

# Simulaciona analiza metode pogodne za metrološku karakterizaciju impedanse na niskim frekvencijama

Milan Šaš, Dragan Pejić, Nemanja Gazivoda, Đorđe Novaković, Bojan Vujičić, *Members, IEEE*

**Apstrakt**—U radu je prikazana simulaciona analiza metode koja je primenjiva za metrološku karakterizaciju dvokrajnih elemenata na niskim frekvencijama. Program napisan u programskom jeziku Python simulira rad dva multimetra tipa FLUKE 8846A, od kojih je jedan konfigurisan kao ampermetar, a drugi kao voltmetar. Odbirci napona i struje se obrađuju u programu, koji na osnovu odbiraka određuje vrednost amplitude naizmenične komponente i faznog stava napona i struje, a onda na osnovu tih vrednosti izračunava moduo i fazni stav impedanse. Program uračunava deklarisanе greške oba instrumenta i daje mogućnost za procenu merne nesigurnosti rezultata merenja.

**Ključne reči**—Simulacija, moduo i fazni stav impedanse, merna nesigurnost, Monte Karlo metoda, FLUKE 8846A.

## I. UVOD

Pojam impedanse je definisao Oliver Hevisajd (Oliver Heaviside) 1886. godine [1], a kompleksnu notaciju je uveo Artur Keneli (Arthur Kennelly) 1893. godine [2]. Kompleksna vrednost impedanse sadrži dva podatka: a) moduo impedanse predstavlja količnik amplitude napona i amplitude struje prostoperiodičnog talasnog oblika i b) fazni stav impedanse predstavlja razliku faznih stavova napona i struje. Ako se ograničimo na sampling metodu i prostoperiodični režim, potrebno je:

- sinhrono odabirati talasni oblik napona i struje,
- na osnovu odbiraka odrediti amplitude i fazne stavove napona i struje i
- odrediti moduo i fazni stav impedanse.

Za dobijanje odbiraka napona i struje su korišćena dva multimetra FLUKE 8846A, od kojih je jedan konfigurisan kao ampermetar, a drugi kao voltmetar. Oba instrumenta su konfigurisana za rad u jednosmernom (DC, *direct current*) režimu, kako bi se pristupanjem njihovim analogno-digitalnim (AD) konvertorima dobili odbirci merenih veličina.

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

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

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

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

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

Ampermetar i voltmetar mogu da se konfigurisu da rade i u naizmeničnom (AC, *alternate current*) režimu, što se na prvi pogled čini logičnijim, jer se pojam impedanse i definiše u AC režimu. U tom slučaju bismo dobijali efektivnu vrednost napona i struje, što je dovoljno za određivanje modula impedanse. Određivanje faznog stava impedanse bi ostao nerešen problem, jer se ovakvim pristupom ne raspolaze vrednošću faznog stava napona i struje.

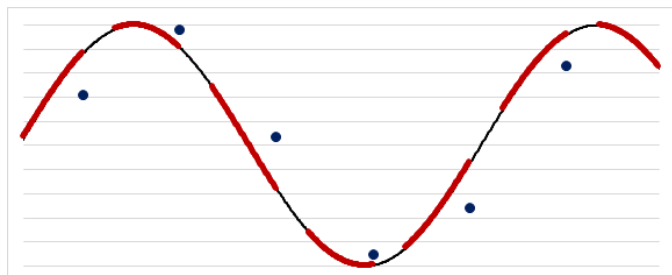
Korišćeni multimetri imaju ugrađen integrišući (*multi slope*) AD konvertor [3]. Umesto da vrše odabiranje u tački, ovi AD konvertori ustvari određuju srednju vrednost ulazne veličine na intervalu integraljenja zadanog trajanja. Integrišući AD konvertori imaju osobinu da potiskuju smetnje čija je perioda ceo broj puta duža od trajanje integraljenja, zbog čega se vrlo često koriste u industrijskim uslovima gde se očekuje značajno prisustvo smetnje mrežne frekvencije. Trajanje vremena integraljenja se zadaje parametrom NPLC (*Number of Power Line Cycles*). Kod korišćenih multimetara, pored celobrojnih vrednosti za NPLC, postoje i vrednosti manje od jedan, a najmanja je 0.02. Za minimalnu vrednost parametra NPLC, pri mrežnoj frekvenciji od 50 Hz, se dobija najkraće vreme integraljenja od  $0.02/50 \text{ Hz} = 0.4 \text{ ms}$ . Vrednost najkraćeg vremena integraljenja i željeni broj odbiraka po periodi su dva parametra koji ograničavaju primenljivost ove metode pri višim frekvencijama prostoperiodične pobude. Kada se vreme integraljenja ponderiše i iskaže u odnosu na trajanje periode signala čije odabiranje se vrši, onda se koristi termin ugao integraljenja i iskazuje se u radijanima.

