

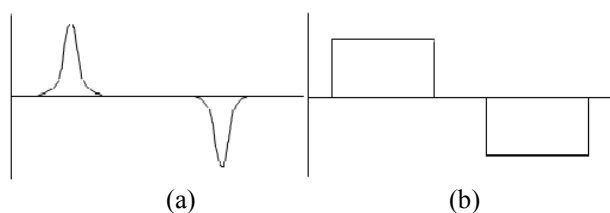
IZRAČUNAVANJE SNAGE DISTORZIJE U INTEGRISANOM MERAČU POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Dejan Stevanović, Borisav Jovanović, *Elektronski fakultet Niš, desha@venus.elfak.ni.ac.rs, borisav.jovanovic@elfak.ni.ac.rs*

Sadržaj – U ovom radu biće urađena kratka analiza potrošača električne energije, njihova podela na linearne i nelinearne, kao i uticaj nelinearnih potrošača na elektroenergetski sistem. Takođe će biti prikazano i hardversko rešenje kola za računanje snage distorzije, koje je sastavni deo Integrisanog Merača Potrošnje Električne Energije. Kolo je realizovano u CMOS 0.35 μ m tehnologiji korišćenjem alata iz Cadence paketa za projektovanje integrisanih kola.

1. POTROŠAČI ELEKTRIČNE ENERGIJE

U zavisnosti od talasnog oblika struje koju potrošači vuku iz elektroenergetskog sistema, sve potrošače možemo svrstati u dve grupe: u linearne i nelinearne. Linearni potrošači su oni koji povlače struju prostoperiodičnog talasnog oblika frekvencije 50 Hz, odnosno 60Hz, tj. kod njih je talasni oblik struje isti kao talasni oblik napona. Istorijski gledano, do skoro su se uglavnom proizvodili linearni potrošači: električni motori, sijalice sa užarenim vlaknom, razna grejna tela i većina drugih uređaja koji su se koristili u domaćinstvu. Nelinearne potrošače električne energije karakteriše talasni oblik struje koji se razlikuje od prostoperiodične funkcije napona [1]. Poslednjih 50-ak godina primećuje se značajno povećanje broja ovih potrošača. Oni se mogu svrstati u dve grupe. U prvoj grupi mogu biti uređaji koji se koriste u kancelarijama kao što su računari, faks mašine i većina uređaja iz domaćinstva kod kojih je primenjena savremena elektronika za kontrolu rada tog uređaja, kao što su napredne veš mašine i dr. U drugoj grupi mogu se naći razne vrste DC motora kod kojih se može podešavati brzina rada. Ovi motori se uglavno koriste u industriji, u procesu proizvodnje, kao i u liftovima. Na Sl.1 prikazani su talasni oblici struje (a) računara, (b) dc motora promenljive brzine

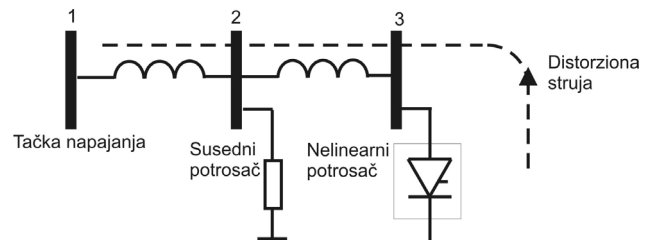


Slika 1. Talasni oblici struje (a) računara, (b) dc motora

Talasni oblici struje koji su prikazani na Sl. 1 mogu se dobiti superponiranjem više sinusnih talasnih oblika različitih frekvencija. Da bismo dobili talasni oblik struje sa Sl.1a potrebno je izvršiti sabiranje tri sinusne funkcije frekvencija 50Hz, 150Hz, 250Hz, ... Talasni oblik sa Sl.1b formiraju signali sinusne funkcije frekvencija 50Hz, 250Hz, 350Hz, ... Frekvencija od 50Hz je osnovna frekvencija dok su sve ostale frekvencije viših harmonika koje predstavljaju celobrojni umnožak osnovne frekvencije. Amplituda i frekvencija viših harmonika zavise od vrste nelinearnog potrošača tako da pomažu u njegovoj identifikaciji [1].

