

Merenje slabih sinusoidalnih signala i granica detekcije AC nule

Bojan Vujičić, *Member IEEE*, Marjan Urekar, *Member IEEE*, Platon Sovilj, *Member IEEE*, Zoran Mitrović, *Member IEEE*

Apstrakt — U ovom radu je predložena hardverska struktura uređaja i optimalni postupak merenja ekstremno malih prostoperiodičnih napona korišćenjem stohastičke digitalne merne metode (SDMM). Pokazano je teorijski i simulaciono da je sa relativnom mernom nesigurnošću manjom od 1 % moguće meriti predloženim uređajem prostoperiodične napone reda nV. Problem je rigorozno matematički analiziran. Nađena je jednostavna formula koja definiše teorijsku granicu detekcije AC nule u zavisnosti od parametara SDMM – kvanta dvobitnog fleš A/D konvertora, frekvencije semplovanja, vremenskog intervala trajanja merenja, veličine pojačanja merenog signala i zahtevanog intervala poverenja, odnosno faktora prekrivanja. Opsežne simulacije rada uređaja, navedene u ovom radu su, bez izuzetka, potvrdile korektnost formule i time i kompletne teorijske analize. Za granični, realan, izbor parametara SDMM teorijska granica detekcije AC nule predloženim uređajem je reda pV. Ta činjenica govori da bi predloženi merni uređaj mogao da bude i veoma dobar detektor AC nule.

Gljučne reči — Sinusoidalan signal; merenje; detekcija AC nule; diskretna digitalna Furijeova transformacija; stohastika

A. UVOD - Postavka problema

U okviru projekta tehnološkog razvoja Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Srbije TR32019 „Merenje u konceptu pametne distributivne mreže“ eksperimentalno je istraživao uticaj rezolucije primenjenog fleš A/D konvertora na mernu nesigurnost ključnog instrumenta projektovanog u projektu – dvostrukog trofaznog analizatora snage MM2 u kome je primenjena SDMM. Ovaj uređaj je prikazan na slici 1. Favorit je bila dvobitna rezolucija, ali je izrađen i jedan prototip sa četvorobitnim fleš A/D konvertorom. Uočeno je da u slučaju merenja malih struja (što je bitno u merenju malih snaga i, posebno, malih energija) sa približavanjem amplitude nuli:

- u oba slučaja (i kod dvobitnog i kod četvorobitnog A/D konvertora) raste preciznost (smanjuje se standardna devijacija merenja amplitude), i
- u slučaju četvorobitnog fleš A/D konvertora standardna devijacija je znatno (nekoliko puta) manja za istu vrednost amplitude.

To je bila motivacija da se taj problem uopšti kao problem merenja ekstremno malih prostoperiodičnih signala i detekcije

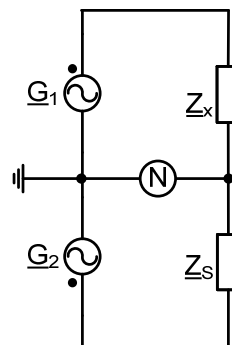
Bojan Vujičić – Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Serbia (e-mail: bojanvuj@uns.ac.rs), Marjan Urekar – Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Serbia (e-mail: urekarm@uns.ac.rs), Platon Sovilj - Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Serbia (e-mail: platon@uns.ac.rs), Zoran Mitrović - Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Serbia (e-mail: zoranmit@uns.ac.rs)

AC nule, i da se detaljno teorijski istraži. U radovima [1], [2], [3], [4], [5] iz više aspekata je prikazana teorija SDMM i pokazana teorijska zavisnost merenja, u prvom redu RMS vrednosti i harmonika od rezolucije primenjenog A/D konvertora i uređaja za obradu (množača/akumulatora). Za tu svrhu je potrebno precizno definisati hardverski i softverski model instrumenta, odnosno, detektora AC nule.



