga jednog potrošača $p^{(k)}(t)$ se može modelovati kao

$$p^{(k)}(t) = \sum_{n=1}^{N_k} P^{(k)} \left(h(t - t_{on}^{(k)}(n)) - h(t - t_{off}^{(k)}(n)) \right) \quad (1)$$

gdje je $P^{(k)}$ snaga posmatranog potrošača, N_k broj uključivanja potrošača u posmatranom vremenskom intervalu, $h(t)$ je jedinična Hevisajdova funkcija, $t_{on}^{(k)}(n)$ su trenuci uključivanja potrošača, a $t_{off}^{(k)}(n)$ su odgovarajući trenuci isključivanja potrošača takvi da vrijedi $t_{on}^{(k)}(1) < t_{off}^{(k)}(1) < t_{on}^{(k)}(2) < t_{off}^{(k)}(2) < \dots < t_{on}^{(k)}(N_k) < t_{off}^{(k)}(N_k)$. Dakle, potrošač je aktivan u N_k neprekidajućih vremenskih intervala $(t_{on}^{(k)}(n), t_{off}^{(k)}(n))$, $n = 1, 2, \dots, N_k$.

Izraz (1) se može napisati u obliku

$$p^{(k)}(t) = P^{(k)} a^{(k)}(t) \quad (2)$$

gdje je

$$a^{(k)}(t) = \sum_{n=1}^{N_k} \left(h(t - t_{on}^{(k)}(n)) - h(t - t_{off}^{(k)}(n)) \right) \quad (3)$$

prekidačka funkcija koja uzima vrijednost 1 kada je potrošač uključen i 0 kada je potrošač isključen.

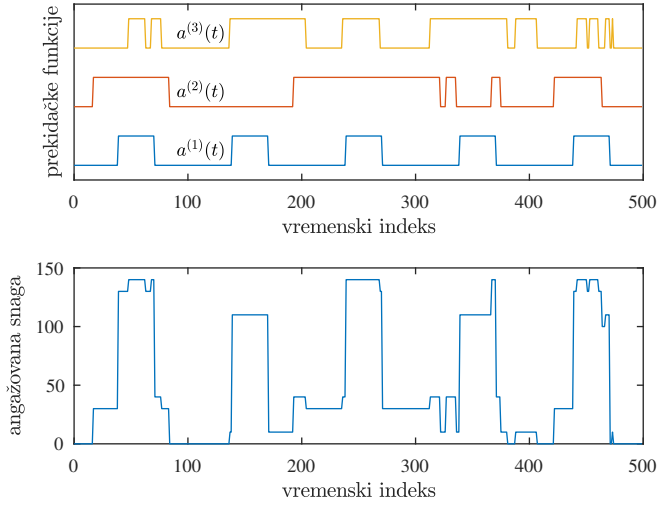
U slučaju K potrošača ukupna angažovana snaga se modeluje kao zbir pojedinačnih snaga

$$p(t) = \sum_{k=1}^K p^{(k)}(t) = \sum_{k=1}^K P^{(k)} a_n^{(k)}(t) \quad (4)$$

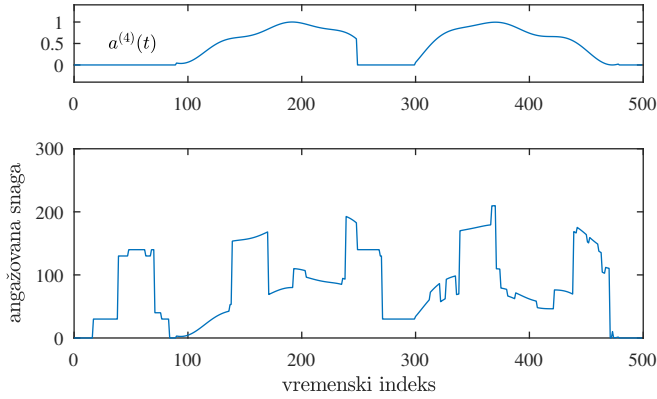
Na slici 1 je prikazan primjer signala $p(t)$ za slučaj $K = 3$ potrošača čije su snage $P^{(1)} = 10\text{W}$, $P^{(2)} = 100\text{W}$ i $P^{(3)} = 30\text{W}$. U gornjem dijelu slike su prikazane prekidačke funkcije za tri posmatrana potrošača a u donjem dijelu je data ukupna angažovana snaga $p(t)$.

