

Rad po pozivu

ENERGETSKA EFIKASNOST I ELEKTRONIKA

Predrag Petković, Borisav Jovanović, *Elektronski fakultet u Nišu, Univerzitet u Nišu*
Dejan Stevanović, *Inovacioni centar naprednih tehnologija, Niš*

Sadržaj – *Primena energetske efikasne uređaja nametnuta je težnjom da se izbalansira potrošnja energenata sa njihovom proizvodnjom. U tom globalnom procesu elektronika nije izuzetak. Šta više, ona predstavlja značajnog saveznika u borbi za održivim upravljanjem energijom. Njen značaj proističe iz ukupnog udela elektronskih uređaja kao potrošača električne energije. U radu je, najpre, dat prikaz udela elektronskih uređaja na ukupnu potrošnju električne energije. Zatim su opisane tehnike za smanjenje potrošnje u CMOS integrisanim kolima. Njihov efekat ilustrovan je na primeru projektovanja mikrokontrolera. Na kraju je dat prikaz uticaja energetske efikasne elektronskih uređaja na parametre elektroenergetske mreže. Ukazuje se na povećanje prisustva harmonika i predlaže metod za njihovo registrovanje na bazi svakog domaćinstva.*

1. UVOD

Probuđena svest o činjenici da su energetske resursi koje danas trošimo ograničeni usmerila je fokus naučne javnosti na traženje načina da se njihova potrošnja dovede u granice održivosti. Održivost podrazumeva proces koji obezbeđuje balans između trošenja i obnavljanja prirodnih resursa. Najnemilosrdnije trošenje darova prirode nastaje kao posledica traženja za energijom. Počelo je od sakupljanja svega što može da sagori i pretvori se u vatru. (Naši stari jednostavno su to skupljali i ložili, a nisu ga zvali, tako da nam u amanet nisu ostavili naziv, pa ga danas zovemo biomasom.) Nastavilo se sa energetske efikasnijim materijalima, koji sagorevanjem oslobađaju više energije, kao što su ugalj, nafta i gas. Svi oni nastaju sporim prirodnim procesom transformacije organskih materija pod izvesnim veoma karakterističnim uslovima. Zato se nalaze samo ponegde i to najčešće duboko u litosferi. Potražnja za ovim izvorima energije značajno je porasla u 20. veku, a ulaskom u 21. postaje enormna. Povećana tražnja kompenzovana je intenzivnom eksploatacijom. Nešto, što nastaje hiljadama godina i čega ima u ograničenim količinama sagorimo za par sekundi. Pri tome, kao nusproizvod javlja se velika količina neželjenih i štetnih gasova kao što su CO₂ i SO₂. Oni ne samo da doprinose smanjenju ozonskog omotača, nego izazivaju i mnoge respiratorne smetnje kod ljudi.

Da bismo nasledene resurse mogli da ostavimo našoj deci, potrebno je da dovedemo u ravnotežu nezasitu glad za energijom sa realnom sposobnošću njenog generisanja. Prvobitno rešenje nađeno je u većem korišćenju obnovljivih izvora energije (voda, vetar, bio masa) kao i neobnovljivih ali sa dovoljnom zalihom, kao što su nuklearna i solarna energija. Međutim, pokazalo se da to nije dovoljno - neophodno je i smanjiti potrošnju.

Smanjenje potrošnje energije može se postići na dva načina. Prvi je štednja zasnovana na promeni načina života: pažljiva evidencija o nepotrebno uključenim uređajima,

manje se grejati zimi, manje se hladiti leti, jednom rečju – odricanje. Drugi podrazumeva poboljšanje energetske efikasnosti time što će se smanjiti energija potrebna za obavljanje određene aktivnosti. Cilj ovog rada jeste da ukaže na mesto elektronike u stvaranju uslova za održivim načinom upravljanja električnom energijom. Rad ima tri celine. Najpre se daje presek eksploatacije električne energije u svetu i kod nas i ukazuje se na udeo koji imaju elektronski uređaji kao potrošači. Na osnovu prikazanih podataka videće se da inovacije u elektronici značajno poboljšavaju efikasnost korišćenja električne energije na globalnom nivou.

U drugom delu biće prikazani konkretni rezultati koje daje projektovanje za smanjenu potrošnju na primeru mikrokontrolera. Radi se o rezultatima koji proističu iz projekta realizovanog u LEDA laboratoriji Elektronskog fakulteta Univerziteta u Nišu.

Treći deo posmatra uticaj priključivanja energetske efikasne potrošača (EEP) na mrežu. Pokazaće se da je značajno smanjenje aktivne snage potrošača zasnovano na prekidačkom radu aktivnih alamenata u kolu, čime se u elektroenergetsku mrežu unose nelinearna izobličenja. Efikasan način za njihovo merenje biće ilustrovan praktičnom primenom originalnog metoda na više realnih primera.

2. ELEKTRONIKA U ELEKTROENERGETSKOM BILANSU

Obično se pretpostavlja da elektronski uređaji predstavljaju relativno male potrošače koji neznatno utiču na globalnu elektroenergetsku mrežu. Da bismo tačno utvrdili uticaj elektronike na elektroenergetski bilans moramo poći od toga koliko trošimo struje. Prema podacima Republičkog zavoda za statistiku za 2011. godinu objavljenim na webrzs.stat.gov.rs ukupno je u Republici Srbiji utrošeno 27.991GWh, od čega je industrija, bez energetske sektora, potrošila 7.147GWh, dok je u domaćinstvima potrošeno 14.665GWh (ostalo je potrošeno prevažodno u građevinarstvu, transportu i poljoprivredi) [1]. Očigledno je da udeo domaćinstava od 52,4% najveći. Zato ćemo se u daljoj analizi posvetiti domaćinstvima.

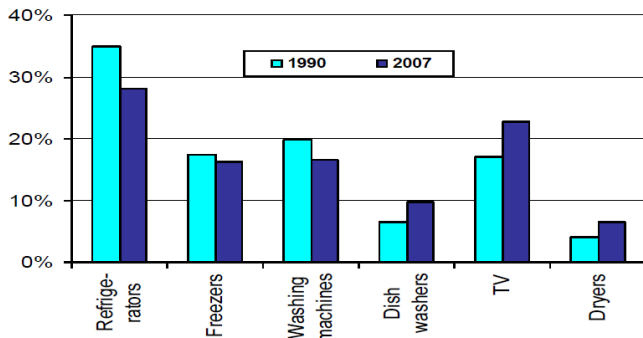
Prema podacima o popisu iz 2011. godine (objavljenim oktobra 2013. godine) [2] u Republici Srbiji postoji 2.471.092 domaćinstava što govori da se u Srbiji po domaćinstvu troši 5.935kWh godišnje. Interesantno je da je to više od mnogih evropskih zemalja. Naime, na osnovu podataka Svetskog energetske saveta (World Energy Council) objavljenim u [3] prosečna potrošnja električne energije po elektrifikovanom domaćinstvu u 2011. iznosi u USA 11.789kWh/hh, Velikoj Britaniji 4.153kWh/hh, Nemačkoj 3.454kWh/hh, Rusiji 2.427kWh/hh, Kini 1.308kWh/hh, dok je svetski prosek 3.338kWh/hh.