Sl. 1. Dvostruki trofazni analizator snage MM2

S druge strane, nul-detektor je klasičan merni instrument (AC mikrovoltmetar) koji detektuje ravnotežu AC mernog mosta. Najviše je korišćen šezdesetih i sedamdesetih godina prošlog veka [6]. Zatim je došlo do promene u konstrukciji AC mernih mostova tako da su dve grane mosta postale digitalni, softverski kontrolisani izvori AC napona [7], kao što je prikazano na slici 2.



Sl. 2. Uravnoteženi most sa dva izvora AC napona

Navedeni pristup (mostovi sa dva izvora AC napona) je praktično definisao AC merni most kao jedinstven digitalni sistem sa jedinstvenim vremenom i frekvencijom. To je činjenica koja izuzetno olakšava detekciju nule jer uravnotežavanje i detekcija nule postaju delovi istog digitalnog algoritma. Rezolucija A/D konvertora i dva D/A konvertora su obično jednake, mada to nije neophodno.

AC most sa dva izvora može biti realizovan i drugačije: razvoj digitalnih generatora funkcija je omogućio da imamo nekoliko

nezavisnih izvora u istom instrumentu [7], pa se dva izvora (kanala) mogu usvojiti za jedan most. Blok za detekciju AC nule je tada poseban element koga treba povezati u digitalni sistem mosta. Visoka tačnost i visoka stabilnost savremenih generatora funkcija ($1 \cdot 10^{-6}/\text{god}$) omogućavaju punu primenu SDMM za detekciju nule.

SDMM [8], zahvaljujući upotrebi uniformnog slučajnog ditera postiže visoku rezoluciju iako radi sa A/D konvertorima niske rezolucije, najčešće dvobitnim. Postiže i visoku tačnost jer, zbog jednostavnog hardvera, ima mali broj izvora sistematske greške. U radu [5] je pokazano kako se metodološki može čak za više od tri reda veličine smanjiti uticaj ofseta komparatora u dvobitnom fleš A/D konvertoru na tačnost merenja AC signala. Ofset komparatora je ključni uticajni faktor u ovom merenju.

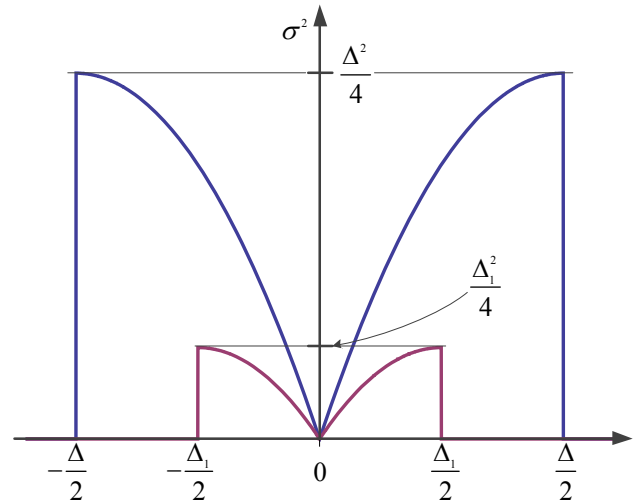
U ovom radu se analizira osobina SDMM – porast rezolucije sa približavanjem merenog AC signala nuli i njena primena u merenju ekstremno malih prostoperiodičnih signala i u detekciji AC nule. Ona se analizira teorijski, a dobijeni rezultati se proveravaju simulaciono u programima koji su napisani u programskom jeziku LAZARUS.

