

СПЕЦИЈАЛНА СЕСИЈА - МЕТРОЛОГИЈА
/
SPECIAL SESSION - METROLOGY
(CC-ML/SS-MLI)

Merenje snage i energije vetra anemometrom bez pokretnih delova

Boris Ličina, Bojan Vujičić, Platon Sovilj, Vladimir Vujičić

Apstrakt — U radu se analizira merenje snage i energije vetra anemometrom sa nepokretnim ramovima. Razmatraju se dva scenarija – merenje standardnom sampling metodom (SSM) i merenje dvobitnom stohastičkom digitalnom mernom metodom (SDMM). Novina je softversko diterovanje izlaza iz anemometra.

Ključne reči — snaga vetra; energija vetra; dvobitna SDMM; anemometer sa nepokretnim ramovima.

I. UVOD

U radu [1] je pokazano kako se anemometrom sa šoljicama može vrlo tačno meriti energija vetra. Ta činjenica je posebno bitna u istraživanju izdašnosti lokacija za vetro-parkove. Merenje prosečnog smera vetra je daleko jednostavniji problem – prosto se standardni vetrokaz mehanički spregne sa apsolutnim enkoderom [2] u cilju merenja ugla i direktno se dobija digitalna informacija o trenutnom smeru vetra, a usrednjavanjem tih informacija se dobija glavna – prosečan smer vetra. Otežavajuća okolnost je primena oba senzora, i anemometra sa šoljicama i vetrokaza, što su im najvažniji delovi pokretni pa u teškim vremenskim uslovima drastično opada njihova upotrebljivost.

Kao jedno od mogućih rešenja da se navedena otežavajuća okolnost prevaziđe je projektovan i realizovan senzor za istovremeno merenje brzine i smera vetra – anemometer sa nepokretnim ramovima [3]. Tema ovog rada je primena anemometra sa nepokretnim ramovima u merenju energije i prosečnog smera vetra na potencijalnim lokacijama za izgradnju vetroparkova.

II. POSTAVKA PROBLEMA

Konstatujemo, najpre, da je u [1] opisano vrlo tačno merenje energije vetra primenom dvobitne SDMM. Konstatujemo, dalje, da je u [4] pokazano kako se dvobitnom SDMM može tačno meriti i u prisustvu značajnih nelinearnosti primenjenog senzora.

Boris Ličina – Univerzitet Privredna Akademija Novi Sad, Fakultet za primenjeni menadžment, ekonomiju i finansije, Jevrejska 24/1, 11000 Beograd (e-mail: boris.licina@yahoo.com).

Bojan Vujičić – Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: bojanvuj@uns.ac.rs).

Platon Sovilj – Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: platon@uns.ac.rs).

Vladimir Vujičić – Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: vujiciv@uns.ac.rs).

Konstatujemo još da je izlaz iz anemometra sa nepokretnim ramovima digitalan (zapravo ima dva digitalna izlaza – jedan je brzina vetra, a drugi smer vetra), Sl. 1. i da su date dve kalibracione nelinearne krive [3], Sl. 2. i Sl. 3.

Problem koji se rešava je:

- Izmeriti tačno, u dugom vremenskom intervalu, energiju vetra na datoj lokaciji uzimajući u obzir nelinearnost anemometra sa nepokretnim ramovima. Problem je ekvivalentan sa merenjem srednje snage vetra u istom vremenskom intervalu.
- Izmeriti tačno srednji smer vetra u istom vremenskom intervalu kao pod a).

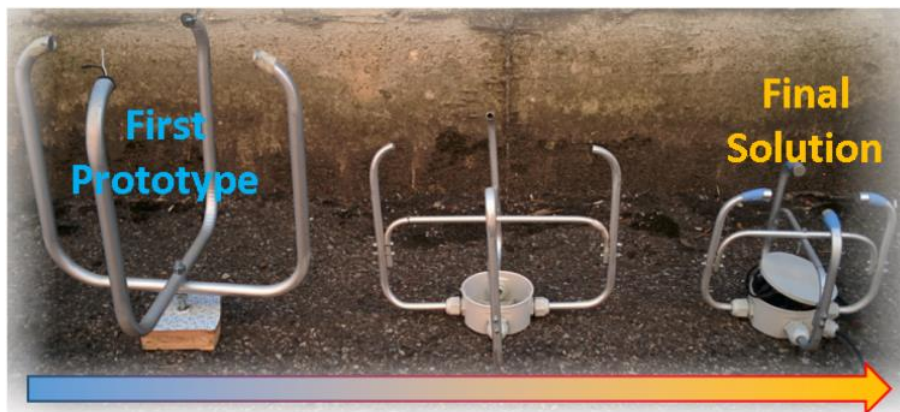
III. PREDLOG REŠENJA

Činjenica da senzor daje dva digitalna izlaza prirodno nameće primenu dvobitne SDMM gde se hardversko analogno diterovanje zamenjuje softverskim diterovanjem [5], a dalja obrada je, principijelno, ista kao u [1] i u [4]. Šta više, s obzirom da je softversko diterovanje drastično jednostavnije od hardverskog i, uz to, i adaptibilno, moguće je primeniti i optimalnu rezoluciju od 3 bita [6] i time, uz minimalno komplikovanje obrade, dobiti efektivno ubrzanje od 9 puta postojeće tehnologije merenja. Pri tome se ne narušava tačnost merenja koja je definisana kalibracionim krivama. Rad [4] pokazuje kako se koristi dvobitna SDMM u merenju nelinearnim senzorom. Osnova je imati na raspolaganju ili:

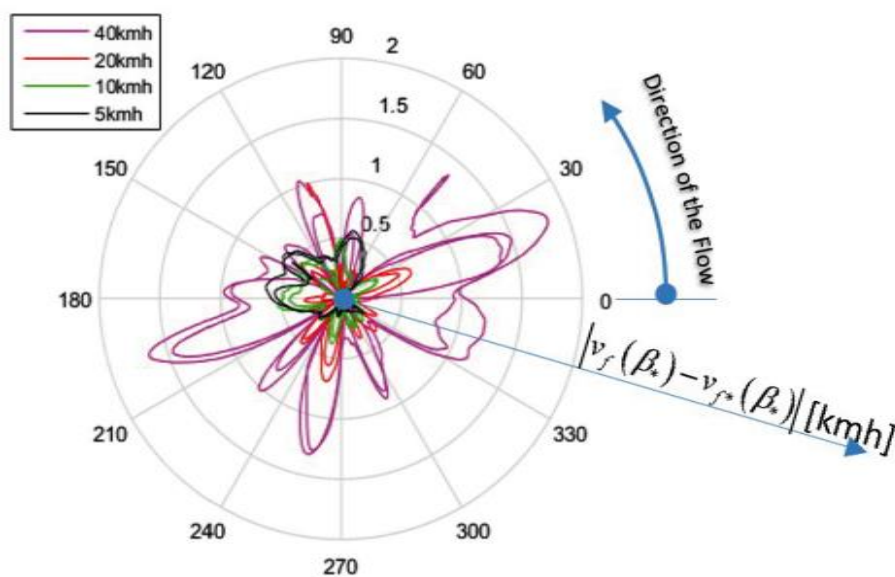
- inverzni kalibracioni polinom [4] ili
- dijagram greške odgovarajuće merne veličine [7]

U [7] je pokazano kako se mogu meriti dve uzajamno spregnute veličine – prenosni odnos i fazna greška (ugao). U našem slučaju ovde, uzajamno spregnute veličine su: jačina (amplituda) vetra i smer (ugao) vetra. Novi princip nelinearne regresije, razvijen u [7], omogućuje korišćenje izlaza iz nelinearnog senzora, strujnog mernog transformatora (SMT) u [7], odnosno anemometra sa ramovima u ovom slučaju, do granice tačnosti kalibracionog sistema kojim su dobijene krive na Sl. 2. i Sl. 3. bez ikakve potrebe za linearizacijom senzora.

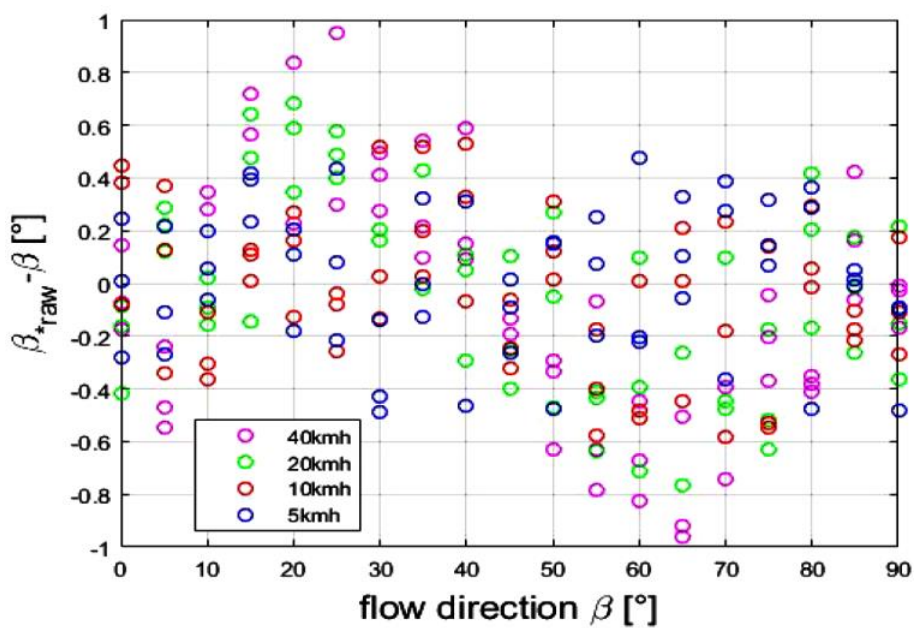
Sa druge strane, digitalni izlazi anemometra sa ramovima omogućuju i direktnu obradu primenom SSM i dobijanje traženih veličina – energije i srednjeg smera vetra. Problem koji se, generalno, tu javlja je elaboriran u [8] a koji se svodi na ogromno uvećanje greške usled integralne nelinearnosti primenjenog ADC u senzoru. Taj problem je, kako je pokazano, za bar dva reda veličine manji u slučaju primene dvobitne SDMM. Stoga je, bez sumnje, potrebno i ovde primeniti softverski diterovanu dvobitni SDMM, a ne direktno SSM.



Sl. 1. Fotografija evolucije anemometra sa ramovima [3].



Sl. 2. Kalibraciona kriva brzine vetra [3].

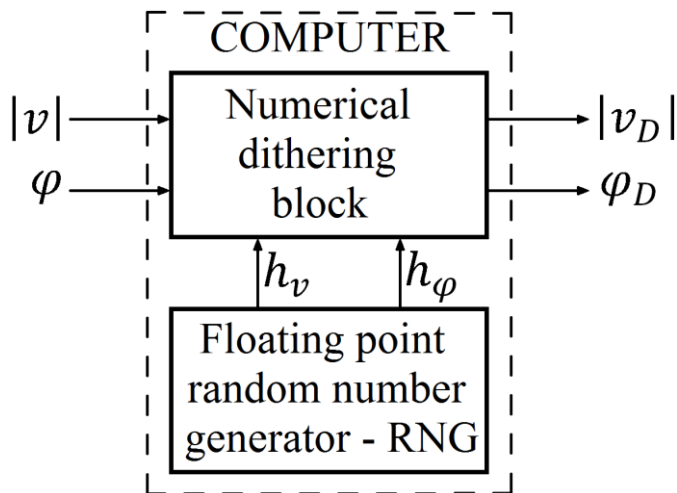


Sl. 3. Kalibraciona kriva smeru vetra [3].

Senzor bez pokretnih delova korišćen u [3] na svom izlazu daje dva digitalna podatka u floating point reprezentaciji:

- intenzitet (brzinu) vetra $|v|$ i
- smer duvanja vetra φ

Kompletna obrada pomoću dvobitne SDMM obavlja se u mikroracunaru (Beaglebone, Raspberry), a njena opšta šema prikazana je na Sl. 4.

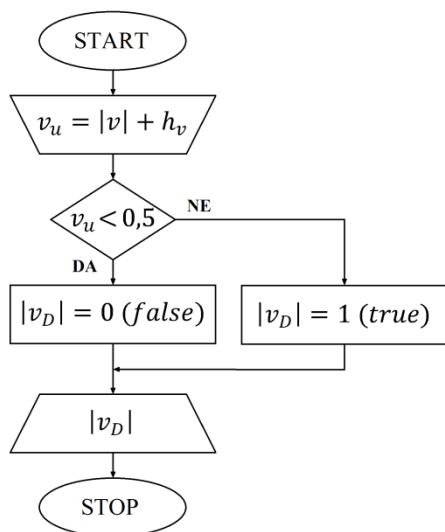


Sl. 4. Opšta šema numeričkog diterovanja

Sl. 5. prikazuje algoritam računanja jednobitnog diterovanog intenziteta (brzine) vetra $|v_D|$, gde se na ulazni signal brzine vetra $|v|$, dobijen sa senzora bez pokretnih delova, superponira deterski signal h_v , tj: $v_u = |v| + h_v$, pri čemu je:

$$|v| \leq V_{FS} \quad (1)$$

$$|h_v| \leq \frac{V_{FS}}{2} \quad (2)$$

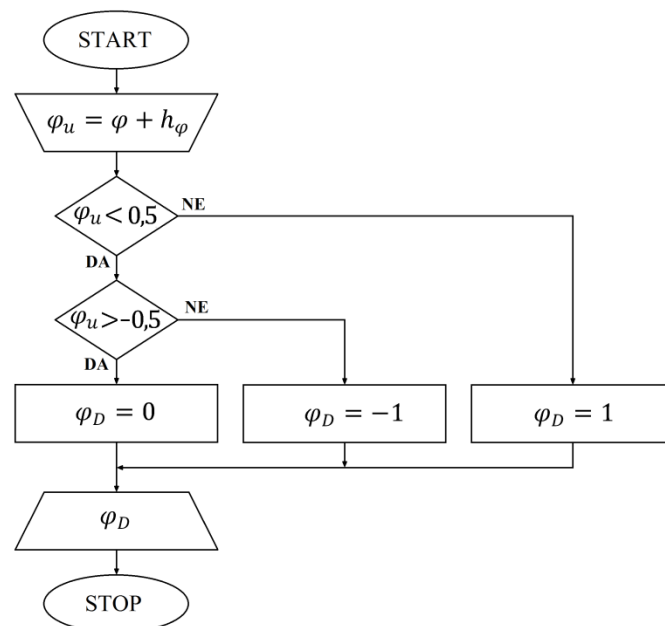


Sl. 5. Jednobitni diterovani intenzitet vetra $|v|$

Sl. 6. prikazuje algoritam računanja dvobitnog diterovanog smer duvanja (ugla) vetra φ_D , gde se na ulazni signal smer duvanja (ugla) vetra φ , takođe dobijenog sa senzora bez pokretnih delova, superponira deterski signal h_φ , tj: $\varphi_u = \varphi + h_\varphi$, pri čemu je:

$$|\varphi| \leq \pi \quad (3)$$

$$|h_\varphi| \leq \frac{\pi}{2} \quad (4)$$



Sl. 6. Dvobitni diterovani smer duvanja (ugao) vetra φ_D

Napomenimo još da je postupak softverskog diterovanja prikazan samo za mantise ulaznih podataka. Operacije nad eksponentima nisu prikazane jer su mnogo jednostavnije i, u osnovi, definisane relacijama (1) i (2), odnosno (3) i (4), respektivno.

IV. DISKUSIJA

U radu [8] je pokazano da nelinearnost dvobitnog stohastičkog adicionog AD konvertora (SAADK), ukoliko se koristi DAC AD5791, praktično, na dugom vremenskom intervalu (recimo jedan dan) pravi grešku reda ppm, a greška obrade praktično iščezava [4]. Ukoliko se, pak, koristi SSM i ADC (recimo 16-bini ADC LTC1605 koji je obrađen u [8]) čija je integralna nelinearnost reda 16 ppm, što je korektna ocena, onda je srednja vrednost kuba izlaza iz ADC-a:

$$(A + \delta A)^3 = A^3 + 3A^2(\delta A) + 3A(\delta A)^2 + (\delta A)^3 \quad (5)$$

gde je sa A označen moduo brzine, a sa δA integralna nelinearnost primenjenog AD konvertora.

U prvoj aproksimaciji srednja vrednost kuba izlaza iz ADC-a iznosi:

$$3 \cdot \frac{(\delta A)}{A} = 3 \cdot 16 \text{ ppm} = 48 \text{ ppm} \quad (6)$$

dakle, ona je za gotovo dva reda veličine veća od one dobijene pomoću dvobitnog SAADK koji ima ofset analognog sabirača od 1/5000 FS (1 mV, na 5 V). Ako kao ofset analognog sabirača prihvatimo vrednost δA , vrednost unutar LSB datog AD konvertora, kako je to pokazano u [4], tada je njegova vrednost još manja i iznosi $1/2^{16} = 1/64000$.

U zavisnosti od metode primenjene u konstrukciji ACD u SSM metodi, može se značajno smanjiti uticaj integralne nelinearnosti, ako se koristi samo MSB u dvobitnoj softverski diterovanoj SDMM u ovom slučaju. Ili MSB i prvi sledeći niži bit u slučaju trobitne softverski diterovane SDMM što je, dokazano je u [6], optimalna rezolucija u primeni SDMM. Naime, u slučaju da je, na primer, primenjena metoda sukcesivnih aproksimacija u konkretnom ADC-u na integralnu nelinearnost ne utiču svi otpornici u R-2R mreži, nego samo prva dva ili četiri respektivno, pa je integralna nelinearnost daleko manja.

V. ZAKLJUČAK

U radu je pokazano da koncept softverskog diterovanja izlaza iz anemometra sa nepokretnim ramovima nudi mogućnost znatno tačnijeg merenja energije ali i srednjeg smera vetra. U navedenoj literaturi je definisana i eksperimentalno proverena ideja merenja nelinearnim senzorom, kako sa jednim, tako i sa dva izlaza. U našem slučaju jedan izlaz predstavlja intenzitet (brzinu) vetra $|v|$, a drugi izlaz predstavlja smer (ugao) duvanja vetra φ .

Stoga velike nelinearnosti, vidljive sa kalibracionih dijagrama na Sl. 2. i Sl. 3. praktično nemaju uticaj na tačnost merenja energije odnosno srednjeg smera duvanja vetra - nih, pre svega, određuje tačnost primenjene kalibracione opreme i postupka. Kako je pokazano u radu [3] prilikom kalibrisanja anemometra sa nepokretnim ramovima korišćena je oprema najvišeg ranga – aerodinamički tunel.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja kroz institucionalno finansiranje naučno-istraživačkog rada na Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu.

LITERATURA

- [1] Vujčić, V., Ličina, B., Pejić, D., Sovilj, P. and Aleksandar, R., "Stochastic Measurement of Wind Power Using a Two-Bit A/D Converter", Elsevier Measurement, Volume 152, February 2020, 107184, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107184>
- [2] Howard Austerlitz, Data Acquisition Techniques Using PCs, Book, Second Edition, 2003, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-068377-2.X5000-1>, ISBN: 978-0-12-068377-2
- [3] L. Pugi et al., "Integrated Design and Testing of an Anemometer for Autonomous Sail Drones", J. Dyn. Sys. Meas. Control, vol. 140, no. 5, pp. 1–10, May.
- [4] Platon Sovilj, Bojan Vujčić, Dragan Pejić, Aleksandar Radonjić, Vladimir Vujčić: "Stochastic Two-bit On-line Temperature Measurement with RTD Pt-100 Sensor Operating in a Nonlinear Mode", 24th IMEKO TC4 International Symposium, 22nd International Workshop on ADC and DAC Modelling and Testing, IMEKO TC-4 2020, Palermo, Italy, September 14-16, 2020
- [5] Vujčić V., Milovancev S., Pesaljević M., Pejić D., Zupunski I.: "Low frequency stochastic true RMS instrument", CPEM Digest (Conference on Precision Electromagnetic Measurements, Cat.No.98CH36254), 6-10 July 1998, Washington, DC, USA, DOI: 10.1109/CPEM.1998.699956
- [6] Doktorska disertacija: Prilog optimizaciji performansi digitalnih merenja, Marjan Urekar – 2018, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu
- [7] Attila Juhász, Vladimir Vujčić: "Contribution to Experimental Investigation of Fitting the Current Transformers' Calibration Curves", Journal on Processing and Energy in Agriculture, Bibliid: 1821-4487 (2020) 24; 3-4, p 123-128, UDK: 621.314, DOI: 10.5937/jpea24-30719
- [8] Doktorska disertacija: Metoda merenja snage i energije vetra zasnovana na merenju na intervalu, Boris Ličina – 2020, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu

ABSTRACT

The paper analyzes the measurement of wind power and energy with an anemometer with fixed frames. Two scenarios are considered - measurement by standard sampling method (SSM) and measurement by two-bit stochastic digital measurement method (SDMM). A novelty is the software dithering of the anemometer output.

Measurement of wind power and energy with an anemometer without moving parts

Boris Ličina, Bojan Vujčić, Platon Sovilj, Vladimir Vujčić

Inženjerska indukcija – predlog definicije i jedna potvrda predloga

Bojan Vujičić, Boris Ličina, Platon Sovilj, Vladimir Vujičić

Apstrakt — U radu se predlaže definicija novog inženjerskog pojma nazvanog inženjerska indukcija. Predlog je primenjen u istraživanjima optimalne strukture uređaja za merenje snage i energije vetra i pokazao je svoju efikasnost i primenljivost.

Ključne reči — matematička indukcija; deduktivni dokaz, induktivni dokaz; inženjerska indukcija.

I. UVOD

PRE nego što izložimo osnovnu ideju ovog rada, važno je istaći da za matematičku indukciju nije “zaslužna” konkretna ličnost, niti je nastala konkretnog datuma. Ona je nastala kao posledica mnogobrojnih radova različitih matematičara, i ne samo matematičara, već i naučnika iz heterogenih naučnih disciplina. Najraniji tragovi matematičke indukcije sežu još u Euklidove *Elemente*, u treći vek p.n.e. Ovom prilikom se nećemo upuštati u dublje istorijske detalje njenog nastanka, ali ćemo spomenuti da se prva konkretna formulacija matematičke indukcije sreće kod Paskalovog rešenja aritmetičkog trougla 1654. godine.

Tekst koji sledi nema pretnju da u bilo kom segmentu umanjuje značaj matematičke indukcije. Naprotiv, na ovom konkretnom primeru, princip “inženjerske” indukcije se pokazuje kao samo jedan od praktičnih načina za brže, a jednako korektno, rešenje problema koji se pred autore postavio. Tim pre, što se ponudeno rešenje ima veoma jednostavnu potvrdu kroz hardversku realizaciju prikazanu u jednom od ranijih radova [1]. U ovom konkretnom slučaju prikazano je opšte rešenje “inženjerskom” indukcijom i opštim deduktivnim postupkom i na taj način izvršena potvrda tvrdnje na oba načina.