## II. SIMULACIONI MODEL

Simulacioni model je realizovan u programskom jeziku Python [4] sa ciljem da se ispita uticaj bitnih parametara (broj odbiraka po periodi, trajanje/ugao integraljenja, greška ampermetra i voltmetra) na rezultate merenja (greška određivanja modula i faznog stava impedanse). Drugi razlog korišćenja simulacija je određivanje merne nesigurnosti dobijenih rezultata merenja simulacionim putem, odnosno primenom Monte Karlo metode.

Na Sl. 1. je prikazana ilustracija prostoperiodičnog talasnog oblika (crna linija) koji je doveden na ulaz integrišućeg AD konvertora. Vrednosti ulaznog talasnog oblika koje pripadaju periodima integraljenja su obeležene debljom linijom crvene boje. Rezultat AD konverzije se saopštava na kraju intervala integraljenja (plava tačka) i predstavlja srednju vrednost ulazne veličine u toku trajanja AD konverzije.

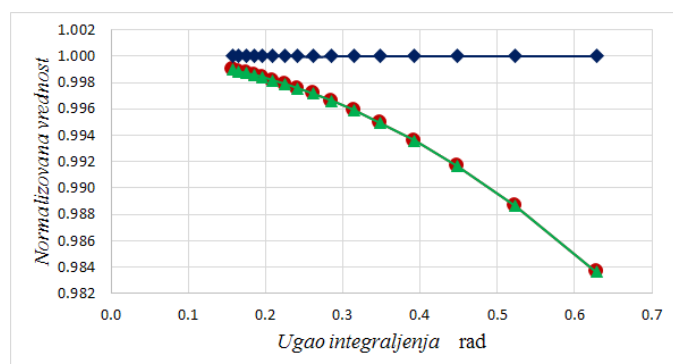
Sa Sl. 1. se vidi da rezultati AD konverzije (plave tačke) ne leže na ulaznom talasnom obliku (crna kriva), nego su fazno pomereni. Što je duži interval integraljenja u odnosu na periodu signala, dobija se sve veće fazno kašnjenje. Slična greška se javlja i u pogledu amplitude talasnog oblika koja bi bila određena na osnovu dobijenih odbiraka. Fazna i amplitudna greška teže nuli kada interval integraljenja teži nuli, odnosno kada integrišući AD konvertor postaje *sampling* AD konvertor.



Sl. 1. Ilustracija uticaja ugla integraljenja. Ulazni talasni oblik (tanka crna linija), integracioni period (debela crvena linija) i rezultat AD konverzije (plave tačke).

Postavlja se pitanje opravdanosti korišćenja integrišućeg AD konvertora za određivanje modula i faznog stava impedanse, kada međurezultati (amplitude i faze napona i struje) u sebi sadrže opisane greške. Simulacionim postupkom je proveravana navedena nedoumica.

Pretpostavljeni su prostoperiodični talasni oblici napona i struje na ulazu AD konvertora zadatog vremena integraljenja. Simulirano je odabiranje u svega pet tačaka po periodu, a onda je na osnovu odbiraka, postupkom fitovanja, određena amplituda i fazni stav napona. Na Sl. 2. je prikazan grafik zavisnosti normalizovane vrednosti (količnik vrednosti izmerene i zadate amplitude) opisanim postupkom određene amplitude napona i struje, kao i izračunatog modula impedanse. Na horizontalnoj osi je ugao integraljenja iskazan u radjanima, kako bi bio uporediv prema periodu prostoperiodične funkcije koja iznosi  $2\pi$  rad.