Koliki je udeo elektronskih uređaja u toj potrošnji?

Prema podacima objavljenim u [4], u zemljama Evropske unije, 1990. veliki potrošači u domaćinstvima učestvovali su

sa 62%, osvetljenje sa 20% a ostali sa 18%. U 2009. godini učešće velikih potrošača spalo je na 44%, dok je učešće ostalih uređaja poraslo na 36%, dok se učešće osvetljenja zadržalo na 20%. Pri tome treba imati u vidu da je ukupna potrošnja energije povećana sa oko 350TWh na oko 525TWh.

Među potrošačima najveći doprinos porastu potrošnje energije između 1990. i 2007. daju TV prijemnici, kao što pokazuje Sl. 1 [4].



Sl. 1. Trend povećanja potrošnje energije pojedinih kućnih aparata u EU od 1990. do 2007. godine, preuzeto iz [4]

Povećanju udela „ostalih potrošača“ značajno je doprineo povećani broj računara i prateće opreme u domaćinstvima.

Ova analiza pokazuje dve važne činjenice:

- domaćinstva predstavljaju značajne potrošače električne energije;
- u okviru domaćinstva, broj elektronskih uređaja raste i uzima sve veći udeo u ukupnoj potrošnji.

Ovakvi trendovi pokrenuli su „mehanizme“ kojima se stimuliše primena energetske efikasne uređaja.

U USA je još 1992. agencija za zaštitu životne sredine (*Environmental Protection Agency, EPA*) pokrenula program *Energy Star*, sa ciljem da ukaže potrošačima koliko električne energije troše uređaji za široku potrošnju [5]. Ovaj program najpre je obuhvatio računare i monitore, a zatim se proširio i na ostale uređaje (frižidere, klime, osvetljenje, kućne aparate). Značajan doprinos smanjenju potrošnje doneo je program *80 Plus* koji je pokrenut 2004. godine. On preporučuje ugradnju izvora DC napona sa stepenom iskorišćenja preko 80%. U taj projekat provajderi električne energije u USA uložili su više od pet miliona dolara. Danas *Energy Star* oznaku može da dobije samo računar koji ima ugrađeni izvor iz klase *80 Plus*.

Evropski savet dopunio je 2012. Direktivu o energetske efikasnosti (*European Energy Efficiency Directive*) kojom se definišu osnovne mere pomoću kojih će se dostići cilj o povećanju energetske efikasnosti od 20% do 2020. godine [6].

Sve ove mere stimulisale su inženjere da se dodatno angažuju kako bi se uređajima za široku potrošnju smanjila nominalna snaga.

Rezultati uloženi naporu vidljivi su sa svakom novom generacijom uređaja. Ovo je naročito karakteristično na primeru TV prijemnika. Napuštanjem tehnologije bazirane na katodnim cevima snaga prijemnika drastično je smanjena. Prijemnici bazirani na plazma ekranima imaju bar dva puta manju potrošnju od onih sa CRT. Plazma TV troši oko 300W. Prelaskom na LCD potrošnja je dodatno smanjena na oko 200W, dok uvođenje LED tehnologije iz generacije u generaciju smanjuje potrošnju. Tako, na primer, televizori

dijagonale 32“ danas troše samo oko 30W. Ali i pored toga, zbog načina eksploatacije TV prijemnici predstavljaju najveće konzumente električne energije na godišnjem nivou. U današnje vreme sličan režim eksploatacije imaju i računari. Zato se posebna pažnja posvećuje i njihovoj efikasnosti. Drastičan primer smanjene potrošnje predstavlja *Cranberry 7*. On troši neverovatnih 12-19W [7]. Njegova tzv. *tin client* varijanta prema [8] prosečno troši svega 9W.

Iskusni inženjeri zapitaće se

- kako je sve to moguće?
- čime je plaćena cena energetske efikasnosti?

Odgovore na ova pitanja nude naredna poglavlja.

3. PROJEKTOVANJE ZA SMANJENU POTROŠNJU

Ovaj odeljak opisuje neke od tehnika za smanjenje potrošnje savremenih digitalnih integrisanih kola. Posebna pažnja posvećena je rezultatima dobijenim optimizacijom statičke potrošnje na primeru IP bloka 8051 mikrokontrolera, koji je sastavni deo IMPEG čipa [9, 10].

3.1. Uzroci disipacije snage u CMOS kolima

Glavni uzroci disipacije snage kod digitalnih CMOS kola mogu podeliti na dve grupe: dinamičku snagu disipacije ($P_{dynamic}$) i statičku snagu (P_{static}):

$$P = P_{dynamic} + P_{static} \quad (1)$$

Dinamička snaga se sastoji od unutrašnje snage i snage nastale usled promene logičkih stanja (prekidanja) na vezama:

$$P_{dynamic} = P_{internal} + P_{switching} \quad (2)$$

Unutrašnja snaga uključuje snagu kratkog spoja i snagu nastalu usled promene stanja na vezama unutar standardnih ćelija:

$$P_{internal} = P_{int-switching} + V_{DD}I_{SC} \quad (3)$$

Snaga prekidanja $P_{switching}$ čini najveći deo dinamičke potrošnje. Nastaje usled punjenja i pražnjenja kapacitivnosti tokom promene logičkih stanja na izlazima digitalnih kola tako da se može izračunati kao:

$$P_{switching} = \alpha C_L V_{DD}^2 f_{CLK} \quad (4)$$

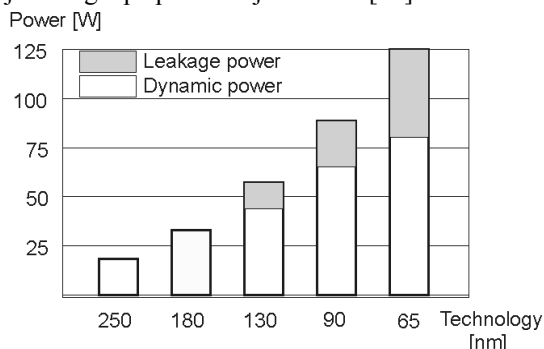
gde α predstavlja faktor aktivnosti prekidanja, C_L ukupnu kapacitivnost kola, V_{DD} napon napajanja, f_{CLK} taktnu frekvenciju. Važno je uočiti da dinamička snaga raste sa povećanjem taktne frekvencije i veličine kola, kao i da je proporcionalna kvadratu napona napajanja.