Dodatno se u model mogu uključiti i potrošači promjenljive snage. U tom slučaju se angažovana snaga modeluje funkcijom koja može imati diskontinuitete (u trenucima uključivanja ili isključivanja potrošača), a pored toga ima i kontinualnu promjenu angažovane snage u intervalu od uključivanja do isključenja potrošača.

Matematički se ovakav potrošač može modelovati formulom (2) pri čemu je $P^{(k)}$ maksimalna snaga posmatranog potrošača, a prekidačka funkcija $a^{(k)}(t)$ može uzeti bilo koju vrijednost od 0 do 1. Njene vrijednosti se mogu tumačiti kao procenat



Slika 1. Primjer signala angažovane snage za slučaj tri potrošača. Prekidačke funkcije individualnih potrošača su prikazane u gornjem, a ukupna angažovana snaga u donjem dijelu grafika.



Slika 2. Primjer signala angažovane snage za slučaj tri potrošača konstantne snage i jednog potrošača promjenljive snage. Prekidačka funkcija potrošača promjenljive snage je prikazana u gornjem, a ukupna angažovana snaga u donjem dijelu grafika.

maksimalne snage potrošača angažovan u posmatranom vremenskom trenutku. Matematički model prekidačke funkcije je

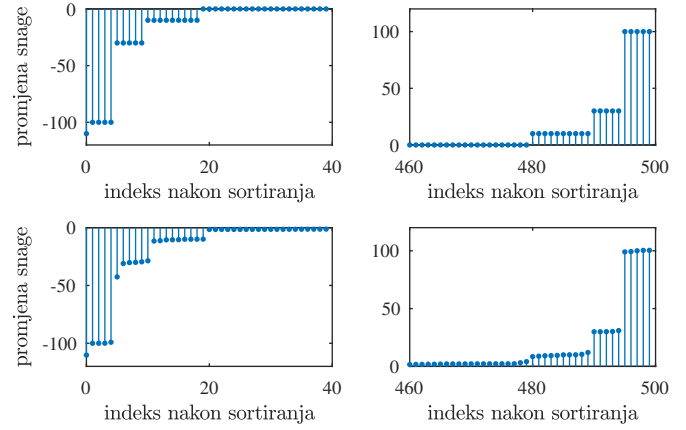
$$a^{(k)}(t) = \sum_{n=1}^{N_k} b_n^{(k)}(t - t_{on}^{(k)}(n)) \left(h(t - t_{on}^{(k)}(n)) - h(t - t_{off}^{(k)}(n)) \right) \quad (5)$$

gdje je snaga potrošača u n -tom intervalu modelovana funkcijom $b_n^{(k)}(t)$ koja uzima vrijednosti od 0 do 1.

Na slici 2 je prikazan prethodno analizirani slučaj (slika 1) sa jednim potrošačem promjenljive snage čija je maksimalna snaga $P^{(4)} = 70W$. Potrošač je aktivan u dva vremenska intervala.

III. PROBLEM RAZDVAJANJA POTROŠAČA

Pretpostavimo da je snaga mjerena u diskretnim vremenskim trenucima t . Posmatrajmo promjene u signalu snage. Promjenu



Slika 3. Promjene u signalu snage za slučaj sa slike 1 (gornji dio) i za slučaj sa slike 2 (donji dio). Promjene su sortirane u neopadajući niz vrijednosti. Prikazan je samo početni (lijevo) i krajnji (desno) dio sortiranog niza vrijednosti.