Distorzione komponente protiču kroz energetski sistem i izazivaju dodatni visoko frekvencijski pad napona [1]. To dovodi do promene u talasnom obliku napona kod svih potrošača koji se nalaze u blizini. Na Sl.2 je prikazano kako

nelinearno opterećenje utiče na potrošače u blizini. U tački 1 izobličenje je najmanje, dok je u tački 3 najveće, zato što impedansa sistema raste sa povećanjem daljine između potrošača i trafostanice a samim tim se povećava i pad napona.



Slika 2. Uticaj nelinearnog opterećenja

Nelinearno opterećenje osim što prouzrokuje pad napona, dovodi i do izobličenja talasnog oblika napona napajanja. Kao što se vidi sa Sl.2 harmonijsko izobličenje je fenomen kod koga potrošači međusobno utiču jedan na drugog pošto su povezani na istu električnu mrežu. Sa porastom broja nelinearnih potrošača raste i veličina harmonijskog izobličenja celog sistema. Postojanje harmonijskih izobličenja utiče na rad pojedinih komponenta distributivne mreže i drugih potrošača. Ukoliko već harmonijska izobličenja na mreži ne mogu da se spreče, važno ih je održavati u prihvatljivim granicama. Da bi to bilo moguće, neophodno je meriti ova izobličenja a zatim primeniti odgovarajuće mere za njihovo smanjenje.

Rad je organizovan u sedam poglavlja. Naredno poglavlje opisuje uticaj harmonijskih izobličenja na električne uređaje. U trećem poglavlju objašnjeno je kako se računa snaga nelinearnih monofaznih potrošača. Četvrto poglavlje posvećeno je funkciji i arhitekturi DSP bloka koji predstavlja deo sistema na čipu za merenje parametara signala elektro-energetske mreže. U petom poglavlju prikazana je hardverska implementacija kola za računanje snage distorzije, koji predstavlja nadogradnju DSP bloka u postojećem integrisanom meraču potrošnje električne energije IMPEG [2, 3]. U šestom poglavlju prikazani su rezultati simulacija koji verifikuju rad kola za merenje distorzije. Zaključak je dat u sedmom poglavlju.

2. UTICAJ HARMONIJSKIH IZOBLIČENJA NA ELEKTRIČNU OPREMU

Električna oprema različito reaguje na postojanje harmonijskih izobličenja u zavisnosti od načina na koji obavlja svoju funkciju. Na primer, na rad sijalice sa užarenim vlaknom, harmonijski izobličen napon uopšte ne utiče. Sa druge strane, kod induktorskog motora dolazi do grejanja namotaja što dovodi do bržeg uništenja izolacije i samim tim smanjuje se životni vek motora [1]. Pojedini uređaji zahtevaju veoma precizan napon napajanja. Postojanje harmonijskih izobličenja može dovesti do nepravilnosti u radu tih uređaja. Primer za takvu opremu predstavljaju svi uređaji koji sadrže tiristore (prigušivači svetla ili neki aparati za zavarivanje).

Harmonijska izobločenja prouzrokovana nelinearnim potrošačima negativno utiču i na trofazni sistem: To za posledicu može imati da neutralna struja premaši vrednost aktivne linijske struje. Kada ne postoji harmonisko izobličenje, struja kroz nulti provodnik je veoma mala. Ukoliko je zastupljenost harmonijskog izobličenja duž monofaznog sistema visoka, postoji opasnost od preopterećenja neutralnog provodnika što može prouzrokovati:

- Pregrevanje neutralnog provodnika, samim tim se smanjuje životni vek tog provodnika a može doći i do pojave požara
- Poznato je da visoki napon između nule i zemlje može uticati na rad digitalne opreme i lokalne računarske mreže (LAN), ukoliko je uzemljenje loše odrađeno [4]

Osim što postojanje harmonijskih izobličenja može prouzrokovati probleme kod rada potrošača, ono takođe izaziva problem i u sistemu napajanja. Distorziona struja izaziva dodatno grejanje transformatora i samim tim smanjuje njihov životni vek. S druge strane, kod kondenzatorskih baterija distorzioni napon dovodi do pregrevanja dielektrika, i samim tim postoji mogućnost pojave eksplozija.