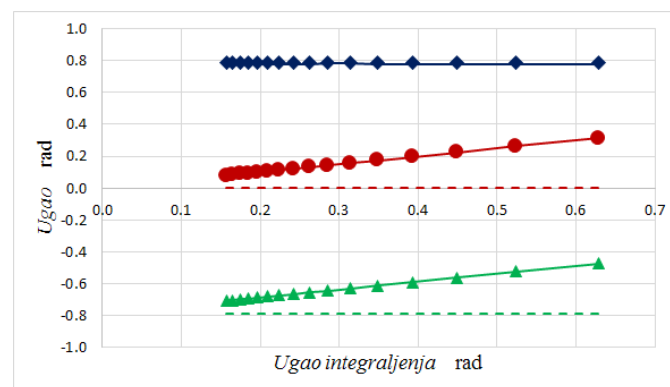


Sl. 2. Zavisnosti normalizovane vrednosti određene amplitude napona (crveni krugovi) i struje (zeleni trouglovi), kao i izračunatog modula impedanse (plavi rombovi).

Sa porastom ugla integraljenja javlja se sve primetnija sistematska greška, za koju se pokazuje da zavisi samo od ugla integraljenja. Greška je multiplikativnog tipa, jednaka je

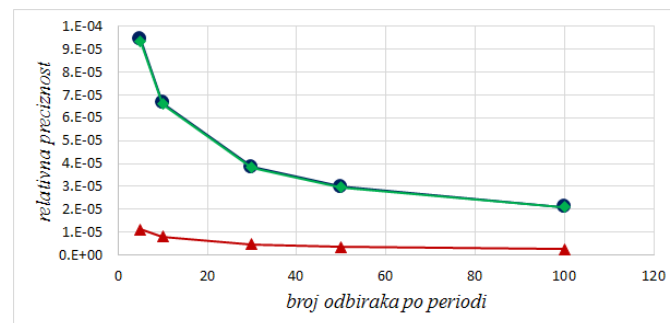
za napon (crvena karakteristika) i struju (zeleno karakteristika). Prilikom određivanja modula impedanse (plava karakteristika) kao količnika napona i struje dolazi do potiranja polaznih sistematskih grešaka. Ovo je vrlo korisna osobina jer se mogu sprovesti merenja sa vrlo velikim uglom integraljenja koja za posledicu ima značajnu sistematsku grešku od nekoliko procenata, a da se to ne odrazi na performanse određivanja modula impedanse.

Na Sl. 3. je data zavisnost određenog faznog stava napona (crveni krugovi), struje (zeleni trouglovi) i impedanse (plavi rombovi) od ugla integraljenja. Za zadanu vrednost faznog stava napona (crvena isprekidana linija) i struje (zeleno isprekidana linija), izmereni fazni stav napona i struje sadrži sistematsku grešku koja zavisi od ugla integraljenja. Ta greška je aditivnog tipa i jednaka je za napon i struju. Prilikom određivanja faznog stava impedanse (razlika faznog stava napona i faznog stava struje) dolazi do potiranja polaznih aditivnih sistematskih grešaka faznog stava napona i struje.



Sl. 3. Zavisnost rezultata određivanja faznog stava napona (crveni krugovi), struje (zeleni trouglovi) i faznog stava impedanse (plavi rombovi) od vrednosti ugla integraljenja.

