



## BRZI PARALELNI DIGITALNI VATMETAR

### THE FAST PARALLEL DIGITAL WATTMETER

V. Vujičić, S. Milovančev, I. Župunski\*

**Kratak sadržaj:** U radu je opisana konstrukcija jedne varijante adicionog A/D konvertora, tzv. rezidualnog A/D konvertora i sa njim spregnutog rezidualnog množača/akumulatora, koji zajedno čine strukturu višekanalnog digitalnog vatmetra vrlo velike brzine i velike jednostavnosti i pouzdanosti. Napravljen je simulacioni model za proveru ideje i prototip digitalnog dela. Oba su potvrdili u radu navedene visoke performanse ove strukture. Prikazana je mogućnost primene u uslovima izobličjenih signala, čiji najčešći uzrok su uređaji energetske elektronike.

**Ključne reči:** A/D konvertor, vatmetar, rezidualna aritmetika

**Abstract:** A residual multichannel adding A/D converter coupled with residual multiplier/accumulator is described. These two make a structure of a high speed, very simple and reliable multichannel digital wattmeter. A corresponding simulation model and the prototype of the digital part are also made in order to confirm calculated high performances. Results were satisfied. They are given in the paper too.

**Key words:** A/D Converter, Wattmeter, Residual Arithmetics

## 1. UVOD

Počevši od Turgela [1] i nastavljajući sa Stenbakenom [2] digitalna sampling metoda je polako ali sigurno zauzimala dominantnu poziciju u merenjima snage i energije. Nelinearna i nesimetrična opterećenja [3] dalje povećavaju zahteve u pogledu tačnosti i dinamike koji se postavljaju pred uređaje za merenja na distributivnoj mreži - tj. vatmetre, brojlila, ampemetre i voltmetre. Upravljanje potrošnjom (Load Management) podrazumeva mnogo raznovrsnih merenja na mreži, ali pre svega simultana merenja u mnogo mernih tačaka i tokom dugog perioda vremena.

Vatmetar je po prirodi višekanalni uređaj pa je logična primena paralelnog adicionog (adding) A/D konvertora. Ovakav konvertor je predstavljen u [4] i utvrđeno je da on sa visokom tačnošću može da meri signale na realnoj mreži i do 400 kanala istovremeno.

Primena višekanalnog paralelnog adicionog (adding) A/D konvertora je postavila novi problem - problem simultane obrade velike količine izmerenih podataka dobijenih od A/D konvertora u istom trenutku.

Aktivna snaga u jednoj periodu mrežnog napona je data sa:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \cdot i_i \quad (1)$$

gde su:  $P$  - aktivna snaga

\* Vladimir Vujičić, Slobodan Milovančev, Ivica Župunski, Fakulteta tehničkih nauka, Dositeja Obradovića 6 Novi Sad,

$u_i, i_i$  -  $i$ -ti odmerci napona i struje

$N$  - broj odmeraka u jednoj periodi.

U standardnim rešenjima izraz (1) sračunava ili mikroprocesor, za male brzine i/ili mali broj kanala, ili DSP, za velike brzine i/ili velik broj kanala. Savremeni DSP ima nekoliko miliona tranzistora i veoma je složen uređaj čija cena postaje prihvatljiva tek ako se proizvede u ogromnoj seriji. Isto tako, specijalne mere moraju biti preduzete da uređaj takve složenosti pouzdano radi.

U rešenju opisanom u ovom radu, izraz (1) sračunava posebno programiran PLD koji ima nekoliko desetina hiljada tranzistora i koji je ostvarljiv u nekoliko komercijalnih PLD familija. Složenost je, dakle, oko 100 puta manja, brzina je veća nekoliko puta, a takođe je veća i pouzdanost u radu. Posebnu prednost predstavlja korišćenje rezidualne aritmetike koja, s jedne strane, eliminiše problem propagacije prenosa (carry propagation problem) čime značajno povećava brzinu, i, s druge strane, značajno pojednostavljuje konstrukciju same aritmetičke jedinice, kao što će u radu biti pokazano.

