

Стручни рад/ Professional paper

УДК/UDC: 004.382.7:621.317.3

doi: 10.5937/bizinfo2001065M

## Мерење трофазних електричних величина несинусоидног облика помоћу микрораџунарског мерача

### Measurement off three-phase electrical sizes on non-insusible form to microcomputer meter

Filip Marković<sup>a</sup>, Slobodan Bjelić<sup>a</sup>, Violeta Milićević<sup>b</sup>, Nenad Marković<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup> Univerzitet u Prištini, Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici, Srbija

<sup>b</sup> Akademija strukovnih studija Južna Srbija, Odsek za poslovne studije Blace, Srbija

<sup>c</sup> Visoka tehnička škola strukovnih studija iz Uroševca, Leposavić, Srbija

**Rezime:** U radu je opisan postupak za merenje trofaznih električnih veličina koji se koristi u elektroenergetskim mrežama. Merenje trofaznih električnih veličina izvršeno je pomoću formula koje su implementirane u dijagnostičku blok šemu pomoću softverskog paketa Quartus II 13.0sp1. Određen je diskretni (digitalni) algoritam za dobijanje efektivnih vrednosti napona, struja, aktivne i reaktivne snage. Rezultati koji se dobijaju se programski simuliraju, predstavljaju na monitoru ili štampaju i primenljivi su u praksi.

**Кljučне речи:** микрораџунарски мерач, алгоритам, трофазне електричне величине, VHDL код

**Abstract:** In the paper is describing a procedure for measuring the three-phase electrical quantities used in power grids. Measuring the three-phase electrical quantities used in power grids was done with formulas that were implemented in the diagnostic block scheme using the Quartus II 13.0sp1 software package. A discrete (digital) algorithm was developed to obtain the effective values of voltage, current, active and reactive power. The results obtained are programmatically simulated, presented on the monitor or printed, and are applicable in practice.

**Key words:** microcomputer meter, algorithm, three-phase electrical size, VHDL code

## 1. Uvod

Za napajanje trofaznih potrošača u elektroenergetskim mrežama (za merenje i registraciju veličina) često se koriste elektrodinamički merni instrumenti. Njihove

---

\*Autor za korespodenciju.

E-adresa: [nen.mark74@yahoo.com](mailto:nen.mark74@yahoo.com)

prednosti su jednostavna ugradnja, mala cena i lako održavanje a nedostaci su upotreba mehaničkih delova, otežano očitavanje mernih rezultata udaljenih izvora i potreba da se za svaku vrstu merenja ima poseban instrument. Za povećanje osetljivosti i tačnosti elektrodinamičkih instrumenata koriste se merni pretvarači a primenom digitalizacije jednosmernih signala dobijenih iz mernih pretvarača omogućeno je lakše prenošenje mernih rezultata u centralni računar (Bjelić & Matić, 1996).

Razvojem mikroelektronskih komponenti, memorija i analognih pretvaračkih elemenata, dobijaju se signalni procesori koji mnogo bolje proračunavaju analogne vrednosti prema zadatim matematičkim algoritmima (Bjelić et al., 2007). Merač na bazi mikroprocesora lakše prihvata i obrađuje veći broj vrednosti istovremeno, kao što su na primer: jednofazne ili trofazne struje, naponi, snage, reaktivne snage, prividne snage, faktori snage itd. (Bjelić & Mladenović, 2006).

Poseban problem predstavljaju merenja veličina na nelinearnim potrošačima veće snage (merenje naizmenične struje u neregulisanim konzumnim područjima, zatim merenje naizmenične struje kod korišćenja jakih energetskih pretvarača, kao i besprekidna napajanja ili napajanja u železničkim vagonima itd.). Merne veličine sadrže veći broj harmonika i zato se mora izabrati merni postupak koji će dati najbolje merne rezultate, koji neće zavistiti od uticaja harmonika (Marković et al., 2017).