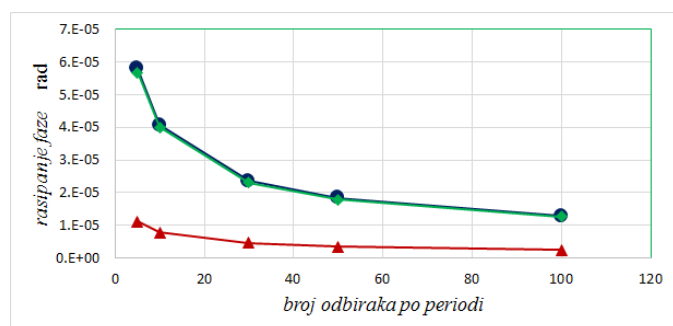
Nakon eliminacije uticaja sistematskih grešaka pri određivanju modula i faznog stava impedanse, u rezultatu merenja preostaju slučajne greške. Na Sl. 4. je prikazana zavisnost relativno iskazanog rasipanja (količnik standardne devijacije i srednje vrednosti rezultata merenja) prilikom određivanja amplitude naizmenične komponente napona (crveni trouglovi) i struje (zeleni rombovi), kao i modula impedanse (plavi krugovi).



Sl. 4. Zavisnost relativno iskazane preciznosti (rasipanje) amplitude napona (crveno), struje (zeleno) i modula impedanse (plavo) od broja odbiraka po periodu.

Korišćeni voltmetar ima značajno manju grešku (desetak puta) nego ampermetar, pa je greška merenja struje dominantna prilikom određivanja modula impedanse. Ako se broj odbiraka po periodu poveća sa 5 na 100 (20 puta), dobije se nesrazmerno manje poboljšanje u preciznosti određivanja modula impedanse (svega 4.5 puta).

Na Sl. 5 je prikazana zavisnost rasipanja faznog stava napona (crveni trouglovi), struje (zeleni rombovi) i impedanse (plavi krugovi) od broja odbiraka po periodu. Važe slični zaključci u pogledu zavisnosti navedenih parametara od broja odbiraka po periodu.



Sl. 5. Zavisnost preciznosti (rasipanja) rezultata određivanja faznog stava napona (crveni trouglovi), struje (zeleni rombovi) i impedanse (plavi krugovi) od broja odbiraka po periodu.

### III. MERNA NESIGURNOST

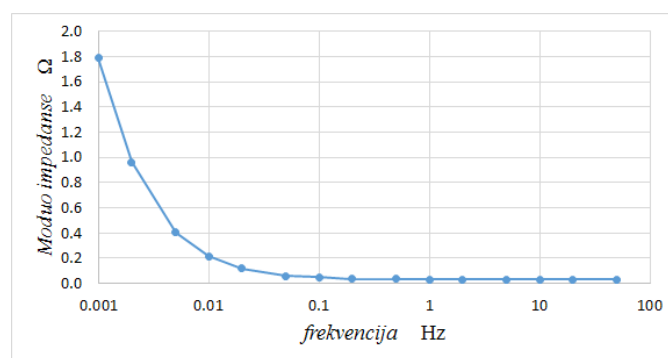
Dokument [5] predstavlja preporuke za iskazivanje merne nesigurnosti polazeći od matematičkog modela merenja. Matematički model merenja je izraz koji predstavlja zavisnost izlazne veličine od uticajnih veličina. U konkretnom slučaju, izlazne veličine (čiju mernu nesigurnost želimo da odredimo) su moduo i fazni stav impedanse. Neke od uticajnih veličina su: greške ugrađene u odbirke napona i struje, greška postupka određivanja amplitude i faznog stava napona prostoperiodične veličine na osnovu odbiraka i trajanje intervala integraljenja. Pristupom opisanim u [5] se vrši analiza propagacije mernih nesigurnosti ulaznih veličina na izlaznu veličinu.

Pored velikog broja uticajnih veličina, poseban problem u konkretnom slučaju je nepoznavanje načina funkcionisanja Python-ove funkcije *curve\_fit*, koja je preuzeta iz biblioteke *scipy* [7]. Ova funkcija je korišćena za fitovanje prostoperiodične funkcije kroz dobijeni skup odbiraka, radi određivanja amplitude i faznog stava napona i struje.