Ovaj rad nastao je iz inženjerske prakse, kao potreba da se na egzakatan, inženjerski i logički korektan način, ali lišen strogih pravila matematičke indukcije, na jednostavniji način reši jedan konkretan inženjerski problem. Opšte je poznata činjenica da su inženjeri u svojoj praksi često suočeni sa

Bojan Vujičić – Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: bojanvuj@uns.ac.rs).

Boris Ličina – Univerzitet Privredna Akademija Novi Sad, Fakultet za primenjeni menadžment, ekonomiju i finansije, Jevrejska 24/1, 11000 Beograd (e-mail: boris.licina@yahoo.com).

Platon Sovilj – Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: platon@uns.ac.rs).

Vladimir Vujičić – Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: vujiciv@uns.ac.rs).

potrebom da nađu konkretno rešenje za svakodnevne izazove sa kojima se susreću u svom okruženju. Neretko, potreba za rešenjem je vremenski limitirana, pa se u takvim okolnostima pribegava različitim pristupima koji dovode do kvalitetnog i korektnog rešenja. Takav pristup ima svoje dobre i loše strane. Dobra stvar je što se brže dolazi do rešenja konkretnog problema, a loša stvar je što se uglavnom ne vodi računa o uopštavanju rešenja i njegovoj generalizaciji, o “široj slici”.

Za razliku od ovog pristupa matematičari nastoje da objedine što veći broj problema u jedan opšti i da ponude njegovo rešenje, bez ulaženja u inženjersku suštinu da li je to nekome stvarno potrebno i hoće li ovakvo rešenje imati široku primenu u praksi. Imajući ovo u vidu, prilikom rešenja jednog konkretnog problema, nastao je ovaj rad kao težnja da “pomiri” ova dva, samo naizgled, oprečna pristupa. Da pokaže kako oba pristupa dovode do korektnog rešenja, da ne isključuju jedan drugog, već, naprotiv, da jedan drugog podupiru u zajedničkom cilju [2].

II. PROBLEM MERENJA SREDNJE VREDNOSTI PROIZVODA N NEPREKIDNIH SIGNALA

Pretpostavimo da se, tokom vremenskog intervala T , proizvod k signala meri korišćenjem dvobitne statističke digitalne merne metode (SDMM). U tom slučaju će izlazna vrednost množača koju u stvari generiše $(k - 1)$ -binarni množač biti jednaka:

$$\begin{aligned}\bar{\Psi}(k) &= \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \Psi_1(i) \cdot \Psi_2(i) \dots \cdot \Psi_k(i) \\ &= \frac{1}{T} \cdot \int_0^T f_1(t) \cdot f_2(t) \dots \cdot f_k(t) \cdot dt\end{aligned}\quad (1)$$

gde su $\Psi_1(i), \Psi_2(i), \dots, \Psi_k(i)$ digitalizovane vrednosti k ulaznih signala i gde $N \rightarrow \infty$ označava neograničen broj uzoraka (uzrokovanih neograničenom frekvencijom uzorkovanja) u vremenskom intervalu T . Navedimo sada sledeću **teoremu**: Pretpostavimo da je $\sigma_e^2(k) = \sigma_e^2(k)/N$ varijansa srednje greške merenja e proizvoda k signala merenih dvobitnom SDMM u vremenskom intervalu $[0, T]$. Ako sa $+g$ i $-g$ označimo naposke pragove odlučivanja dvobitnog AD konvertora tada, za konačnu frekvenciju uzorkovanja, pa time i ograničenu vrednost uzoraka N , možemo pisati:

$$\sigma_e^2(k) = \frac{1}{N} \cdot \left[\frac{(2g)^k}{T} \cdot \int_0^T |f_1(t) \cdot f_2(t) \cdot \dots \cdot f_k(t)| \cdot dt - \frac{1}{T} \cdot \int_0^T f_1^2(t) \cdot f_2^2(t) \cdot \dots \cdot f_k^2(t) \cdot dt \right] \quad (2)$$

Dokaz: Umesto strogo i dugog deduktivnog dokaza, dajemo jednostavnu analizu (**u duhu matematičke indukcije**) koja potvrđuje opštu formulu (2).

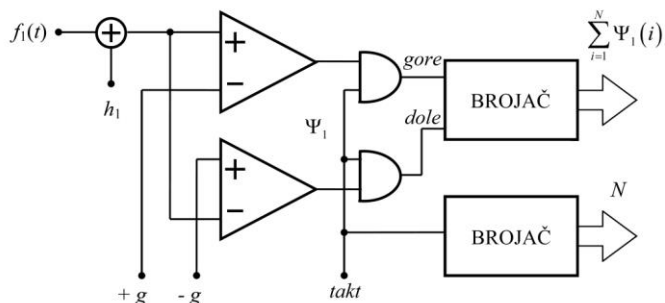
Korak 1: Za $k = 1$, izlazna vrednost je jednaka:

$$\Psi = f_1(t) + e \quad (3)$$

a varijansa srednje greške je izražena sa:

$$\sigma_e^2(1) = \frac{1}{N} \cdot \left[\frac{2g}{T} \cdot \int_0^T |f_1(t)| \cdot dt - \frac{1}{T} \cdot \int_0^T f_1^2(t) \cdot dt \right] \quad (4)$$

Hardverska realizacija slučaja za $k = 1$, gde se ulaznom signalu $f_1(t)$ superponira deterski signal h_1 , kako je to prikazano na Slici 1.



Sl. 1. Blok dijagram uređaja za merenje srednje vrednosti ulaznog signala.

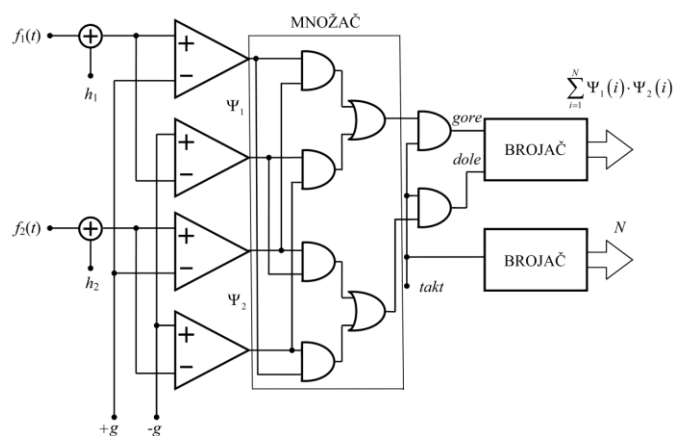
Korak 2: Za $k = 2$, izlazna vrednost je jednaka:

$$\Psi = f_1(t) \cdot f_2(t) + e \quad (5)$$

a varijansa srednje greške je izražena sa:

$$\sigma_e^2(2) = \frac{1}{N} \cdot \left[\frac{(2g)^2}{T} \cdot \int_0^T |f_1(t) \cdot f_2(t)| \cdot dt - \frac{1}{T} \cdot \int_0^T f_1^2(t) \cdot f_2^2(t) \cdot dt \right] \quad (6)$$

Hardverska realizacija slučaja za $k = 2$, gde se ulaznim signalima $f_1(t)$ i $f_2(t)$ superponiraju međusobno nekorelisani deterski signali h_1 i h_2 , respektivno, prikazana je na Slici 2.



Sl. 2. Blok dijagram uređaja za merenje proizvoda dva ulazna signala.

Korak 3: Primitimo da se izrazi (5) i (6) mogu zapisati kao:

$$\sigma_e^2(1) = \frac{1}{N} \cdot \left[\frac{(2g)^0 \cdot 2g}{T} \cdot \int_0^T |1| \cdot |f_1(t)| \cdot dt - \frac{1}{T} \cdot \int_0^T [1^2 \cdot f_1^2(t)] \cdot dt \right] \quad (7)$$

i

$$\sigma_e^2(2) = \frac{1}{N} \cdot \left[\frac{(2g)^1 \cdot 2g}{T} \cdot \int_0^T |f_1(t)| \cdot |f_2(t)| \cdot dt - \frac{1}{T} \cdot \int_0^T [f_1^2(t) \cdot f_2^2(t)] \cdot dt \right] \quad (8)$$

Pored toga, primetimo da, za bilo koji $k \geq 1$, prilikom dodavanja sledeće funkcije i sledećeg množaća vredi:

- prvi integral je pomnožen sa $2 \cdot g$,
- funkcija unutar prvog integrala množi se sa apsolutnom vrednošću sledeće funkcije,
- funkcija unutar drugog integrala množi se sa kvadratom sledeće funkcije.

Korak 4: Pretpostavimo da je teorema tačna za neko k , te da važe pretpostavke a), b) i c). Ostaje da pokažemo da važi i za $k + 1$.

$$\sigma_e^2(k+1) = \frac{1}{N} \left[\frac{(2g)^k \cdot 2g}{T} \int_0^T |f_1(t) f_2(t) \dots f_k(t)| \cdot |f_{k+1}(t)| \cdot dt - \frac{1}{T} \int_0^T [f_1^2(t) f_2^2(t) \dots f_k^2(t)] \cdot f_{k+1}^2(t) dt \right] \quad (9)$$

Kad se navedene operacije izvrše, dobijamo:

$$\sigma_e^2(k+1) = \frac{1}{N} \left[\frac{(2g)^{k+1}}{T} \int_0^T |f_1(t) \cdot f_2(t) \cdot \dots \cdot f_{k+1}(t)| \cdot dt - \frac{1}{T} \int_0^T [f_1^2(t) \cdot f_2^2(t) \cdot \dots \cdot f_{k+1}^2(t)] \cdot dt \right] \quad (10)$$

čime je teorema dokazana.

Primitimo da je dokaz "u duhu matematičke indukcije" ali da nije matematička indukcija. Autori su skloni da ovaj primenjeni postupak nazovu "inženjerska indukcija" i da ga u daljim istraživanjima detaljnije uopšte i formaliziju.

III. DEDUKTIVNA POTVRDA

Dokažimo deduktivno formulu za varijansu srednje greške merenja proizvoda k signala dvobitnom SDMM. To ćemo uraditi u pet koraka, kao je to niže prikazano.

Korak 1: M_3 je konačan:

$$M_3 = \overline{(e - \bar{e})^3} \quad (11)$$

Može se strogo dokazati da važi $M_3 \leq (2g)^{3k}$ odnosno da je treći centralni momenat slučajne greške e konačan (ograničen) i da to važi za svaki konačan prirodan broj k ($k \geq 1$).

Korak 2: Pošto je M_3 konačan [3] važi:

$$\sigma_e^2 = \frac{\sigma_e^2}{N} \quad (12)$$

Korak 3: $\sigma_e^2 = ?$

Trenutna vrednost proizvoda k ulaznih signala je deterministička veličina a trenutna vrednost greške merenja e je slučajna veličina. Prema tome, one su međusobno statistički nezavisne pa je:

$$\begin{aligned} \Psi &= y_1 \cdot y_2 \cdot \dots \cdot y_k + e \\ \sigma_\Psi^2 &= \sigma_{y_1 y_2 \dots y_k}^2 + \sigma_e^2 \\ \sigma_e^2 &= \sigma_\Psi^2 - \sigma_{y_1 y_2 \dots y_k}^2 \end{aligned} \quad (13)$$

Po definiciji je varijansa proizvoda k signala na vremenskom intervalu T data sa:

$$\sigma_{y_1 y_2 \dots y_k}^2 = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T f_1^2(t) \cdot f_2^2(t) \cdot \dots \cdot f_k^2(t) \cdot dt - \left[\frac{1}{T} \cdot \int_0^T f_1(t) \cdot f_2(t) \cdot \dots \cdot f_k(t) \cdot dt \right]^2 \quad (14)$$

Sa druge strane je:

$$\sigma_\Psi^2 = \overline{\Psi^2} - \bar{\Psi}^2 \quad (15)$$

Korak 4: Čemu je jednaka srednja vrednost izlaza fleš AD konvertora: $\bar{\Psi} = ?$ Zapišimo sledeći simbolički integral:

$$\bar{\Psi} = \int_{-(2g)^k}^{+(2g)^k} \Psi \cdot dP_\Psi \quad (16)$$

gde je:

$$\Psi = \Psi_1 \cdot \Psi_2 \cdot \dots \cdot \Psi_k \quad (17)$$

a dP_Ψ elementarna verovatnoća da se Ψ desi:

$$dP_\Psi = dP_{y_1/t} \cdot dP_{y_2/t} \cdot \dots \cdot dP_{y_k/t} \cdot dP_t \cdot dP_{h_1} \cdot dP_{h_2} \cdot \dots \cdot dP_{h_k} \quad (18)$$

Kako je:

$$dP_{y_i/t} = \delta[y_i - f_i(t)] \cdot dy_i, \quad \text{za } i = 1, 2, \dots, k \quad (19)$$

$$dP_t = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot dt \quad (20)$$

$$dP_{h_i} = \frac{1}{2 \cdot g} \cdot dh_i, \quad \text{za } i = 1, 2, \dots, k \quad (21)$$

konačno dobijamo:

$$\begin{aligned} \bar{\Psi} &= \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} dt \cdot \int_{-2g}^{+2g} \delta[y_1 - f_1(t)] \cdot dy_1 \cdot \\ &\cdot \int_{-2g}^{+2g} \delta[y_2 - f_2(t)] \cdot dy_2 \cdot \dots \cdot \int_{-2g}^{+2g} \delta[y_k - f_k(t)] \cdot dy_k \cdot \\ &\cdot \int_{-g}^{+g} \Psi_1 \frac{dh_1}{2g} \cdot \int_{-g}^{+g} \Psi_2 \frac{dh_2}{2g} \cdot \dots \cdot \int_{-g}^{+g} \Psi_k \frac{dh_k}{2g} \end{aligned} \quad (22)$$

Lako se pokazuje [4] da je za $y_i = \text{const.}$:

$$\int_{-g}^{+g} \Psi_i \frac{dh_i}{2g} = y_i, \quad \text{za } i = 1, 2, \dots, k \quad (23)$$

pa se gornji integral na kraju svodi na:

$$\bar{\Psi} = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} f_1(t) \cdot f_2(t) \cdot \dots \cdot f_k(t) \cdot dt \quad (24)$$

Korak 5: $\bar{\Psi}^2 = ?$

Lako se pokazuje da u dvobitnoj SDMM generalno važi:

$$\Psi_i^l = (\text{sgn } \Psi_i)^l \cdot (2g)^{l-1} \cdot |\Psi_i| \quad (25)$$

gde je l končan prirodan broj.

Za $l = 2$ što je naš slučaj $\Psi_i^2 = (2g) \cdot |\Psi_i|$, pa je:

$$\begin{aligned} \Psi^2 &= \Psi_1^2 \cdot \Psi_2^2 \cdot \dots \cdot \Psi_k^2 = \\ &= (2g)^k \cdot |\Psi_1| \cdot |\Psi_2| \cdot \dots \cdot |\Psi_k| = (2g)^k \cdot |\Psi| \end{aligned} \quad (26)$$

a srednja vrednost od Ψ^2 je:

$$\bar{\Psi}^2 = (2g)^k \cdot |\bar{\Psi}| \quad (27)$$

Ponavljajući gore navedenu proceduru, dobija se:

$$\bar{\Psi}^2 = (2g)^k \cdot \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} |f_1(t)| \cdot |f_2(t)| \cdot \dots \cdot |f_k(t)| \cdot dt \quad (28)$$

pa je najzad:

$$\begin{aligned} \sigma_e^2 &= \frac{(2g)^k}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} |f_1(t) \cdot f_2(t) \cdot \dots \cdot f_k(t)| \cdot dt \\ &\quad - \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} f_1(t) \cdot f_2(t) \cdot \dots \cdot f_k(t) \cdot dt \right]^2 \\ &\quad - \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [f_1^2(t) \cdot f_2^2(t) \cdot \dots \cdot f_k^2(t)] \cdot dt \\ &\quad + \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} f_1(t) \cdot f_2(t) \cdot \dots \cdot f_k(t) \cdot dt \right]^2 \end{aligned} \quad (29)$$

i konačno je:

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{N} \cdot \left\{ \frac{(2g)^k}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} |f_1(t) \cdot f_2(t) \cdot \dots \cdot f_k(t)| \cdot dt - \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} [f_1^2(t) \cdot f_2^2(t) \cdot \dots \cdot f_k^2(t)] \cdot dt \right\} \quad (30)$$

što je i trebalo dokazati.

IV. ZAKLJUČAK

U radu su prikazana dva načina izvođenja opšte formule za grešku merenja srednje vrednosti proizvoda k neprekidnih analognih signala primenom SDMM. Jedan način je primenom novog induktivnog pristupa koji su autori nazvali inženjerska indukcija a drugi je generalni deduktivni način. Dobijena opšta formula u oba slučaja je identična i ima dalekosežne posledice i primenu. Jedna već ostvarena primena je u vrlo tačnom merenju energije vetra anemometrom sa šoljicama. Druga već ostvarena primena je u merenju temperature Pt100 senzorom u nelinearnom režimu.

Autori još traže opštu formalnu definiciju pojma inženjerske idukcije i otvoreni su za diskusiju i dopunu formalnog postupka primenjenog u ovom radu.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja kroz institucionalno finansiranje naučno-istraživačkog rada na Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu.

LITERATURA

- [1] Vujčić, V., Župunski, I., Milovancev, S. "Predetermination of the quantization error in digital measurement systems", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 46, pp. 439-441, April 1997.
- [2] Doktorska disertacija: Metoda merenja snage i energije vetra zasnovana na merenju na intervalu, Boris Ličina – 2020, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu
- [3] V. Vranić, Probability and statistics. Zagreb: Tehnička knjiga. 1965. (in Croatian).
- [4] M. Urekar et al., "Accuracy Improvement of the Stochastic Digital Electrical Energy Meter," Measurement, vol. 98, pp. 139-150, Feb. 2017.

ABSTRACT

The paper proposes a definition of a new engineering concept called engineering induction. The proposal was applied in research of the optimal structure of devices for measuring wind power and energy and showed its efficiency and applicability.

Engineering induction - proposal of definition and one confirmation of proposal

Bojan Vujičić, Boris Ličina, Platon Sovilj, Vladimir Vujičić

Pregled doktorata u kojima je istraživana stohastička merna metoda

Dragan Pejić, Vladimir Vujičić

Apstrakt— U radu je prikazan razvoj ideja vezanih za stohastičku adiciju analogno-digitalnu konverziju. Pregled je dat kroz prizmu doprinosa 18 doktorskih radova, počev od 1996. kada je odbranjen prvi doktorat na ovu temu. Neki radovi su u većoj meri bili teorijskog značaja, drugi su imali značajniju praktičnu težinu, ali su svi dali doprinos u razvoju i primeni stohastičke konverzije u poslednjih četvrt veka.

Ključne reči—Stohastički pristup; adaptivnost; merenja; diter.

I. UVOD

Za početak primene stohastičkih principa, prvenstveno u takozvanom stohastičkom računanju, se navode [1] iz 1956. i [2] iz 1967. godine. U ova dva rada su postavljeni temelji konverzije analognih (napon) i digitalnih (broj u binarnom zapisu) vrednosti u povorku impulsa, tako da je informacija "utisnuta" u verovatnoću pojave jedinice. Pokazuje se da se, u slučaju operanada prikazanih na ovaj način, mnoge operacije obavljaju jednostavno: primenom jednostavnih kombinacionih ili sekvencijalnih mreža. Tako se množenje dva operanda u obliku povorka impulsa realizuje jednim AND logičkim kolom. Rezultat operacije je povorka impulsa kod koje je verovatnoća pojave jedinice približno jednaka proizvodu verovatnoća. Pored jednostavnosti izvođenja operacija, kao dobra osobina se navodi jednaka težina svih bita u povorki impulsa. Ovo za posledicu ima malu grešku u rezultatu, koja je posledica greške u bilo kom bitu operanda. Kod težinskih kodova je situacija druga: greška u bitu najveće vrednosti može da iznosi 50 %. Kao loše osobine ovog pristupa se navodi sporost, odnosno mala tačnost rezultata. Tačnost se može postići radom sa vrlo dugačkim operandima za šta je potrebna ili velika učestanost ili dugačko vreme računanja.

II. STOHAŠTIČKA ADICIONA ANALOGNO-DIGITALNA KONVERZIJA

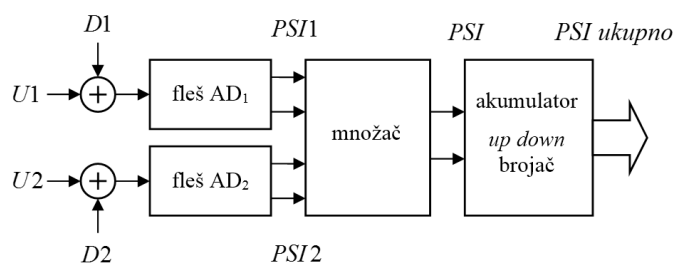
Na Katedri za električna merenja Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, sredinom devedesetih godina XX veka, se počelo raditi na ideji koja je bazirana na primeni stohastike u merenjima. U osnovi ideje jeste primena analogno-digitalne (AD) konverzije fleš AD konvertorom male rezolucije, uz

Dragan Pejić, FTN, Univerzitet u Novom Sadu, Trg D. Obradovića 6, Novi Sad (email: pejicdra@uns.ac.rs)

Vladimir Vujičić, FTN, Univerzitet u Novom Sadu, Trg D. Obradovića 6 (email: vvujicic@uns.ac.rs)

dodavanje šuma specijalnih osobina na ulazni naponski signal. Uloga aditivnog šuma jeste smanjivanje velike greške kvantizacije koja je sadržana u svakom rezultatu AD konverzije, što se postiže usrednjavanjem velikog broja susednih vrednosti.

Idejni tvorac ove ideje je profesor Vladimir Vujičić, koji je bio mentor prvog doktorskog rada [3] kolege Slobodana Milovančeva. U ovom doktorskom radu su postavljene osnove nove metode na bazi primene stohastike. Metoda je nazvana: stohastička adicijna AD konverzija. Reč je o analogno-digitalnoj konverziji jer se ulaznoj analognoj veličini na izlazu konvertora dodeljuje digitalna vrednost - broj. Termini "stohastička" i "adicijna" su upotrebljeni zbog primene specijalnog šuma (ditera) koji se dodaje na ulaznu analognu veličinu. U okviru doktorske teze je pokazana važna osobina ovakvog konvertora - adaptivnost. Metrološke osobine rezultata konverzije zavise od broja osnovnih rezultata konverzije (N) nad kojima se vrši usrednjavanje. Pokazano je da preciznost rezultata konverzije raste sa kvadratnim korenom iz N . Na Sl. 1. je data blok šema stohastičkog adicijnog AD konvertora sa dva generatora šuma.