Realizaciju brzog i paralelnog vatmetra je u značajnoj meri pomoglo postojanje paralelnog adicionog A/D konvertora prikazanog na PES Winter Meeting-u 1995. od strane istih autora. U radu je pokazano kako se od običnog paralelnog adicionog A/D konvertora koji radi u proizvodnom ponderisanom brojnem sistemu, može dobiti odgovarajući paralelni rezidualni adicioni A/D konvertor.

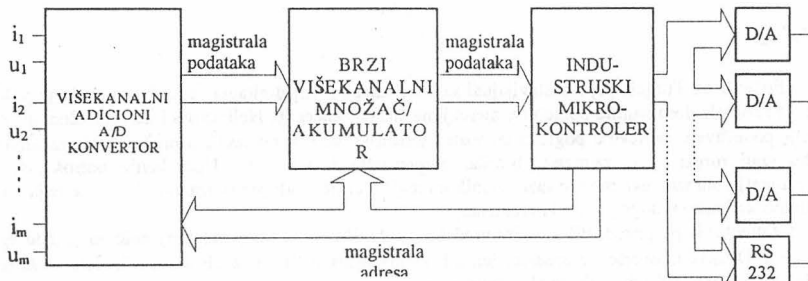
U radu su razmatrani i aspekti primene ovakvog uređaja u uslovima izobličених talasnih oblika napona i struje. Najčešći izvor ovih nesinusoidalnosti su uređaji energetske elektronike, pa se u ovoj oblasti predviđa jedan od značajnijih aplikacija vatmetra.

## 2. OPIS UREĐAJA

U ovom radu je predstavljen brzi paralelni digitalni vatmeter, koji u potpunosti koristi prednosti povezivanja A/D konverzije i sa njom usklađene brze obrade signala. Predstavljena je poboljšana verzija A/D konvertora, koja koristi rezidualnu aritmetiku - paralelni rezidualni adicioni A/D konvertor, a sa njim i novo rešenje množača/akumulatora na bazi iste aritmetike - rezidualni množač/akumulator. Primenom jeftinog mikroprocesora i tehnologije PLD dobijena je znatno jednostavnija konstrukcija sa veoma elastičnim performansama.

### 2.1 Blok šema

Na slici 1. je prikazana blok šema brzog paralelnog digitalnog vatmetra.

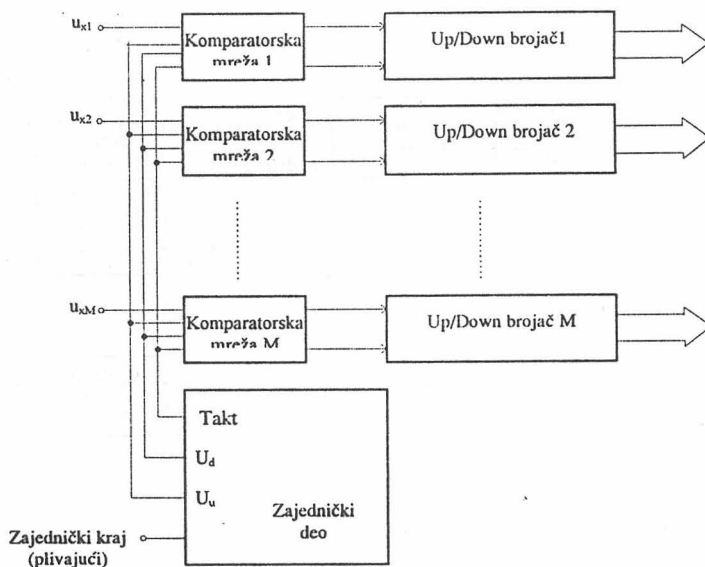


Slika 1. Blok šema brzog paralelnog digitalnog vatmetra

Na šemi nisu prikazani detalji vezani za kondicioniranje ulaza: naponski razdelnici, žantovi i instrumentacioni pojačavači za pojačanje analognih signala srazmernih strujama. Vektori  $\vec{u}$  i  $\vec{i}$  su naponi proporcionalni vrednostima ulaznih napona i struja u posmatranom trenutku.

### 2.2 Višekanalni adicioni A/D konvertor

U literaturi [4] je opisan A/D konverter koji se na način prikazan na slici broj 2. može preurediti da radi kao višekanalni.