Za ovu svrhu se koriste dve metode:

- a) prva metoda proizilazi iz Furijeovog razvoja prostoperiodične funkcije signala u niz frekventno-diskretnih komponenti (Papoulis, 1962);
- b) druga metoda se odnosi na izračunavanje vremenskih tokova signala u skladu sa analizom vrednosti koje je potrebno izmeriti (Anthony, 1995; Marković & Bjelić, 2018).

Postojeća rešenja sistema za merenje trofaznih električnih veličina nesinusoidnog oblika u distributivnim mrežama su na dispečerskom nivou dok korisnički nivo nije tretiran. Po mišljenju Arilage i Watsona (2000) i Dalea i Farda (2009) nedostaci klasičnih rešenja su: mala brzina i mali kapacitet koji nije mogao da obuhvati sve kategorije. Probleme je rešavao operator u elektrodistribuciji i efektivnost i efikasnost sistema i postojeće opreme u velikoj meri su zavisile od njegovog iskustva, ali je rezultat uvek bio kašnjenje koje je moglo da ima i tragične posledice po ljude, opremu i korisnike u slučaju havarija, zaključuje u svojoj doktorskoj disertaciji (Jakšić, 2015).

Analizom mernih sistema koji se koriste u distribucijama, može se ustanoviti da oni suštinski i kvalitativno nisu sledili razvoj savremene akvizicijske opreme. Prvi razlog je ekonomski pri čemu se posredstvom ekonomskih analiza polazi od postojećih sistema, daje im se prednost zbog uštede i ne ulazi u valjanost primene novih rešenja. Drugi, mnogo važniji razlog, koji proizilazi iz prvog, je da su mnoge od komponenti akvizicijske opreme zastarele i ne može se sa sigurnošću tvrditi koliko su adaptibilne i kompatibilne na novi sistem, što ima za posledicu izostanak kvalitetnih podataka i male brzine u prenosu (Bjelić et al., 2007).

## 2. Algoritam za izračunavanje efektivnih vrednosti struja, napona i snaga

Osnovni preduslov za pisanje algoritma je poznavanje informacija o periodičnim signalima, aktivnoj, prividnoj i reaktivnoj snazi, kao i merenju efektivnih vrednosti napona i struja. U nastavku će biti predstavljene formule koje će biti implementirane u dijagnostičku blok šemu pomoću koje je moguće izvršiti merenje trofaznih električnih veličina. Ovakav način merenja veličina je pogodan jer znatno smanjuje vreme izračunavanja istih i može se primeniti u različitim elektrodistributivnim sistemima.

Za periodični signal (napon ili struju sa periodom  $T$ ) pogodne formule za izračunavanje struje i napona proizilaze iz definicije srednjih ili efektivnih vrednosti (Bjelić, 2018):

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i^2(t) dt}, \quad U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u^2(t) dt} \quad (1)$$

gde je:

$T$  – perioda,

$t_0$  – početno vreme signala.

Aktivna snaga  $P$  je definisana kao srednja vrednost snage u jednom periodu, prividna snaga  $S$  je izražena kao proizvod napona i struje, dok je reaktivna snaga  $Q$  definisana kao srednja vrednost proizvoda napona i struje u toku četvrtine periode (Bjelić, 2018):

$$P = \frac{1}{T} \int_0^{t_0+T} u(t) \cdot i(t) dt \quad (2)$$

$$S = U \cdot I \quad (3)$$

$$Q = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \cdot i\left(t_0 + \frac{T}{4}\right) dt \quad (4)$$

Ako se signali  $u(t)$  i  $i(t)$  predstavljaju kao sume harmonijskih komponenti sa amplitudama  $U_i$  ili  $I_i$  i fazama  $\alpha_i$  i  $\beta_i$ , rešavanjem izraza za reaktivnu snagu dobija se sledeća formula (Bjelić, 2018):

$$Q = \sum_{i=1}^{\infty} U_i \cdot I_i \cdot \sin(\alpha_i - \beta_i) \quad (5)$$