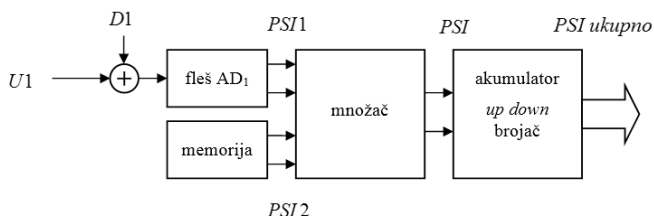


Sl. 1. Blok šema Stohastičkog adicijnog analogno-digitalnog konvertora sa dva generatora ditera

U ovom radu je korišćen fleš AD konvertor sa svega tri moguća stanja na izlazu, kodovana vrednostima iz skupa $\{-1, 0, 1\}$. Operacija množenja se jednostavno izvodi upotrebom nekoliko logičkih kola i za rezultat se dobija vrednost iz polaznog skupa. Zbog ovoga se akumuliranje realizuje korišćenjem up-down brojača. Rezultat konverzije teži vrednosti određenog integrala proizvoda ulaznih napona. Ovakav blok je namenjen za određivanje aktivne energije i aktivne snage, u slučaju da su ulazni naponi srazmerni naponu i struji potrošača. Ako se na oba ulaza dovede napon, ovom metodom se može odrediti efektivna vrednost napona po definiciji.

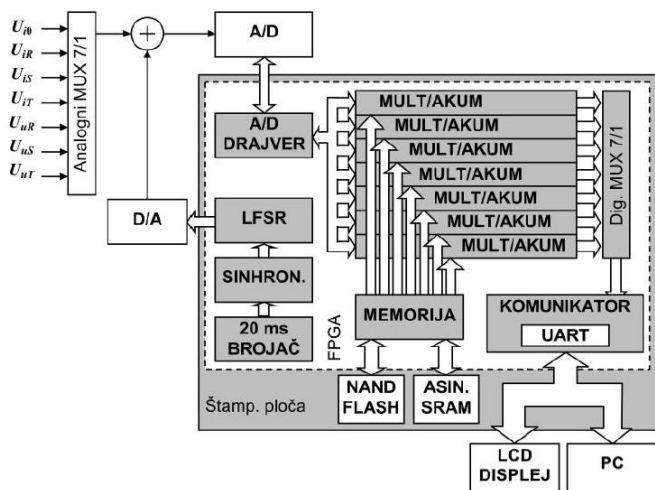
III. FREKVENTNA ANALIZA PRIMENOM STOHAŠTIČKE MERNE METODE

U sledećem koraku se razmišljalo o primenivosti stohastičke konverzije na određivanje koeficijenata razvoja u ortogonalni red. Ideja se nametnula sasvim logično budući da se koeficijenti razvoja u red određuju nalaženjem vrednosti određenog integrala proizvoda ulaznog napona i bazisne funkcije. Zaključeno je da nema potrebe realizovati bazisne funkcije u analognom obliku. Umesto toga, razmatrana je ideja prikazana na Sl. 2.



Sl. 2. Blok šema primene stohastičkog adicionog AD konvertora na određivanje jednog koeficijenta razvoja u red

Memorijski blok je iskorišćen za smeštanje dvobitnih odbiraka diterisane bazisne funkcije u trajanju jedne periode mrežnog napona i struje. Ovi odbirci se množe sa dvobitnim rezultatima fleš AD konverzije i rezultati se akumuliraju na potpuno isti način kao na Sl. 1. Ova tematika je teorijski i praktično analizirana u [4], gde je napravljen i korak dalje. Realizovan je sedmokanalni uređaj (tri napona i četiri struje), Sl. 3, kojim se vrši određivanje 50 harmonika po svakom od kanala.



Sl. 3. Blok šema sedmokanalnog uređaja za razvoj u red od 50 harmonika

Sve digitalne komponente (memorija, množači, akumulatori, itd...) su realizovane primenom FPGA (Field Programmable Gate Array) modula. Analogni deo sadrži sabirač i generisanje jednog deterskog signala. Na osnovu poznavanja harmonika napona i struja se određuju efektivne vrednosti, aktivne i reaktivne snage i energije. Uslov za

funkcionisanje jeste bliskost učestanosti napona i struje nazivnoj mrežnoj učestanosti.

U [5] je izvršena generalizacija stohastičke metode i dat je detaljan matematički model. Analiziran je uticaj rezolucije primenjenog fleš AD konvertora za ulazni napon, kao i rezolucije diterisane bazisne funkcije. Pokazano je da je dovoljno da odbirci diterisanih bazisnih funkcija budu dva bita veće rezolucije nego odbirci analiziranog signala, kako ne bi dodatno povećavali grešku u određivanju razvoja u ortogonalni red. Takođe je pokazano da apsolutna greška određivanja koeficijenata razvoja u red ne zavisi od reda harmonika.

U [6] je prikazana primena stohastičke metode u određivanju harmonijskog sastava napona i struja kvara sa električnim lukom. Na osnovu dobijenih podataka je pokazano da se može efikasno utvrditi mesta nastanka kvara. Nad praktično dobijenim rezultatima je pokazano da se u vremenu od 50 ms do 60 ms može odrediti harmonijski sastav napona i struje sa greškom manjom od 2 %. Isti postupak sproveden u simulacionim uslovima daje mnogo manju grešku, reda 0.01 %.

Ofseta komparatora kojim se realizuje fleš AD konvertor je prepoznat kao jedan od najvećih uzročnika sistematske greške u okviru stohastičkog konvertora [7]. Realizovan je prototip merila, uz posebno obraćanje pažnje na smanjenje uticaja ofseta primenjenih komparatora. Pokazano je da se periodičnim obrtanjem ulaza komparatora, uticaj ofseta može smanjiti između 40 dB i 70 dB. Na ovaj način se ostvaruje mogućnost merenja aktivne energije u 15-minutnom intervalom sa greškom manjom od 100 ppm.

IV. PRIMENA STOHAŠTIČKOG KONVERTORA U BIOMEDICINSKIM DISCIPLINAMA

Nakon uspešne primene stohastičke metode na merenje parametara jednosmernog i prostoperiodičnog signala, složenoperiodičnog signala, u [8] je pokazana mogućnost primene u medicini: na merenje nestacionarnih EEG signala. Poznato je da je EEG signal male amplitude i zato lako prijemčiv za šum. Pokazano je da se primenom stohastičke digitalne metode može realizovati analiza EEG signala i što je najvažnije, postignuta je veća otpornost na prisustvo šuma nego kod klasičnih analognih i digitalnih metoda.

U [9] je pokazana mogućnost primene stohastičke digitalne metode u merenju elektrookulogrfskog signala. Primećeno je da dolazi do problema na krajevima mernog intervala usled takozvanog Gibsovog efekta. Problem je uspešno rešen preklapanjem vremenskih intervala. Preklapanjem se dobija rezerva, tako da se u kasnijoj analizi mogu odbaciti sami krajevi signala, upravo oni koji su problematični. Realizovan je sistem za testiranje, tako da se iz računara zadaje oblik signala na koji se dodaje diter i vrši fleš AD konverzija i konačno dobijeni odbirci vraćaju u računar. Na ovaj način je dobijen zatvoren sistem koji je korišćen za istraživanje primenivosti stohastičke metode, uz ograničenje učestanosti

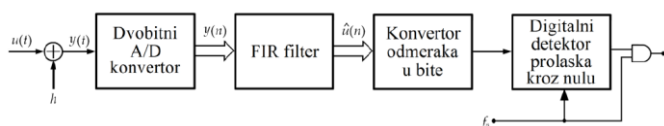
generisanja ispitivanog signala, a time i učestanosti odabiranja fleš AD konvertorom, brzinom serijske komunikacije.

Primena stohastičke metode merenja na ERP (Event Related Potential) potencijalima je prikazana u [10]. Posmatrano je merenje latence ERP signala i vršne vrednosti P300 signala. Prilikom merenja latence ERP signala dobijena je greška do 1.5 %, dok je pri merenju vršne vrednosti P300 komponente dobijena greška u oko 13 %. I ovde je potvrđena ranije pomenuta otpornost na prisustvo šuma, što predstavlja prednost stohastičke metode nad drugim metodama.

V. GENERALIZACIJA STOHAŠTIČKE METODE

Doktorska teza [11] definiše pojam merenja na intervalu naspram standardnog pristupa koji je merenje u tački. Stohastička metoda je primer merenja na intervalu: rezultat stohastičke konverzije je vrednost određenog integrala proizvoda dve vremenski zavisne veličine. Kao što je već pokazano, mnoštvo veličina se određuje upravo na ovaj način: aktivna snaga i energija, efektivna vrednost, koeficijenti razvoja u ortogonalni red, itd... Samo usled razvoja tehnologije, očekuje se dalje poboljšanje metroloških performansi merenja na intervalu primenom stohastičke metode. Zahvaljujući adaptivnosti, sa porastom učestanosti odabiranja raste preciznost rezultata merenja dobijenih primenom stohastičkog pristupa.

Posebna pažnja tačnom određivanju mrežne učestanosti je posvećena u [12]. Tačno poznavanje vrednosti mrežne učestanosti je od presudnog značaja za kvalitet ostalih merenja u elektroenergetskom sistemu koja mogu biti obavljena primenom stohastičkog konvertora. Definisana je metoda za merenje mrežne učestanosti primenom stohastičke merne metode i FIR (Finite Impulse Response) filtera, Sl. 4.



Sl. 4. Blok šema za određivanje učestanosti napona primenom FIR filtera

Mala rezolucija primenjenog fleš AD konvertora, omogućava jednostavnu izvedbu FIR filtera bez korišćenja množača. Kako je moguća vrednost na izlazu fleš AD konvertora iz skupa -1, 0 i 1, umesto množenja vrednosti odbirka koeficijentom filtera, ovde se koeficijenti koriste sa promenjenim znakom, anuliraju se ili se koriste bez izmene, zavisno o vrednosti odbirka.

Ukoliko se poznaje tačna vrednost mrežne učestanosti, moguće je prevazići ograničenja na koja je ukazano u [4] i [5]. U [13] je obuhvaćen uticaj osobina deterskih signala, uticaj nepoklapanja trajanje merenja sa celim brojem perioda merenog signala, kao i uticaj odstupanja učestanosti osnovnog harmonika od nazivne vrednosti (50 Hz ili 60 Hz). Dat je niz preporuka za poboljšanje metroloških osobina merila koje se odnose na izvedbu pseudoslučajnih deterskih signala. Najvažniji doprinos disertacije je definisanje postupka kojim

se u slučaju odstupanja učestanosti od nazivne vrednosti vrši određivanje vrednosti harmonika na osnovu skupa izmerenih vrednosti pseudoharmonika.

U radu [14] je prikazana je primena stohastičke merne metode u merenju napona i struje korišćenjem transformatora bez jezgra. Transformatori bez jezgra se odlikuju većom linearnošću, ali se retko koriste pošto na sekundaru daju napon srazmeran izvodu merene veličine. Primenom harmonijske analize bazirane na stohastičkoj mernoj metodi, ovaj problem se prevazilazi i što je još važnije, postaje prednost. Prirodno je da viši harmonici imaju manju vrednost, a zbog diferenciranja se dobija efekat pojačavanja n-tog harmonika faktorom n. U radu je dato rešenje za visokonaponski transformator bez jezgra, koji je opisan teorijski i simulaciono, a na prototipu sprovedena merenja su potvrdila prethodno dobijene rezultate.

Analiza uticaja variranja mrežne učestanosti na rezultate merenja primenom stohastičke metode u elektrodistributivnoj mreži je prikazana u [15]. Teorijskim, simulacionim i na posletku eksperimentalnim analizama potvrđena je mogućnost primene stohastičke metode sa 2-bitnim fleš A/D konvertorima u merenju, prevashodno osnovnog, a kasnije i viših harmonika u mreži, čak i u prisustvu značajne (7 puta veće od izmerene) gausovske varijacije mrežne frekvencije. Merne nesigurnosti rezultata simulacija merenja efektivne vrednosti osnovnog harmonika trougaonog (THD = 12 %) i testerastog signala (THD = 81 %) su ispod 0.006 %, čak i pri (za fleš A/D konvertore i SDMM metodu) frekvenciji odabiranja 100 kHz.

Mogućnost primene stohastičke konverzije u nultim metodama je istraživana u [16]. Pokazano je teorijski, simulaciono i praktično da se zahvaljujući jednostavnoj strukturi stohastičkog konvertora ima mali broj izvora sistematske greške. Primenom metoda za smanjenje sistematskih grešaka na prihvatljivo male vrednosti, dobija se mogućnost vrlo tačnih i preciznih merenja malih napona. To kvalifikuje stohastičke metode za merenje u okolini nule.

U [17] je kombinovano korišćenje 4-bitnog fleš AD konvertora umesto dvobitnih. Dobijaju se 4-bitni odbirci ulaznih detersanih veličina, što dalje zahteva komplikovaniji digitalni blok za množenje i akumuliranje. Sve digitalne funkcije su realizovane primenom FPGA modula. Dobitak je u višestruko boljim performansama koje se postižu u pogledu preciznosti rezultata merenja. Za postizanje dobre tačnosti merenja primenjene su poznate tehnike potiskivanja uticaja ofseta komparatora, kojih je sada 16 u fleš AD konvertoru, za razliku od svega dva komparatora u osnovnoj varijanti. Na vremenskom intervalu od 180 sekundi, na realizovanom prototipu je dobijena preciznost od 0.003 %, uz tačnost od 0.007 %.

U svim prethodnim praktičnim rešenjima diteri su generisani primenom LFSR (Linear Feedback shift Register) i digitalno-analognog (DA) konvertora. Pokazuje se da performanse DA konvertora ograničavaju kvalitet ditera u pogledu rezolucije i brzine generisanja, što se direktno odražava na finalne metrološke rezultate. U [18] je dat predlog za generisanje ditera bez upotrebe DA konverora. U

radu je definisana metoda za generisanje šuma uniformne raspodele vrednosti odabiranjem trougaonog napona. Trenuci odabiranja trougaonog napona su određeni LFSR mehanizmom i nestabilnošću primenjene PLL petlje. Na ovaj način je izvršena randomizacija predvidivog (pseudoslučajnog) ponašanja LFSRa i nepredvidivog (u velikoj meri slučajnog) ponašanja PLL petlje i izbegnuta su ograničenja koja nameće primena DA konvertora.

Stohastička merna metoda je primenjena i optimizovana za merenje snage i energije vetra [19]. Ovo je sve važniji problem, obzirom na želju da se sve veći broj vetrogeneratora instalira, ponekad na vrlo nedostupnim lokacijama. Jednostavnost stohastičke metode, pored malog broja izvora sistematskih grešaka čijim se otklanjanjem na dužem vremenskom intervalu postižu zapaženi metrološki rezultati, se karakteriše i malom potrošnjom električne energije. Ova činjenica dodatno kvalifikuje uređaj za merenje snage i energije vetra na bazi stohastičke metode za korišćenje u paralelnim merenjima na nedostupnim mestima koja se izvode radi ispitivanja potencijalnih lokacija na koje bi se postavljali vetrogeneratori.

Slično merenjima na intervalu, u radu [20] je predloženo upravljanje na intervalu: pristup koji se već uspešno pokazao u energetskim, biomedicinskim i drugim merenjima, ovde je proširen na fazi upravljanje. Rad prikazuje stohastički analogno-fazi konvertor (SAFC), uređaj koji radi sa podacima niske rezolucije u impulsnom režimu. Umesto rigorozne tačnosti, javljaju se slučajni događaji, zahvaljujući diterovanju nezanimarive greške kvantizacije po vrednosti pretvorene su u slučajnu grešku i kao takve proučavaju se statističkim metodama. Kombinovana je teorija verovatnoće sa fazi logikom, na način da se one međusobno dopunjuju.

VI. ZAKLJUČAK

Stohastička adicijona analogno-digitalna konverzija je pojam po kojem je Katedra za električna merenja Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu prepoznatljiva. Metoda je primenjiva na određivanje aktivne energije, aktivne snage, efektivne vrednosti napona, za određivanje koeficijentata razvoja u red - svuda gde je potrebno odrediti vrednost određenog integrala proizvoda dva napona. Primenjivana je u elektrodistributivnim merenjima i biomedicini, kao i u fazi upravljanju.

Svaki doktorat na temu stohastičke merne metode je otkrio i ostavio neka otvorena pitanja i probleme. Na njih su odgovarali kasnije objavljeni članci ili sledeći doktorati. Neka od otvorenih pitanja koja su otvorena u poslednjih nekoliko doktorata su: a) merenje vrlo slabih, zašumljenih i izobličjenih signala, b) istraživanje primene stohastičke digitalne merne metode optimalne rezolucije, c) realizacija stohastičkog digitalnog DFT procesora viokog reda, d) merenje nelinearnim senzorima, e) merenje posredno izmerenih nelinearnih veličina i f) merenje imitansnim senzorima.

Dalji razvoj stohastičke merne metode podrazumeva: a)

prepoznavanje i otklanjanja izvora sistematske greške kako bi se tačnost metode i dalje povećavala i b) primenu sve bržih analognih i digitalnih komponenti, kako bi se u što kraćem vremenskom intervalu dobijali što precizniji rezultati merenja.

LITERATURA

- [1] J. von Neumann, "Probabilistic logics and synthesis of reliable organisms from unreliable components," in Automata Studies, Princeton University Press, 1956.
- [2] B. R. Gaines, "Stochastic computing," in American Federation of Information Processing Societies: Proceedings of the AFIPS '67 Spring Joint Computer Conference, April 18-20, 1967, Atlantic City, New Jersey, USA, 1967.
- [3] Slobodan Milovančev, "Adaptivni AD konvertor i njegova primena", FTN Novi Sad, 1996.
- [4] Nebojša Pjevalica, "Merenja na elektrodistributivnoj mreži u frekvencijskom domenu", FTN Novi Sad, 2007.
- [5] Velibor Pjevalica, "Stohastički digitalni procesor ortogonalnih funkcija", FTN Novi Sad, 2008.
- [6] Branislav Santrač, "Precizno određivanje mesta kvara sa lukom u elektroenergetskom sistemu", Univerzitet u Kragujevcu, Tehnički fakultet Čačak, 2008.
- [7] Dragan Pejić, "Stohastičko merenje električne snage i energije", FTN Novi Sad, 2010.
- [8] Platon Sovilj, "Stohastičko digitalno merenje EEG signala", FTN Novi Sad, 2010.
- [9] Jelena Đorđević Kozarov, "Metoda merenja elektrookulografskog signala na intervalu sa preklapanjem vremenskih prozora", FTN Novi Sad, 2017.
- [10] Milan Milovanović, "Metoda merenja moždanih ERP potencijala zasnovana na merenju harmonika epohe", FTN Novi Sad, 2015.
- [11] Predrag Poljak, "Prilog razvoju i standardizaciji mernih metoda u merenjima u tački i merenjima na intervalu", FTN Novi Sad, 2012.
- [12] Aleksandar Radonjić, "Merenja u frekvencijskom domenu u konceptu pametne mreže", FTN Novi Sad, 2013.
- [13] Boris Antić, "Teorija realnog integrisanog merila harmonika", FTN Novi Sad, 2013.
- [14] Dušan Čomić, "Stohastička metoda merenja napona i struje na visokom naponu", FTN Novi Sad, 2015.
- [15] Željko Beljić, "Metoda merenja harmonika u realnoj distributivnoj mreži primenom AD konvertora dvobitne rezolucije", FTN Novi Sad, 2016.
- [16] Bojan Vujičić, "Detekcija nule AD konvertorom niske rezolucije", FTN Novi Sad, 2017.
- [17] Marjan Urekar, "Prilog optimizaciji digitalnih merenja", FTN Novi Sad, 2018.
- [18] Nemanja Gazivoda, "Nova metoda za povećanje efektivne rezolucije stohastičkih mernih instrumenata visokih performansi", FTN Novi Sad, 2019.
- [19] Boris Ličina, "Metoda merenja snage i energije vetra zasnovana na merenju na intervalu", FTN Novi Sad, 2020.
- [20] Karolj Nađ, "Stohastički analogno fazi konvertor i njegova primena", FTN Novi Sad, 2013.

ABSTRACT

The paper presents the development of ideas related to stochastic analog-to-digital conversion. The overview is given through the prism of the contribution of 18 PhD theses, starting from 1996, when the first doctorate on this topic was defended. Some works were more of theoretical significance, others had more significant practical weight, but all contributed to the development of stochastic conversions in the last 25 years.

Overview of PhD theses in which the stochastic measurement method was investigated

Dragan Pejić, Vladimir Vujičić

Primena mernog instrumenta VMP 20 za merenje snage u kolu naizmjenične struje

Nemanja Vidović, Isidora Sabadoš, Atila Juhas i Saša Skoko

Apstrakt—U ovom radu predstavljen je jedan način primene mernog instrumenta VMP 20 u izvođenju laboratorijskih vežbi iz predmeta Električna merenja. Tema rada je merenje snage u kolu jednofazne struje za različite vrste opterećenja, predstavljanje rezultata merenja kao i mogućnost praktičnog izvođenja laboratorijske vežbe u realnom vremenu. Pažljivom organizacijom laboratorijskih vežbi, kao što je prikazano u ovom radu, moguće je uspostaviti maksimalnu korelaciju između osnovne teorije električnih merenja, mernih metoda kao i drugih stručnih predmeta kao što su Osnove elektrotehnike i teorija naizmjeničnih struja.

Ključne reči—merenje snage, merne metode, laboratorijske vežbe.

I. UVOD

Savremeni pravci u obrazovnom sistemu naglašavaju razvijanje što većeg broja praktičnih veština budućih tehničara i inženjera. U tu svrhu potrebno je obezbediti odgovarajući broj stručnih predmeta u čijem sastavu će biti predviđen odgovarajući laboratorijski rad. Laboratorijski rad je veoma važan, jer se u okviru njega neprestano prožimaju teorijski principi i praktične realizacije u okviru neke stručne discipline.

Veoma je važno naglasiti potrebu primene savremenih mernih uređaja i mernih sistema u izvođenju laboratorijskih vežbi. Na taj način se stvaraju dobri preduslovi za maksimalno iskorišćenje potencijala izvođenja odgovarajuće laboratorijske vežbe.

U ovom radu prikazana je primena mernog instrumenta VMP 20 u izvođenju laboratorijske vežbe iz oblasti merenja snage u kolu jednofazne struje. Instrument pruža izuzetne pogodnosti u radu, jednostavno priključenje u električno kolo, jednostavnu upotrebu. Pored toga na prednjem displeju instrumenta prikazuju se osnovne merene veličine, ali se najveća vrednost ogleđa u tome što za instrument postoji odgovarajući softver VMPCalc. Na taj način može se meriti više veličina nego što se prikazuje na displeju instrumenta. Uz primenu odgovarajućeg softvera instrument VMP 20 pruža mogućnost merenja na daljinu i razmene osnovnog prozora softvera za merenje preko video linka. Ovakvom organizacijom laboratorijskog rada, pruža se mogućnost

Nemanja Vidović – Elektrotehnička škola "Mihajlo Pupin", Futoška 17, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: vidovicnemanja123@gmail.com).