Najznačajniji deo statičke potrošnje potiče od pod-pragovske struje curenja u uslovima kada je tranzistor isključen [11].

$$P_{leakage} = V_{DD}I_{leakage} = V_{DD}I_0 \exp\left(\frac{V_{GS} - V_{TH}}{nV_T} \left(1 - \exp\left(-\frac{V_{DS}}{V_T}\right)\right)\right) \quad (5)$$

gde je V_{TH} napon praga tranzistora, V_T je termički napon (26mV na 300K), V_{GS} je napon između gejta i sorsa, a V_{DS} napon između drejna i sorsa MOS tranzistora.

Kako je struja curenja eksponencijalno proporcionalna negativnoj vrednosti napona praga V_{TH} , statička snaga eksponencijalno raste sa smanjenjem vrednosti V_{TH} . U submikronskim tehnologijama smanjena je veličina tranzistora, pa raste udeo statičke snage u ukupnoj potrošnji kola. Uticaj skaliranja veličine tranzistora na udeo statičke potrošnje nekog čipa prikazan je na Sl.2. [12]



Sl. 2. Udeo statičke i dinamičke disipacije čipa implementiranog različitim tehnologijama, [12].

3.2 Tehnike za optimizaciju statičke potrošnje

Danas se koriste sledeće tehnike za minimizaciju struje curenja: skaliranje napona napajanja, korišćenje biblioteka standardnih ćelija sa različitim naponima praga MOS tranzistora, podela projekta kola na oblasti (domene) sa različitim naponima napajanja i isključenje napona napajanja u neaktivnim blokovima (*Power Gating*) [12].

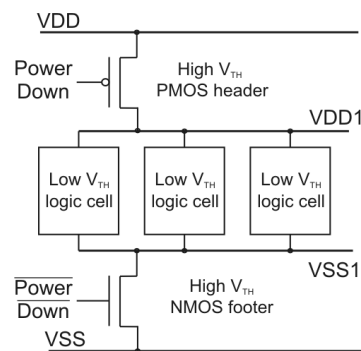
Smanjenjem napona napajanja efikasno se smanjuje i potrošnja digitalnih kola. Promene u dinamičkoj snazi disipacije su značajne. Dinamička komponenta snage proporcionalna je kvadratu napona napajanja [12]. Njegovim smanjenjem linearno se smanjuje i statička snaga. Pri projektovanju mikrokontrolera, smanjenje napona napajanja je važno u primenama kada mikrokontroler ne obrađuje veliku količinu informacija ili kada je u stanju mirovanja (*Standby* mod rada). Sa smanjenjem napona napajanja dolazi do povećanja kašnjenja standardnih ćelija, pa je neophodno smanjiti maksimalnu frekvenciju taktnog signala:

$$f \propto \frac{(V - V_T)^2}{V} \quad (6)$$

U novim tehnologijama, postoji više biblioteka digitalnih standardnih ćelija koje su na raspolaganju projektantima. Biblioteke se sastoje od ćelija koje imaju različite napone pragova MOS tranzistora. Digitalne ćelije su prisutne u dva oblika: ćelije sa visokim naponom praga koje imaju malu statičku potrošnju ali su sporije, i ćelije sa nižim naponom praga, koje imaju manja kašnjenja ali veće struje curenja. Postoji velika razlika u statičkoj potrošnji uprkos malim razlikama u kašnjenju. Odgovarajuće ćelije biraju se tokom sinteze kola. Alati za sintezu prvenstveno koriste ćelije sa višim naponom praga jer imaju manju statičku potrošnju. Tek kada ne mogu da ispune vremenska ograničenja specificirana projektom, alati za sintezu ubacuju brže ćelije umesto ćelija sa višim naponom praga.

Daleko efikasnija tehnika za smanjenje struje curenja je *Power gating* tehnika u kojoj se neaktivnim tranzistorima ukida napon napajanja [13]. Obično se isključuju neaktivni blokovi ćelija. Specijalni PMOS i NMOS tranzistori

postavljaju se redno sa tranzistorima digitalnog bloka koji se isključuje, i imaju funkciju prekidača napajanja, kao što ilustruje Sl. 3.



Sl. 3. *Power gating* tehnika za smanjenje statičke potrošnje kola, preuzeto iz [13]

3.3 Optimizacija potrošnje mikrokontrolera

Opisane tehnike primenjene su pri projektovanju 8051 mikrokontrolera. Mikrokontroler ima brzinu od 4.19 MIPS-a (miliona instrukcija u sekundi) pri taktnoj frekvenciji od 4.194 MHz. Arhitektura se sastoji od sledećih glavnih podblokova: jezgra 8052 mikrokontrolera, memorijskog bloka i perifernih jedinica [14].

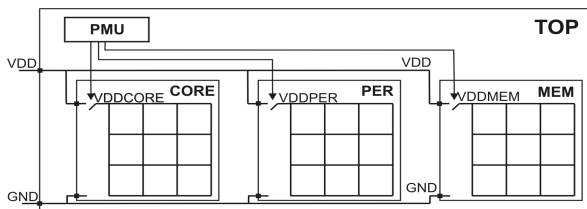
Kolo ne poseduje sopstvenu EEPROM memoriju za smeštanje programa. Umesto toga, koristi se programska SRAM memorija i eksterno EEPROM kolo. Nakon resetovanja, programki kod se automatski učitava iz EEPROM čipa u 8kB SRAM.

Kolo je implementirano primenom biblioteke ćelija Synopsys 90nm [15] uz primenu Synopsys alata za projektovanje kola: *Design Compiler* za sintezu i *IC Compiler* za rameštaj ćelija i povezivanje veza.

Arhitektura jezgra mikrokontrolera je promenjena u odnosu na osnovnu arhitekturu 8051 mikrokontrolera. Nova arhitektura ima prednost u odnosu na osnovnu verziju koja se ogleda u većoj brzini izvršenja instrukcija. Ona odgovara izvršenju jedne jednobajtnje instrukcije u jednom taktom ciklusu.