B. Predlog rešenja

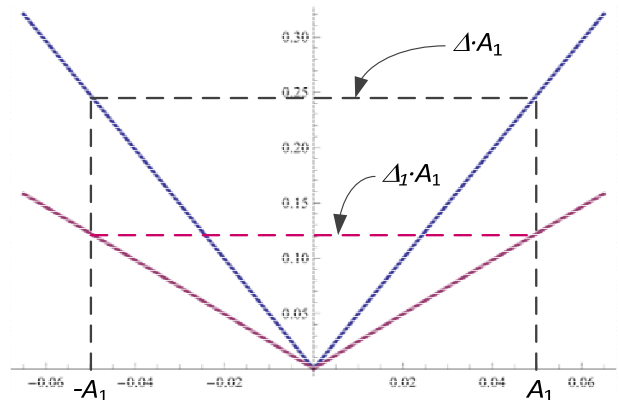
1) Hardverski model

Usvaja se dvobitni fleš A/D konvertor sa promenljivom rezolucijom, odnosno kvantom, $\Delta_1 = R_1 = 2g$ za merenje AC signala, kao na slici 5. Sa promenljivim kvantom Δ_1 on može da predstavlja i četvorobitni i, uopšte, višebitne konvertore u blizini nule. U bliskoj okolini nule je amplituda $A \ll \Delta_1$, pa viši kvantni nivoi nisu ni bitni. Varijansa SDMM definiše njenu preciznost i na slikama 3. i 4. se vidi uticaj veličine kvanta na njenu vrednost. Na slici 4. je posebno istaknuta linearna zavisnost varijanse od amplitude sinusoidalnog signala u bliskoj okolini nultog kvantnog nivoa. To je od ključnog značaja za nalaženje teorijske granice detekcije nule, odnosno, rešenje problema u celini. Relacije (8) i (9) na osnovu kojih su dobijeni grafici na slikama 3. i 4. su izvedene u [9].

Kao uređaj za obradu se usvaja računar sa USB priključkom koji radi u floating-point aritmetici u dvostrukoj preciznosti, pa je njegova rezolucija ekstremno visoka, i praktično je $\Delta_2 = 0$



Sl. 3. Varijansa izlaza dvobitnog A/D konvertora u $\Delta/2$ i $\Delta_1/2$ okolini nultog kvantnog nivoa - relacija



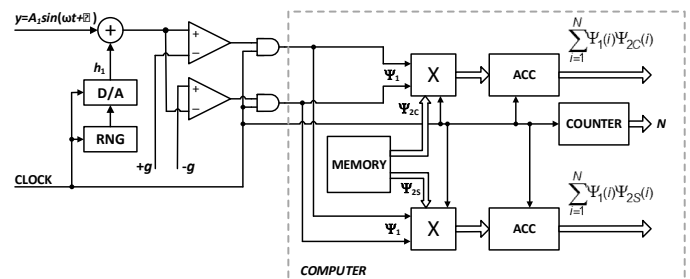
Sl. 4. Normirana varijansa izlaza dvobitnog A/D konvertora u bliskoj okolini nultog kvantnog nivoa za sinusni signal amplitude $A_1 \ll \Delta = 2\Delta_1$ - relacija

2) Softverski model

Usvaja se algoritam DFT za merenje amplitude osnovnog, u AC mostnim metodama, i jedinog harmonika amplitude A_1 .

C. Rešenje teorijskog problema

Na slici 5. je šematski prikazan teorijski hardverski model uređaja za merenje ekstremno malih sinusoidalnih napona.



Sl. 5. Šematski prikaz teorijskog hardverskog modela stohastičkog digitalnog detektora nule

Ako primenom stohastičke digitalne merne metode merimo srednju vrednost integrala proizvoda dva signala na konačnom vremenskom intervalu $T = t_2 - t_1$ i ako sempling učestanost $f_s \rightarrow \infty$, onda je:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^N \Psi_1(i) \Psi_2(i)}{N} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} f_1(t) f_2(t) dt \quad (1)$$

i tada nema greške, odnosno, merna nesigurnost je nula.

Ako je, pak, frekvencija semplovanja konačna, a kvant A/D konvertora na oba kanala Δ , tada važi:

$$\frac{\sum_{i=1}^N \Psi_1(i) \Psi_2(i)}{N} \approx \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} f_1(t) f_2(t) dt \quad (2)$$

a varijansa srednje vrednosti greške kvantizacije σ_e^2 je ograničena i iznosi:

$$\sigma_e^2 = \frac{\sigma_e^2}{N} \leq \frac{1}{N} \left\{ \frac{\Delta^2}{4} \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (f_1^2(t) + f_2^2(t)) dt + \frac{\Delta^4}{16} \right\} \quad (3)$$

U uređaju na slici 5. uvek je $y_1 = f_1(t) = A_1 \sin(\omega t + \varphi) = A \sin(\omega t + \varphi)$ a y_2 je ili $y_2 = f_2(t) = \cos(\omega t)$ ili je $y_2 = f_2(t) = \sin(\omega t)$ u zavisnosti od toga da li se meri kosinusna ili sinusna komponenta osnovnog harmonika AC signala.