Isidora Sabadoš – Elektrotehnička škola "Mihajlo Pupin", Futoška 17, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: lapislazuli.ns@gmail.com).

Atila Juhas, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija, (e-mail: juhiatti@gmail.com)

Saša Skoko – Elektrotehnička škola "Mihajlo Pupin", Futoška 17, 21000 Novi Sad, Srbija, (e-mail: sasaskoko78@gmail.com).

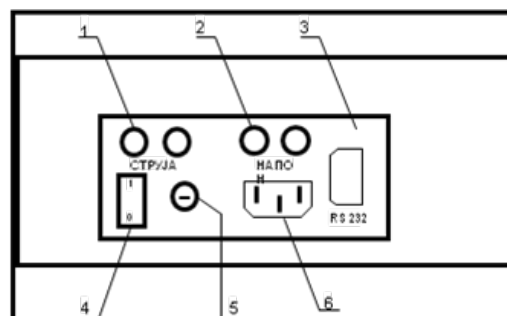
primene mernog instrumenta VMP 20 u organizaciji onlajn laboratorijskih vežbi u okviru udaljenih laboratorija.

II. MERNI INSTRUMENT VMP 20

Meni instrument VMP 20 razvijen je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu. Na Sl. 1. prikazan je izgled mernog instrumenta, a na Sl. 2. prikazana je priključna ploča.



Sl. 1. Izgled mernog instrumenta VMP 20.



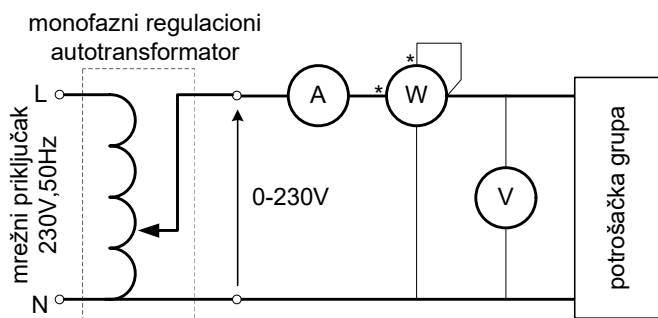
Sl. 2. Izgled priključne ploče instrumenta VMP 20.

Na Sl. 2. brojevima su označeni sledeći priključni kontakti: 1- strujni priključni kontakti, 2 - naponski priključni kontakti, 3- konektor za povezivanje sa računarom sa RS232 komunikacionim protokolom, 4 - prekidač za uključenje i isključenje mernog instrumenta, 5- osigurač, 6 - konektor za priključenje kabla za napajanje mernog sistema. Rad mernog sistema instrumenta zasniva se na stohastičkoj adicionoj A/D konverziji (SAADK). Metoda omogućava nov pristup merenjima na električnoj mreži, nezavisna je od tehnološkog razvoja i elektronskih komponenata, zahteva jednostavan hardver i adaptivnu preciznost merenja [1-4].

III. MERENJE SNAGE U KOLU NAIZMENIČNE STRUJE

Standardni pristup izvođenju laboratorijskih vežbi

podrazumeva primenu standardnih analognih mernih instrumenata. Na Sl. 3. prikazana je principiska električna šema za izvođenje laboratorijske vežbe za merenje snage u kolu naizmenične struje primenom ampermetra, voltmetra i vatmetra [5].



Sl. 3. Električna šema za merenje snage u kolu jednofazne struje primenom standardnih analognih mernih instrumenata.

Na osnovu prikazane merne metode sa Sl. 3. napon, struja i aktivna snaga određuju se direktno očitavanjem mernih instrumenata, dok se prividna snaga, reaktivna snaga i faktor snage određuju indirektno primenom proračuna.

$$S = U \cdot I \quad (1)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (2)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3)$$

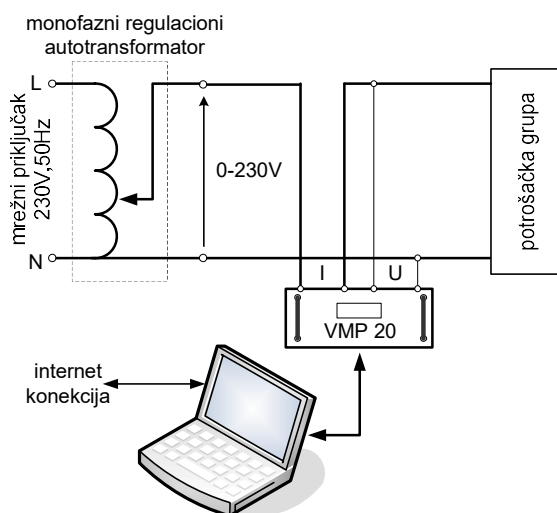
Pri čemu u (1), (2), (3), veličine imaju sledeće značenje: I - izmerena struja, U - izmereni napon, P - izmerena aktivna snaga, S - prividna snaga, $\cos \varphi$ - faktor snage, Q - reaktivna snaga. Na sl. 4. prikazan je izgled postavljene laboratorijske vežbe za merenje snage u kolu jednofazne struje.



Sl. 4. Izgled merne opreme za izvođenje laboratorijske vežbe primenom standardnih analognih mernih instrumenata.

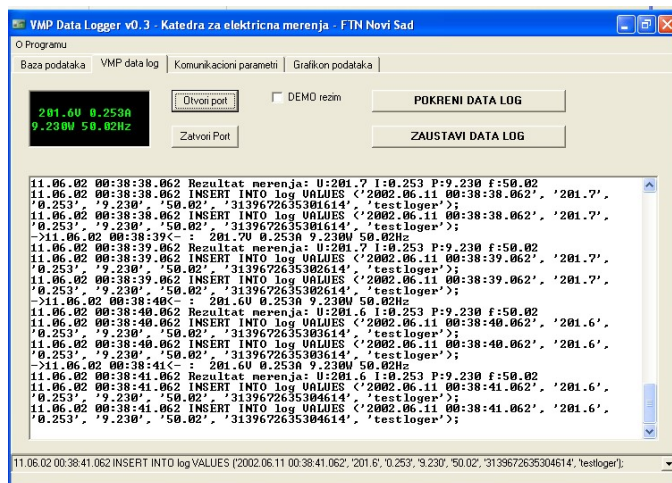
Osnovni nedostaci ovako postavljene laboratorijske vežbe ogledaju se u sledećem: mere se samo tri veličine (napon, struja i aktivna snaga) dok se ostale veličine izračunavaju, merni postupak relativno dugo traje zbog očitavanja analognih mernih instrumenata, ne postoji mogućnost izvođenja laboratorijske vežbe na daljinu.

Za razliku od standardnih mernih metoda koje se zasnivaju na primeni analognih mernih instrumenata, primena instrumenta VMP 20 pruža mnogo više mogućnosti. Na Sl. 5. prikazana je principiska šema primene mernog instrumenta VMP 20 u merenju snage u kolu naizmenične struje.



Sl. 5. Električna šema za merenje snage u kolu jednofazne struje primenom mernog instrumenta VMP 20.

Primenom odgovarajućeg softvera VMPCalc moguće je u realnom vremenu meriti sledeće veličine: napon, struju, aktivnu snagu i frekvenciju. Na Sl. 6. prikazan je izgled osnovnog prozora softvera VMPCalc.

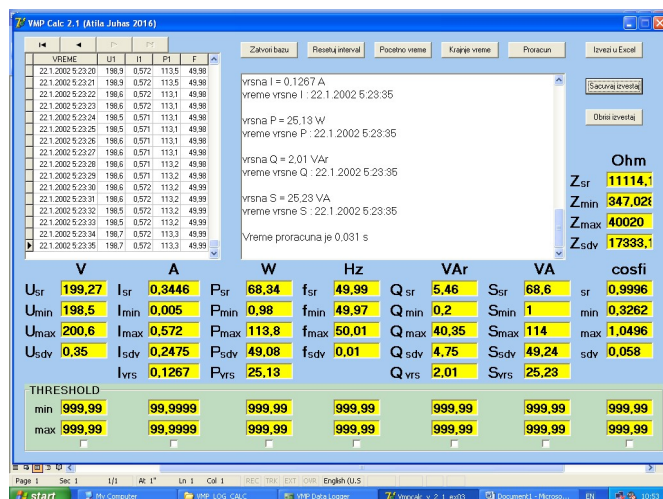


Sl. 6. Izgled osnovnog prozora softvera VMPCalc.

Na Sl. 6. možemo uočiti displej u gornjem desnom uglu prozora na kome se u realnom vremenu prikazuju vrednosti

napona, struje aktivne snage i frekvencije potrošačke grupe. Ovaj način prikazivanja izuzetno je pogodan za praćenje vrednosti merenih veličina u realnom vremenu ako je računar povezan na internet i postoji mogućnost deljenja ekrana računara putem odgovarajućeg video linka.

Pored prikazanog prozora na Sl. 6 softver za obradu podataka VMPCalc pruža mogućnost merenja više veličina na definisanom intervalu. Na Sl. 7. prikazan je izgled prozora softvera VMPCalc u kome se prikazuju sve veličine koje može da meri instrument VMP 20.



Sl. 7. Izgled prozora softvera VMPCalc prikaz više veličina merenih na intervalu.

U Tabeli I pregledno su prikazane električne veličine koje se mogu meriti instrumentom VMP 20, na definisanom intervalu.

TABELA I
PRIKAZ VELIČINA KOJE INSTRUMENT MERI NA INTERVALU

Naziv veličine	Oznaka i jedinica
Napon	U [V]
Struja	I [A]
Aktivna snaga	P [W]
Frekvencija	f [Hz]
Reaktivna snaga	Q [VAr]
Prividna snaga	S [VA]
Faktor snage	$\cos\phi$ [-]
Impedansa potrošača	Z [Ω]

IV. PRIMENA INSTRUMENTA VMP 20 I REZULTATI MERENJA

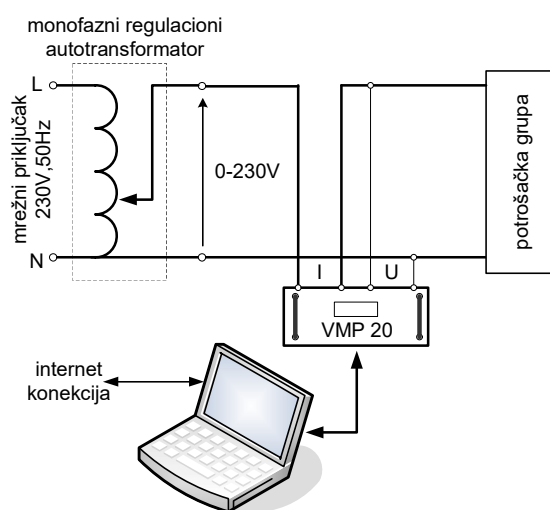
Laboratorijka vežba je tako koncipirana da je jasno definisan zadatak, data je električna šema i spisak ogledne opreme i kratko uputstvo za realizaciju laboratorijske vežbe. Učenik ili student, pre dolaska u laboratoriju, potrebno je da prouči tekst postavke laboratorijske vežbe i pripremiti se za nju.

U slučaju da se vežba radi u realnom vremenu, odnosno, onlajn, učenik ili student treba da bude pored svog računara u zakazanoj satnici. Neophodan preduslov je da postoji pristup internetu u laboratoriji za električna merenja.

Za rad u realnom vremenu preko interneta nastavnik ili saradnik su moderatori i definišu dinamiku izvođenja laboratorijske vežbe, dok učenik ili student preko video linka prate tok izvođenja laboratorijske vežbe.

U toku neposrednog merenja prozor softvera VMPCalc dostupan je putem video linka studentima ili učenicima i samostalno mogu izvršiti očitavanje merenih veličina.

Principijski izgled električne šeme ispitne stanice za merenje snage u kolu naizmenične struje primenom instrumenta VMP20 u realnom vremenu prikazan je na Sl. 8.



Sl. 8. Principijski izgled električne šeme za merenje snage u kolu jednofazne struje primenom instrumenta VMP20.

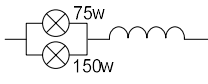
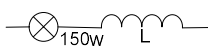
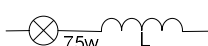
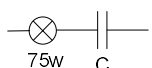
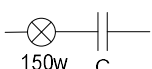
Na Sl. 9. prikazan je izgled ispitne stanice u laboratoriji sa povezanom mernom opremom i odgovarajućim računarnom.

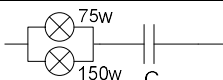


Sl. 9. Izgled ispitne stanice u laboratoriji sa povezanom mernom opremom i odgovarajućim računarnom.

Tok izvođenja laboratorijske vežbe ogleda se u tome da se instrumentom VMP 20 mere električne veličine potrošača za različite kombinacije u potrošačkoj grupi. U Tabeli II prikazani su rezultati merenja za različite kombinacije elemenata potrošačke grupe.

TABELA II
TABELARNI PRIKAZ REZULTATA MERENJA

		
1. kombinacija		
U	200.8	[V]
I	0.828	[A]
P	141.5	[W]
S	166.26	[VA]
$\cos\varphi$	0.853	
Q	86.45	[VAr]
		
2. kombinacija		
U	201.4	[V]
I	0.578	[A]
P	108.7	[W]
S	116.41	[VA]
$\cos\varphi$	0.932	
Q	41.91	[VAr]
		
3. kombinacija		
U	202.9	[V]
I	0.311	[A]
P	61.85	[W]
S	63.101	[VA]
$\cos\varphi$	0.982	
Q	11.36	[VAr]
		
4. kombinacija		
U	203.4	[V]
I	0.221	[A]
P	22.72	[W]
S	44.95	[VA]
$\cos\varphi$	0.503	
Q	38.66	[VAr]
		
5. kombinacija		
U	203.6	[V]
I	0.256	[A]
P	9.452	[W]
S	52.12	[VA]
$\cos\varphi$	0.181	
Q	51.07	[VAr]

		
6. kombinacija		
U	203.8	[V]
I	0.262	[A]
P	3.029	[W]
S	53.39	[VA]
$\cos\varphi$	0.057	
Q	52.86	[VAr]

Završni deo vežbe učenik ili student radi samostalno. On se ogleda u korelaciji između teorije naučene iz Osnova elektrotehnike koje je neophodno povezati sa rezultatima dobijenim u laboratoriji za električna merenja.

Naime, neophodno je za odgovarajuće kombinacije potrošačke grupe konstruisati u odgovarajućoj razmeri trouglove snaga (aktivna, reaktivna, prividna) i dijagrame dobijene konstrukcionom metodom uporediti sa znanjima usvojenim na predmetu Osnove elektrotehnike. Proveriti da li komponente aktivne reaktivne i prividne snage čine pravougli trougao i eventualna odstupanja komentarisati stručno. Na taj način uspostavlja se snažna korelacija između osnovne teorije električnih merenja i teorije osnova elektrotehnike odnosno praktičnim merenjima proverava se da li važe osnovni teorijski principi u elektrotehnici.

V. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je da približi jedan način izvođenja laboratorijskih vežbi iz električnih merenja. Obuhvaćena je jedna veoma važna tema a to je merenje snage u kolu naizmjenične struje. Posebnu važnost u radu predstavlja primena savremenog mernog instrumenta VMP 20 i odgovarajućeg softvera VMPCalc za obradu merenih podataka. Zahvaljujući primeni softvera u radu je posebno akcentovana mogućnost primene instrumenta za izvođenje laboratorijskih vežbi u realnom vremenu i putem onlajn vežbi, odnosno video-linka. Na taj način podiže se kvalitet realizacije laboratorijskih vežbi, ali i ono što je još važnije, pruža se mogućnost pristupanja, praćenja i neposrednog rada učenika ili studenata koji nisu u mogućnosti iz objektivnih razloga da prisustvuju neposrednom izvođenju laboratorijskih vežbi. Iskustvo stečeno u radu sa instrumentom VMP20 je izuzetno pozitivno pa na ovom mestu želimo da istaknemo podršku autorima instrumenta na daljem hardverskom i softverskom usavršavanju mernog instrumenta.

ZAHVALNICA

Na ovom mestu želimo da se zahvalimo Vladimiru Vujičiću profesoru Fakulteta tehničkih nauka u penziji na velikoj podršci i savetima o mogućnostima primene instrumenta u neposrednoj laboratorijskoj praksi kao i pravcima primene u razvoju laboratorijskih merenja na daljinu i onlajn organizaciji laboratorijskih vežbi.

LITERATURA

- [1] A. Juhas, "Hardverska i softverska podrška trofaznim merenjima snage i energije u ED mreži", master rad, Katedra za električna merenja, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija, 2017.
- [2] V. Vujičić, I. Župunski, Z. Mitrović, M. Sokola, "Merenje u tački i intervalu", Proc. of IMECO XIX, World Congress, Lisabon, Portugal, , pp. 1128-1132, No. 480, septembar, 2009.
- [3] V. Vujičić, S. Milovančev, "Digitalni instrument za merenje srednje vrednosti proizvoda dava analogna periodična signala", YU patent, broj 48195, 1995.
- [4] V. Pjevalica, V. Vujičić, "Further Generation of Low-Frequency True-RMS Instrument", IMTC, pp. 1008-1011, May, 2005.
- [5] P. Dobanovački, S. Skoko, "Električna merenja-praktikum laboratorijskih vežbi", Elektrotehnička škola "Mihajlo Pupin", Novi Sad, Srbija, 2016.

ABSTRACT

This paper presents a way of applying the measuring instrument

VMP 20 in performing laboratory exercises in the subject of Electrical Measurements. The topic of the paper is the measurement of power in a single-phase current circuit for different types of loads, the presentation of measurement results as well as the possibility of practical laboratory exercises in real time. By careful organization of laboratory exercises, as shown in this paper, it is possible to establish the maximum correlation between the basic theory of electrical measurements, measurement methods and other professional subjects such as Fundamentals of Electrical Engineering and Theory of Alternating Currents.

Practical implementation of the VMP 20 for measuring power in an alternating current circuit

Nemanja Vidović, Isidora Sabadoš, Atila Juhas i Saša Skoko

Primena mernog instrumenta VMP 20 za izvođenje laboratorijske vežbe - popravka faktora snage

Isidora Sabadoš, Nemanja Vidović, Atila Juhas i Saša Skoko

Apstrakt—U ovom radu predstavljen je jedan način primene mernog instrumenta VMP 20 u izvođenju laboratorijskih vežbi iz predmeta Električna merenja. Tema rada je popravka faktora snage u jednofaznom sistemu napajanja. Radom je obuhvaćen osnovni teorijski princip kompenzacije reaktivne snage i dat je prikaz izvođenja laboratorijske vežbe. Primena instrumenta VMP 20 i odgovarajućeg softvera VMPCalc ima posebnu pogodnost u organizaciji laboratorijskih vežbi na daljinu- online, što je u radu posebno naznačeno.

Ključne reči—popravka faktora snage, VMP20, laboratorijske vežbe, online-laboratorija.

I. UVOD

Savremeni pristup stručnom obrazovanju tehničara i inženjera podrazumeva povećani pristup razvoju praktičnih veština. Zato je neophodno obezbediti u obrazovnom procesu dovoljno praktičnog rada u okviru odgovarajućih laboratorijskih vežbi kako bi se praktično demonstrirao i proverio što veći broj teorijskih principa.

Zato organizacija laboratorijskih vežbi iz Električnih merenja ima poseban značaj. U okviru planiranja i realizacije vežbi potrebno je postaviti (osmisliti) odgovarajući broj zadataka koji bi uspešno i smisleno povezali osnovne teorijske principe i njihove praktične aspekte.

U ovom radu prezentovan je jedan takav pristup. Naime, nastojali smo da kroz organizaciju jedne laboratorijske vežbe izvršimo sintezu osnovnih teorijskih principa iz teorije Električnih merenja i da uspostavimo korelaciju sa osnovnim teorijskim sadržajima iz predmeta Osnove elektrotehnike 2 - teorija naizmeničnih struja, odnosno, kompenzacija reaktivne snage (popravka faktora snage). Prilikom postavke i organizacije laboratorijske vežbe korišćen je merni instrument VMP20 i njegov aplikativni softver VMPCalc za prikazivanje rezultata merenja. S obzirom da primena softvera VMPCalc omogućava rad u realnom vremenu, koncept realizacije laboratorijske vežbe je da se ukaže na mogućnosti primene instrumenta VMP20 u organizaciji i izvođenju laboratorijskih

Isidora Sabadoš – Elektrotehnička škola "Mihajlo Pupin", Futoška 17, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: lapislazuli.ns@gmail.com).

Nemanja Vidović – Elektrotehnička škola "Mihajlo Pupin", Futoška 17, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: vidovicnemanja123@gmail.com).

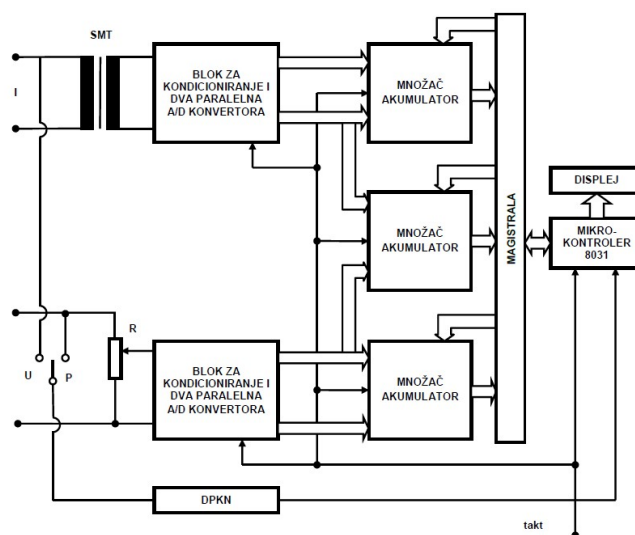
Atila Juhas, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija, (e-mail: juhiatti@gmail.com)

Saša Skoko – Elektrotehnička škola "Mihajlo Pupin", Futoška 17, 21000 Novi Sad, Srbija, (e-mail: sasaskoko78@gmail.com).

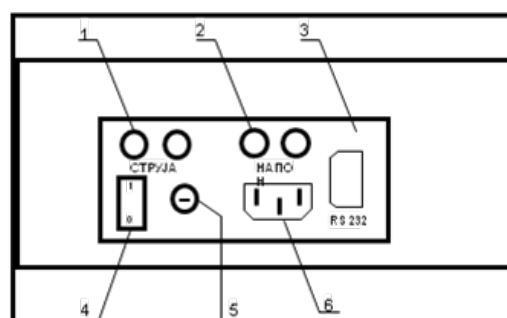
vežbi na daljinu (online laboratorijske vežbe, udaljena laboratorija). Na taj način se daje poseban doprinos podizanju kvaliteta organizacije i realizacije laboratorijskih vežbi.