Aktivnosti unutar jezgra lokalizovane su da bi se smanjila dinamička komponenta snage disipacije. Specijalni funkcijski registri projektovani su tako da koriste svoje sopstvene magistrale. Smanjena je količina informacija koja se prenosi preko magistrala koje povezuju udaljene podsisteme jezgra mikrokontrolera. Zatim, gde god je to bilo moguće primenjena je tehnika gejtovanja stabla takta. Upotrebom specijalnih standardnih ćelija za gejtovanje, provođenje taktog signala je ukinito do neaktivnih delova kola, i na taj način, smanjena dinamička potrošnja. Opisanim tehnikama dinamička komponenta snage je smanjena sa početne vrednosti 0.5004mW na 0.2574mW, što predstavlja poboljšanje od 48.6%. Ovi rezultati optimizacije dinamičke potrošnje se odnose na taktnu frekvenciju od 4.194MHz.

Za smanjenje statičke potrošnje primenjene su sledeće tehnike: podela *layout*-a mikrokontrolera u više oblasti sa različitim naponima napajanja, korišćenje biblioteka standardnih ćelija sa različitim naponom praga MOS tranzistora, prekidanje napona napajanja u trenutno neaktivnim blokovima (*Power gating*).

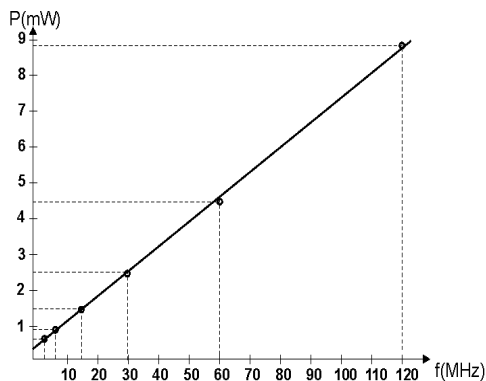


Sl. 4. Podela projekta mikrokontrolera na oblasti sa odvojenim linijama za napajanje

Mikrokontroler je podeljen u oblasti sa odvojenim linijama za napajanje tako da su jezgro mikrokontrolera, periferijske jedinice i memorijski blokovi raspoređeni u različite oblasti (Sl. 4). Uvedeni su novi modovi rada koji omogućavaju smanjenje statičke potrošnje (*Standby* i *Power Down*). Isprojektovana je i nova jedinica mikrokontrolera - Blok za upravljanje potrošnjom (*Power Management Unit-PMU*) koja upravlja promenom modova rada.

U *Standby* modu rada jezgro mikrokontrolera je isključeno, dok periferijske jedinice i memorije ostaju pod napajanjem. Mikrokontroler ostaje u *Standby* modu rada sve dok se ne javi potreba za obradom podataka. Kada se javi prekid (interrupt) u nekoj od periferijskih jedinica, Blok za upravljanje potrošnjom vraća napajanje jezgru i jezgro počinje sa obradom informacija. Nakon završetka obrade, jezgro se ponovo isključuje a mikrokontroler vraća u *Standby* mod rada. Periferijske jedinice mikrokontrolera (tri paralelna ulazno izlazna porta, tri kola tajmera/brojača i USART jedinice), tokom *Standby* moda rada rade na isti način kao i kad je mikrokontroler u aktivnom modu rada.

Maksimalna taktna frekvencija mikrokontrolera je 120MHz i tada je snaga disipacije 9mW. Takođe, zavisnost snage disipacije od vrednosti taktne frekvencije je linearna funkcija.



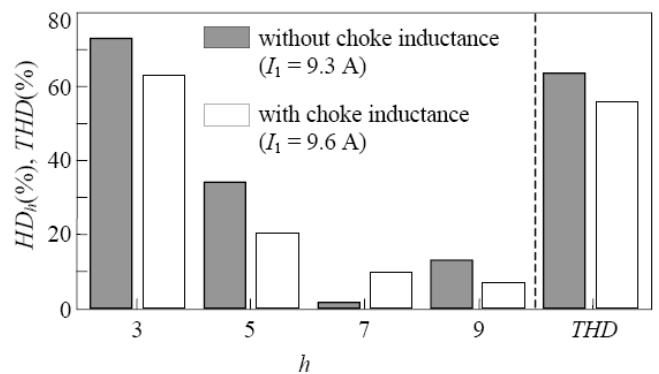
Sl. 5. Disipacija u funkciji frekvencije

Glavna prednost predloženog rešenja mikrokontrolera jeste smanjenja potrošnja u *Standby* modu rada. Ukupna potrošnja snage u *Standby* modu rada je 0.1381mW što predstavlja samo 18% ukupne potrošnje koja se disipira u aktivnom režimu rada, pri vrednosti taktne frekvencije od 4.194MHz. Pored toga, statička snaga od 0.1013mW merena u *Standby* modu manja je za 73 % u odnosu na vrednost statičke snage od 0.3806mW koja je merena u aktivnom režimu rada, što je posledica isključivanja napona napajanja jezgra mikrokontrolera u aktivnom modu rada.

4. UTICAJ ENERGETSKI EFIKASNIH POTROŠAČA NA ELEKTROENERGETSKU MREŽU

U prethodnom odeljku videli smo kako se smanjuje potrošnja unutar savremenih elektronskih uređaja. Sa stanovišta elektroenergetske mreže (EEM) važno je utvrditi uticaj elektronskih uređaja na celokupni sistem snabdevanja električnom energijom.

Elektronski uređaji napajaju se jednosmernim naponom tako da njih EEM vidi preko AC/DC konvertora. U drugom poglavlju rečeno je da program *80 Plus* podržava ugradnju konvertora čija je efikasnost veća od 80%. To je moguće ostvariti samo smanjenjem disipacije na aktivnim elementima. Zato tranzistori rade u prekidačkom režimu koji obezbeđuje da je napon na njima maksimalan kada je struja minimalna (otvoreni prekidač), dok maksimalna struja kroz njih teče kada je napon minimalan (zatvoreni prekidač). Ovo implicira da EEM vidi konvertor kao veoma nelinearni potrošač jer ga napaja strujom koja ne prati sinusni oblik mrežnog napona. Praktično ovo podrazumeva da će se u talasnom obliku struje pojaviti viši harmonici. Zbog konačne otpornosti vodova nelinearna izobličenja delimično će se preneti i na napon EEM. Problem unošenja viših harmonika u EEM ublažava se filtriranjem. Međutim, kao što se vidi sa Sl. 6. [16] oni i dalje postoje u mreži.