Greška e je definisana u svakom trenutku sa:

$$\Psi = \Psi_1 \cdot \Psi_2 = y_1 y_2 + e \quad (4)$$

Kada su rezolucije, odnosno kvanti merenja y_1 i y_2 različiti, relacija (3) postaje:

$$\sigma_e^2 = \frac{\sigma_e^2}{N} \leq \frac{1}{N} \left\{ \frac{\Delta_1^2}{4} \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} f_2^2(t) dt + \frac{\Delta_2^2}{4} \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} f_1^2(t) dt + \frac{\Delta_1^2 \Delta_2^2}{16} \right\} \quad (5)$$

Specijalan slučaj relacije (5) je slučaj kada je $\Delta_1^2 \gg \Delta_2^2$,

praktično govoreći, situacija kad $\Delta_2 \rightarrow 0$:

$$\sigma_e^2 = \frac{\sigma_e^2}{N} \leq \frac{1}{N} \frac{\Delta_1^2}{4} \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} f_2^2(t) dt \quad (6)$$

Ako je $y_2 = f_2(t)$ funkcija iz Furijeove ortonormirane baze, onda je merna nesigurnost ograničena konstantom ako je interval vremena $t_2 - t_1$ jedna ili ceo broj perioda funkcije $y_2 = f_2(t)$

$$\sigma_e^2 = \frac{\sigma_e^2}{N} \leq \frac{1}{N} \frac{\Delta_1^2}{4} \cdot \frac{1}{2} \quad (7)$$

za proizvoljnu funkciju iz Furijeove ortonormirane baze.

U svim ovim slučajevima je pretpostavljeno da je $|y_1|_{\max} \geq \Delta_1$ ili $|y_1|_{\max} \gg \Delta_1$

U slučaju detekcije nule je $y_1 = A \sin(\omega t + \varphi)$ i $A \rightarrow 0$.

Kako je $|y_1|_{\max} = A \rightarrow 0$, sledi da je $|y_1|_{\max} \ll \Delta_1$ što je potpuno drugačija situacija u odnosu na dosad istraživane i analizirane.

Na slici 3. je prikazana zavisnost $\sigma_e^2(y_1)$ u slučaju dvobitnog A/D konvertora u stohastičkoj digitalnoj mernoj metodi:

$$\sigma_e^2(y_1) = |y_1| (\Delta_1 - |y_1|) \quad (8)$$

Ako je $|y_1|_{\max} = A \ll \Delta_1$, onda je

$$\sigma_e^2(y_1) \leq \Delta_1 \cdot A \quad (9)$$

Pa relacija (7) postaje:

$$\sigma_e^2 \leq \frac{1}{N} \frac{\Delta_1 \cdot A}{2} = \varepsilon^2 \quad (10)$$

Kompletno izvođenje relacije (10), ključne za analizu mogućnosti primene SDMM na detekciju nule, dato je u [9].

Ako želimo da izmerimo amplitudu napona A pomoću stohastičke digitalne merne metode i hardvera sa slike 5., onda je:

$$A_m = \sqrt{a_m^2 + b_m^2} \leq \sqrt{(a + \varepsilon)^2 + (b + \varepsilon)^2} \quad (11)$$

merena vrednost amplitude A_m , a

$$A = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (12)$$

tačna vrednost amplitude A .