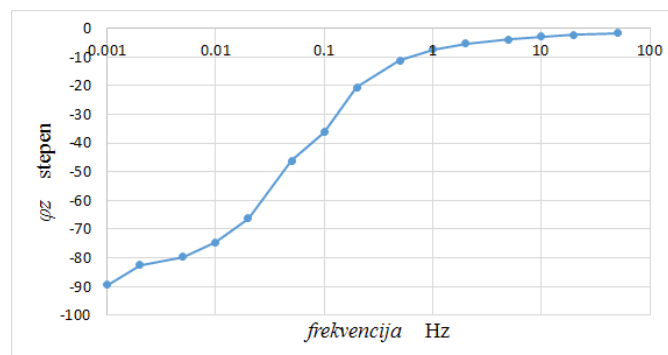
Drugi način za određivanje merne nesigurnosti, opisan u [6], je zasnovan je na simulacionom postupku, odnosno na primeni Monte Karlo metode. Kod ovog postupka se uticajne veličine posmatraju kao slučajne promenljive i vrši se analiza propagacije funkcije gustine uticajnih veličina na funkciju gustine izlazne veličine. Veliki broj puta (preko  $10^5$ ) se simulira postupak merenja uz uvažavanje funkcije gustine svake od uticajnih veličina. Za dobijene vrednosti izlazne veličine se određuje funkcija gustine, srednja vrednost i standardna devijacija. Srednja vrednost se saopštava kao

najbolja procena izlazne veličine, dok vrednost standardne devijacije predstavlja standardnu mernu nesigurnost.

Na Sl. 6 i Sl. 7. su prikazani rezultati određivanja modula i faznog stava impedanse superkondenzatora za frekvencije počev od 1 mHz do 50 Hz. Za sva merenja je definisano najkraće vreme integraljenja (0.4 ms), uzimano je sedam odbiraka po periodu u tri susedne periode napona i struje. Odbirci napona i struje su kao argument prosleđivani funkciji *curve\_fit*, a kao izlaz su dobijene najbolje procene amplitude i faznog stava naizmenične komponente pretpostavljenog prostoperiodičnog oblika. Moduo impedanse se određuje kao količnik amplitude prostoperiodične komponente napona i struje. Fazni stav impedanse se određuje oduzimanjem faznog stava napona i struje.



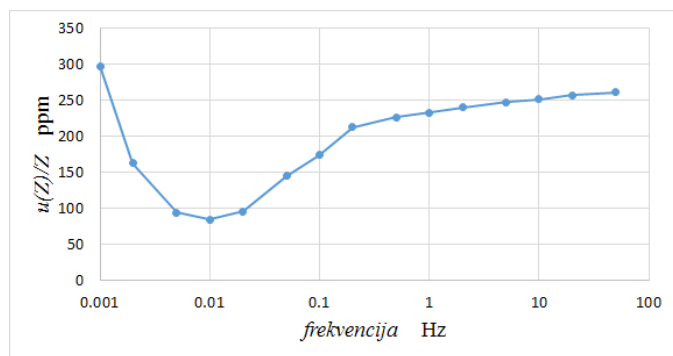
Sl. 6. Zavisnost modula impedanse superkondenzatora od frekvencije.



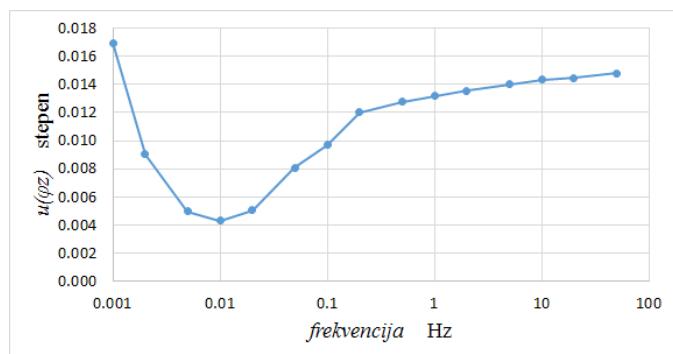
Sl. 7. Zavisnost faznog stava superkondenzatora od frekvencije.

Korišćenjem Monte Karlo postupka je određena standardna merna nesigurnost (standardna devijacija) modula i faznog stava impedanse superkondenzatora. U simulaciji su modelovane: greška AD konvertora na naponskom i strujnom kanalu za svaki odbirak [4], vreme integraljenja zadato parametrom NPLC, broj tačaka po periodu i broj perioda. U nedostatku dodatnih informacija, sve greške su modelovane uniformnom raspodelom. Zavisnost relativno iskazane standardne merne nesigurnosti modula impedanse superkondenzatora od frekvencije je prikazana na Sl. 8.