Sl. 6 Uticaj induktivne prigušnice na izobličenje struje punjenja baterije vozila na električni pogon, preuzeto iz [16]

Pažljivom čitaocu nije promakao podatak sa Sl. 6 da se radi o strujama reda desetina ampera. Može se zaključiti da se ne radi o malim potrošačima! Šta više, u skoroj budućnosti može se očekivati da koncept V2G (*Vehicle-to-Grid*) [17] doprinese da svaka garaža i većina parking mesta budu snabdeveni ovakvim punjačima. Time će se efekat prisustva harmonika u EEM višestruko povećati.

U ovom odeljku najpre će biti navedeni negativni efekti harmonika na elektroenergetski sistem. Zatim će biti kvantifikovano prisustvo nelinearnih izobličenja usled priključivanja realnih potrošača koji se najčešće sreću u domaćinstvima. Merenja su obavljena primenom originalnog metoda razvijenog u saradnji LEDA laboratorije i Inovacionog centra naprednih tehnologija iz Niša, koji je prilagođen za implementaciju u savremenim elektronskim brojlilima.

4.1. Uticaj harmonika na opremu u domaćinstvu Osvetljenje

Jedan od najuočljivijih efekata harmonika na opremu koja se koristi za osvetljenje ispoljava se kroz treperenje svetlosti. Ljudsko oko je veoma osetljivo na promenu intenziteta

osvetljenja koja je kod električnih sijalica proporcionalna efektivnoj vrednosti napona. Zato su uočljive čak i male promene napona od 0.25% [18].

Usled intereakcija između struje harmonika i kondenzatora kojim se povećava faktor snage, a koji se nalazi unutar fluorescentne lampe može doći do pojave paralelne rezonanse koja može uništiti sijalicu.

Telefonske smetnje i računarske mreže

Ukoliko se provodnici kojima se napajaju nelinearni potrošači razvede paralelno sa telefonskim kablom, onda u telefonskom kablom može doći do preslušavanja. Frekvencijski opseg indukovano napona može ući u čujni opseg od 450Hz do 1000Hz (od 9. do 20. harmonika osnovne frekvencije 50Hz).

Korišćenjem višezilnih kablova, odgovarajućeg uzemljenja, propisanog rastojanja između kablova i odgovarajuće izolacije, smanjiće se potencijalni problemi koji nastaju usled postojanja harmonika.

Harmonici u elektroenergetskom sistemu negativno utiču na rad lokalne računarske mreže (LAN) pogotovu ukoliko je uzemljenje loše odrađeno. Problemi u radu LAN mreže [19] manifestuju se sporijim transportom podataka, prekidom rada mrežnog servera, ispadanjem iz normalnog režima rada pojedinih mrežnih uređaja, otkazom komponenti koje se koriste prilikom prenosa podataka i gubitkom podataka.

Osigurači

Topljiv osigurači bazirani su na termičkom efektu izazvanog strujom. Brzina njihovog reagovanja zavisi od efektivne vrednosti i vremena proticanja struje, odnosno od I^2t karakteristike osigurača. Kod brzih osigurača, čim se premaši dozvoljena vrednost struje dolazi do momentalnog topljenja provodnog dela osigurača. Ukoliko su u pitanju spori osigurači, do topljenja dolazi ukoliko premašenje efektivne vrednosti struje traje duže vreme (1-2s). Efektivna vrednost struje veća je kod nelinearnih u odnosu na linearne potrošače iste nominalne snage. Zato nelinearni potrošači zahtevaju upotrebu osigurača sa većom nominalnom strujom.

Automatski osigurači projektovani su tako da do prekidanja struje dolazi tokom prolaska kroz nulu. Ukoliko je struja izobličena i ima višestruke prolaskе kroz nulu (*notching*), osigurač može prerano da reaguje, odnosno da isključi mrežu pre nego što dođe do prekoračenja u vrednosti struje ili pojave struje kratkog spoja.

Pojedini automatski osigurači reaguju kada dođe do prekoračenja maksimalne vrednosti struje. Ukoliko struja osim osnovne komponente sadrži i harmonike, može doći do isključenja ovih osigurača čak i u slučaju kada postoji nizak nivo vrednosti struje harmonika. Osigurači novijeg tipa sadrže kombinaciju oba metoda zaštite, zaštitu od prekoračenja maksimalne dozvoljene vrednosti struje i zaštitu od efektivne vrednosti struje.

4.2 Uticaj harmonika na mernu opremu

Osnovna merna oprema koja se koristi u EEM projektovana je sa ciljem da zadovolji željenu tačnost u sistemu opterećenom linearnim potrošačima. To podrazumeva da su napon i struja prostoperiodične funkcije sa istom frekvencijom. Promena prirode potrošača zahteva instrumente koji su u stanju da obezbede željenu tačnost i u uslovima harmonijskih izobličenja.

Postojeći pristup za merenje efektivne vrednosti napona/struje kod analognih instrumenata bazira se na merenju srednje vrednosti dvostrano usmerenog signala i množenje te vrednosti sa odgovarajućim koeficijentom. Za prostoperiodični talasni oblik taj koeficijent iznosi 1.11. Ovaj postupak koristio se od samog nastanka AC sistema i pokazao se kao veoma efikasan. Nažalost, danas on nije tačan. Talasni oblik napona, a naročito struje, nije više prostoperiodična funkcija. Nivo greške merenja efektivnih vrednosti klasičnim instrumentima zavisi od stepena izobličenja signala. Zbog toga se moraju koristiti instrumenti koji mere pravu efektivnu vrednost. Oni nose oznaku *true RMS*. Kod njih se ukupna efektivna vrednost napona i struje računa kao:

$$V_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^M V_{RMSh}^2}, \quad I_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^M I_{RMSh}^2}, \quad (7)$$

gde V_{RMSh} i I_{RMSh} predstavljaju efektivnu vrednost h -tog harmonika napona, odnosno struje.

Uobičajeno je da se informacija o struji konvertuje preko strujnog transformatora. To znači da njegove karakteristike direktno utiču na ukupnu grešku merenja. Prisustvo harmonika zahteva da strujni transformatori imaju linearnu karakteristiku u širem frekvencijskom opsegu. Pojedini instrumenti kao što su razni analizatori spektra, instrumenti za merenje snage i drugi, konverziju struje baziraju na primeni holovog (*Hall*) efekta. Ovi instrumenti su precizniji ali zahtevaju često baždarenje.