Slika 2. Višekanalni adicioni A/D konverter

Ako se umesto svakog up/down brojača u ponderisanom brojnem sistemu (obično binarnom, oktalanom, heksadecimalnom ili decimalnom) stavi skup up-down brojača koji broje po uzajamno prostim modulima  $a_1, a_2, \dots, a_n$ , dobija se struktura kao na slici 3. koju nazivamo paralelni rezidualni A/D konverter čiji je brojni opseg  $O = a_1, a_2, \dots, a_n$ .

### 2.3. Vrlo brzi rezidualni množač/akumulator

U izrazu (1) za izmerenu snagu u digitalnom sampling vatmetru sumu proizvoda  $\sum_{i=1}^N u_i \cdot i_i$  sračunava vrlo brzi rezidualni množač/akumulator. Izraz se sračunava potpuno paralelno za svaku rezidualnu cifru (modulo). On se sastoji iz dve operacije:

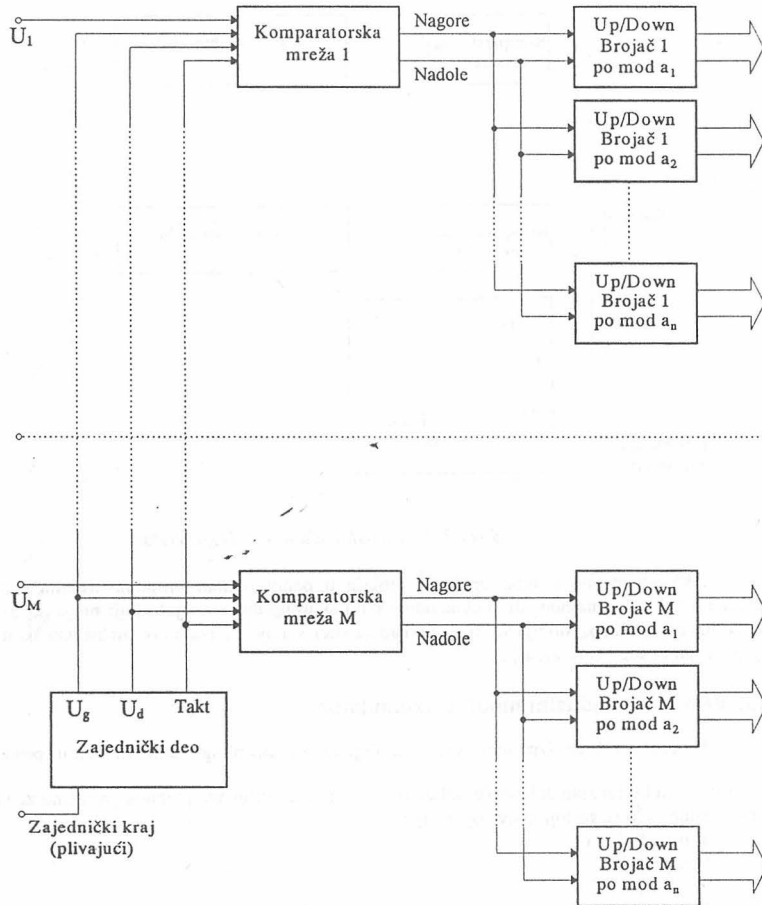
- a) množenje  $i$
- b) sabiranje

Opšti oblik tabele za množenje po modulu  $a_i$  je:

Tabela 1. Opšti oblik tabele rezidualnog množenja za osnovu  $a_i$

	0	1	2	.....	$a_i - 1$
0	0	0	0	.....	0
1	0	1	2	.....	$a_i - 1$
2	0	2	4	.....	$(2a_i - 2)_{\text{mod } a_i}$

$a_{j-1}$	0	$a_{j-1}$	$(2a_1 - 2)_{\text{mod } a_1}$	.....	$(a_1^2 - 2a_1 + 1)_{\text{mod } a_1}$



Slika 3. Paralelni rezidualni A/D konvertor

Tabela 2. Tabela rezidualnog množenja za rezidualnu osnovu 5

	0	1	2	3	4
0	0	0	0	0	0
1	0	1	2	3	4

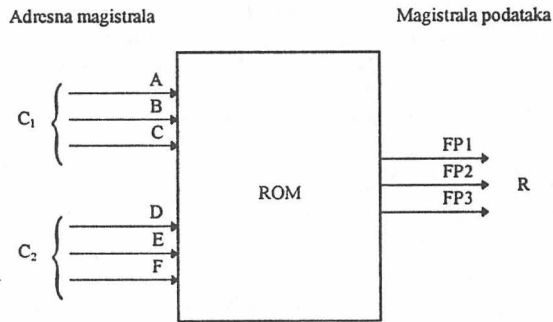
2	0	2	4	1	3
3	0	3	1	4	2
4	0	4	3	2	1

Množáč po modulu 5 (ili po bilo kom drugom modulu) može da se realizuje:

- preko tabele u ROM-u (ili RAM-u)
- preko standardnih aritmetičko-logičkih elemenata, i
- preko kombinacionih mreža.

Kompaktna rešenja bazirana na jednoj ideji realizacije su a) i c) dok je b) kompromisna varijanta.

Fizički najveće brzine izvođenja operacija se postižu sa c), zatim sa a) i najzad sa b).



Slika 4. Rešenje a)

Analitički izrazi za izlazne funkcije množača po modulu 5 su:

$$FP1 = A \cdot D + \bar{B} \cdot C \cdot F + C \cdot \bar{E} \cdot F + B \cdot \bar{C} \cdot D + A \cdot E \cdot \bar{F} + B \cdot \bar{C} \cdot E \cdot F + B \cdot C \cdot E \cdot \bar{F}$$

$$FP2 = B \cdot D + A \cdot E + \bar{B} \cdot C \cdot E + B \cdot \bar{E} \cdot F$$

$$FP3 = \bar{B} \cdot C \cdot D + A \cdot \bar{E} \cdot F + B \cdot \bar{C} \cdot E \cdot \bar{F} + B \cdot C \cdot E \cdot F$$

Izrazi za ostale osnove i operacije imaju sličnu formu, a prostor ne dozvoljava da se sve navedu.

## 2.4. Dekoder rezultata

Da bi se moglo izvršiti deljenje sa N ( iz izraza (1)), potrebno je sadržaj rezidualnog množača/akumulatora prevesti u ponderisani brojni sistem i za to se koristi Kineska teorema ostataka koju realizuje ili mikroprocesor ili ugrađeni hardverski procesor.

## 3. ANALIZA PERFORMANSI

U simuliranom vatmetru su usvojene sledeće brojne osnove:

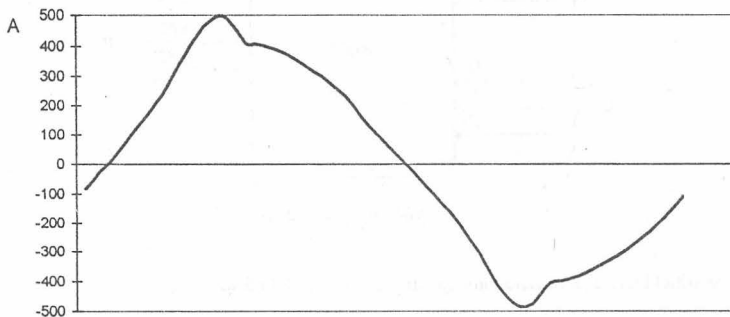
$$a_1 = 5 \quad a_2 = 7 \quad a_3 = 8 \quad a_4 = 9 \quad a_5 = 11 \quad a_6 = 13 \quad a_7 = 17 \\ a_8 = 19 \quad a_9 = 23.$$

Brojni opseg:  $O = \pm 1\,338\,557\,220$ .

Na usvojenom PLD, sa clockom od 50 MHz je vreme potrebno za jedno množenje i akumulaciju približno 80 ns. Postignuta brzina rezidualnog množača/akumulatora je, dakle, 12.500.000 operacija/sekundi.

Paralelni rezidualni A/D konvertor je simuliran kao šestokanalni, sa tri strujna i tri naponska kanala, a radio je na optimalnom sampling rate-u od 10 kHz, [4], što je za takt od 12,5 MHz na A/D konvertoru značilo približno 10-bitnu rezoluciju. Na 50 Hz učestanosti ulaznih signala bilo je 200 tačaka po periodi što je značilo da je brojni opseg  $O$  iskorišćen sa približno 4%. Usvojen je jeftin industrijski mikrokontroler koji je jedno dekodovanje obavljao za oko 700  $\mu$ s, tako da je u toku jedne periode mogao da dekoduje oko 28 akumulatora, što predstavlja broj monofaznih mernih mesta u kojima uređaj simultano može da meri snagu. Postojeći uređaj je vremenski, stoga, bio iskorišćen sa 21%.