možemo izračunati kao razliku uzastopnih izmjerenih vrijednosti

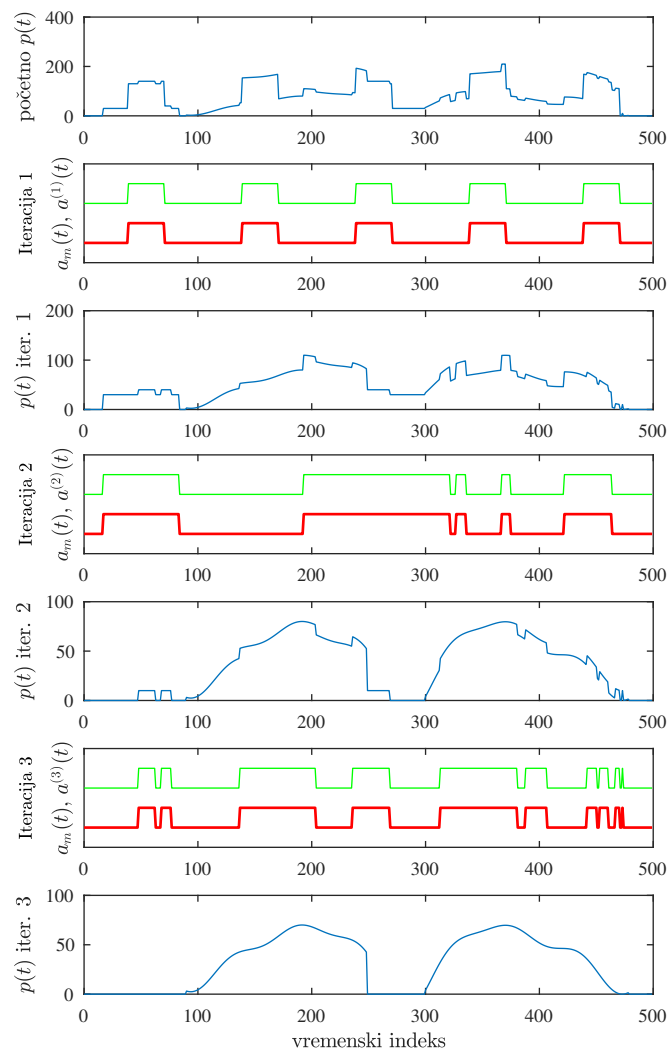
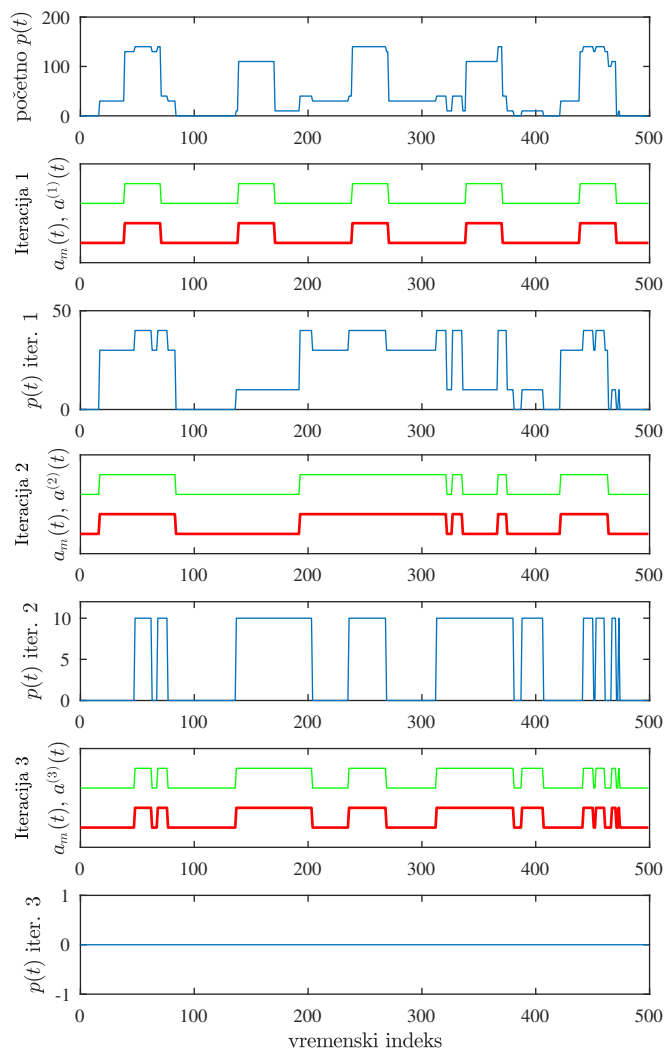
$$\Delta p(t) = p(t) - p(t-1) \quad (6)$$