Precizno izračunavanje/merenje aktivne/reaktivne snage na nelinearnim potrošačima zahteva da se i efekat harmonika uzme u obzir što se i čini direktnom primenom definicionih izraza za aktivnu i reaktivnu snagu (8) i (9):

$$P = \sum_{h=1}^M V_{RMSh} I_{RMSh} \cos(\theta_h) = P_1 + P_H, \quad (8)$$

$$Q = \sum_{h=1}^M V_{RMSh} I_{RMSh} \sin(\theta_h) = Q_1 + Q_H, \quad (9)$$

gde P_1 i Q_1 označavaju aktivnu i reaktivnu snagu osnovnog harmonika, respektivno, dok P_H i Q_H označavaju aktivnu i reaktivnu snagu viših harmonika, respektivno. Treba napomenuti da u prethodnim izrazima indeks h označava isti broj kada se radi o naponu i struji. Drugim rečima na P_H i Q_H utiču samo komponente napona i struje istih frekvencija (proizvodi h -tog harmonika napona i h -tog harmonika struje). Pojedini autori [20] osporavaju definiciju (9). Glavna zamerka odnosi se na njenu tačnost. Uprkos tome, navedena definicija ima praktičnu primenu kod gotovo svih instrumenata koji mere reaktivnu snagu u prisustvu harmonika. Detaljnija analiza ostalih definicija koje se koriste za merenje reaktivne snage može se naći u [21], [22].

Postojeći instrumenti za merenje aktivne/reaktivne snage uglavnom su projektovani sa ciljem da registruju samo snagu osnovnog harmonika (P_1 i Q_1). Prisustvo ostalih harmonika (P_H i Q_H) manifestovaće se na njima samo kroz članove koji predstavljaju proizvod h -tog harmonika napona i h -tog harmonika struje što u praksi ne prelazi 3% komponente osnovne frekvencije [23]. Efekat harmonika znatno je više izražen prilikom merenja prividne snage koja se računa kao

proizvod efektivnih vrednosti napona i struje (10).

$$S = I_{RMS} \cdot V_{RMS} \cdot \quad (10)$$

Na osnovu (10) može se zaključiti da ovaj izraz uključuje i komponente snage nastale kao proizvod različitih harmonika napona i struje.

Poznato je da se faktor snage, po definiciji, računa kao količnik ukupne aktivne i prividne snage. Zato će prisustvo harmonika imati značajan uticaj na ovu veličinu. Važno je kvantitativno odrediti uticaj harmonika na P i Q jer su to jedine veličine koje se mere na nivou svakog potrošača i prema kojima se obavlja tarifiranje, odnosno naplata isporučene energije. Svako odstupanje od tačnih vrednosti oštetice ili potrošača ili isporučioaca električne energije. Zato će naredno poglavlje biti posvećeno merenjima na realnim potrošačima koji se sreću u domaćinstvima.

4.3. Gubici izazvani nelinearnim potrošačima

Elektronsko brojiilo predstavlja osnovni merni instrument u sistemu registrovanja isporučene električne energije. Brojila projektovana za merenje u uslovima prisustva harmonika treba da mere osnovne parametre električne energije u skladu sa definicijama (7), (8), (9) i (10).

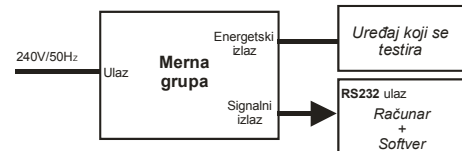
Kada se radi o sistemu bez nelinearnih potrošača, tada navedene definicije potvrđuju da je $S^2 = P^2 + Q^2$. Međutim u prisustvu harmonika dobiće se da je $S^2 > P^2 + Q^2$, odnosno primetno je prisustvo dodatne komponente snage koja se naziva distorziona snaga ili snaga izobličenja, a označava se sa D . Dobro je poznato [23] da distorziona snaga može da se predstavi u zavisnosti od S , P i Q kao:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (11)$$

Zamenom P , Q i S sa (8), (9) i (10) iz prethodnog izraza može se zaključiti da je:

$$D^2 = \sum_n^{M-1} \sum_{k=n+1}^M (V_n \cdot I_k \cdot \cos \theta_n - V_k \cdot I_n \cdot \cos \theta_k)^2 + \sum_n^{M-1} \sum_{k=n+1}^M (V_n \cdot I_k \cdot \sin \theta_n - V_k \cdot I_n \cdot \sin \theta_k)^2, \quad (12)$$

Očigledno je da u izrazu (12) figurišu harmonijske komponente napona i struje koje nisu sadržane u izrazima (8) i (9), tako da predstavljaju komponentu snage koja se ispoljava isključivo usled prisustva harmonika. Naravno izraz (12) daleko je komplikovaniji od izraza (11) i nije pogodan za praktičnu primenu. Sa druge strane, implementacija (11) u savremenim elektronskim brojilima ne predstavlja veliki problem. Ipak, pre početka modifikacije savremenih brojila za registrovanje snage izobličenja, neophodno je dokazati da su ulaganja u proširenje opcija elektronskih brojila opravdana. Zato je načinjen laboratorijski prototip mernog mesta koji povezuje standardnu mernu grupu sa personalnim računaru. Ideja je bila da se omogući merenje potrošnje (S , P i Q) različitih tipova savremenih uređaja standardnom mernom grupom i da se u personalnom računaru izračuna distorziona snaga. Blok šema i fizički izgled ovog mernog mesta prikazani su na slikama 7.a i 7.b, respektivno.



a)



b)

Sl. 7. a) Blok šema i b) fotografija testnog okruženja

Kao merni instrument korišćena je komercijalno dostupna merna grupa koja ispunjava standarde IEC 62053-22 [24] i IEC 62052-11 [25] (proizvod EWG iz Niša). Brojiilo meri osnovne parametre električne energije u skladu sa njihovim definicijama koje su date jednačinama (7), (8) i (9). Korišćena merna grupa nema mogućnost računanja snage distorzije, ali registruje veličine I_{RMS} , V_{RMS} , P i Q . Ove veličine očitavaju se tokom svake sekunde i šalju u računar preko optičkog i RS232 porta. Direktnom primenom izraza (10) i (11) u računaru se izračunavaju vrednosti prividne i distorzione snage.

Rezultati merenja potrošnje različitih tipova savremenih potrošača, sistematizovani u Tabeli 1, potvrdili su očekivanja da distorziona snaga nije zanemariva.