II. MERNI INSTRUMENT VMP 20

Merni instrument VMP 20 razvijen je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu [1]. Na Sl. 1. prikazan je izgled osnovne blok šeme mernog instrumenta, a na Sl. 2. prikazana je priključna ploča.



Sl. 1. Izgled osnovne blok šeme mernog instrumenta VMP 20.



Sl. 2. Izgled priključne ploče instrumenta VMP 20.

Na Sl. 2. brojevima su označeni sledeći priključni kontakti: 1- strujni priključni kontakti, 2 - naponski priključni kontakti,

3 - konektor za povezivanje sa računarom sa RS232 komunikacionim protokolom, 4 - prekidač za uključenje i isključenje mernog instrumenta, 5- osigurač, 6 - konektor za priključenje kabla za napajanje mernog sistema. Rad mernog sistema instrumenta zasniva se na stohastičkoj adicioj A/D konverziji (SAADK) [2],[3],[4]. Metoda omogućava nov pristup merenjima na električnoj mreži, nezavisna je od tehnološkog razvoja i elektronskih komponenata, zahteva jednostavan hardver i adaptivnu preciznost merjenja.

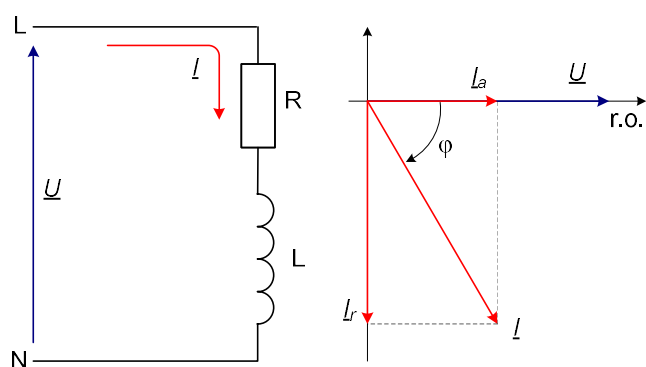
III. OSNOVNI PRINCIPI KOMPENZACIJE REAKTIVNE SNAGE

Faktor snage u električnoj mreži zavisi od karaktera priključenih prijemnika. Ukoliko se karakter prijemnika tokom vremena menja, to znači da će se menjati i faktor snage. Faktor snage definiše se kao odnos aktivne i prividne snage i dat je izrazom (1) [5].

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (1)$$

Ako je opterećenje električne mreže čisto omsko tada je faktor snage jednak 1. Ako je opterećenje u električnoj mreži termogeno-induktivnog karaktera tada se faktor snage kreće u intervalu od 0 - 1 u zavisnosti od toga koliki je udeo termogenog i induktivnog opterećenja u potrošačkoj grupi. Propisima je predviđeno da faktor snage u električnoj mreži bude što bliži 1, odnosno da bude iznad 0.95. S obzirom da su u proizvodnim pogonima prijemnici najčešće elektromotori, transformatori i slični omsko-induktivni prijemnici, oni predstavljaju značajne potrošače reaktivne snage pa je najčešće kod ovakvih potrošačkih grupa faktor snage ispod 0.95. Zato je u takvim slučajevima neophodno izvršiti kompenzaciju reaktivne snage i popravku faktora snage na zadovoljavajuću vrednost.

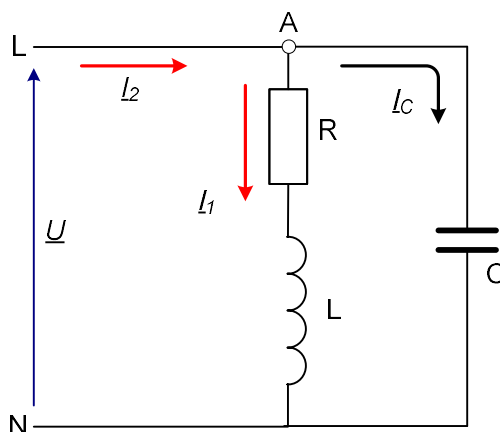
Na Sl. 3. prikazan je jedan RL potrošač povezan u kolo jednofazne struje sa odgovarajućim fazorskim dijagramima napona i struja.



Sl. 3. RL potrošač povezan u kolo jednofazne struje sa odgovarajućim fazorskim dijagramom napona i struja.

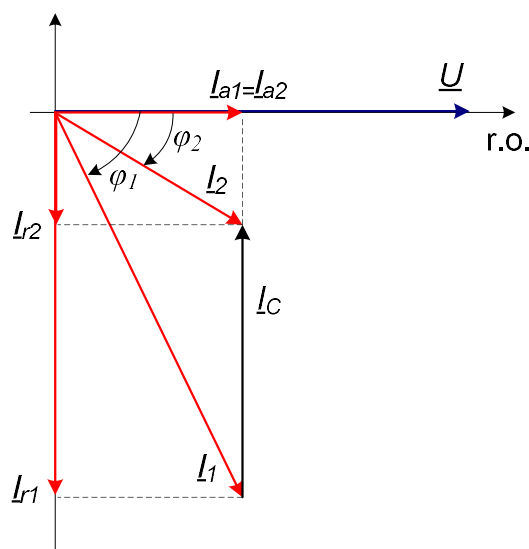
Na Sl. 3. oznake imaju sledeće značenje: R - omski potrošač, L - induktivni potrošač, \underline{U} - fazor napona na potrošaču, \underline{I} - fazor struje potrošača, \underline{I}_a -fazor aktivne komponente struje

potrošača, \underline{I}_r -fazor reaktivne komponente struje potrošača, φ -fazni pomeraj između napona i struje potrošača. Pod uslovom da je vrednost napona u električnom kolu konstanta i da se tokom vremena ne menja, vrednost reaktivne snage zavisi od reaktivne komponente struje u električnom kolu. Što je potrošač dominantnijeg induktivnog karaktera to je veća reaktivna komponenta struje. Prema tome, ako želimo da kompenzujemo reaktivnu snagu potrošača, potrebno je na određeni način kompenzovati reaktivnu komponentu struje potrošača. Kompenzacija reaktivne komponente struje vrši se paralelnim vezivanjem kondenzatora sa RL potrošačem kao što je prikazano na Sl. 4.



Sl. 4. Kondenzator C paralelno povezan RL potrošaču u cilju kompenzacije reaktivne snage (struje).

Na Sl. 5. prikazan je fazorski dijagram napona i struja u električnom kolu pre i posle povezivanja kondenzatora.



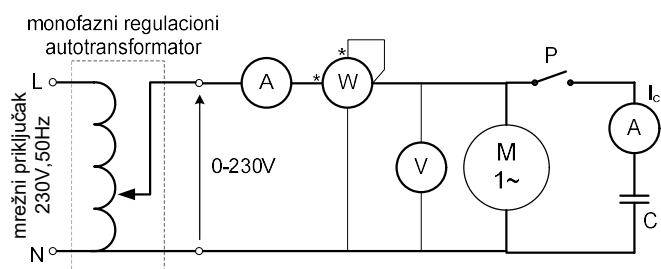
Sl. 5. Fazorski dijagram napona i struja električnog kola pre i posle povezivanja kondenzatora.

Pri čemu je značenje veličina na Sl. 5. sledeće: \underline{I}_c - fazor struje kondenzatora, sa indeksom 1 označene su struje i njihove komponente u električnom kolu pre povezivanja kondenzatora, a sa indeksom 2 označene su struje i njihove

komponente u električnom kolu posle povezivanja kondenzatora. Na osnovu prethodne analize zaključujemo da će struja kondenzatora uticati na smanjenje reaktivne komponente struje u električnoj mreži, odnosno reaktivna komponenta struje će se sa početne vrednosti I_{r1} smanjiti na vrednost I_{r2} , dok će aktivna komponenta struje ostati nepromenjena jer se aktivno opterećenje u električnom kolu nije menjalo.

IV. STANDARDNA MERNÁ METODA

Izvođenje laboratorijske vežbe iz popravke faktora snage sprovodi se neposredno u laboratoriji primenom ampermetra, voltmetra i vatmetra [6]. Principijska šema za izvođenje oglada prikazana je na Sl. 6.



Sl. 6. Električna šema za izvođenje oglada primenom standardnih analognih mernih instrumenata.

Izvođenje laboratorijske vežbe sastoji se iz dva dela. Za prvi i drugi deo vežbe podešena vrednost napona ostaje nepromenjena. Prvi deo vežbe predstavlja merenje napona, struje i snage jednofaznog motora bez priključenog kondenzatora. Na osnovu izmerenih veličina određuje se faktor snage motora i fazni pomeraj između fazora napona i struje primenom izraza (2) i (3). Izmerene i izračunate veličine pregledno se beleže u tabelu.

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_{W1}}{U_1 \cdot I_1} \quad (2)$$

$$\varphi_1 = \arccos(\cos \varphi_1) \quad (3)$$

Drugi deo vežbe podrazumeva zatvaranje preklopnika P sa Sl. 6 i ponavljanje postupka merenja napona, struje, snage i struje kondenzatora. Izmerene vrednosti se pregledno beleže u tabelu i sprovode se izračunavanja nove vrednosti faktora snage i faznog pomeraja između fazora napona i struje primenom izraza (4) i (5).

$$\cos \varphi_2 = \frac{P_{W2}}{U_2 \cdot I_2} \quad (4)$$

$$\varphi_2 = \arccos(\cos \varphi_2) \quad (5)$$

Nakon izvršenih merenja analiziraju se dobijeni rezultati.

Porede se vrednosti faktora snage pre i posle povezivanja kondenzatora. Zatim se konstruiše (grafičkom metodom ili primenom odgovarajućih softverskih alata) vektorski dijagram napona i struja pre i posle povezivanja kondenzatora. Da bi se vektorski dijagram struja mogao pravilno nacrtati neophodno je sve struje nacrtati u istoj razmeri.

Neka od ograničenja standardne merne metode su sledeća: zahteva neposredno prisustvo u laboratoriji, samo neposredno merenje napona, struje i snage je duže zbog očitavanja analognih mernih instrumenata, ograničenja u primeni online-laboratorije. Zato je neophono primeniti savremene merne sisteme i uređaje koji će omogućiti izvođenje laboratorijske vežbe u online uslovima.

V. PRIMENA INSTRUMENTA VMP 20 I REZULTATI MERENJA

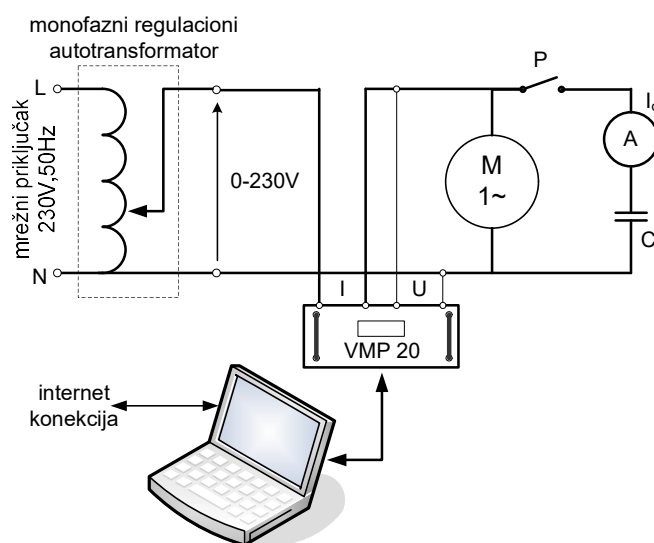
Laboratorijska vežba je tako koncipirana da je jasno definisan zadatak, data je električna šema i spisak ogledne opreme i kratko uputstvo za realizaciju laboratorijske vežbe. Učenik ili student, pre dolaska u laboratoriju, potrebno je da prouči tekst postavke laboratorijske vežbe i pripremiti se za nju.

U slučaju da se vežba radi u realnom vremenu, odnosno, onlajn, učenik ili student treba da bude pored svog računara u zakazanoj satnici. Neophodan preduslov je da postoji pristup internetu u laboratoriji za električna merenja.

Za rad u realnom vremenu preko interneta nastavnik ili saradnik su moderator i definišu dinamiku izvođenja laboratorijske vežbe, dok učenik ili student preko video linka prate tok izvođenja laboratorijske vežbe.

U toku neposrednog merenja prozor softvera VMPCalc dostupan je putem video linka studentima ili učenicima i samostalno mogu izvršiti očitavanje merenih veličina.

Principijska električna šema izvođenja oglada uz primenu instrumenta VMP20 prikazana je na Sl. 7.



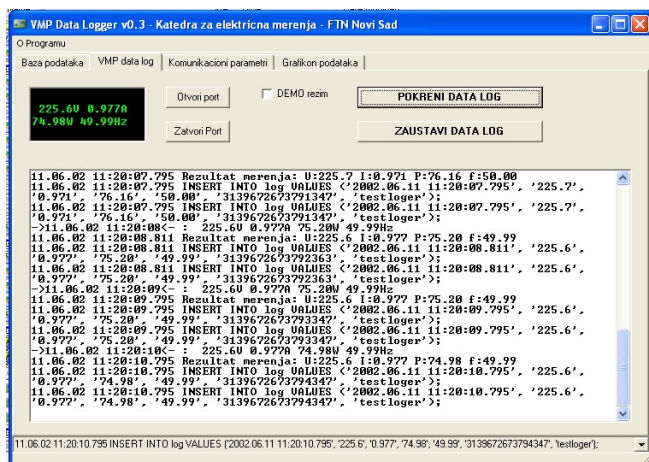
Sl. 7. Principijski izgled električne šeme za izvođenje oglada kompenzacije reaktivne snage primenom instrumenta VMP20.

Na Sl. 8. prikazan je izgled ispitne stanice u laboratoriji sa povezanom mernom opremom.



Sl. 8. Izgled ispitne stanice u laboratoriji sa povezanom mernom opremom i odgovarajućim računarom.

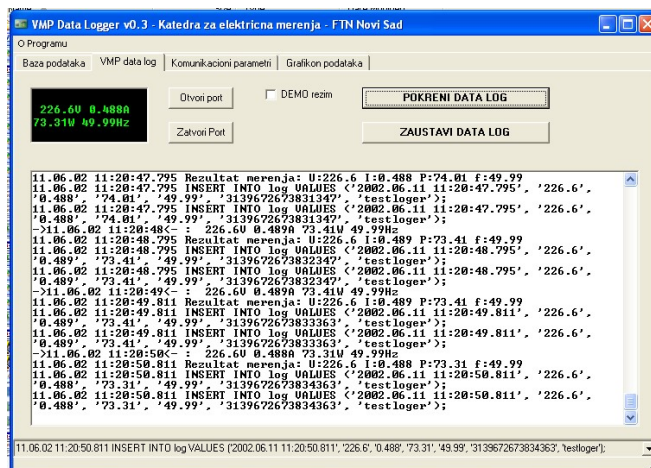
Tok izvođenja laboratorijske vežbe ogleda se u tome da se instrumentom VMP 20 meri napon, struja i snaga pre povezivanja kondenzatora. Primenom softvera VMPCalc na ekranu računara mogu se pratiti vrednosti merenih veličina što je prikazano na Sl. 9.



Sl. 9. Izgled prozora softvera VMPCalc pre povezivanja kondenzatora.

Zatim se preklopnik P sa Sl. 7. zatvori i izvrši se očitavanje pokazivanja instrumenta posle povezivanja kondenzatora, što je prikazano na Sl. 10.

Na osnovu rezultata merenja koji su prikazani na Sl. 9. i 10. uočavamo da se struja izvora napajanja smanjila sa vrednosti $I_1=0.977$ [A] na vrednost $I_2=0.488$ [A], dok je aktivna snaga koja se uzima iz električne mreže ostala približno jednaka jer se mehaničko opterećenje motora nije menjalo.



Sl. 10. Izgled prozora softvera VMPCalc posle povezivanja kondenzatora.

Smanjenje struje izvora upravo je posledica smanjenja reaktivne komponente struje električne mreže koju smo postigli povezivanjem kondenzatora paralelno električnom motoru.

S obzirom da se napajanje aparature vrši iz naizmeničnog izvora sa regulacionim autotransformatorom napajanje aparature možemo izvršiti i za nestandardne vrednosti napona električne mreže. U Tabeli I dati su rezultati merenja za nestandardnu vrednost napona izvora od 200 [V].

TABELA I

TABELARNI PRIKAZ REZULTATA MERENJA ZA NAPON IZVORA 200 [V]

Pre povezivanja kondenzatora C		
U_1	200.4	[V]
I_1	0.714	[A]
P_1	52.86	[W]
$\cos\varphi_1$	0.36	
φ_1	68.9	[°]
I_C	0	[A]
Posle povezivanja kondenzatora C		
U_2	200.6	[V]
I_2	0.312	[A]
P_2	53.7	[W]
$\cos\varphi_2$	0.83	
φ_2	33.9	[°]
I_C	0.52	[A]
C	9	[μF]

Prilikom izvođenja drugog dela vežbe, paralelno elektromotoru povezana su dva međusobno paralelno povezana kondenzatora od 4.5 [μF].

Ovde je važno naglasiti da drugi deo vežbe može imati i drugačiji tok. Naime, moguće je zadati željenu vrednost faktora snage a zatim ostaviti učeniku ili studentu da sam proračuna potrebnu vrednost kapaciteta kondenzatora C_p , primenom izraza (6).

$$C_p = \frac{P_1}{\omega U_1^2} (tg\varphi_1 - tg\varphi_z) \quad (6)$$

Pri čemu je značenje veličina u (6) sledeće: C_p -potrebna vrednost kapaciteta kondenzatora, ω -kružna učestanost električne mreže koja se jednostavno može odrediti jer instrument VMP20 u osnovnom prozoru meri i frekvenciju električne mreže, U_1 -efektivna vrednost napona električne mreže, φ_1 - fazni pomeraj između fazora napona i struje pre povezivanja kondenzatora, φ_z - zadata vrednost faznog pomeraja određena na osnovu zadate vrednosti faktora snage.

Kada odredimo potrebnu vrednost kapaciteta, iz grupe kondenzatora koji su na raspolaganju potrebno je izabrati odgovarajući, povezati ga u električno kolo, izvršiti drugo merenje, proveriti novu vrednost faktora snage i da li odgovara zadatoj vrednosti.

Završni deo vežbe podrazumeva diskusiju dobijenih rezultata, konstrukciju vektorskih dijagrama napona i struja elektromotora pre i posle povezivanja kondenzatora primenom geometrijske metode ili odgovarajućih softverskih alata (CAD softveri, GeoGebra i sl.) i sačinjavanje izveštaja.

VI. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je da približi jedan način izvođenja laboratorijske vežbe za popravku faktora snage (kompenzacija reaktivne snage). Prilikom realizacije laboratorijske vežbe korišćen je merni instrument VMP20 i odgovarajući softver VMPCalc. Na osnovu iskustva koje smo stekli u radu sa instrumentom možemo zaključiti da je izvođenje laboratorijske vežbe veoma elegantno, merenje se brzo vrši, softversko okruženje pruža organizaciju laboratorijske vežbe online, što omogućava učeniku ili studentu da prati tok izvođenja vežbe od kuće. Komunikacija preko video linka i brzo merenje instrumentom omogućavaju da se u terminu laboratorijskih vežbi ostavi sasvim dovoljno vremena za diskusiju i analizu dobijenih rezultata i da se uspostavi korelacija između teorijskih principa i praktičnih rezultata kao i da se uspostavi njihova dodatna siteza.

ZAHVALNICA

Na ovom mestu želimo da se zahvalimo Vladimiru Vujičiću profesoru Fakulteta tehničkih nauka u penziji na velikoj podršci i savetima o mogućnostima primene instrumenta u neposrednoj laboratorijskoj praksi kao i pravcima primene u razvoju laboratorijskih merenja na daljinu i onlajn organizaciji laboratorijskih vežbi.

LITERATURA

- [1] A. Juhas, "Hardverska i softverska podrška trofaznim merenjima snage i energije u ED mreži", master rad, Katedra za električna merenja, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija, 2017.
- [2] V. Vujičić, I. Župunski, Z. Mitrović, M. Sokola, "Merenje u tački i intervalu", Proc. of IMECO XIX, World Congress, Lisabon, Portugal, , pp. 1128-1132, No. 480, septembar, 2009.
- [3] V. Vujičić, S. Milovančev, "Digitalni instrument za merenje srednje vrednosti proizvoda dava analogna periodična signala", YU patent, broj 48195, 1995.
- [4] V. Pjevalica, V. Vujičić, "Further Generation of Low-Frequency True-RMS Instrument", IMTC, pp. 1008-1011, May, 2005.
- [5] Branko Popović, "Osnovi elektrotehnike 2", Građevinska knjiga, Beograd, 1990.
- [6] P. Dobanovački, S. Skoko, "Električna merenja-praktikum laboratorijskih vežbi", Elektrotehnička škola "Mihajlo Pupin", Novi Sad, Srbija, 2016.

ABSTRACT

This paper presents a way of applying the measuring instrument VMP 20 in performing laboratory exercises in the subject of Electrical Measurements. The topic of the paper is reactive power compensation in a single-phase power supply system. The paper covers the basic theoretical principles of reactive power compensation and gives an overview of the laboratory exercise. The application of the VMP 20 instrument and the corresponding VMPCalc software has a special advantage in the organization of remote laboratory exercises - online, which is specifically indicated in the paper.

Application of the measuring instrument VMP 20 for a laboratory exercise - power factor correction

Isidora Sabadoš, Nemanja Vidović, Atila Juhas i Saša Skoko

Algoritam generisanja dvobitnih diterovanih Furijeovih bazisnih funkcija

J. Đorđević Kozarov, A. Juhas, P. Sovilj, *Member, IEEE*, V. Vujičić

Apstrakt — U radu je definisan algoritam generisanja dvobitnih diterovanih Furijeovih bazisnih funkcija (DDFBF) koje se koriste u SDDFT procesoru. Teorijski i eksperimentalno je potvrđena njihova ortonormiranost sto je prikazano u radu.

Ključne reči — Furijeova transformacija; Stohastika; Diter; Stohastička digitalna merna metoda.

I. UVOD

ORTOGONALNE transformacije imaju veliki značaj u merenjima i obradi signala, a najstarija i najviše korišćena je Furijeova. Posebno je značajna brza Furijeova transformacija (FFT) zbog velike redukcije broja neophodnih množenja (najkritičnije aritmetičke operacije) i memorije za njeno izvršenje.