3. RAČUNANJE SNAGE NELINEARNIH MONOFAZNIH POTROŠAČA

Računanje snage nelinearnih potrošača je komplikovanije nego u slučaju kada je struja prostoperiodična funkcija. Kao što je u prethodnom poglavlju objašnjeno, osim signala osnovne frekvencije, talasni oblik struje sadrži i više harmonike. Trenutna vrednost napona, čija je osnovna frekvencija f , može se izraziti kao $u_1(t) = V_1 \sin(\omega t + \theta^o)$, gde V_1 označava maksimalnu vrednost napona prvog harmonika.

Generalni izrazi trenutne vrednosti napona i struje za bilo koji harmonik dati su pomoću sledeće dve formule:

$$u_h(t) = V_h \sin(\omega_h t + \alpha_h^o) \quad (1)$$

$$i_h(t) = I_h \sin(\omega_h t + \beta_h^o) \quad (2)$$

gde V_h , I_h označavaju maksimalne vrednosti napona i struje za h -ti harmonik. Proizvod napona i struje na istoj harmonijskoj frekvenciji daje harmonijsku snagu. Za monofazne sisteme gde je h red harmonika a H najveći harmonik, ukupna aktivna snaga se računa kao:

$$P = \sum_{h=1}^H V_h I_h \cos(\alpha_h - \beta_h) \quad (3)$$

Reaktivna snaga računa se kao

$$Q = \sum_{h=1}^H V_h I_h \sin(\alpha_h - \beta_h) \quad (4)$$

Doprinos harmonijskih komponenti napona i struja na ukupnu aktivnu i reaktivnu snagu je mali, obično je manji od 3% celokupne aktivne ili reaktivne snage [5]. Glavni doprinos harmonijskih komponenti napona i struje odnosi se na snagu distorzije. Vektorski zbir aktivne i reaktivne snage daje *faznu snagu* [5] S . Njen intenzitet računa se kao:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (5)$$

gde aktivna snaga P predstavlja algebarsku sumu aktivne snage osnovnog harmonika i aktivnih snaga svih viših

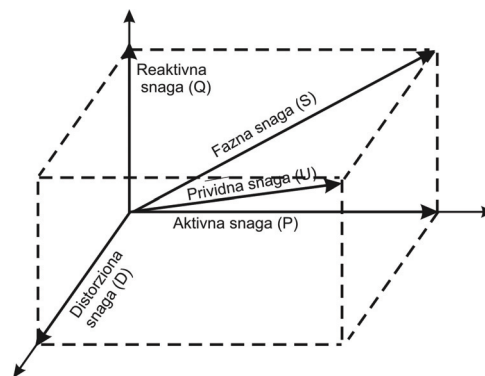
harmonika (3), a Q predstavlja algebarsku sumu reaktivne snage osnovnog i svih viših harmonika (4).

S druge strane, *prividna snaga* U predstavlja vektorski zbir fazne i snage distorzije [5], tako da se njen intenzitet računa kao:

$$U = \sqrt{S^2 + D^2} = V_{RMS} * I_{RMS} \quad (6)$$

Pojam distorzione snage D , koja je sastavni deo prividne snage U , prvi je uveo C. Budeon 1927 godine [6].

Na Sl.3 prikazan je fazni dijagram monofaznog sistema kada struja i napon sadrže više harmonike. Na faznom dijagramu dat je geometrijski odnos između aktivne P , reaktivne Q , fazne S , distorzione D , i prividne snage U .