Kako vatmetar za obradu koristi rezidualnu, dakle, celobrojnu aritmetiku, tačnost zavisi samo od oblika signala i tačnosti A/D konvertora. Tačnost adicionog A/D konvertora u opštem slučaju zavisi samo od periode testerastog napona  $T_s$ , kako je to utvrđeno u radu [4] i ona je izabrana tako da ima donju graničnu optimalnu vrednost od 100  $\mu$ s. Postignuta tačnost se poklapala sa onom u [4].



Slika 5 Talasni oblik test signala struje

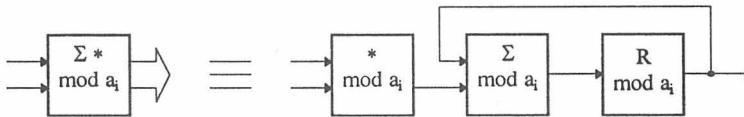
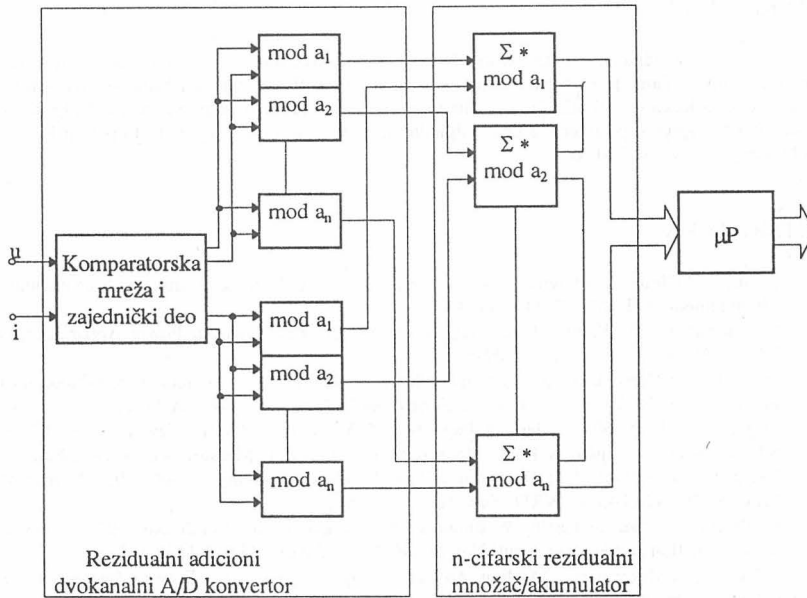
Već sa jednostavnim industrijskim mikrokontrolerom moguće je meriti sa 10-bitnom rezolucijom.

#### 4. DISKUSIJA

U radu je detaljno opisana konstrukcija vrlo brzog paralelnog vatmetra. Realizovan je dvokanalni prototip rezidualnog množača/akumulatora na kome su potvrđene sve glavne performanse. Ako se na oba ulaza rezidualnog množača akumulatora dovede isti signal, onda se paralelno mere RMS vrednosti napona i struje. Sabiranjem dekodovanih  $\sum_{i=1}^N u_i \cdot i_i$  (bez deljenja sa  $N$ ) u ponderisanom brojnom sistemu, paralelno se meri energija, odnosno, dobija se paralelno brojilo.

Već sa jednostavnim industrijskim mikrokontrolerom moguće je meriti sa 10-bitnom rezolucijom na 28 kanala snagu i energiju, odnosno RMS vrednosti napona i struja.

Sa stanovišta brojnog opsega rezolucija se može povećati maksimalno na 12 bita. Tada se preciznije mere sinusni signali [4]. Veća rezolucija kod adicionog A/D konvertora znači duži period  $T_s$  (testere), što ima suprotan efekat - dovodi do veće fazne greške između pozitivnih i negativnih semplova. Kao kompromis je usvojeno  $T_s = 100 \mu s$ , što je ujedno i donja granična optimalna vrednost za izobličeni talasni oblik struje koji se javlja u realnoj distributivnoj mreži (slika 5.). To odgovara 10 - bitnoj rezoluciji.