Ovi izrazi pokazuju da su reaktivne snage jednake sumi harmonijskih komponenti koje su sadržane u obe vrednosti signala i koje imaju fazni stav različit od nule. Na sličan način se predstavlja i aktivna snaga (Bjelić, 2018):

$$P = \sum_{i=1}^{\infty} U_i \cdot I_i \cdot \cos(\alpha_i - \beta_i) \quad (6)$$

## 2.1. Izračunavanje snage na osnovu podele signala (struje ili napona) na ortogonalne Parkove ( $d, q$ ) komponente

Kako je Parkov postupak poznat u stručnoj javnosti u teoriji električnih mašina (National Electrical Safety Code, 1990), ovde će biti reči i o nekim posebnostima u vezi sa razvojem istog koje se ogledaju u sledećem:

Struja  $i(t)$  deli se na pofaznu (podužnu) ( $i_d$ ) i ortogonalnu (poprečnu) komponentu ( $i_q$ ) u odnosu na napon  $u(t)$ :

$$i_q(t) = i(t) - i_d(t) \quad (7)$$

Srednje kvadratne vrednosti ovih komponenti su:

$$I_q = \sqrt{\int_0^T i_q^2(t) dt}, \quad I_d = \sqrt{\int_0^T i_d^2(t) dt} \quad (8)$$

Pošto je struja jednaka kvadratu podužne i poprečne komponente  $I^2 = I_d^2 + I_q^2$  dobijamo sledeće izraze za snage:

$$P = U \cdot I_d, \quad Q = U \cdot I_q, \quad S^2 = P^2 + Q^2 \quad (9)$$

Iz izraza (9) proizilazi da metodi pod a) i b) u suštini daju iste rezultate. Prema ovom postupku izračunavanje reaktivne snage vrši se po sledećem izrazu:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (10)$$

Izbor metode za određivanje reaktivne snage prema razvijenim postupcima zavistan je od realizacije mernog pretvarača. Pri upotrebi analognih vrednosti dobra je metoda pod b). Kod računskih izvođenja za mikroračunski pristup merenju pogodnija je metoda pod a). U slučaju mernog postupka gde je potrebno merenje efektivnih vrednosti napona i struja, aktivne, reaktivne i prividne snage prema matematičkom izrazu takođe će se koristiti metoda pod a).

Izrazi (1-4) moraju se pretvoriti u diskretne oblike na osnovu  $N$ -tih elemenata  $i(k)$  i  $u(k)$  u diskretnom vremenskom trenutku  $k \cdot \frac{T}{N}$ . Poslednji izrazi predstavljaju rezultate efektivnih vrednosti i snagu naizmeničnih signala kosinusnih oblika:

$$I = K_I \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i^2(k)}, \quad U = K_U \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u^2(k)} \quad (11)$$

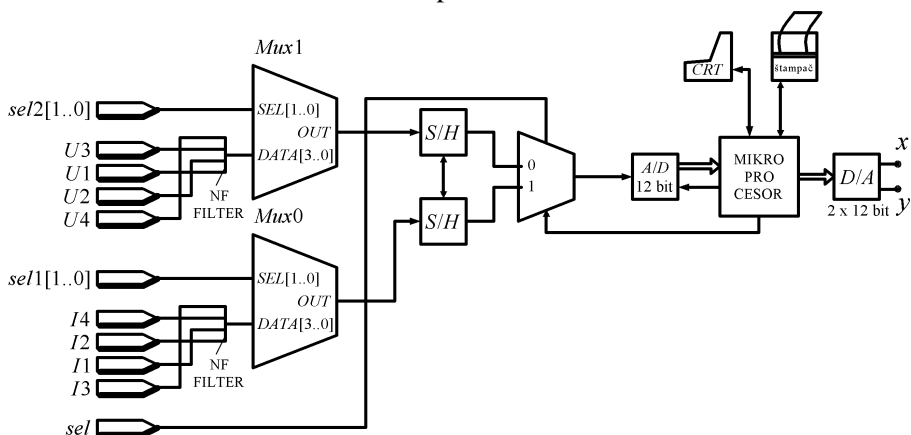
$$P = K_I \cdot K_U \sum_{k=1}^N u(k) \cdot i(k), Q = K_I \cdot K_U \sum_{k=1}^N u(k) \cdot i\left(k + \frac{N}{4}\right) \quad (12)$$

$K_I$  i  $K_U$  su strujni i naponski skalarni faktori za prelaz na fizičke vrednosti, a  $i(k)$  i  $u(k)$  su brojevi koji predstavljaju kvantitativne vrednosti struja i napona.