Napredak tehnologije računarskih komponenti, posebno što se tiče brzine procesora i kapaciteta memorije, postepeno ističu u prvi plan i DFT kao alternativu koja ima nekoliko prednosti u odnosu na FFT:

- Koeficijenti Furijeovog razvoja se izračunavaju međusobno nezavisno i, po potrebi, pojedinačno;
- Izračunavanje može da se vrši istovremeno sa odmeravanjem – kad se završi sekvenca i DFT može da bude završena;
- Jednostavna je paralelizacija u izračunavanju DFT.

Nijednu od gore nabrojanih osobina nema FFT.

Najnoviji razvoj u primeni DFT u merenjima snage i energije u elektrodistributivnoj (ED) mreži je doveo do realizacije namenskog stohastičkog digitalnog DFT (SDDFT) procesora čija je optimalna verzija – dvobitni SDDFT procesor [1].

Ključna operacija, MAK (Multiply and Accumulate), se sada izvršava jednostavno na jednostavnom hardveru – množač se sastoji od 4 dvoulazna „i“ kola i dva dvoulazna „ili“ kola, dok je akumulator – običan „up/down“ brojač. Jednostavna struktura hardvera za izvršavanje dvobitne MAK operacije, posebno ako se primeni u FPGA realizaciji SDDFT procesora, omogućuje visoku paralelizaciju izračunavanja DFT i time postizanja velikih brzina obrade analiziranog signala. Sa druge strane, i dvobitna stohastička digitalna A/D konverzija (SAADK) je izuzetno jednostavna, tako da su i paralelna merenja jednostavna [2].

Jelena Đorđević Kozarov – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: kozarov@elfak.ni.ac.rs).

Atila Juhas – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: atila@uns.ac.rs).

U Literaturi [1] je dokazano da je u slučaju primene dvobitne SAADK optimalno primeniti dvobitne diterovane Furijeove bazisne funkcije. Problem generisanja dvobitnih diterovanih Furijeovih bazisnih funkcija (DDFBF) nije detaljnije elaboriran. Kod SDDFT visokog reda (preko 1000) taj problem postaje kritičan i zahteva posebnu pažnju.

II. ALGORITAM GENERISANJA DVOBITNIH BAZISNIH FUNKCIJA (AGDBF)

1. U memoriji su odmerci Furijeovih bazisnih funkcija (FBF) u floating-point formatu (FP). Treba ih pretvoriti u celobrojni format (CF). Biramo broj bita celobrojnog formata – recimo 32 bita.
2. Pošto je jedan bit – bit znaka – izabrani odmerak FBF u FP formatu množimo sa 2^{31} , primenjujemo funkciju ROUND i smeštamo odmerak u LongInt (LI) formatu. Time smo spremili odmerak FBF za diterovanje.
3. Odgovarajući odmerak uniformnog šuma (UŠ) onda ima 31 bit, a dobijamo ga iz funkcije Random u FP formatu u opsegu (0,1),
4. Od odmerka UŠ oduzmemo 0,5 u FP formatu, pomnožimo sa 2^{30} i primenimo funkciju ROUND.
5. Celobrojno saberemo ta dva celobrojna odmerka. Rezultat ima 31 bit + bit znaka.
6. Detektujemo bit znaka u zbiru i primenimo na rezultat funkciju ABS.
7. Ako je najznačajniji bit apsolutne vrednosti zbira 1, apsolutna vrednost odgovarajuće vrednosti dvobitne FBF je 1, a ako nije – onda je apsolutna vrednost dvobitne FBF jednaka nuli (0).
8. Na apsolutnu vrednost dvobitne FBF se vrati bit znaka i imamo kompletan dvobitni odmerak diterovane FBF.
9. Kompletan dvobitni digitalni odmerak FBF (DDFBF) dalje koristimo u Furijerovom razvoju.

III. EKSPERIMENTALNA POTVRDA ORTONORMIRANOSTI DDFBF

U radu [3] je strogo dokazana relacija (1):

$$\sigma_e^2(2) = \frac{1}{N} \cdot \frac{(2g)^2}{T} \int_0^T |f_1(t) \cdot f_2(t)| dt -$$

Platon Sovilj – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: platon@uns.ac.rs).

Vladimir Vujičić – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: vujiciv@uns.ac.rs).

$$-\frac{1}{N} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T f_1^2(t) \cdot f_2^2(t) dt \quad (1)$$

$\sigma_{\bar{e}}$ je preciznost merenja srednje vrednosti proizvoda dve funkcije, $y_1 = f_1(t)$ i $y_2 = f_2(t)$, dvobitnom SDMM na vremenskom intervalu $[0, T]$. U ED mreži, T je perioda mrežnog napona.

Normiranost DDFBF funkcija je eksperimentalno potvrđena, što je prikazano na slici 1. Teorijsko σ na toj slici je, zapravo, $\sigma = \sigma_{\bar{e}}(2)$ za $g=1$, $f_1(t) = f_2(t) = \sin(n\omega t)$ ili $\cos(n\omega t)$, $\{n = 1, 2, \dots, 32\}$, na 50 Hz sa 2048 semplova po periodu, tj. $N = 2048$. $\sigma_{\bar{e}}$ je usrednjeno σ na kompletom ansamblu od 64 norme u 236800000 tačaka na vremenskoj osi. \bar{e} je srednja vrednost greške svakog proizvoda odmeraka u 236800000 tačaka.

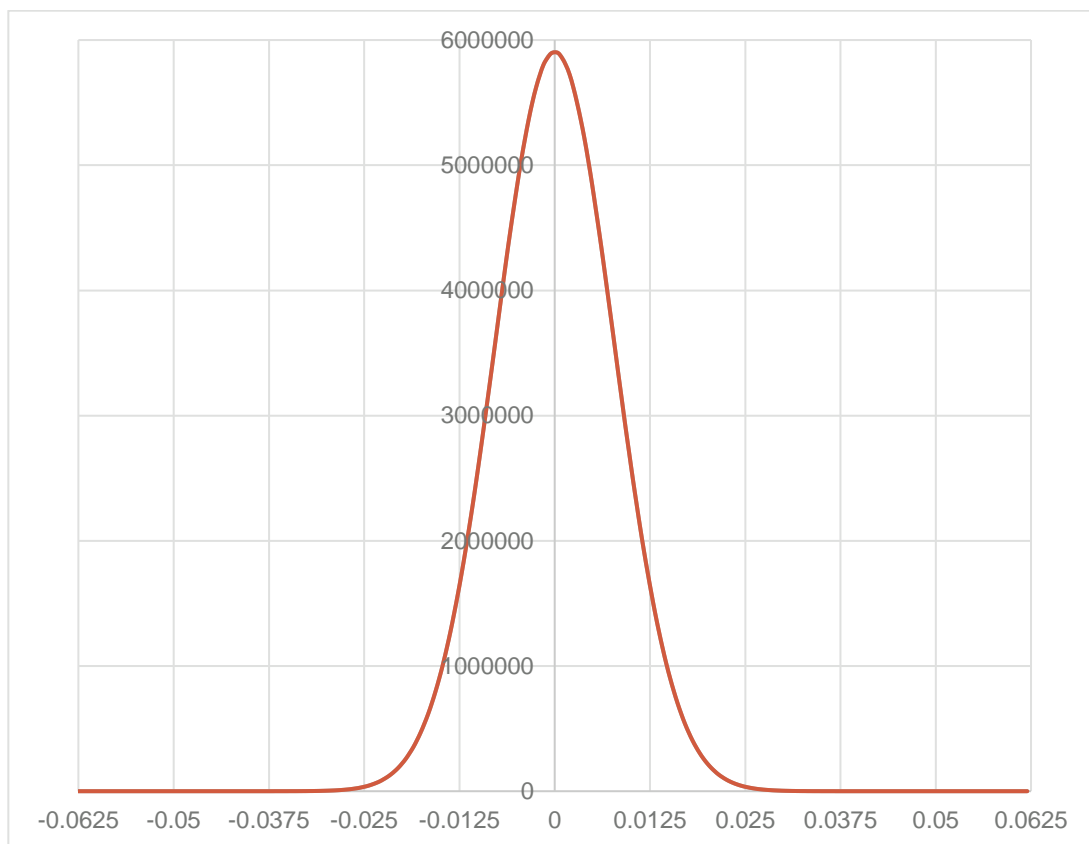
Ortogonalnost DDFBF funkcija je eksperimentalno potvrđena, što je prikazano na slici 2. Teorijsko σ na toj slici je,

zapravo, $\sigma = \sigma_{\bar{e}}(2)$ za $g=1$, $f_1(t) = \sin(n\omega t)$, $f_2(t) = \sin(m\omega t)$ ili $f_1(t) = \cos(n\omega t)$, $f_2(t) = \cos(m\omega t)$, $n, m \in \{1, 2, \dots, 32\}$ i $n \neq m$ na 50 Hz, sa 2048 semplova po periodu, tj. $N = 2048$. $\sigma_{\bar{e}}$ je usrednjeno σ na kompletom ansamblu od $2 \cdot \left[\binom{32}{2} - 32 \right] = 1742$ ortogonalne kombinacije u 236800000 tačaka na vremenskoj osi. \bar{e} je srednja vrednost grešaka svakog proizvoda odmeraka u 236800000 tačaka.

Ortogonalnost DDFBF funkcija je eksperimentalno potvrđena, što je prikazano na slici 3. $\sigma = \sigma_{\bar{e}}(2)$ za $g=1$, $f_1(t) = \sin(n\omega t)$, $f_2(t) = \cos(m\omega t)$, $n, m \in \{1, 2, \dots, 32\}$ i $n \neq m$, na 50 Hz, sa 2048 semplova po periodu, tj. $N = 2048$. Ovdje, $\sigma_{\bar{e}}$ je usrednjeno σ na kompletom ansamblu od $64^2 - 2 \cdot \left[\binom{32}{2} - 32 \right] - 64 = 2290$ ortogonalnih kombinacija u 236800000 tačaka na vremenskoj osi, dok je \bar{e} srednja vrednost grešaka svakog proizvoda odmeraka u 236800000 tačaka.

TABELA I
NUMERIČKA POTVRDA NORMIRANOSTI DDFBF

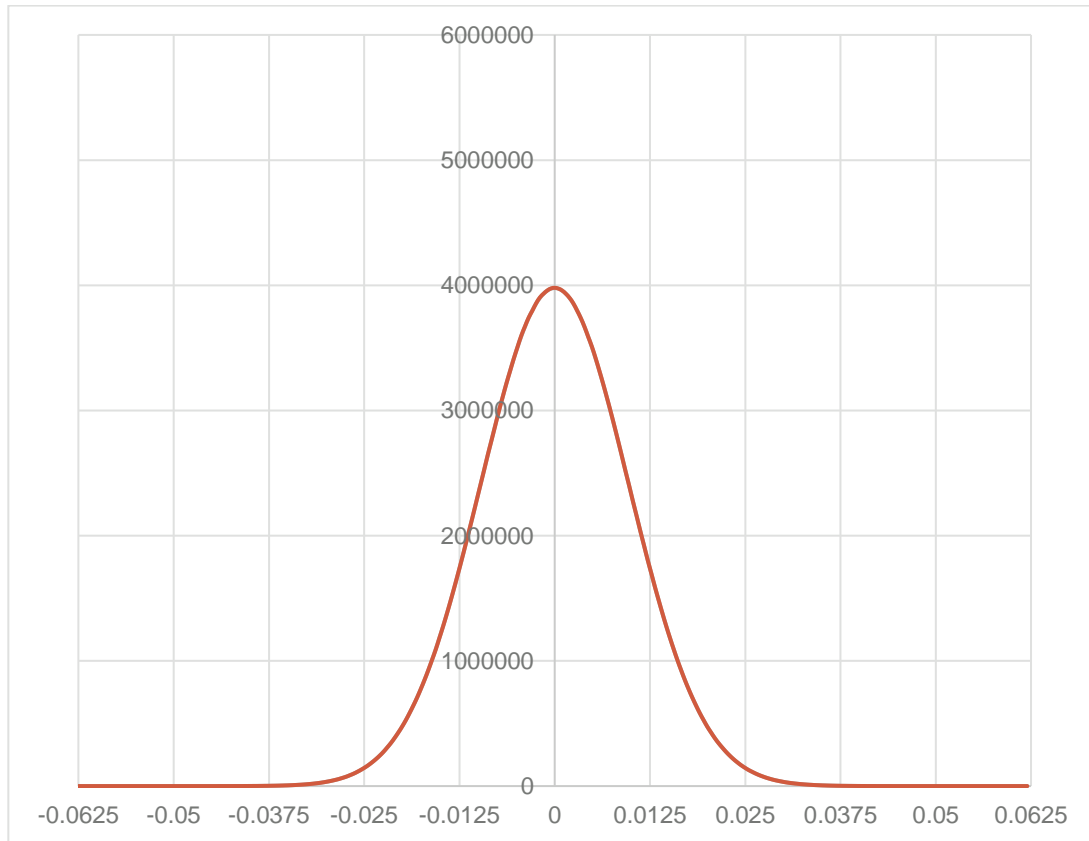
Broj semplova	Slučaj	Teorijsko σ formula	Teorijska vrednost σ	Eksperimentom dobijeno σ	$\frac{\sigma}{\sigma_{\bar{e}}}$	\bar{e}	$\frac{\bar{e}}{\sigma_{\bar{e}}}$	Broj tačaka
2048	a)	$\sigma_{\bar{e}} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{2}{N}} = \sqrt{\frac{1}{8N}}$	0.0078125	0.007814339	1.000235375	-5.37027E-07	-6.87394E-05	236800000



Sl.1. Grafička potvrda normiranosti DDFBF

TABELA II
NUMERIČKA POTVRDA ORTOGONALNOSTI DDFBF - 1

Broj semplova	Slučaj	Teorijsko σ formula	Teorijska vrednost σ	Eksperimentom dobijeno σ	$\frac{\sigma}{\bar{\sigma}}$	\bar{e}	$\frac{\bar{e}}{\sigma_{\bar{e}}}$	Broj tačaka
2048	b)	$\sigma_{\bar{e}} = \sqrt{\frac{8}{\pi} - 1} \cdot \sqrt{\frac{1}{8N}}$	0.009715431	0.009713238	0.999774324	-6.28933E-07	1984000005	236800000



Sl. 2. Grafička potvrda ortogonalnosti DDFBF - 1.

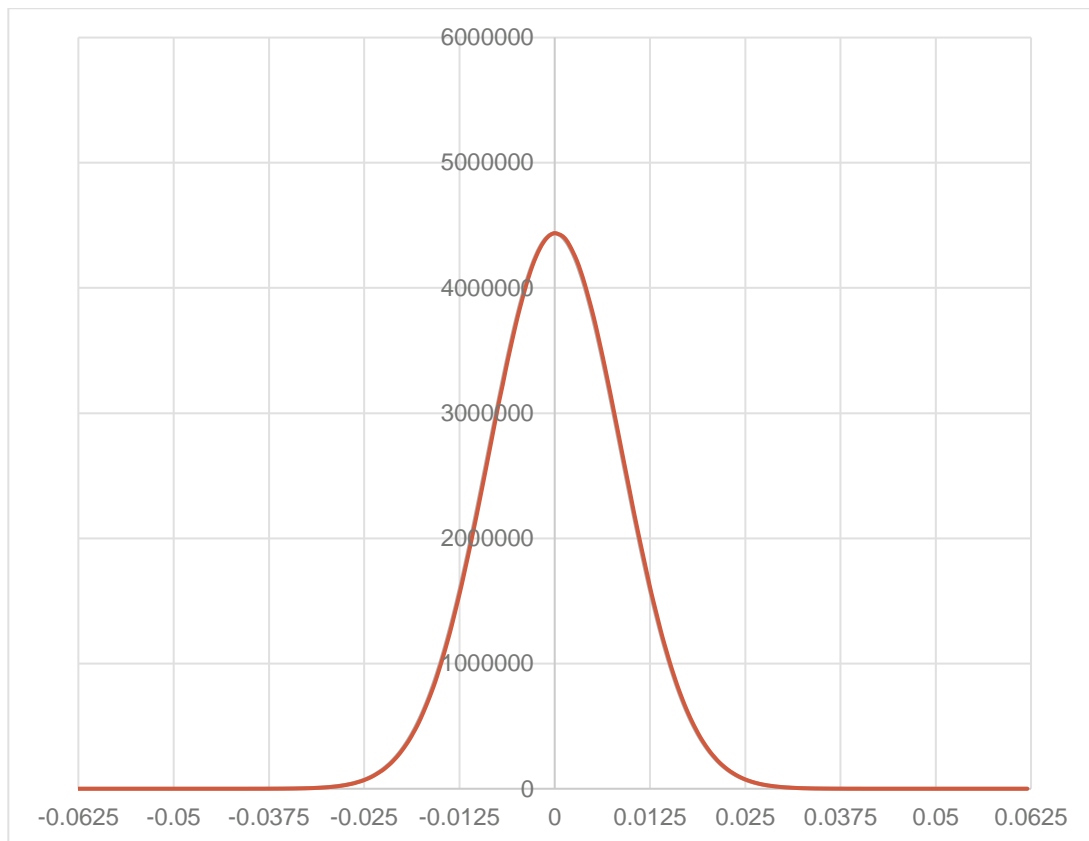
IV. ZAKLJUČAK

U radu je definisan algoritam generisanja digitalnih dvobitnih Furijeovih bazisnih funkcija (DDFBF). Na osnovu teorijskog kriterijuma granične preciznosti norme i ortogonalnosti, eksperimentalno je potvrđena ortonormiranost DFT sa 32 harmonika. Time je teorijski i eksperimentalno

dokazana korektnost opisanog algoritma generisanja. Eksperiment je bio vrlo detaljan i sveobuhvatan i za normiranost i za oba tipa ortogonalnosti. Izveden je u po 236800000 tačaka u svakoj od tri varijante ortonormiranosti. Slaganje teorijske i eksperimentalne preciznosti je vrlo prihvatljivo i sa velikom pouzdanošću stoji tvrdnja da je predloženi algoritam generisanja DDFBF – korektan.

TABELA III
NUMERIČKA POTVRDA ORTOGONALNOSTI DDFBF - 2

Broj semplova	Slučaj	Teorijsko σ formula	Teorijska vrednost σ	Eksperimentom dobijeno σ	$\frac{\sigma}{\bar{\sigma}}$	\bar{e}	$\frac{\bar{e}}{\sigma_{\bar{e}}}$	Broj tačaka
2048	c)	$\sigma_{\bar{e}} \leq \sqrt{2} \sqrt{\frac{8}{\pi} - 1} \cdot \sqrt{\frac{1}{8N}}$	0.013739694	0.008708729	0.633837169	1.22603E-04	8.92326E-03	198400000



Sl.3. Grafička potvrda ortogonalnosti DDFBF – 2

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] D. Pejic et al., "Stochastic Digital DFT Processor and Its Application to Measurement of Reactive Power and Energy", Measurement, vol. 124, pp. 494-504, Aug. 2018.
- [2] P Sovilj et al. "Synergy and Completeness of Simple A/D Conversion and Simple Signal Processing", J. Phys.: Conf. Ser., vol. 1379, paper no. 012064, July 2019.

- [3] V. Vujicic et al., "Stochastic Measurement of Wind Power using a Two-bit A/D Converter", Measurement, vol. 152, paper no. 107184, Feb. 2020

ABSTRACT

The paper defines an algorithm for generating two - bit dithered Fourier basis functions (DDFBF) used in an SDDFT processor. Theoretically and experimentally their orthonormalization was confirmed, which is shown in the paper.

Algorithm for two-bit dithered Fourier basis functions generating

J. Đorđević Kozarov, A. Juhas, P. Sovilj, V. Vujičić

Optimalna rezolucija stohastičkih embedid sistema

Dragan Pejić, Aleksandar Radonjić, Vladimir Vujičić

Sažetak-U radu se elaborira primena stohastičke digitalne merne metode (SDMM) u embedid sistemima. U literaturi je dokazano da je optimalna rezolucija SDMM trobitna i da je optimalni brojni sistem za primenu u obradi takođe trobitni. Ove činjenice su motivisale autore da analiziraju optimalne rezolucije stohastičke A/D konverzije, stohastičke obrade i stohastičke D/A konverzije.

Ključne reči-Stohastička merenja, embedid sistemi, analogno-digitalna konverzija, digitalno-analogna konverzija.

I. UVOD

U zadnjih nekoliko godina, u akademskim krugovima, ali i u industriji, veliku pažnju privlači koncept stohastičkog računanja (SR). Najsveobuhvatniji prikaz ove teme dat je u [1]. Autori tog rada su prikazali načine primene stohastičkog računanja (SR) u embedid sistemima, ali i na koji način se celobrojna aritmetika može kombinovati sa stohastičkom analogno-digitalnom (A/D) konverzijom [2]. Cilj ovog rada jeste da se pomenute teme prodube, odnosno da se da dodatni doprinos teoriji stohastičkih embedid sistema.

II. STOHAŠTIČKA ANALOGNO-DIGITALNA KONVERZIJA

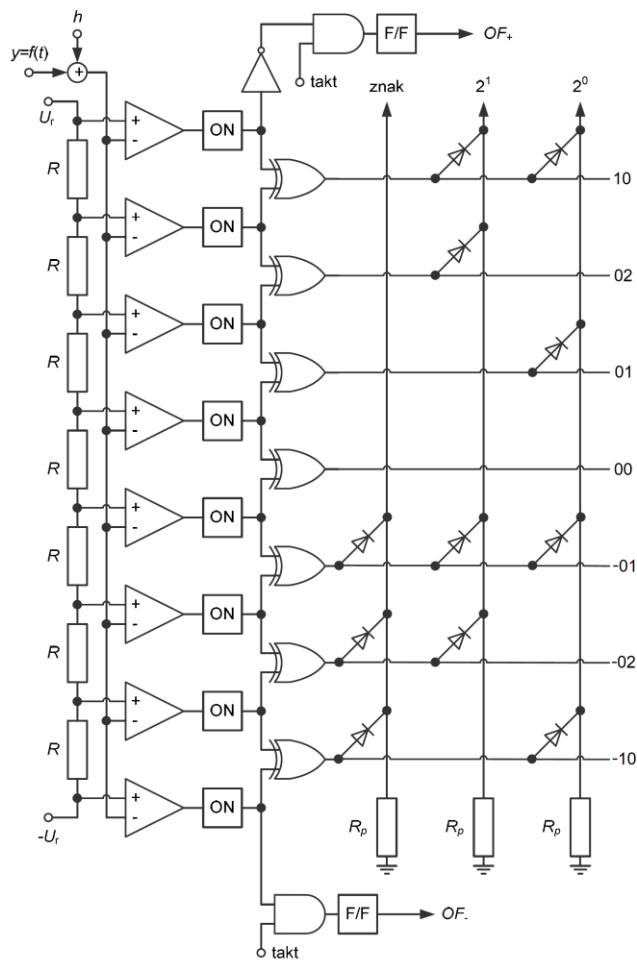
Kao što je već navedeno, u [1] je dat detaljan pregled SR metoda. Međutim, zbog svoje sveobuhvatnosti, pomenuti rad obuhvata teme koje se, u suštini, ne bave SR, već nekim drugim temama, kao što je stohastička A/D konverzija. Primer za to jeste i rad [2], gde se analogni uniformni diter dodaje ulaznom signalu pre njegove digitalizacije pomoću dvobitnog A/D konvertora (slika 1). Dakle, stohastika je prisutna na ulazu u sistem, dok su procesi obrade signala potpuno deterministički. Rezultat ovakvog pristupa jeste činjenica da ulazna veličina (signal) ima mali nivo slučajnosti, ali se zato meri sa velikom preciznošću i tačnošću.