Standardna merna nesigurnost faznog stava impedanse superkondenzatora je prikazana u apsolutnom obliku na Sl. 9.



Sl. 8. Zavisnost relativno iskazane standardne merne nesigurnosti modula impedanse superkondenzatora od frekvencije.



Sl. 9. Zavisnost apsolutno iskazane standardne merne nesigurnosti faznog stava impedanse superkondenzatora od frekvencije.

Relativno iskazana standardna merna nesigurnost modula impedanse superkondenzatora je manja od 300 ppm, dok je apsolutno iskazana standardna merna nesigurnost faznog stava impedanse superkondenzatora manja od  $18 \text{ m}^\circ$ , odnosno  $0.6 \text{ mrad}$ .

#### IV. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana simulaciona analiza metode pogodna za snimanje modula i faznog stava impedanse dvokrajnog elementa na niskim učestanostima. Kao ampermetar i voltmetar su korišćeni standardni multimetri sa integrišućim AD konvertorom. Simulacioni postupak je korišćen iz dva razloga: a) da se oceni doprinos uticajnih veličina i b) da se odredi merna nesigurnost. Pokazano je da:

- prilikom određivanja modula impedanse (deljenjem procenjene vrednosti amplitude prostoperiodične komponente napona i struje) dolazi do potiranja multiplikativne sistematske greške,
- prilikom određivanja faznog stava impedanse (razlika procenjenog faznog stava napona i struje), dolazi do potiranja aditivne sistematske greške,
- povećanje broja odbiraka po periodu ne doprinosi srazmerno poboljšanju metroloških performansi rezultata merenja,

- pod pretpostavkom uniformnih raspodela greške AD konvertora na naponskom i strujnom kanalu, primenom Monte Karlo metode je određena merna merna nesigurnost rezultata merenja.

#### ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Fakulteta tehničkih nauka u sklopu internog projekta Centra za metrologiju pod nazivom "Razvoj naučno-stručnih metoda u oblasti SMART koncepata u industriji, naučne i industrijske metrologije, neuronauka i biomedicinskih merenja primenom napredne metodologije i digitalne tehnologije".

Ovaj rad je podržan od strane Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, Departmana za energetiku elektroniku i telekomunikacije, u okviru realizacije projekta MPNTR 200156 : "Inovativna naučna i umetnička ispitivanja iz domena delatnosti FTN-a".

#### LITERATURA

- [1] Oliver Heaviside, The Electrician, p. 212, 23 July 1886, reprinted as Electrical Papers, Volume II, p 64, AMS Bookstore, ISBN 0-8218-3465-7
- [2] Kennelly, Arthur. Impedance (AIEE, 1893)
- [3] <https://us.flukecal.com/products/data-acquisition-and-test-equipment/bench-multimeters/8845a8846a-65-digit-precision-multime>
- [4] <https://www.python.org/>
- [5] [https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM\\_100\\_2008\\_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6](https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6)
- [6] [https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM\\_101\\_2008\\_E.pdf/325dcaad-c15a-407c-1105-8b7f322d651c](https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_101_2008_E.pdf/325dcaad-c15a-407c-1105-8b7f322d651c)
- [7] <https://scipy.org/>

#### ABSTRACT

The paper presents a simulation analysis of a method that is applicable for the metrology characterization of two-end elements at low frequencies. The program written in the Python programming language simulates the operation of two multimeters of the FLUKE 8846A, one of which is configured as an ammeter and the other as a voltmeter. Voltage and current samples are processed in a program, which determines the value of the amplitude of the alternating component and the phase position of voltage and current based on the samples, and then calculates the modulus and phase position of the impedance based on these values. The program takes into account the declared errors of both instruments and provides an opportunity to assess the measurement uncertainty of the measurement results.

#### Simulation analysis of methods suitable for metrology characterization of impedance at low frequencies

Milan Šaš, Dragan Pejić, Nemanja Gazivoda, Đorđe Novaković, Bojan Vujičić