Na taj način dobijamo diskretni niz vrijednosti. Sortirajmo niz $\Delta p(t)$ u neopadajući poredak. Za primjere navedene u prethodnoj sekciji, (slike 1 i 2 sortirane vrijednosti promjene snage su prikazane na slici 3. Radi jasnoće prikaza dat je početak i kraj sortiranog niza, dok su vrijednosti sa indeksima od 40 do 460 jednake nuli u prvom slučaju, odnosno zanemarljivo male u drugom slučaju.

Analizom grafika sa slike 3 lako je doći do zaključka da u posmatranom sistemu postoje tri potrošača konstantne snage, možemo očitati i snagu pojedinačnih potrošača, kao i broj uključenja, odnosno isključenja. Uključivanje potrošača promjenljive snage (donji grafici) se odražava kao smetnja u detekciji potrošača konstantne snage, mada je u posmatranom slučaju vizuelnim pregledom sortiranih promjena snage i dalje moguće jasno odvojiti potrošače 1, 2 i 3, njihove trenutke uključenja i isključenja. Postavlja se pitanje: da li je moguće automatizovati proceduru klasifikacije potrošača i detekcije odgovarajućih prekidačkih funkcija na osnovu poznatog signala ukupne angažovane snage?

Posmatrajmo slučaj kada je su broj potrošača i njihove snage poznate. Bez umanjena opštosti, smatramo da su na početku i na kraju posmatranog vremenskog intervala svi potrošači isključeni. Postupak detekcije prekidačkih funkcija pojedinačnih potrošača i dekompozicije signala ukupne angažovane snage $p(t)$ na pojedinačne potrošače je sledeći:

- 1) Posmatrajmo potrošač sa najvećom snagom P_m . Pođimo od kraja niza $p(t)$ i tražimo trenutak kada je promjena snage $\Delta p(t)$ bila manja ili jednaka od $-P_m$ (tražimo trenutak isključenja potrošača). Za svaki vremenski trenutak koji ne zadovoljava ovaj uslov stavljamo $a_m(t) = 0$.



Slika 4. Rezultati dobijeni analizom primjera sa slike 1. Prikazana je početna snaga $p(t)$. Za svaki od tri iterativna koraka nacrtana je estimirana prekidačka funkcija (deblja linija crvene boje), tačna prekidačka funkcija (tanja linija zelene boje) i snaga preostala nakon eliminacije analiziranog potrošača.

Slika 5. Rezultati dobijeni analizom primjera sa slike 2. Prikazana je početna snaga $p(t)$. Za svaki od tri iterativna koraka nacrtana je estimirana prekidačka funkcija (deblja linija crvene boje), tačna prekidačka funkcija (tanja linija zelene boje) i snaga preostala nakon eliminacije analiziranog potrošača.