Slika 3. Geometrijski odnos između aktivne, reaktivne, fazne, distorzione i prividne snage.

Na osnovu Sl.3 može se zaključiti da će, ukoliko se nelinearni potrošač zameni linearnim, distorziona snaga biti jednaka nuli, a samim tim će prividna snaga U biti jednaka faznoj snazi S .

4. FUNKCIJA I ARHITEKTURA DSP BLOKA U IMPEG ČIPU

Blok DSP predstavlja deo integrisanog merača potrošnje električne energije - IMPEG. Na osnovu trenutnih vrednosti struje i napona koje dobija iz digitalnih filtera, DSP svake sekunde računa efektivnu vrednost struje I_{RMS} , efektivnu vrednost napona V_{RMS} , aktivnu snagu P , reaktivnu snagu Q , prividnu snagu U , faktor snage $\cos(\varphi)$ i vrednost trenutne frekvencije signala energetske mreže [2, 3]. Na osnovu vrednosti aktivne i reaktivne snage, kolo generiše impulse za svaki Wh izmerene energije. Impulsi inkrementiraju registre DSP-a u kojima se beleži aktivna i reaktivna (potrošena ili generisana) energija.

Najpre će biti dat kratak pregled relevantnih jednačina koje opisuju funkciju DSP-a.

Trenutna vrednost struje može se predstaviti sa:

$$i(t) = \sqrt{2} I_{RMS} \cdot \cos(2\pi f t + \varphi) \quad (7)$$

Posle diskretizacije po vremenu dobija se

$$i(nT) = \sqrt{2} I_{RMS} \cdot \cos(2\pi \frac{f}{f_{semp}} n + \varphi) \quad (8)$$

gde je $f = 50\text{Hz}$, $f_{semp} = 4096\text{Hz}$, frekvencija semplovanja signala struje i napona na izlazu digitalnih filtera.

Kolo računa efektivnu vrednost struje po formuli:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N i(nT)^2}{N}} \quad (9)$$

gde je $N=4096$. Relativna greška računanja I_{RMS} po formuli (9) zavisi od trenutne frekvencije signala. Sličan se izraz koristi prilikom izračunavanja efektivne vrednosti napona. V_{RMS} . Trenutna vrednost snage dobija se množenjem trenutnih vrednosti struje i napona a srednja snaga računa se kao:

$$P = \frac{\sum_{n=1}^N p(nT)}{N} \quad (10)$$

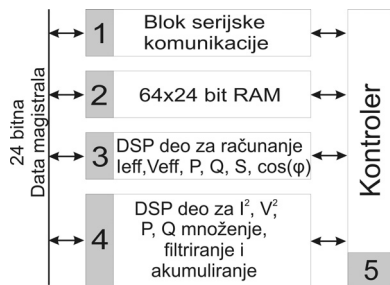
Izvor grešaka pri računanju snage leži u mogućoj faznoj razlici signala struje i napona i činjenici da frekvencija mrežnog signala nije tačno 50Hz, pa vremenski period od $1s$ nije jednak celom broju polu-perioda mrežnog signala. Radi eliminacije grešaka, trenutne vrednosti $i^2(t)$, $u^2(t)$, $p(t)$ i $q(t)$ se filtriraju, pa tek onda akumuliraju. Prividna snaga se računa po obrascu:

$$U = V_{RMS} I_{RMS} \quad (11)$$

DSP blok radi na 4.194 MHz i sa relativnom greškom manjom od 0.1% računa pomenute parametre signala elektro-energetske mreže. Dinamički opseg efektivne struje je od 10mA to 100A, a napona do 300V.