Slika 6. Šematski prikaz dvokanalnog rezidualnog vatmetra

Digitalni merni instrumenti i merni sistemi danas imaju jasno razgraničene systemske funkcije: kondicioniranje ulaznih signala, A/D konverziju, numeričku obradu i komunikaciju sa okruženjem. Šta više, svaka od pomenutih funkcija je predmet izučavanja jedne posebne naučne discipline i opšti stav je da interferencija između njih nije poželjna, a i praktično je teško ostvarljiva. Pristup definisan u ovom radu podrazumeva interferenciju između A/D konverzije i numeričke obrade, a što, u slučaju merenja električne snage, RMS vrednosti i energije, dovodi do krajnje jednostavnih i veoma brzih struktura odgovarajućih mernih uređaja i sistema. Ovaj razvoj su omogućili najnoviji rezultati u tehnologiji PLD komponenti, koja dozvoljava podešavanje hardverske strukture prema krajnjem, praktičnom rešenju. To je suprotna tendencija u razvoju elektronskih komponenti onoj uobičajenoj, koja je definisana razvojem mikroročunara i DSP.

Jedan prilog ovom razvoju predstavlja konstrukcija brzog, paralelnog vatmetra opisanog u ovom radu. On omogućuje merenje nesinusoidalnih snaga u mnogo tačaka. Isto tako, sa njim kao osnovom, mogu da se razvijaju ampermetri, vatmetri i brojlila [6]. Konceptija razvijenog uređaja je bazirana na dve ideje:

- i) paralelnom, adicionom rezidualnom A/D konvertoru,
- ii) (paralelnom) rezidualnom množaću/akumulatoru.

Njihovom kombinacijom su postignute impresivne performanse koje su opisane u radu, a to su u prvom redu brzina, jednostavnost i pouzdanost.

Sa moćnijom PLD familijom i moćnijim mikrokontrolerom, moguće je dalje povećati rezoluciju, broj kanala i brzinu, a to je stvar daljeg razvoja.

## 5. ZAKLJUČAK

U [4] je kao jedna od dve prednosti adicionog A/D konvertora naveden velik broj kanala na kojima se simultano meri. Time je otvoren problem brze i efikasne obrade velikog broja istovremenih mernih podataka. U predloženom rešenju je, kao što se vidi, i ovaj problem uspešno rešen. Dalji razvoj PLD komponenti će unaprediti postojeće rešenje. Digitalni deo opisanog vatmetra je oko sto puta jednostavniji a i nešto brži nego rešenje sa DSP-om.

## 6. LITERATURA

- [1] R.Turgel: "Digital Wattmeter Using a Sampling Method", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. IM - 23, Dec. 1974.
- [2] G.Stenbakken: "A Wideband Sampling Wattmeter", IEEE Trans. on Power Appar. and Systems, PAS - 103, Oct 1984, pp. 2919 - 2926.
- [3] IEEE WG on Nonsinusoidal Situations ( Chairman, A.Emanuel ), "Practical Definitions for Powers in Systems with Nonsinusoidal Wave Forms and Unbalanced Loads: A Discussion", IEEE Power Eng. Society 1995. Winter Meeting, Paper No. 95 WM 040 - 6 PWRD, New York, Jan. 1995.
- [4] S.Milovančev, V.Vujičić, V.Katić: "Improvements of On-line Measurement in Distribution System Using a New Adding A/D Converter", IEEE Power Engineering Society 1995 Winter Meeting, Paper No 95 WM 043-0 PWRD, New York, Jan.1995.
- [5] P.Filipski: "System for Testing Wattmeters Under Nonsinusoidal Conditions", IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol. IM-36, No. 2, June 1987, pp. 347 - 353.
- [6] V.Vujičić, S.Milovančev: "Adding Analog to Digital Converter", Federal Institute for Patents, Patent Number P-277/94, FR Yugoslavia, 1994.
- [7] P.Miljanić, B.Stojanović, P.Bošnjaković: "The Development of High Precision Time-Division Power Meter", IEEE Conf. on Precision Electromag. Measurements - CPEM'84, Delft, 1984.
- [8] R.K.Richards: "Aritmetic Operations in Digital Computers", Van-Nostrand, 1961.