Ako $A \rightarrow 0$, onda i $a^2 \rightarrow 0$ i $b^2 \rightarrow 0$, odnosno $|a| \rightarrow 0$ i $|b| \rightarrow 0$, pa (11) postaje:

$$A_m \leq \sqrt{2\varepsilon^2} = \sqrt{\frac{\Delta_1 \cdot A}{N}} \quad (13)$$

Podatak o amplitudi, u slučaju mernog mosta, nemamo, nego samo:

$$a_m = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \Psi_1(i) \Psi_{2c}(i) \approx a \quad (14)$$

$$b_m = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \Psi_1(i) \Psi_{2s}(i) \approx b \quad (15)$$

S druge strane, granica merne nesigurnosti zavisi od amplitude. U slučaju (13) verovatnoća da je $A=0$ je 68 % jer je faktor prekrivanja 1 (budući da se radi o Normalnoj raspodeli greške). Dva puta veća granica je u slučaju da je verovatnoća 95 %, odnosno, faktor prekrivanja 2. Na samoj granici je:

$$A_m = A_g = 2 \sqrt{\frac{\Delta_1 \cdot A_g}{N}} \quad (16)$$

pa se iz (16) dobija

$$A_g = \frac{4\Delta_1}{N} \quad (17)$$

Kada je merena veličina A_m , unutar kruga poluprečnika

$$A_g = \frac{4\Delta_1}{N} \text{ u kompleksnoj ravni, detektovana je nula sa 94 \%}$$

pouzdanosti.

Analogno rezonujući,

$$A_g = \frac{9\Delta_1}{N} \quad (18)$$

definiše krug unutar koga je verovatnoća detekcije nule 99.7 %, odnosno faktor prekrivanja 3 itd.

Gledano sa stanovišta uravnotežavanja mosta, korisna informacija nije kad je $A_m \leq A_g$, nego upravo obrnuto, kad je

$A_m > A_g$. To znači da most još uvek nije u ravnoteži i da ga još treba uravnotežavati. Ta informacija, posebno u slučaju (18), po teoriji informacija [10] nosi daleko veću količinu informacija nego $A_m \leq A_g$. Za faktore prekrivanja 4 i 5 je to još mnogo izraženije.

U detektorima nule se obično koriste i pojačavači. Ako je A_m dobijeno pojačanjem k puta, onda je, za faktor prekrivanja 3:

$$kA_g = 3\sqrt{\frac{\Delta_1 \cdot kA_g}{N}} \quad (19)$$

odnosno

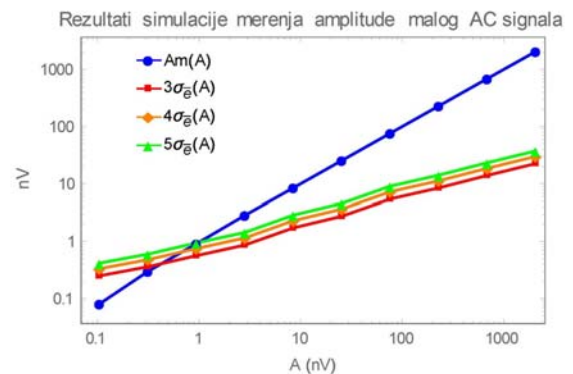
$$A_g = \frac{9\Delta_1}{kN} \quad (20)$$

S druge strane, na granici a i b stvarno nisu nule, pa za nalaženje granice detekcije nule treba poći od definicije granice – na granici su amplituda A i njena merna nesigurnost ($A_m - A$) jednake. To je poseban problem i njegovo rešenje se svodi na rešavanje algebarske jednačine četvrtog stepena po $\sqrt{A_g}$ i ono zavisi od međusobnog odnosa a_g i b_g . Pokazuje

se da se najšira granica dobija u slučaju kad je $a_g = b_g = \frac{A_g}{\sqrt{2}}$

i ona je upravo definisana relacijama (17), (18), odnosno (20). U [9] je ta činjenica detaljno elaborirana.

D. Simulaciona provera teorijskog rešenja



Sl. 6. Rezultati simulacije merenja amplitude A malog AC signala

Simuliran je rad (teorijski softverski model) uređaja sa slike 5., odnosno, teorijskog hardverskog modela. Rezultati su prikazani na slici 6.

Parametri simulacije su bili:

- $\Delta_1 = 1$ mV - kvant dvobitnog fleš A/D konvertora;
- $f_s = 500$ kHz - frekvencija semplovanja;
- $t_2 - t_1 = 50$ s - interval vremena u kome se meri amplituda AC signala;
- $a = b = \frac{A}{\sqrt{2}}$ - usvojeni međusobni odnos a i b .