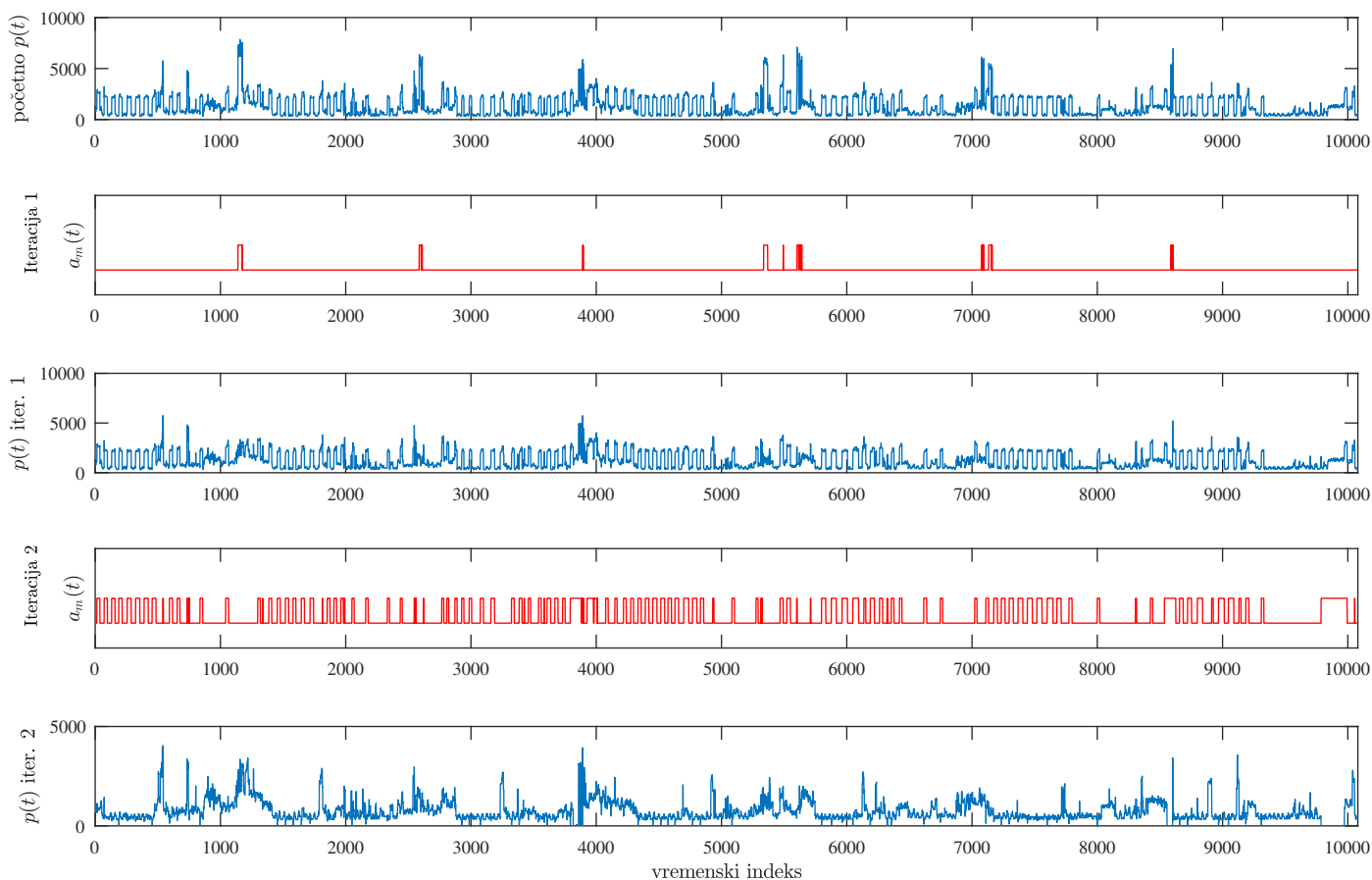
- 2) Sada tražimo vremenski trenutak uključivanja potrošača krećući se prema početku niza $p(t)$ i provjeravajući da li je promjena snage $\Delta p(t)$ približno jednaka P_m , odnosno trenutak kada je $|\Delta p(t) - P_m| < \kappa P_m$ gdje je $0 < \kappa < 1$ parametar kojim definišemo približnu jednakost posmatranih veličina. Za svaki vremenski trenutak koji ne zadovoljava ovaj uslov postavljamo $a_m(t) = 1$.
- 3) Vraćamo se na korak 1 sve dok ne dođemo do početka niza $p(t)$.
- 4) Kada je cijeli niz $p(t)$ obrađen u nizu $a_m(t)$ imamo estimiranu prekidačku funkciju posmatranog potrošača. Signal snage $p(t)$ možemo dekomponovati na dva signala $p_1(t) = a_m(t)P_m$ i $p_2(t) = p(t) - p_1(t)$. Na taj način smo snagu najjačeg potrošača izdvojili u poseban signal $p_1(t)$, a snaga ostalih potrošača je u signalu $p_2(t)$.
- 5) Ponavljamo proceduru od prvog koraka, pri čemu umjesto signala $p(t)$ koristimo novodobijeni signal $p_2(t)$ a

iz skupa analiziranih potrošača izbacujemo potrošač čiji smo prekidačku funkciju estimirali.