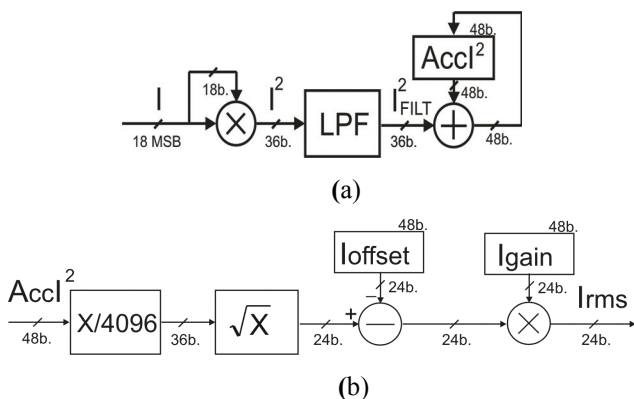
Arhitektura DSP-a zasnovana je *controller/datapath* podeli. Može se sagledati kroz nekoliko celina koje su prikazane na slici 4:

- bloka serijske komunikacije
- memorije kapaciteta 64x24 bita za smeštanje rezultata za sve tri faze energetske mreže.
- dela za množenje, filtriranje i akumuliranje vrednosti $i^2(t)$, $u^2(t)$, $p(t)$ i $q(t)$
- bloka za računanje I_{RMS} , V_{RMS} , P , Q , U , $\cos(\varphi)$, i f.
- konačnog automata koji upravlja ostalim blokovima DSP-a



Slika 4. DSP blok dijagram

Na Sl.5 prikazane su operacije koje izvršava DSP blok u cilju nalaženja efektivne vrednosti struje.



Slika 5. (a) Množenje, filtriranje i akumuliranje $I^2(i)$ (b) Izračunavanje efektivne vrednosti struje I_{RMS}

Veličine: trenutna vrednost struje i napona, fazno pomerenog napona, efektivne vrednosti struje i napona, aktivne P , reaktivne snage Q , prividne snage U predstavljene su 24-bitnim binarnim brojevima u potpunom komplementu u formatu koji je prikazan na slici 6.

znak	2^{-1}	2^{-2}	2^{-3}	2^{-22}
------	----------	----------	----------	-------	-----------

Slika 6. Format za predstavljanje merenih veličina

U tom formatu predstavljaju se brojevi u opsegu od -1 do 1. Pomenute veličine normalizovane su u odnosu na odgovarajuću vrednost pune skale: za napon to je $\sqrt{2}$ 300V, za struju je $\sqrt{2}$ 100A, za snagu je 60kW.

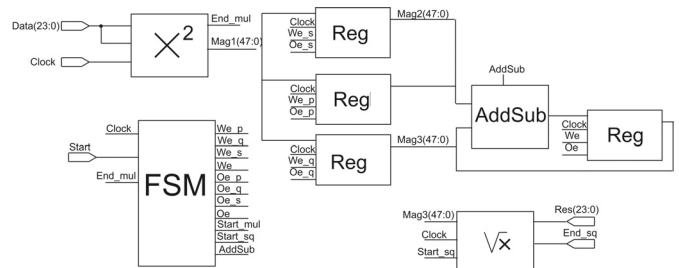
5. REALIZACIJA KOLA ZA RAČUNANJE DISTORZIONE SNAGE

Na osnovu svega rečenog u poglavlju 2 možemo zaključiti da je potrebno imati informaciju o vrednosti distorzionne snage. Realizovani modul računa distorzionu snagu periodično, jednom nakon svake sekunde, koristeći obrazac (12).

$$D = \sqrt{U^2 - P^2 - Q^2} \quad (12)$$

Unutrašnja struktura modula za računanje distorzionne snage prikazana je na Sl.7. Modul se sastoji od kola za množenje, kola za korenovanje, kola za oduzimanje, bloka kontrolne logike i četiri registra.

Modul radi na sledeći način. Setovanjem signala *Start*, kolo za množenje uzima 24-bitni broj P koji se nalazi na ulaznom portu *Data In*. Nakon 24 taktih ciklusa na izlazu kola za množenje dobija se 48 bitni rezultat P^2 koji se smešta u pomoćni registar. Postupak se ponavlja za veličine Q i U . Nakon dobijanja P^2 , Q^2 , U^2 , pomoću kola za oduzimanje, dobija se broj koji se dalje šalje na ulaz kola za korenovanje.