Stohastička A/D konverzija je još uočljivija u [3]-[6], gde se koriste višebitni A/D konvertori. U svim slučajevima, blokovi za obradu signala su deterministički, iako bi se mogli realizovati i na stohastički način. Kada bi se tako nešto uradilo, pojednostavila bi se hardverska struktura uređaja, ali bi se značajno smanjila preciznost merenja zbog dužeg vremena računanja. S obzirom da se stohastika primenjuje na ulaznim podacima, korišćenje aritmetike sa pokretnim zarezom ne bi imalo smisla, jer se adekvatna preciznost rezultata može postići samo u dovoljno dugom vremenskom periodu. To se, inače, već postiže celobrojnom aritmetikom, što su potvrdili rezultati simulacija [3]-[6].

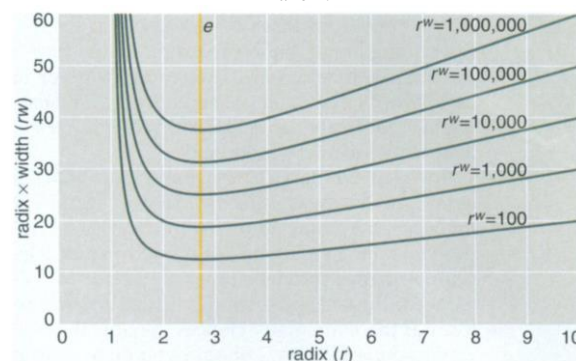
Dragan Pejić, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Novi Sad, Srbija (i-mejl: pejicdra@uns.ac.rs)

Aleksandar Radonjić, Institut tehničkih nauka SANU, Beograd, Srbija (i-mejl: sasa_radonjic@yahoo.com)

Vladimir Vujičić, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Novi Sad, Srbija (i-mejl: vujiciv@uns.ac.rs)

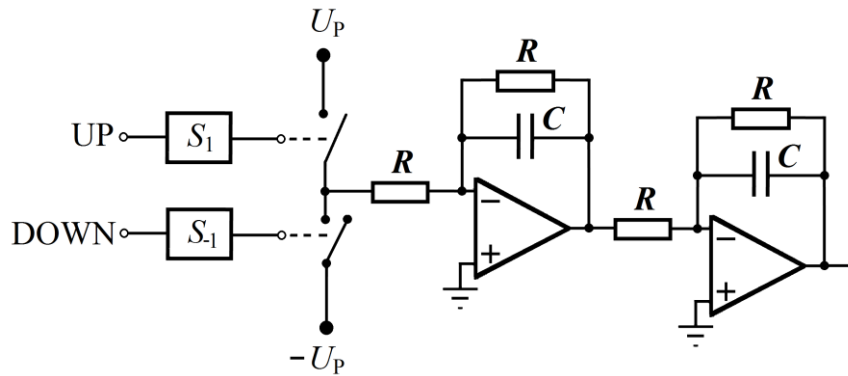


Sl.1. Šema trobitnog diterovanog A/D konvertora sa binarnim i ternarnim izlazom.



Sl. 2. Zavisnost cene primene od brojne osnove r i opsega računara r^w [8].

U [6] je pokazano kako kombinacija dvobitne stohastičke A/D konverzije i celobrojne aritmetike (visoke rezolucije) omogućava precizno merenje veoma važne vrednosti u električnoj mreži: osnovne frekvencije. Prednost pomenutog pristupa je uklanjanje celobrojnog množenja u FIR filtru. Ova činjenica nas navodi na zaključak da u embedid sistemima mogu postojati četiri načina digitalizacije i obrade signala: A/D konverzija i determinističko računanje (DR),

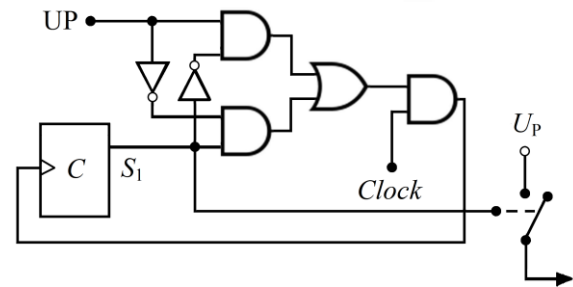


Sl. 3. Inherentno dvo-bitni stohastički analogni AC / DC transfer [7].

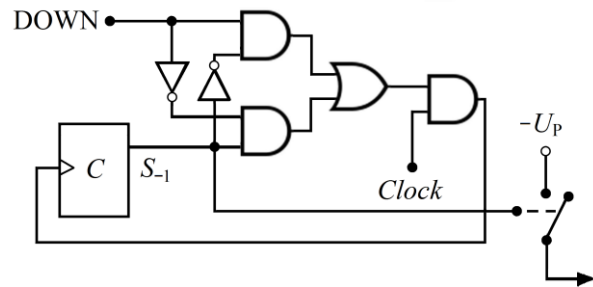
A/D konverzija i SR, stohastička A/D konverzija i DR, i stohastička A/D konverzija i SR. Poslednja kombinacija ima najjednostavniji hardver, i veoma je pogodna za primenu u embedid sistemima koji mere, nadgledaju ili regulišu spore procese (hemijski i biološki procesi) u poljoprivredi i zaštiti životne sredine. Jednostavan hardver znači i da minimalno korišćenje energije, što embedid sisteme, zasnovane na SR i stohastičkoj A/D konverziji čini pogodnim za realizaciju u formi autonomnog baterijskog-napajanoog ASIC čipa.

III. OPTIMALNA STOHAŠTIČKA OBRADA

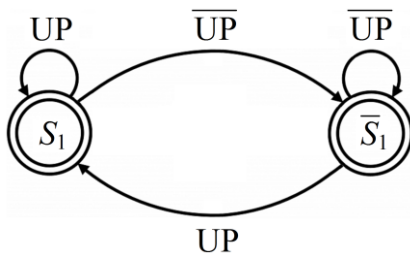
Još od rane faze razvoja računara povela sa diskusija o optimalnom brojnom sistemu koji bi se koristio u računarima. Rezime tih diskusija je dat u članku [8]. Eksplicitno je utvrđeno da je brojni sistem sa osnovom e ($e \approx 2,718$) najekonomičniji sa stanovišta zapisa u memoriji, pretraživanja i obrade. Kako brojna osnova mora biti ceo broj, najbliži ceo broj je 3, pa svi zaključci koji se odnose na brojnu osnovu e se ostvaruju usvajanjem brojne osnove (modula, radix-a) 3. To je prikazano na slici 2. Vrlo rano je razvijena i ternarna Bulova algebra, tako da, generalno, ternarni brojni sistem i ternarna obrada su najekonomičniji sa stanovišta obrade.



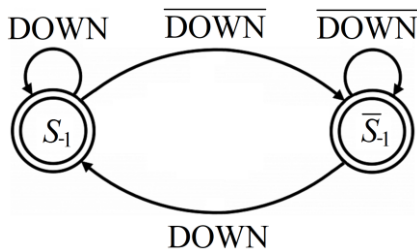
Sl. 6. Logički prikaz mašine stanja S_1 [7].



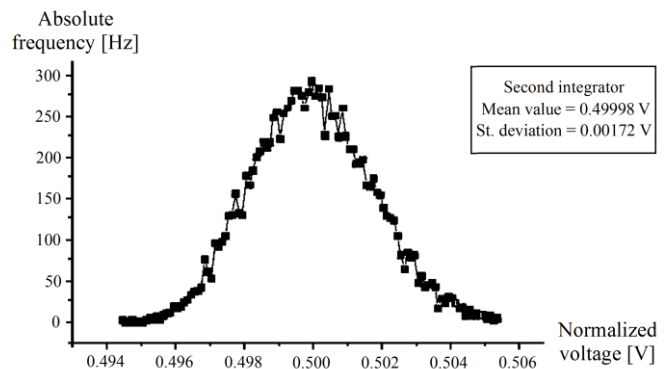
Sl. 7. Logički prikaz mašine stanja S_{-1} [7].



Sl. 4. Grafički prikaz mašine stanja S_1 [7].



Sl. 5. Grafički prikaz mašine stanja S_{-1} [7].



Sl. 8. Izlaz drugog analognog integratora u slučaju sinusoidalnog ulaza u uređaj [7].

Da li je bolja stohastička obrada, u prvom redu računanje, binarna ili ternarna, je jednostavno utvrditi po analogiji sa njihovim determinističkim analogonima - bolja je ternarna.

Kako je stohastički embedid sistem vrlo složen tehnički entitet, koji se sastoji od tri podsistema: ulaza (A/D konverzija), bloka za obradu (realizacija algoritama i računanje) i izlaza (D/A konverzija), a na osnovu poznate Pontijaginove teoreme - optimum sistema se nikada ne

poklapa sa optimumom bilo kog njegovog podsistema - gotovo je neverovatan rezultat istraživanja [9] da je ternarni izlaz iz SAADK sa slike 1 takođe optimalan. Već na osnovu te činjenice vredi razmisliti i o ternarnom SAADK. U tom slučaju je kompletan stohastičke embedid sistem ternaran. To je nepobitna činjenica, a najnoviji razvoj FPGA tehnologije nudi velike mogućnosti njegove realizacije.

IV. STOCHASTIČKA DIGITALNO-ANALOGNA KONVERZIJA

Treća važna funkcija embedid sistema je digitalno-analogni (D/A) konverzija. U stohastičkim embedid sistemima ona se lako izvršava pomoću analognih filtera. To je sintetički prikazano na slici 3, dok su ostali detalji prikazani na slikama 4-8 u slučaju dvobitnog stohastičkog embedid sistema. U [7] je pokazano da je za postizanje jednostavnog, robusnog i preciznog AC/DC transfera dovoljno koristiti dvobitni stohastički A/D konvertor, dvobitni deterministički blok za obradu signala i jednostavan inherentno stohastički dvobitni D/A konvertor na ulazu u analogni filter drugog reda (redno vezana dva analogna integratora sa gubicima). Potpuno analogno se može uraditi ternarna stohastička DA konverzija trobitnim izlazima iz ternarnog bloka za obradu.

V. ZAKLJUČAK

U radu je pokazano da stohastička ternarna A/D konverzija znatno pojednostavljuje hardver embedid sistema. Istraživanje i analiza metoda, zasnovanih na ternarnoj stohastičkoj A/D konverziji, dovelo bi do dodatnog unapređenja embedid sistema. Prednosti bi bile slične onima kod ternarnog SR-a. Sinergijski efekat kombinovane primene ternarne SR i ternarne stohastičke A/D konverzije nudi velike mogućnosti za dodatno pojednostavljenje hardvera embedid sistema sa svim prednostima koje ova činjenica podrazumeva. Ternarna stohastička DA konverzija je potpuno ostvarljiva na analogan način binarnoj.

LITERATURA

- [1] A. Alaghi and J. P. Hayes, "Survey of Stochastic Computing," *ACM Trans. Embedded Comput. Syst.*, vol. 12, no. 2s, pp. 1-19, May 2013.
- [2] D. Pejic and V. Vujicic, "Accuracy Limit of High Precision Stochastic Watt-Hour Meter," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 49, no. 3, pp. 617-620, Jun. 2000.
- [3] V. Vujicic, "Generalized Low-Frequency Stochastic True RMS Instrument," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 50, no. 5, pp. 1089-1092, Oct. 2001.
- [4] V. Pjevalica and V. Vujicic, "Further Generalization of the Low-Frequency True-RMS instrument," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, no. 3, pp. 736-744, Mar. 2010.
- [5] P. Sovilj, S. Milovancev, and V. Vujicic, "Digital Stochastic Measurement of a Nonstationary Signal with an Example of EEG Signal Measurement," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 60, no. 9, pp. 3230-3232, Sep. 2010.
- [6] A. Radonjic, P. Sovilj, and V. Vujicic, "Stochastic Measurement of Power Grid Frequency Using a Two-Bit A/D Converter," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no. 1, pp. 56-62, Jan. 2014.
- [7] V. Vujicic and D. Pejic, "Inherently Digital Stochastic Analog AC to DC Transfer," in: *Proc. IMTC 2001*, vol. 3, pp. 2070-2073, May 2001.
- [8] Brian Hayes, "Computing Science: Third Base," *American Scientist*, vol. 89, no. 6, pp. 490-494, Nov.-Dec. 2001.
- [9] M. Urekar, Contribution to the optimization of digital measurements performance (in Serbian), Ph.D. dissertation, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad.

ABSTRACT

The paper elaborates the application of stochastic digital measurement method (SDMM) in embedded systems. It has been proven in the literature that the optimal SDMM resolution is three-bit and that the optimal number system for application in signal processing is also three-bit. These facts motivated the authors to analyze the optimal resolutions of stochastic A/D conversion, stochastic processing, and stochastic D/A conversion.

Optimal resolution of stochastic embedid systems

Dragan Pejic, Aleksandar Radonjic and Vladimir Vujicic

Идејни пројекат генератора аналогног дискретног униформног шума

Бојан Вујичић, Драган Пејић, Александар Радоњић, Владимир Вујичић

Сажетак- У раду се предлаже идеја генератора аналогног дискретног униформног шума (ГАДУШ) за примену у стохастичкој дигиталној мерној методи. Предложеним решењем, за разлику од стандардног, које користи генератор случајних бројева и прецизни и тачни дигитално-аналогни конвертор (ДАК), се превазилази проблем ограничене резолуције ДАК-а и његов узак пропусни опсег.

Кључне речи- Стохастичка дигитална мерна метода, генератор аналогног дискретног униформног шума, дигитално-аналогна конверзија.

I. УВОД

Основни мотив за ово истраживање и писање овог рада је потреба за квалитетним генератором аналогног дискретног униформног шума (ГАДУШ) који би нашао примену у стохастичким дигиталним мерењима (СДМ) [1]-[6]. У [5] је дата строга дефиниција једноставне аналогно-дигиталне (А/Д) конверзије и једноставне обраде сигнала у оквиру једноставне СДМ методе (СДММ). Обе су или једнобитне или двобитне. Ова чињеница имплицира једноставан хардвер и свега пар извора систематске грешке у једноставној СДММ који се лако идентификују и елиминишу [3], [7]. Изузетна тачност је најважнија перформанса једноставне СДММ.

С друге стране, сваки нови бит у СДММ је еквивалентан примени приближно четири пута брже технологије [8]. Ово убрзање се плаћа дупло сложенијим хардвером, а самим тим и дупло већим бројем извора систематске грешке. Оптимална резолуција СДММ је три бита [8]. Тада ефективно убрзање технологије износи девет пута у односу на двобитну СДММ. Привлачна је, стога, идеја врло тачног мерења тробитном СДММ, или, уопште, вишебитном СДММ. Та идеја није предмет овог рада.

У [9] је дат кратак преглед инструмената у којима је примењена једноставна СДММ. Општа особина свих тих инструмената је велика тачност али не само она. Једноставан хардвер имплицира и велике могућности паралелног мерења и паралелне обраде сигнала. У [9] је наведена могућност детекције основног и најзначајнијег вишег хармоника у клизећем прозору од половине периоде мрежног напона, док је у [10] описана примена једноставне СДММ у решавању проблема редукције велике количине података у електро-дистрибутивној (ЕД) мрежи.

Бојан Вујичић, Факултет техничких наука Нови Сад, Нови Сад, Србија (и-мејл: bojanvujic@uns.ac.rs)

Владимир Вујичић, Факултет техничких наука Нови Сад, Нови Сад, Србија (и-мејл: vujiciv@uns.ac.rs)

Александар Радоњић, Институт техничких наука САНУ, Београд, Србија (и-мејл: sasa_radonjic@yahoo.com)

Драган Пејић, Факултет техничких наука Нови Сад, Нови Сад, Србија (и-мејл: pejicdra@uns.ac.rs)

У свим варијантама СДММ је неопходан елемент ГАДУШ. Поновимо још једном општу дефиницију СДММ у којој се то и експлицитно види. СДММ је: дигитално мерење средње вредности производа два сигнала на временском интервалу када се сваком од сигнала пре АД конверзије дода шум униформне расподеле у опсегу +/- половине кванта АД конвертора. Шумови на оба канала морају бити међусобно некорелисани а средња вредност сваког од њих мора бити нула. Усредњавају се, не дигитални одмерци, него производи парова одмерака. Све остало је или специјалан случај горе наведене дефиниције или њена директна генерализација.

II. ПРОЈЕКТНА ИДЕЈА ГАДУШ-А

Термички или Никвистов шум у отпорнику има Гаусову густину вероватноће расподеле:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{\sigma}\right)^2} \quad (1)$$

Претпоставимо, сада, да је шум x могуће линеарно појачати k пута у опсегу од интереса (бар у 3σ). Тада за појачани шум важи:

$$f(kx) = \frac{1}{k \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{kx}{k\sigma}\right)^2} \quad (2)$$

У $x \leq x_g \approx 0$ околини $x = 0$, $kx = 0$ је фактор одступања Q Гаусове расподеле од униформне:

$$Q = \frac{1}{2} \cdot \frac{f(k \cdot 0) - f(k \cdot x_g)}{f(k \cdot 0)} \approx \frac{1}{4} \cdot \frac{x_g^2}{\sigma^2} \quad (3)$$

У Табели 1 су приказане карактеристичне вредности x_g , односно kx_g у зависности од изабраног фактора одступања Q (напомена: $k = 10^5$ и $\sigma = 10^{-6}V$).

ТАБЕЛА 1
ЧЕТИРИ КАРАКТЕРИСТИЧНЕ ВРЕДНОСТИ x_g И kx_g

Q	x_g [V]	kx_g [V]
0.001	$6.32 \cdot 10^{-8}$	$6.32 \cdot 10^{-3}$
0.0001	$2 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-3}$
0.00001	$6.32 \cdot 10^{-9}$	$6.32 \cdot 10^{-4}$
0.000001	$2 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-4}$

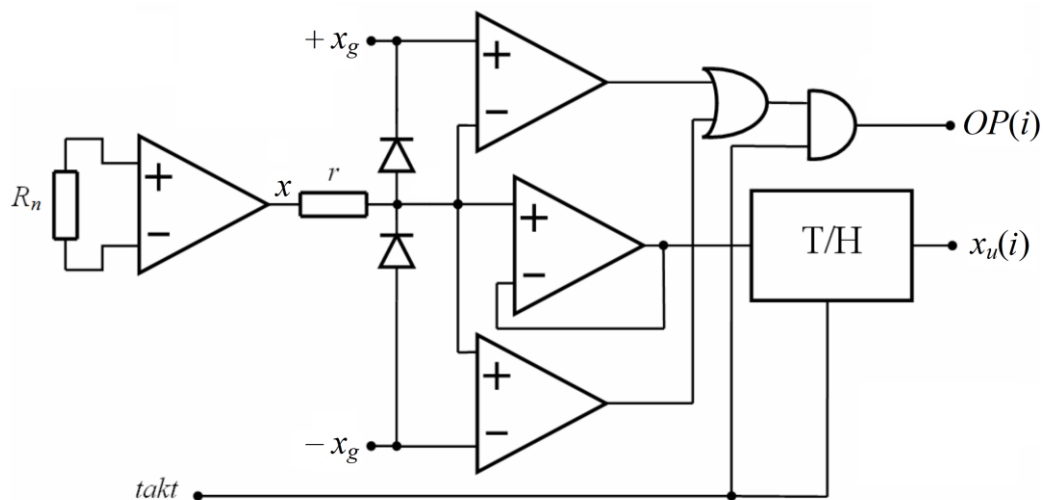
III. ПОСТАВКА ПРОБЛЕМА

Теорија и досадашња искуства су показала да ГАДУШ мора имати следеће особине:

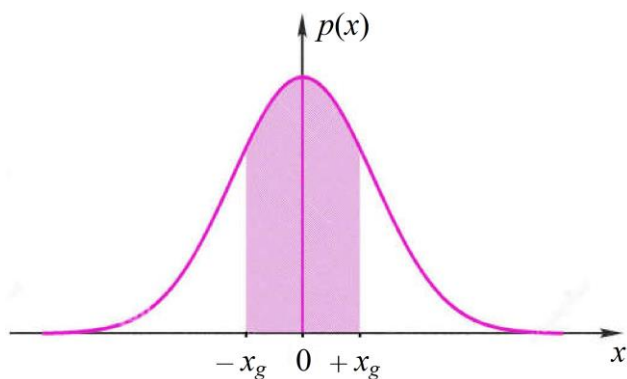
1) ГАДУШ мора да генерише напон стварно униформне расподеле,

2) Одмерци ГАДУШ-а морају бити међусобно некорелисани – аутокорелациона функција излаза ГАДУШ-а мора бити нула,

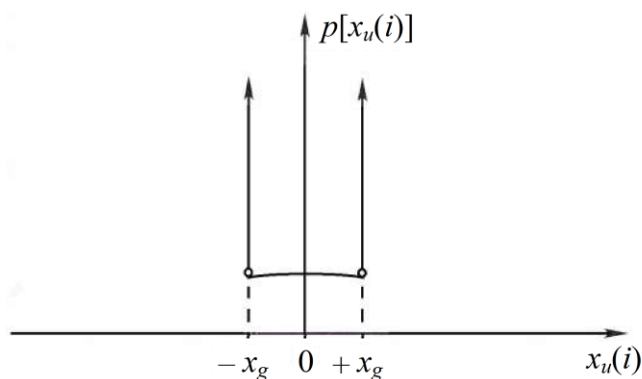
3) Одмерци ГАДУШ морају бити у опсегу једног кванта стохастичког адиционог А/Д конвертора



Слика 1. Предлог новог ГАДУШ-а.



Слика 2. Гаусова функција густине расподеле вероватноће (облик Никвистовог отпорничког шума).



Слика 3. Функција густине расподеле вероватноће на излазу из Т/Н кола.

(СААДК),

4) Одмерци морају бити распоређени униформно у интервалу времена,

5) Одмерци морају бити аналогни морају да имају бесконачно велику резолуцију).

Само такав ГАДУШ може заменити постојеће решење засновано на генератору случајних бројева и ДА конвертору и, евентуално, превазићи његова ограничења. У постојећем решењу је уско грло ДА конвертор, посебно, његов пропусни опсег [11].