### 3. Realizacija mikrorračunarskog merača

Uspostavljene prethodne jednačine (1-12) se mogu koristiti za određivanje vrednosti trofaznih električnih veličina. Merenje trofaznih električnih veličina se izvodi prema dijagnostičkoj blok šemi koja sadrži 6 (ili 8) analognih veličina, procesnom delu za izračunavanje algoritma u izrazima (11) i (12) i medijumu za prikaz rezultata, Slika 1.

**Slika 1.** Prikaz sklopa za digitalizaciju i čuvanje digitalnih rezultata u memoriji mikroprocesora



Izvor: Autori

Principijelna blok šema je realizovana na sledeći način:

Pretvarač signala služi za podešavanje amplitude mernog signala u opsegu  $A/D$  pretvarača. Sastavljen je iz mernog transformatora, strujnog (naponskog) i pasivnog delitelja ili linearnog pojačavača, tako da je ostvareno galvansko odvajanje potencijalno vrlo osetljivog mikroprocesorskog sklopa od mernog signala.

Niskofrekventni filter prigušuje amplitude viših harmonika (iznad 1 kHz) i tako smanjuje grešku nastalu zbog prekrivanja spektra kao posledica konačne frekvencije takta (1,6 kHz).

Selekcionni ( $SEL$  ulazni port) pušta ulaz u multiplekser ( $MUX$ ) i kontroliše ulaz signala kao što je prikazano šemom na Sl. 1 koja je konstruisana u VHDL kodu (Quartus II 13.0sp1 (64-bit) Web Edition) i gde je dat kraći opis koda gde se pokazuje konstrukcija  $MUX$ -a. U zavisnosti od vrednosti selekcionog ulaznog porta ( $SEL$ ) na izlaz  $MUX$ -a prosleđuje se odgovarajuća vrednost koja se u tom

trenutku nalazi na ulazu  $U_{(i)}$  ili  $I_{(i)}$  čiji indeks  $i$  odgovara tekućoj numeričkoj vrednosti selekcionog ulaza.

*VHDL KOD ZA MULITPLEKSERE*

```

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;
entity mux_4na1 is
port (
    I1: in std_logic; I2: in std_logic; I3: in std_logic; I4: in std_logic;
    sel1: in std_logic_vector (1 downto 0);
    U1: in std_logic; U2: in std_logic; U3: in std_logic; U4: in std_logic;
    sel2: in std_logic_vector (1 downto 0);
    sel: in std_logic;
    g: out std_logic;
    U: buffer std_logic;
    I: buffer std_logic);
end entity mux_4na1;

architecture mux of mux_4na1 is
begin
    mux: process (I1,I2,I3,I4,sel1) is
        begin
            case sel1 is
                when "00" => I <= I1;
                when "01" => I <= I2;
                when "10" => I <= I3;
                when "11" => I <= I4;
            end case;
        end process;
    process (U1,U2,U3,U4,sel2) is
        begin
            case sel2 is
                when "00" => U <= U1;
                when "01" => U <= U2;
                when "10" => U <= U3;
                when "11" => U <= U4;
            end case;
        end process;
    process (I, U, sel) is
        begin
            if (sel = '0') then
                g <= I;
            else
                g <= U;
            end if;
        end process;
    end architecture mux;

```

Merenje trofaznih električnih veličina nesinusoidnog oblika pomoću mikroročunarskog merača

Pomoću programski ispunjenog analognog birača (dva *MUX* -a 4 to 1 koji idu na *MUX* 2 to 1) par signala će biti prosleđeno dalje, tako da *MUX* procesor sam adresira koji od četiri para signala je spreman za digitalizovanje.