Slika 7. Blok šema kola za računanje snage distorzije

Broj koji se korenuje je 48-bitni broj. Rezultat je 24-bitni broj, predstavljen u potpunom komplementu. Format rezultata, sračunate snage distorzije D , dat je na Sl.6.

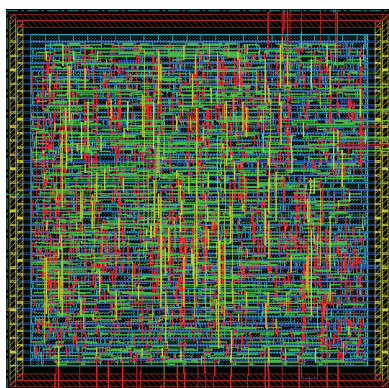
6. REZULTATI SINTEZE I SIMULACIJE

RTL simulacija urađena je alatom Active HDL. Modul je zatim sintetizovan programom RTL Compiler iz Cadence paketa za projektovanje integrisanih kola dok je implementacija do izrade lejauta urađena u SoC Encounter-u, takođe iz Cadence paketa. Prilikom sinteze i izrade lejauta korišćena je biblioteka standardnih ćelija MTC45000. Za realizaciju kola korišćena je AMIS CMOS 0.35µm tehnologija. Površina svakog dela modula prikazana je u tabeli 1, dok je na Sl. 8 prikazan lejauta.

Tabela 1. Površina modula koja se dobija nakon sinteze

Naziv bloka	Ceo Modul	Kolo za množenje	Kolo za korenovanje	FSM	Registar	Kolo za sabiranje i oduzimanje
Površina	4164	822	788	78	416	382

Na osnovu Tabele 1 vidimo da površina modula za računanje snage distorzije iznosi 4164 gejtova. Površina kola za množenje je 822, kola za korenovanje 788. Dimenzije dobijenog lejauta su 569 μm x 564 μm .



Slika 8. Lejaut modula za računanje snage distorzije

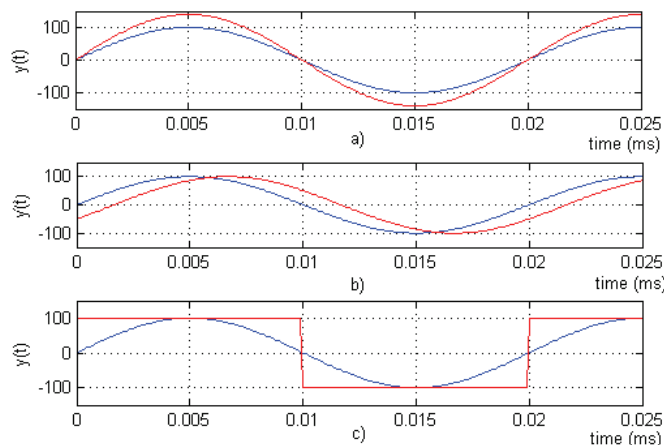
Nakon implementacije lejauta, urađena je logička verifikacija rada, pri čemu su korišćene informacije o kašnjenju signala na metalnim vezama lejauta.

Pošto smo se uverili da projektovano kolo ispravno radi, pristupili smo postupku logičke verifikacije zajedničkog rada kola i DSP-a. Da bi se izračunala snaga distorzije D na osnovu formule (11), potrebno je da budu poznate brojne vrednosti za aktivnu, reaktivnu i prividnu snagu (P , Q , U respektivno). One se računaju u okviru DSP bloka koji je opisan u četvrtom poglavlju.

Simulirano je opterećenje sa 3 različita potrošača:

- Linearni potrošač, struja i napon su u fazi, $\varphi=0^\circ$
- Linearni potrošač, struja kasni za naponom, $\varphi=30^\circ$
- Nelinearni potrošač

Talasi oblici napona i struje koje smo koristili za simulaciju prikazani su na Sl.9 a dobijeni rezultati u tabeli 2.