TABELA 1
REZULTATI MERENJA RAZLIČITIH TIPOVA POTROŠAČA

Potrošač	$V_{RMS}[V]$	$I_{RMS}[A]$	$S[VA]$	$P[W]$	$Q[VAR]$	$D[VAR]$
Sijalica Philips 75W	222.82	0.33	73.53	73.48	0.69	2.64
Aparat za grej. vode	216.24	7.906	1709.59	1709.54	0.39	13.51
CFL20Wtube	219.46	0.14	31.60	18.73	-9.58	23.58
CFL11W helix	221.73	0.08	17.74	10.42	-5.38	13.31
CFL9W bulb	216.06	0.06	12.75	7.58	-3.64	9.58
CFL7W bulb	219.83	0.04	9.67	6.03	-2.57	7.11
Led Reflektor 10W	223.05	0.093	20.74	10.81	-3.75	17.30
Led Parlamp10W	217.51	0.11	24.80	12.89	-2.74	21.00
Led Sijalica 6W	217.85	0.05	9.80	8.34	-0.16	5.15
Led Sijalica 3W	215.86	0.03	7.34	3.91	-1.00	6.13
TV Toshiba 147R9	233.51	0.217	50.67	31.44	-3.73	39.56
TV LG32LE5300, s	234.79	0.024	5.63	0.29	-3.52	4.39
TV LG32LE5300, a	233.62	0.436	101.86	95.61	-24.86	24.82
LCD-19(SAM943N)	226.11	0.247	55.85	32.75	-1.24	45.22
LCD-19 (Dell 1909W)	221.79	0.20	43.91	24.69	-7.15	35.61
DELL Optiplex 360	220.57	0.39	85.50	61.09	10.24	59.37
Klima-hladi	217.14	4.729	1026.86	1006.03	107.44	175.48
Klima-ventilator	221.07	0.15	33.16	22.00	18.32	16.73

5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada jeste da ukaže na značaj i uticaj koji elektronika i elektronski uređaji imaju na ukupni bilans potrošnje električne energije. On je iskazan kroz kroz tri celine. Najpre je ilustrovan udeo elektronskih uređaja na potrošnju električne energije. Savremeni elektronski uređaji posmatrani pojedinačno ne predstavljaju velike potrošače električne energije. Međutim njihov ukupan broj i dugo vreme eksploatacije svrstavaju ih u istu ravan sa takozvanim velikim potrošačima. Pokazano je da se između 1990. i 2009. udeo velikih potrošača na ukupnu potrošnju smanjio sa 62% na 44%, dok se kod malih potrošača (bez osvetljenja) sa 18% popeo na 32%. Pri tome ukupna potrošnja u ovom periodu povećana je za 66%. Imajući u vidu da je u tom periodu već postojala svest o energetski efikasnim uređajima i da se njihova pojedinačna potrošnja smanjivala, nedvosmisleno se može zaključiti da je ovo povećanje posledica veće dostupnosti elektronskih uređaja. To praktično znači da je broj elektronskih uređaja značajno porastao i da ključ održivog upravljanja električnom energijom leži u energetskoj efikasnosti svakog pojedinačnog uređaja. Zato je druga celina ovog rada posvećena metodima koji se primenjuju za smanjenje potrošnje u okviru CMOS integrisanih kola.

Treba podsetiti da je osnovna prednost CMOS kola nad bipolarnim u trenutku njihovog nastanka bila, upravo, daleko manja potrošnja. Vremenom je i ta "mala" potrošnja porasla do nivoa koji se ne može zanemariti. Do toga dolazi, pre svega, zbog potrebe da se broj tranzistora u integrisanom kolu poveća, tako da on danas premašuje cifru od milion. Naravno, pored toga, povećane su aspiracije da se što veći broj instrukcija obavi za što kraće vreme – što, takođe, povećava glad za energijom. Da bi se potrošnja svakog pojedinačnog uređaja smanjila, neophodno je smanjiti potrošnju svake njegove komponente. U elektronskim uređajima integrisana kola predstavljaju ključne komponente. U drugom delu ovog rada ilustrovani su metodi za smanjenje potrošnje CMOS kola na primeru mikrokontrolera koji je projektovan u LEDA laboratoriji Elektronskog fakulteta univerziteta u Nišu. Primenom opisanih tehnika dinamička potrošnja smanjena je za 48%, a statička za 78%. Na osnovu ovakvih rezultata očigledno je da se značajne uštede u potrošnji električne energije mogu ostvariti promenom pristupa projektovanju elektronskih kola. Međutim, otvara se pitanje čime je to plaćeno. Odnosno, koliku cenu elektroenergetski sistem plaća zbog „elektronizacije“. Toj temi posvećena je treća celina ovog rada.

Nesumnjivo je da je digitalizacija u elektronici dala značajan doprinos smanjenju potrošnje time što aktivni elementi rade u prekidačkom režimu. Udeo analogne elektronike koja zahteva polarizaciju tranzistora (potrošnju) i u odsustvu signala svodi se mali deo oko AD i DA konvertora na ulazno/izlaznim priključcima uređaja. Slična dobitna kombinacija za radni režim tranzistora koristi se danas i u pojačavačima snage kao i u AC/DC konvertorima. Međutim, prekidački režim rada tranzistora podrazumeva nagle promene struje. Sa stanovišta EEM to znači da talasni oblik struje ne prati prostoperiodični talasni oblik napona. Ovo ima za posledicu „zagadivanje“ EEM harmonicima. Poznato je da oni mogu da prouzrokuju gubitke, pa i kvarove na opremi i potrošačima koji su prevashodno namenjeni da se

napajaju prostoperiodičnim naponom. Problem postaje veoma ozbiljan upravo zato što broj elektronskih uređaja priključenih na mrežu raste. Svaki elektronski uređaj, računajući štedljive i LED sijalice, rade na DC naponu, što znači da u sebi sadrže AC/DC pretvarač. Ovome u skoroj budućnosti treba dodati i V2G punjače za automobile na električni pogon. Sa druge strane, svi merači potrošnje u današnjim EEM registruju isključivo aktivnu i reaktivnu, a mogu da mere i prividnu snagu. Snagu izobličenja koja postaje sve dominantnija u sistemima opterećenim nelinearnim potrošačima ne mere. Zato su, u ovom radu, sistematizovani podaci o merenjima svih komponenata snage koji se javljaju u većini uređaja koji se koriste u domaćinstvima. Merenja su obavljena originalnim metodom koji je pogodan za primenu u savremenim elektronskim brojljima, a razvila ga je grupa autora sa Elektronskog fakulteta u Nišu i iz Inovacionog centra naprednih tehnologija iz Niša. Rezultati ukazuju da se cena smanjene potrošnje aktivne snage plaća gubicima koji nastaju zbog nepostojanja svesti o značaju snage izobličenja. Zato autori ponovo ukazuju na ovaj problem i predlažu efikasan način za njegovo prevazilaženje.