Simulacija je izvršena u 10 tačaka, počev od 0.105 nV do 2066.715 nV u geometrijskoj progresiji sa faktorom 3. Simulirano je merenje amplitude u svakoj tački po 256 puta. Uzorak merenja dakle, ima 256 elemenata.

U tabeli 1. su dati rezultati poređenja teorijske i simulacione granice detekcije nule za faktore prekrivanja 3, 4 i 5. Odgovarajući intervali poverenja su 99.7 %, 99.99 % i 99.9999 %.

Tabela 1. Poređenje teorijske i simulacione granice detekcije nule

Veličina Red. Broj	Faktor prekrivan ja	Teorijska granica (nV) A_g	Simulacio na granica (nV) A_g	Relativno odstupanj e (%)	Apsolutn o odstupanj e (pV)
1	3	0.36	0.374	3.9	14
2	4	0.64	0.619	-3.3	-21
3	5	1.00	0.952	-4.8	-48

Vidi se da se teorijska i simulaciona granica za sve navedene faktore prekrivanja slažu unutar relativnog odstupanja od 5 %, odnosno apsolutnog od 50 pV. S obzirom na veličinu statističkog uzorka (256 rezultata simulacije za svaku tačku), dozvoljeno relativno odstupanje simulacionih rezultata u

odnosu na teorijske je $\frac{1}{\sqrt{256}} = 0.0625$, odnosno 6.25 %.

Prema tome, možemo konstatovati da je u sva tri razmatrana

slučaja simulacijom potvrđena izračunata teorijska granica. Simulacija je potpuno potvrdila teorijsku analizu.

Napominjemo da nije simulirano pojačanje, jer je ono u simulacijama trivijalno: pojačanje $k = 10$ prosto znači da je granica za red veličine niža, pojačanje $k = 100$ znači da je granica za dva reda veličine niža i td.

E. Diskusija

Neka su parametri merenja, odnosno SDMM: $\Delta_1 = 0.05$ V; $f_s = 500$ kHz; $t_2 - t_1 = 100$ s; $k = 100$. Tada je na osnovu relacije (20):

$$A_g = \frac{9 \cdot 0.05 \text{ V}}{100 \cdot 5 \cdot 10^5 \cdot 100} = \frac{9 \cdot \cancel{\delta} \cdot 10^{-2} \text{ V}}{10^4 \cdot \cancel{\delta} \cdot 10^5} = 9 \cdot 10^{-11} \text{ V} \approx 1 \cdot 10^{-10} \text{ V}$$

, odnosno

$$A_g \approx 0.1 \text{ nV}$$

Već za ovakav skroman izbor parametara merenja, korišćenjem dvobitne stohastičke digitalne merne metode se dobija izuzetno niska teorijska granica merne nesigurnosti. Ona se i dalje može snižavati, bilo:

- smanjenjem Δ_1 ,
- povećanjem frekvencije smplovanja f_s ,
- odnosno produžavanjem intervala merenja,
- povećanjem pojačanja.

Sa dva puta manjim Δ_1 , 10 puta većim pojačanjem i 5 puta dužim vremenom merenja, A_g pada ispod 1 pV.

S druge strane, dvobitni fleš A/D konvertor je izuzetno jednostavan i ima mali broj izvora sistematske greške, pa je ozbiljan izazov da se one eliminišu. To je izazov, kako za tehnologiju, tako i za primenjenu metodologiju. Na primer, u radu [5] je pokazano kako se uticaj ofseta komparatora može, u slučaju merenja RMS, snage i energije, korišćenjem stohastičke digitalne merne metode smanjiti za više od tri reda veličine definisanim metodološkim postupkom. U svakom slučaju, praktično dostizanje vrlo niskih granica merne nesigurnosti detekcije nule primenom stohastičke digitalne merne metode je problem za sebe i izlazi izvan okvira ovog rada.