Аналогни дискретни случајни одмерци на његовом излазу се сврставају у две класе: а) неуниформни случајни одмерци када излазни бинарни класификациони сигнал $OP(i)$ има вредност 0 (лаж) и б) униформни случајни одмерци када излазни бинарни класификациони сигнал има вредност 1 (истина). За дигитално мерење и дигиталну обраду сигнала се користе само одмерци из класе б). Одмерци из класе а) се игноришу – не обрађују се.

Извор шума је отпорник а термички шум у отпорнику има нормалну (Гаусову) функцију густине расподеле вероватноће са средњом вредношћу нула. У довољно уским симетричним границама $|x| < |x_g|$ око нуле Гаусова расподела је униформна. Термички шум из отпорника се снажно напонски појачава и преко редног отпорника доводи на симетрични двострани диодни ограничавач. Када је тренутна вредност појачаног термичког шума

унутар граница $|x| < |x_g|$, диоде су закочене и излазни бинарни класификациони сигнал има вредност 1. Тада тренутна вредност појачаног термичког шума иде у даљу обраду. Када је тренутна вредност појачаног термичког шума изван горенаведених граница, излазни бинарни класификациони сигнал има вредност 0, сама тренутна вредност појачаног термичког шума се преко редног отпорника своди на граничну вредност увећану за пад напона на диоди и игнорише се – не иде у даљу обраду.

Важан елемент у овој идеји је коло за праћење и задршку (енгл. Track & Hold – Т/Н). Ако су симетричне границе диодног ограничавача уске, тј. ако $|x_g| \rightarrow 0$, онда Т/Н коло може да ради на врло високој учестаности и тиме се превазилази проблем уског пропусног опсега ГАДУШ-а. Чињеница да су одмерци аналогни имплицира да је у овом ГАДУШ-у превазиђен и проблем ограничене резолуције претходних решења. Дигитални генератор такта дефинише посматране дискретне тренутке у обе класе одмерака.

IV. ДИСКУСИЈА

Са слика 2 и 3 је јасно да уколико су симетричне границе $|x_g| \rightarrow 0$ уже, расподела приказана на слици 3 је ближа униформаној у области $|x| < |x_g|$. Више технолошких параметара утиче на употребљивост ове идеје реализације ГАДУШ-а. У првом реду, то је начин

реализације и пропусни опсег Т/Н кола. Уколико је вредност $|x_g|$ мала у односу на напонски опсег улаза у Т/Н коло, његов фреквентни опсег се може повећати два до три реда величине тако да и ретки догађаји, каква је вероватноћа $p(|x| < |x_g|)$, могу да имају прихватљиву учесталост. Прелиминарне анализе су показале да учесталост таквог догађаја може да иде, са доступном технологијом Т/Н кола, до 20 МHz. Искрпна анализа тог проблема превазилази оквире овог рада. Предлог, изнет у раду, је намењен научној и стручној јавности у области мерења и метрологије, јер за више од реда величине подиже фреквентни опсег СДММ и обезбеђује аналогну (бесконечно велику) резолуцију дитерског сигнала.

V. ЗАКЉУЧАК

У раду је изнет предлог идеје новог генератора аналогног дискретног униформног шума. Дата је његова идејна хардверска шема, описан је принцип његовог рада и наведене су његове главне предности: бесконачно велика резолуција и бар за ред величине већи фреквентни пропусни опсег. Озбиљан инжењерски напор и труд мора бити уложен да би се од њега направило решење које и по осталим параметрима мора да буде на нивоу стандардног решења, а то је, у првом реду, тачност.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] V. Vujicic *et al.*, "Low frequency stochastic true RMS instrument", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 48, no. 2, pp. 467-470, Apr. 1999.
- [2] V. Vujicic *et al.*, "Measurement in a point versus measurement over an interval", *Proc. of the IMEKO XIX World Congress*, pp. 1128-1132, Sep. 2009.
- [3] M. Urekar *et al.*, "Accuracy Improvement of the Stochastic Digital Electrical Energy Meter," *Measurement*, vol. 98, pp. 139-150, Feb. 2017.
- [4] D. Pejic *et al.*, "Stochastic Digital DFT Processor and Its Application to Measurement of Reactive Power and Energy," *Measurement*, vol. 124, pp. 494-504, Aug. 2018.
- [5] P. Sovilj *et al.*, "Synergy and completeness of simple A/D conversion and simple signal processing," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 127, Nov. 2019.
- [6] V. Vujicic *et al.*, "Mathematical Basis of the Stochastic Digital Measurement Method", *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Stochastic Processes and Algebraic Structures*, pp. 55-56, Oct. 2019.
- [7] V. Vujicic *et al.*, "Stochastic Measurement of Wind Power using a Two-bit A/D Converter", *Measurement*, vol. 152, paper no. 107184, Feb. 2020.
- [8] M. Urekar, Contribution to the optimization of digital measurements performance (in Serbian), Ph.D. dissertation, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad.
- [9] V. Vujicic, D. Pejic and A. Radonjic, "A brief overview of stochastic instruments for measuring flows of electrical power and energy", *FU Elec. Energ.*, vol. 32, no. 3, pp. 439-448, Sept. 2019.
- [10] V. Vujicic *et al.*, "Measurement in Fourier domain - a Natural Method of Big Data Volume Reduction", *Proc. of the 6th Int. Conf. on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2019)*, pp. 471-474, June 2019.
- [11] Analog Devices Inc., AD5791 Series Digital to Analog Converters, <https://www.analog.com/en/products/ad5791.html#>

ABSTRACT

The paper proposes the idea of an analog discrete uniform noise generator for application in the stochastic digital measurement method. The proposed solution, unlike the standard one, which uses a random number generator and a precise and accurate digital-to-analog converter (DAK), overcomes the problem of limited DAK resolution and its narrow bandwidth.

Preliminary design of analog discrete uniform noise generator

Bojan Vujicic, Dragan Pejic, Aleksandar Radonjic and Vladimir Vujicic

Primer daljinskog merenja sinusoidalnih signala instrumentom VMP20

Jovan Ničković, Jelena Đorđević Kozarov, Radoje Jevtić i Atila Juhas

Apstrakt— Monofazni analizator snage VMP20 koristi se za realizaciju nastave u Laboratoriji za elektroenergetiku u ETŠ „Nikola Tesla“ u Nišu. U radu je prikazana realizacija laboratorijske vežbe, koja se izvodi u okviru predmeta Merenja u elektroenergetici. Dobljeni rezultati su prikazani tabelarno. U radu se, takođe, opisuje i daljinsko merenje sinusoidalnih signala u ED mreži korišćenjem VMP20 monofaznog analizatora snage. Demonstracija on-line prikaza mrežnog napona i frekvencije realizovana je na samoj konferenciji ETRAN 2021.

Cljučne reči— Monofazni analizator snage VMP20; Daljinsko merenje; Merenje sinusoidalnih signala u ED mreži.

I. UVOD

RAZVOJ metoda za digitalno stohastičko merenje stacionarnih signala opisan je u literaturi [1-4]. Opisana stohastička digitalna merna metoda (SDMM) karakteriše se izuzetno jednostavnim, robusnim i pouzdanim hardverom visoke tačnosti. SDMM omogućava potpuno paralelna merenja, kao i paralelnu obradu mernih podataka. S obzirom da SDMM koristi dvobitne fleš A/D konvertore, propusni opseg je vrlo širok, dok se ključna operacija u obradi podataka MAC (Multiply and Accumulate) izvodi u jednom taktu zahvaljujući jednostavnom hardveru. Posledica toga je velika brzina obrade izmerenih podataka u vremenskom i frekventnom domenu, što omogućava i vrlo efikasan nadzor nad elektrodistributivnom (ED) mrežom i tehnološkim procesima [5].

II. INSTRUMENT VMP20

Instrument VMP20, monofazni analizator snage, projektovan je na Katedri za električna merenja, pri Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, i proizveden 1996. godine. Baziran je na patentu [6] i namenjen je merenjima u ED mreži na mrežnoj frekvenciji od 50 Hz. Direktno meri napon, struju i aktivnu snagu (direktan prikaz na displeju), a indirektno meri frekvenciju, impedansu, reaktivnu snagu, prividnu snagu, aktivnu i reaktivnu energiju

Jovan Ničković – ETŠ “Nikola Tesla”, Aleksandra Medvedeva 18, 18000 Niš, Srbija (e-mail: jovan@etstesla.ni.ac.rs).

Jelena Đorđević Kozarov – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: kozarov@elfak.ni.ac.rs).

Radoje Jevtić – ETŠ “Nikola Tesla”, Aleksandra Medvedeva 18, 18000 Niš, Srbija (e-mail: milan.jvtc@gmail.com).

Atila Juhas – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija, (e-mail: juhiatti@gmail.com).

(dobijaju se uz pomoć softvera na računaru). Instrument ima dva „plivajuća“ kanala - strujni i naponski. Oba kanala su baždarena sinusnim veličinama, na frekvenciji od 50 Hz. Tačnost merenja napona i struje je 0,5% FS, aktivne snage je 1% FS i frekvencije je 0,02% FS. Dometi su 400 V na naponskom, odnosno 5 A na strujnom kanalu. Na Sl. 1 prikazan je instrument VMP20.



Sl. 1. Instrument VMP20 – monofazni analizator snage

Na displeju instrument pokazuje napon u voltima, struju u amperima, aktivnu snagu u vatima i apsolutnu vrednost faktora snage sa najviše 3 značajne cifre. Klasa faktora snage je 2% od punog opsega. Instrument sračunava i prikazuje na displeju apsolutnu vrednost faktora snage.

Sve četiri veličine koje se mere (napon, struja, aktivna snaga i frekvencija) su predstavljene svojim srednjim vrednostima u 100 perioda mrežne učestanosti, dakle u dvosekundnom vremenskom intervalu. Merenje je sinhronizovano sa učestanošću mrežnog napona.

A. Softver VMPCalc

Pored instrumenta realizovan je i softver za podršku VMPCalc, koji se koristi za dodatnu obradu podataka dobijenih merenjem instrumentom VMP20. Monofazni instrument VMP20 u jednoj fazi direktno meri, koristeći SDMM, efektivne vrednosti napona i struje, aktivnu snagu i frekvenciju mrežnog napona. Izmerene vrednosti se pomoću povezanog PC računara pohranjuju u bazu podataka svake sekunde.

Program VMPCalc obrađuje snimljene podatke i izračunava prividnu snagu, faktor snage, moduo impedanse, Fryze-ovu reaktivnu snagu. Sve podatke, i izmerene i izračunate, izvozi u Excel tabele sa grafikonima.

Program VMPCalc, osim izvoza izmerenih i izračunatih podataka u tabele, izračunava srednje vrednosti, minimum, maksimum i standardnu devijaciju svih direktno izmerenih i izračunatih veličina, kao i maksimalne petnaestominutne prosečne vrednosti aktivne snage (vršna snaga), reaktivne

snage, prividne snage i struje. Sve ove podatke snima kao kratak izveštaj obrade.

U bazi podataka je moguće uzeti proizvoljni vremenski podinterval, u kojem je moguće izračunati aktivnu energiju EP , reaktivnu energiju EQ i prividnu energiju ES .

S obzirom da se u bazu podataka svake sekunde upisuju aktuelni mereni podaci, zapisi o snagama i -te sekunde (P_i , Q_i i S_i) bročano su jednaki energijama za taj vremenski interval od jedne sekunde (EP_i , EQ_i , ES_i). Energije se mogu izračunati kao prosta suma svih pojedinačnih energija unutar izabranog vremenskog intervala. Ovaj način je pogodan za računanje energija pomoću Excel tabela.

U kratkom izveštaju koriste se proračuni dobijeni programom VMPCalc, koji računaju srednje vrednosti aktivne snage P_{sr} , reaktivne snage Q_{sr} i prividne snage S_{sr} u vremenskom intervalu T . Energije se u ovom slučaju dobijaju prostim množenjem srednjih vrednosti sa dužinom vremenskog intervala.

B. Korisnički interfejs programa VMPCalc

Na Sl. 2 prikazan je korisnički interfejs programa VMPCalc. Ispod naslovne linije nalaze se komande za upravljanje programom. Komandom *Otvori bazu* otvara se baza podataka i vrši se tabelarni prikaz cele baze u prozoru koji se nalazi ispod dugmeta. Komandama *Pocetno vreme* i *Krajnje vreme* podešavaju se početno i krajnje vreme intervala obrade. Komandom *Podesi interval*, nakon podešavanja granica intervala obrade, vrši se priprema podataka za obradu. Nakon što je interval podešen, komanda menja naziv u *Resetuj interval*, čijim se odabirom ponovo priprema celokupna baza podataka za prikaz. Komandom *Proračun* vrši

se proračun i prikaz podataka, kao i generisanje izveštaja u desnom oknu, koje je namenjeno za prikaz izveštaja. Komandom *Izvezi u Excel* odabrani interval podataka iz baze izvozi se u Excel tabele. Komandom *Sacuvaj izveštaj* snima se izveštaj kao tekstualna datoteka u tekućem folderu programa. Komandom *Obrisi izveštaj* briše se sadržaj prozora izveštaja.

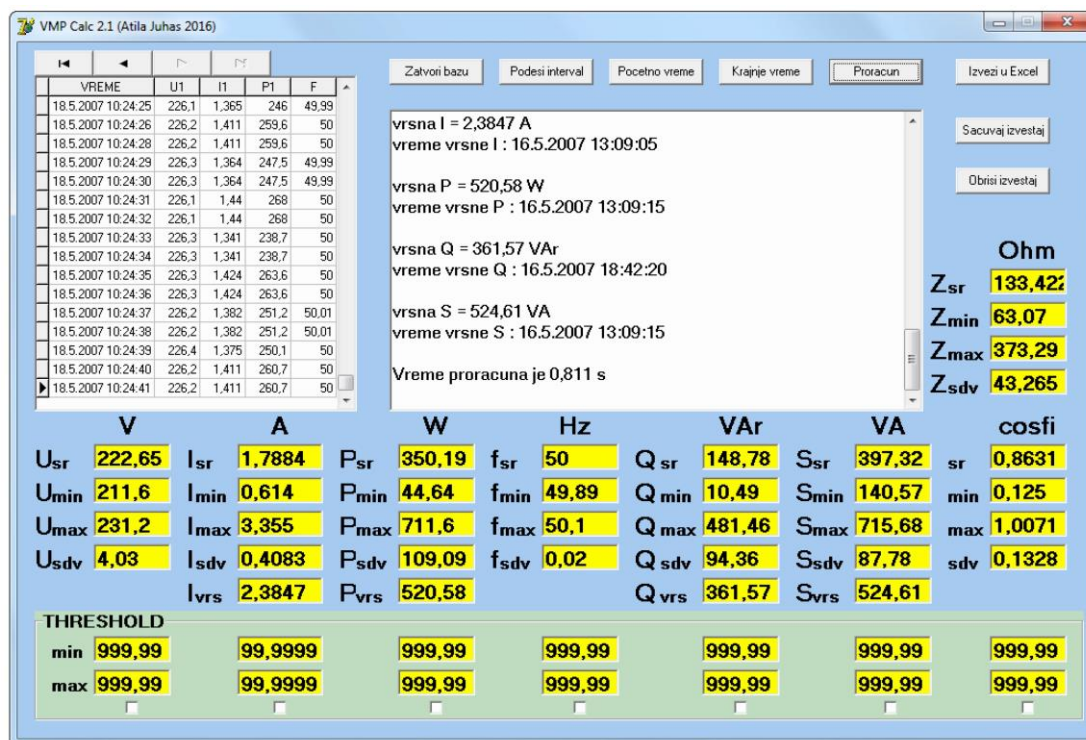
Ispod okna za prikaz podataka iz tabele i izveštaja, nalaze se displeji za prikaz izračunatih veličina organizovanih u kolone.

Ispod displeja za prikaz izračunatih podataka, nalazi se uokvireno polje za podešavanje *threshold*-a. Odabirom određenog *threshold*-a, iz obrade se izbacuju podaci koji su ispod minimuma ili iznad maksimuma date veličine. Nakon podešavanja *threshold*-a potrebno je ponovo aktivirati komandu *Podesi interval*.

Naravno, da bi funkcionisala opcija *Izvezi u Excel* na računaru mora biti instaliran Microsoft Office programski paket sa aplikacijom Microsoft Excel.

III. PRIMENA INSTRUMENTA VMP20 U NASTAVI

Monofazni mrežni analizator snage VMP20 koristi se za realizaciju nastave u Laboratoriji za elektroenergetiku elektrotehničke škole „Nikola Tesla“ u Nišu od školske 2019/2020. godine. Instrument se koristi za realizaciju laboratorijske vežbe, koja se izvodi u okviru predmeta Merenja u elektroenergetici.



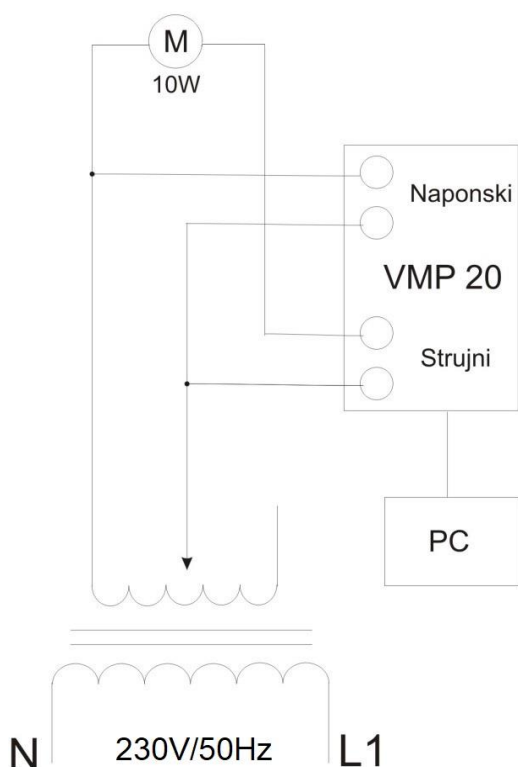
Sl. 2. Izgled VMPCalc po završetku obrade podataka.

TABELA I
REZULTATI MERENJA INSTRUMENTOM VMP20

U [V]	0	24,73	51,24	73,79	101,4	125,1	151,6	175,5	199,4	222,9	239,3
I [A]	0	0,023	0,041	0,059	0,095	0,132	0,173	0,171	0,198	0,223	0,248
P [W]	0	0,425	1,674	3,352	6,719	10,56	17,19	19,77	24,8	30,78	35,87
$\cos \phi$	0	0,76	0,802	0,768	0,7	0,641	0,654	0,659	0,632	0,618	0,604
f [Hz]	0	49,99	50	50	50	50,01	50	50,02	50	50	49,99

Zadatak u nastavnoj vežbi jeste da se izmere struja, snaga i frekvencija pri promeni napona napajanja. Napon se menja pomoću jednofazni regulacioni autotransformator u opsegu od 0 V do 250 V. Kao potrošač korišćen je monofazni motor sledećih karakteristika: FAN za 0,23 A, 220 V i 50 Hz. Ostale karakteristike motora su: 1350 RPN, snage 10 W.

Šema veza laboratorijske vežbe data je na Sl. 3, dok je na Sl. 4 prikazan instrument VMP20 u Laboratoriji.



Sl. 3. Šema veza laboratorijske vežbe sa monofaznim analizatorom snage VMP 20.

IV. REZULTATI MERENJA

Rezultati izvršenih merenja prikazani su u Tabeli I.

Za snimanje izmerenih podataka dobijenih pomoću uređaja VMP20 na PC računar upotrebljen je program VMPLOG. Program je predviđen da radi na standardnom PC računaru pod operativnim sistemom Microsoft Windows XP ili novijim. Aplikacija koristi Firebird tip baze podataka sa

integriranim klijent/server rešenjem.

Uz pomoć pratećih softvera moguće je i daljinsko merenje sinusoidalnih signala u ED mreži korišćenjem VMP20 monofaznog analizatora snage. Demonstracija on-line prikaza mrežnog napona i frekvencije realizovana je na samoj konferenciji ETRAN 2021.



Sl. 4. Instrument VMP20 u Laboratoriji.

V. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana primena monofaznog analizatora snage VMP20 u realizaciji nastave u Laboratoriji za elektroenergetiku u ETŠ „Nikola Tesla“ u Nišu. U radu je prikazana realizacija laboratorijske vežbe, koja se izvodi u okviru predmeta Merenja u elektroenergetici. Isto tako, realizovana je demonstracija on-line prikaza merenja mrežnog napona i frekvencije na samoj konferenciji ETRAN 2021. S obzirom da se u protekle dve godine javila potreba za izvođenjem nastave na daljinu, uključivanje ovog instrumenta u nastavu se pokazalo kao veoma svrsishodno.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] V. Vujičić, S. Milovančev, M. Pešaljević, D. Pejić, and I. Župunski, "Low frequency stochastic true RMS instrument," *IEEE Trans. Instrum. & Measurement*, vol. 48, no. 2, pp. 467–470, Apr. 1999.
- [2] V. Vujičić, "Generalized low frequency stochastic true RMS instrument," *IEEE Trans. Instrum. & Measurement*, vol. 50, no. 5, pp. 1089–1092, Oct. 2001.
- [3] V.V. Vujicic, I. Župunski, Z. Mitrovic and M.A. Sokola, "Measurement in a point versus measurement over an interval," Proc. of the IMEKO XIX World Congress; Lisbon, Portugal. no. 480, pp. 1128-1132, Sep. 6–11, 2009.
- [4] V. Pjevalica and V. Vujičić, "Further generalization of the low-frequency true-RMS instrument," *IEEE Trans. Instrum. & Measurement*, vol. 59, no. 3, pp. 736–744, Mar. 2010.
- [5] A. Juhas, P. Sovilja, V. Vujičić, "Softverska i hardverska podrška trofaznim mjerenjima u ED mreži," Naučno-stručni simpozijum Energetska efikasnost – ENEF 2017, str. 84-89, Banja Luka, 3-4. Novembar 2017.
- [6] Vladimir Vujičić, Slobodan Milovančev, „Patent P-742/95, Digitalni instrument za merenje proizvoda dva analogna periodična signala“, Zavod za intelektualnu svojinu Beograd, 1995.

ABSTRACT

The single-phase power analyzer VMP20 is used for the realization of teaching exercises in the Laboratory for Electric Power Engineering in ETS "Nikola Tesla" in Niš. The paper presents the realization of a laboratory exercise that is carried out within the course of the Measurements in Power Engineering. The obtained results are shown in the table. The paper also describes the remote measurement of sinusoidal signals in the ED network using a VMP20 single-phase power analyzer. Demonstration of on-line measurement of voltage and frequency is realized at the Conference ETRAN 2021.

Example of remote measurement of sinusoidal signals with VMP20 instrument

Jovan Ničković, Jelena Đorđević Kozarov, Radoje Jevtić and
Atila Juhas