Na taj način je omogućeno istovremeno digitalizovanje izabranog signalnog para (napon i struja iste faze) sa dve konekcije za digitalizovanje i pamćenje.

Drugi analogni birač se spaja na *A/D* pretvarač, prvo prvi signal pa onda i drugi, ukoliko je *A/D* još zatvoren. Vreme pretvaranja izabranog 12 bitnog *A/D* pretvarača iznosi oko 25  $\mu$ S a analogni opseg je u okviru  $\pm 10$  V. Ako se uzme u obzir kašnjenje birača zbog vremena za prenos u memoriju mikroprocesora, moguće je postići ponovno digitalizovanje jednog signala u toku intervala 625  $\mu$ S.

Na ovaj način, realizovana blok šema je pogodna za merenje trofaznih električnih veličina u elektroenergetskim mrežama jer smanjuje vreme izračunavanja zadatih komponenti u odnosu na druge vrste merenja (laboratorijska, analogna).

#### 4. Rezultati i diskusija

Mikroročunarski merač je implementiran u deo elektrodistributivnog sistema u Kosovskoj Mitrovici i pri tome je izvršena analiza merenja napona i struja za jedan trofazni četvorožični sistem (trofazni četvorožični sistem-sistem sa nesimetričnim opterećenjem i sadržajem harmonika struje i simetričnim sistemom napona). Dobijene merne vrednosti su date sa sledećim modulima i faznim stavovima:

Napon sistema	Fazne struje	Simetrične komponente	Faktori nesimetrija
$\bar{U}_R = 6,9 \underline{0^0}$	$\bar{I}_R = 6,61 \underline{0^0}$	$\bar{I}_1 = 5,41 \underline{-17,78^0}$	$\rho_i = 0,313$
$\bar{U}_S = 6,9 \underline{240^0}$	$\bar{I}_S = 5,7 \underline{210^0}$	$\bar{I}_2 = 1,67 \underline{+49,1^0}$	$\varepsilon_i = 0,112$
$\bar{U}_T = 6,9 \underline{120^0}$	$\bar{I}_T = 3,8 \underline{90^0}$	$\bar{I}_0 = 0,63 \underline{30^0}$	$K = 0,3$ proizvoljno
	$\bar{I}_N = 1,9 \underline{30^0}$	$\bar{I}_N = 3I_0$	

Iz dobijenih rezultata se vidi da je problematika veoma složena i da zahteva timove stručnjaka iz više oblasti za njeno rešavanje. Razmatranjem računarskog sistema za akviziciju i obradu podataka može se zaključiti da je potrebno podjednako obratiti pažnju na elemente koji prilagođavaju veličine za održavanje stanja distributivnog sistema kao i deo koji preuzima prilagođene veličine i koristi ih za obradu i donošenje odluka (posebno treba izdvojiti važnost bloka koji objedinjuje pretvarače i procesor). Istraživanja u smeru realizacije razvijenijeg sistema za akviziciju i obradu podataka iz mreže zahtevala su da se razmatra hardverski i softverski deo. Hardverski deo ima procesore i sadrži i digitalne filtre, dok softverski deo simulira hardverski i potvrđuje rezultate koji definišu detekcije stanja.

U mikroračunarskom mernom uređaju se može ostvariti transformacija i rotacija faznih komponenti dodavanjem posebne komponente, i on se tada može primeniti kao merni deo za indikaciju željene komponente. Za merenje simetričnih komponenti potrebno je da kroz merni uređaj teče struja direktno proporcionalna, ali ne i jednaka kontrolisanoj komponenti da bi se efekat ostalih dveju komponenti eliminisao. Rotacijom vektora postiže se tačnija transformacija i izbegavaju se nepotrebne komplikacije u mernom uređaju. Prosesi u mrežama su po pravilu nesimetrični a merenja se izvode pod pretpostavkom da su simetrični. Osnovni izvor mernih nesigurnosti u slučaju korišćenja klasičnih metoda je zanemarenje kompleksnog karaktera struja. Kompleksnu vrednost impedanse određuju napon i struja osnovne učestanosti 50 Hz, a iz havarijskih komponenti posredstvom filtera se mogu odstraniti viši harmonici i aperiodične komponente korišćenjem Furije ili Wols transformacije.