Slika 9. Talasni oblici struje i napona a) Linearni potrošač - struja i napon su u fazi, b) Linearni potrošač - struja kasni za naponom za 30 stepeni c) Nelinearni potrošač

Tabela 2. Rezultati simulacije potrošača električne energije

	Slika 9a	Slika 9b	Slika 9c
$I_{RMS}(A)$	41.72	41.73	58.63
$U_{RMS}(V)$	125.17	125.2	125.17
$P(W)$	5223.19	4524.42	6650.3
$Q(VAR)$	0.007	2613.31	0.09
$U(VA)$	5223.19	5224.92	7339.6
$D(VA)$	0	2.61	3105.36

Kao što se vidi iz tabele 2 za slučaj pod a) aktivna snaga jednaka je prividnoj, dok su reaktivna snaga i snaga distorzije jednake nuli; za slučaj pod b) očigledna je značajna komponenta reaktivne snage. Analizirajmo sada slučaj pod c). Kao što se vidi sa Slike 9, struja nije sinusna funkcija već ima oblik pravougaonog impulsa što ukazuje na veliki broj harmonika. Ovo je najgori slučaj koji se može pojaviti u električnoj mreži. Dobijeni rezultat je zabrinjavajući sa strane distribucije. Naime, dobija se vrednost snage distorzije koja dostiže 46% aktivne snage. To predstavlja veliki gubitak za elektro-energetski sistem.

7. ZAKLJUČAK

Na osnovu dobijenih rezultata vidi se da u slučaju „zaprljanja“ elektroenergetske mreže višim harmonicima, distorziona snaga može da predstavlja značajan uzročnik gubitka za elektrodistribuciju. Takođe, ono može prouzrokovati oštećenja elektronske opreme. Predloženo kolo koristi se za računanje snage distorzije i predstavlja nadgradnju DSP bloka koji je ugrađen u kolo integrisanog merača potrošnje električne energije. Prednost kola ogleda se u maloj površini na čipu koja je potrebna za njegovu realizaciju.

ZAHVALNOST

Rezultati prikazani u ovom radu ostvareni su u okviru projekta TR 11007. čiju realizaciju finansira Ministarstvo nauke Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] *Integral Energy Power Quality Centre: Technical note No. 3, „Harmonic Distortion in the Electric Supply System“*, March 2000
- [2] B. Jovanovic, M. Damnjanović, P. Petković, “Digital Signal Processing for an Integrated Power Meter”, *Proceedings of 49. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium*, Technische Universitat Ilmenau, Ilmenau, Germany, vol. 2, pp. 190-195, September 2004
- [3] B. Jovanović, M. Damnjanović, “Digital Signal Processing in three-phase Integrated Power Meter”, *Proc. of the 52th ETRAN conference*, Palić, June 2008, EL2.3-1-4.
- [4] T. Shaughnessy, “Clearing Up Neutral-to-Ground Voltage Confusion”, *Electrical Construction & Maintenance*, February 1, 2007.
- [5] J. G. Webster, *The measurement, instrumentation, and sensors handbook*, IEEE Press, 1999.
- [6] A. E. Emanuel, “Summary of IEEE Standard 1459: Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions”, *IEEE Tran. On Industrial Applications*, Vol. 40, No3, May 2004.

Abstract – In this paper, the brief analysis of electrical power consumption, the division of linear and nonlinear consumers, and also, the influence of nonlinear consumers on the power system will be given. The hardware circuit for calculating the distortion power will be described. The circuit is embedded into Integrated Power-Meter and realized in CMOS 0.35 μm technology, using Cadence design tools.

THE CALCULATION OF DISTORSION POWER IN INTEGRATED POWER METER CIRCUIT

Dejan Stevanović, Borisav Jovanović