Opisana procedura je prilagođena off-line obradi podataka (krećemo od kraja niza $p(t)$ prema njegovom početku). Razlog za takvu odluku je taj što snaga mnogih realnih potrošača ne dostiže trenutno stacionarnu vrijednost prilikom uključivanja, dok trenutak isključenja potrošača ne prati prelazni proces, odnosno on se odvija trenutno.

IV. REZULTATI

Navedena procedura je primijenjena na simulirane primjere prikazane na slikama 1 i 2. Rezultati dekompozicije u prvom slučaju su prikazani na slici 4 a u drugom slučaju na slici 5. Na prvom podgrafiku je dat početni signal $p(t)$. Nakon toga za svaku iteraciju su prikazani estimirana prekidačka



Slika 6. Rezultati dobijeni analizom realnih podataka iz AMPDs [6] baze. Analizirana su dva potrošača snage 4500W i 1800W, estimirane su odgovarajuće prekidačke funkcije i dobijen signal snage sa eliminisanim uticajem detektovanih potrošača

funkcija $a_m(t)$, stvarna prekidačka funkcija posmatranog potrošača i signal preostale snage nakon eliminacije posmatranog potrošača. Korišćen je faktor sličnosti $\kappa = 0.25$.

Vidimo da u posmatranim slučajevima imamo potpuno tačnu estimaciju prekidačkih funkcija potrošača konstantne snage. U prvom slučaju preostala snaga, na kraju procesa, je jednaka nuli. U drugom slučaju snaga potrošača sa promjenljivom snagom je ostala na kraju iterativnog procesa.

Predložena procedura je primijenjena i na realne podatke. Korišćeni si podaci iz AMPDs baze [6] koji se odnose na aktivnu angažovanu snagu domaćinstva. Podaci su dostupni u širokom vremenskom razdoblju, a u ovom radu su korišćeni podaci sedmodnevnog mjerenja. Mjerenje snage je vršeno svakog minuta. Rezultati su prikazani na slici 6.

Statističkom analizom sortiranog signala promjena snage došli smo do zaključka da u sistemu postoje potrošači čija je snaga približno 4500W i 1800W pa je predložena procedura provedena u dvije iteracije. Sa slike 6 se vidi kako detekcija potrošača utiče na to da se u preostalom signalu snage prepoznaju detalji koji su bili maskirani ponašanjem ovih potrošača.

V. ZAKLJUČAK

U radu je predložena procedura za analizu aktivnosti potrošača bazirana na neinvazivnom mjerenju ukupne angažovane snage u sistemu. Razvijen je matematički model signala snage. Predloženi metod je ilustriran simuliranim primjerima i primijenjen na realni slučaj mjerenja snage u domaćinstvu. Dobijeni rezultati pokazuju efikasnost predloženog metoda.

LITERATURA

- [1] G. Hart, "Nonintrusive appliance load monitoring," *IEEE Proc.*, vol 80, pp. 1870-1891, 1992.
- [2] S. Đorđević, M. Dimitrijević, D. Stevanović, S. Bojanić, "Novi metod za detekciju događaja u neinvazivnom monitoringu potrošnje", *ENEF 2015*, Banja Luka, 25-26. sept. 2015, pp. 132-135.
- [3] K. He, L. Stanković, J. Liao and V. Stanković, "Non-Intrusive Load Disaggregation using Graph Signal Processing," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. PP, no. 99, doi: 10.1109/TSG.2016.2598872
- [4] B. Zhao, L. Stanković, V. Stanković, "Blind non-intrusive appliance load monitoring using graph-based signal processing," *IEEE GlobalSIP*, Orlando, FL, 2015, pp. 68-72. doi: 10.1109/GlobalSIP.2015.7418158
- [5] Lj. Stanković, *Digital Signal Processing with Selected Topics*, CreateSpace Independent Publishing Platform, An Amazon.com Company, 2015.
- [6] S. Makonin, B. Ellert, I. V. Bajic, F. Popowich, "Electricity, water, and natural gas consumption of a residential house in Canada from 2012 to 2014," *Scientific Data*, vol. 3, no. 160037, pp. 1-12, 2016.