#### 4. Zaključak

Opisani mikroračunarski merač je kompaktna merna naprava za merenje i registraciju većeg broja veličina u trofaznim električnim mrežama i daje dosta tačne rezultate čak i za vrlo malo izobličene signale. Njegova prednost u odnosu na klasične metode je što se može prilagoditi novim postupcima za merenje simetričnih komponenti električnih veličina u električnim mrežama. Maksimalna merna nesigurnost ne prelazi 0,3% (Bjelić et al., 2006).

Mikroračunarski merač sa instaliranim programom za protokol rezultata (efektivne vrednosti, simetrične komponente trofaznih napona i struja, aktivne, reaktivne i prividne snage, fazne impedanse, faktori snage) je testiran u Elektrodistribuciji u Kosovskoj Mitrovici za snage od 3 MW. Dobra osetljivost i doslovno tačni rezultati su podsticaj za dalja istraživanja o primeni ovog sistema merenja električne energije.

#### Reference

- Bjelić, S., & Matić, D. (1996). Application of Digital Signal Processing to the Control and Protection System at Substation. In *AMSE Scientific International Conference on Communication, Signals and Systems (Session 6.) CSS (Vol. 96)*.
- Bjelić, S., Bogićević, Z., Krečković, N., & Marković, N. (2007). Estimation of current's flow, loss of power and voltage fall down in distributive networks by using PDM KM<sub>p,q</sub> program. In *19<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution*, Paper 0907, Cired.
- Bjelić, S., & Mladenović, V. (2006). Algoritam merno informacionog sistema za dijagnostiku kvarova u električnoj mreži. In *Telekomunikacioni forum TELFOR 2006*. (str. 411-413). Društvo za telekomunikacije i Akademska misao.
- Bjelić, S., Matić, D., & Jakšić, U. (2006). Merne nesigurnosti programabilnih distantnih mernih članova, *Zbornik radova Više tehničke škole Požarevac, 1-2*, 130-135.
- Markovic, N., Bjelic, S., Zivanic, J., & Jaksic, U. (2017). Simulation of the impact of higher harmonics on the transient process of induction machine fed from



- PWM inverters/Simuliranje utjecaja visih harmonika na prijelazni proces indukcionog stroja napajanog iz PWM invertera. *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette*, 24(1), 265-272. <https://doi.org/10.17559/TV-20150502231618>
- Papoulis, A. (1962). *The Fourier integral and its applications*. McGraw-Hill Book Company.
- Anthony, M.A. (1995). *Electric Power System Protection and Coordination*. McGraw-Hill Book Company.
- Marković, N.A., & Bjelić, S.N. (2018). *Zaštita od opasnog dejstva električne struje*. Visoka tehnička škola strukovnih studija.
- Arrillaga, J., & Watson, N.R. (2000). *Power System Quality Assessment*. John Wiley.
- Dale, R.P., & Fardo, S.W. (2009). *Electrical Distribution Systems*. 2<sup>nd</sup> Edition. CRC Press.
- Jakšić, U. (2015). *Prilog merenju napona i struja uz primenu matičnih transformacija i prepoznavanje simetričnih komponenti*. Doktorska disertacija. Univerzitet u Prištini, Fakultet tehničkih nauka.
- Bjelić, S. (2018). *Protection Techniques in Electrical Energy Networks*. Kvark. Institute of Electrical and Electronics Engineers. (1990). *National Electrical Safety Code, 1990. (ANSI C2-1990)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Quartus II 13.0sp1 (64-bit) Web Edition, 06.12.2013.

Rad je primljen: 10.09.2019; Vraćen na korekciju: 20.03.2020; Prihvaćen za objavljivanje: 21.04.2020.

Received: 10 September, 2019; Sent for revision: 20 March, 2020; Accepted: 21 April, 2020