Konačno, valja zaključiti da potrošnja električne energije značajno zavisi od načina eksploatacije elektronskih uređaja. Inženjeri su uložili značajni napor da osmisle „hibernaciju“, odnosno smanjenje potrošnje tokom neaktivnog tzv. *standby* rada uređaja. Međutim, ne treba izgubiti iz vida da i tada uređaji troše. Troše malo, ali ih ima vrlo mnogo i, što je još važnije, troše veoma dugo. Ulažu se veliki naponi da se korisnik oslobodi obaveze da isključuje za sobom prekidače. Međutim i ti pametni sistemi za prelazak u i iz *standby* moda u aktivno stanje rada uređaja moraju da se napajaju. Dok se ne nađe bolje rešenje, mole se korisnici da za sobom isključuju uređaje.

Zahvalnica

Istraživanja čiji su rezultati prikazani u ovom radu finansiralo je Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u okviru projekta sa evidencionim brojem TR32004.

6. LITERATURA

- [1] Republički zavod za statistiku Republike Srbije, Bilans električne energije 2011, <http://webrzs.stat.gov.rs/WebSite/userFiles/file/Energetika/2012-10-5/Bilans%20elektricne%20energije,%202011.pdf>
- [2] Republički zavod za statistiku Republike Srbije, „Stambene jedinice prema broju lica i domaćinstava“, oktobar 2013, <http://pod2.stat.gov.rs/ObjavljenePublikacije/Popis2011/Knjiga26.pdf>.
- [3] Enerdata, Average electricity consumption per electrified household, March 2013, <http://www.wec-indicators.enerdata.eu/household-electricity-use.html#/household-electricity-use.html>
- [4] Roos, Dave. "How Energy-efficient Electronics Work" 21 July 2008. HowStuffWorks.com. <<http://electronics.howstuffworks.com/everyday->

- tech/energy-efficient-electronics.htm> 03 November 2013.
- [5] Energy Efficiency Trends and Policies in The EU27, ADEME Editions, Paris 2009, http://www.odyssee-indicators.org/publications/PDF/publishable_report_final.pdf
- [6] Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC, *Official Journal of the European Union*, L 315, Vol. 55., 14. November 2012., ISSN 1977-0677.
- [7] Introducing Cranberry Smart Clients, Launch of the Cranberry SC21 Smart Client at <http://www.cranberrynet.com/>
- [8] Cranberry SC20, Ibid.
- [9] D. Mirković, P. Petković, „Multi channel Sigma-Delta A/D converter for integrated power meter,“ *Proceedings of the Small Systems Simulation Symposium 2010*, Niš, Feb., 2010.
- [10] M. Marinković, B. Andjelković, P. Petković, „Compact Architecture of Digital Decimation Filters in Solid-State Energy Meter,“ *Electronics*, Vol. 10, No. 2, University of Banja Luka, ISSN 1450, December 2006
- [11] P. Bipul, A. Agarwal, K. Roy, „Low-Power Design Techniques for Scaled Technologies,“ *Integration, The VLSI Journal*, Vol. 39, Issue 2 (2006)
- [12] M. Keating, D. Flynn, R. Aitken, A. Gibbons, K. Shi, „Low Power Methodology Manual,“ Springer, 2007.
- [13] S. Katkoori, S. Roy, N. Ranganathan, „A Framework for Power-Gating Functional Units in Embedded Microprocessors,“ *IEEE transactions on VLSI systems*, 2009, Vol.17, N.11
- [14] B. Jovanović, M. Damjanović, „Low Power Microcontroller Design By using UPF,“ *VIII Symposium on Industrial Electronics INDEL 2010*, Banja Luka, 2010
- [15] Synopsys 90nm Generic Library for Teaching IC Design, <http://www.synopsys.com>, accessed April 2010
- [16] Sainz Saperá, Luis & Balcells Sendra, Josep. (2011). Experimental measurements about harmonic current mitigation of electric vehicle battery chargers, *E-prints UPC -Universitat Politècnica de Catalunya-*. Retrieved at April 15, 2012, from the website temoa: Open Educational Resources (OER) Portal at <http://www.temoa.info/node/144712>.
- [17] Kempton W., Tomić J., „Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy“, *Journal of Power Sources* 144 (2005) 280–294.
- [18] Control of Harmonics in Electrical Power System, American Bureau of Shipping, May 2006
- [19] T. Shaughnessy, “Clearing Up Neutral-to-Ground Voltage Confusion”, *Electrical Construction & Maintenance*, February 1, 2007.
- [20] A. E. Emanuel, *Power Definitions and the physical mechanism of power*, Wiley and IEEE Press, 2010.
- [21] Stevanović, D., Petković, P., “A New Method for Detecting Source of Harmonic Pollution at Grid,” *Proc. of 16th Intern. Symp. Power Electronics Ee2011*, Novi Sad, Serbia, T6-2.9 pp. 1-4, 26.10.-28.10., 2011.
- [22] Dimitrijević, M., Litovski, V., “Quantitative Analysis of Reactive Power Calculations for Small Non-linear Loads,” *Proc. Small System Simul. Symp. 2012*, Niš, Serbia, pp. 150-154, 12.02.-14.02., 2012.
- [23] J. G. Webster, *The measurement, instrumentation, and sensors handbook*, IEEE Press, 1999.
- [24] *IEC 62053-22*, Electricity metering equipment (AC) - Particular requirements - Static meters for active energy (classes 0.2S and 0.5S), 2003.
- [25] *IEC 62052-11*, Electricity metering equipment (AC) - General requirements, tests and test conditions - Part 11: Metering equipment, 2003.

Abstract – The application of energy-efficient devices is imposed by the desire to balance the energy consumption and production. In this global process the electronics is no exception. Moreover, it is an important ally in the fight for sustainability in energetics. Its importance comes from the overall share of electronic devices as electricity consumers. Firstly, this paper discusses the role of electronic devices within the overall energy consumption. Then it describes the techniques for reducing consumption in CMOS integrated circuits. Their effect is illustrated by the example of designed microcontroller. Finally, it presents the impact of energy efficient electronic devices on the parameters of power networks. It points to the increasing presence of harmonics and proposes a method for their registration on the basis of each household.

ENERGY EFFICIENCY AND ELECTRONICS

Predrag Petković, Borisav Jovanović, Dejan Stevanović