F. Zaključak

Teorijskom analizom u ovom radu je utvrđeno, a simulacionom analizom i potvrđeno, da SDMM ima osobine da:

- rezolucija merenja AC signala (prostoperiodičnog) značajno raste kad se amplituda signala približava nuli;
- na osnovu definisanog kriterijuma detekcije AC nule je utvrđena teorijska granica detekcije nule i njena zavisnost od parametara SDMM;
- za realan izbor parametara SDMM ona je ispod 1 nV, što SDMM kvalifikuje za detekciju AC nule u

vrhunskim savremenim uravnoteženim AC mostovima;

- pokazano je da je dvobitna rezolucija u SDMM primenjenog fleš A/D konvertora i potrebna i dovoljna;
- pokazano je da je moguće predloženim hardverom i softverom precizno meriti prostoperiodične signale u području reda mikrovolt i niže, dakle, ekstremno male AC signale.

Primenjenoj metodologiji i tehnologiji elektronskih komponenti je ostavljeno da praktično dostignu nađenu teorijsku granicu detekcije AC nule, odnosno, merenja slabih AC signala primenom SDMM i dvobitnih fleš A/D konvertora.

Literatura

- [1] V. V. Vujicic, S. S. Milovancev, M. D. Pesaljevic, D. V. Pejic, and I. Z. Zupunski, "Low-frequency stochastic true RMS instrument," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 48, no. 2, pp. 467–470, 1999.
- [2] V. Vujicic, "Generalized low-frequency stochastic true RMS instrument," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 50, no. 5, pp. 1089–1092, Oct. 2001.
- [3] B. M. Santrac, M. A. Sokola, Z. Mitrovic, I. Zupunski, and V. Vujicic, "A novel method for stochastic measurement of harmonics at low signal-to-noise ratio," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, no. 10, pp. 3434–3441, 2009.
- [4] A. Radonjic, P. Sovilj, and V. Vujicic, "Measurement uncertainty bounds of DSM method," 2012, pp. 572–573.
- [5] D. Pejic, M. Urekar, V. Vujicic, and S. Avramov-Zamurovic, "Comparator offset error suppression in stochastic converters used in a watt-hour meter," 2010, pp. 235–236.
- [6] "Tuned Amplifier and Null Detector." General Radio Company, Apr-1962.
- [7] D. Tarach and G. Trenkler, "A noise-adaptive digital null detector," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 46, no. 2, pp. 435–438, Apr. 1997.
- [8] V. Vujčić, I. Župunski, Z. Mitrović, and M. Sokola, "Measurement in a point versus measurement over an interval," in *XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology*, 2009.
- [9] <http://www.ftn.uns.ac.rs/1054578074/doktorske-disertacije-stavljene-na-uvod-javnosti-i-izvestaj-o-oceni-komisije>
- [10] C. E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," *SIGMOBILE Mob Comput Commun Rev*, vol. 5, no. 1, pp. 3–55, Jan. 2001.

Abstract

This paper proposes hardware structure of a device and optimal procedure for measurements of small sinusoidal voltages using stochastic digital measurement method (SDMM). It has been shown theoretically and by simulation that, with relative uncertainty of less than 1 %, with a suggested device, it is possible to measure sinusoidal voltages in order of 1nV. Problem has been rigorously mathematically analyzed. Simple formula has been found that defines theoretical limit of AC zero detection with regards to the parameters of SDMM – quantum of two bit flash A/D converter, sampling frequency, time interval of measurements, level of amplification of measured signal, required confidence interval i.e. coverage factor. Extensive simulations of operation of a suggested device have confirmed, without exception, the accuracy of formula and by that of the whole theoretical analysis. For conservative choice of SDMM parameters theoretical limit for AC zero detection, with suggested device, is in order of 1pV. That fact suggests that proposed device could be a very good AC zero detector.

**Measurement of weak sinusoidal signals and AC zero
detection limit**

Bojan Vujičić, *Member IEEE*, Marjan Urekar, *Member IEEE*,
Platon Sovilj, *Member IEEE*, Zoran Mitrović, *Member IEEE*