

Merni sistem za određivanje modula i faznog stava impedanse baziran na virtuelnoj instrumentaciji

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

Apstrakt—U ovom radu će biti predstavljen realizovani merni sistem za određivanje modula impedanse i faznog stava superkondenzatora. Sistem se sastoji od dvokanalnog generatora funkcija, dva digitalna multimetra i baferskog pojačavača struje koji su spojeni u električno kolo koje se koristi za četvorožično merenje impedanse. Kao generator signala koristi se Siglent SDG 1025 generator funkcija koji generiše sinusni signal superponiran za DC vrednost. Kao digitalni multimetri koriste se dva FLUKE 8846A 6-1/2 cifarska multimetra gde se jedan koristi kao voltmetar, a drugi kao ampermetar. Kapacitivnost superkondenzatora je reda stotina Farada pa je potrebno koristiti strujni pojačavač kako bi se obezbedila potrebna struja. Kako bi se postigla sinhronizacija rada uređaja, oni su umreženi i njima se upravlja pomoću računara na kom se nalazi skripta, napisana u Python programskom jeziku. Frekvencije na kojima se mere moduo impedanse i fazni stav su u opsegu od 1 mHz do 50 Hz.

ključne reči— superkondenzator; FLUKE 8846A; Siglent SDG 1025; Python; Scipy; curve_fit; matplotlib; PySerial; PyVISA.

I. UVOD

Pojavom i razvojem električnih automobila dolazi i do razvoja uređaja za skladištenje električne energije poput litijumskih baterija. Kako je eksploatacija litijuma i proizvodnja baterija štetna za okolinu, istraživanja su se usmerila ka pronalasku novih komponenata koje mogu da efikasno skladište energiju. Istraživanjem i razvojem došlo se do superkondenzatora [1][2][3] čija kapacitivnost može biti reda stotina Farada, ali namenjenih za nizak naponski nivo reda volti. Povezivanjem ovakvih kondenzatora u redne i paralelne veze, realizuju se superkondenzatori sa nazivnim naponom reda 100 V, kakvi su neophodni za korišćenje u auto industriji. Prednosti superkondenzatora u odnosu na baterije jesu brzina punjenja i količina energije koja se isporučuje u

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)

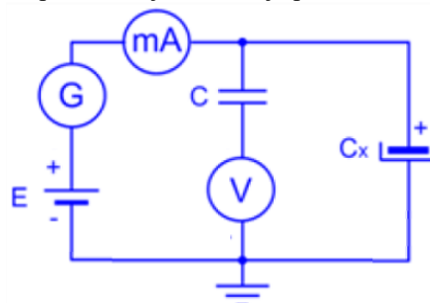
Đorđe Novaković – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: djordjenovakovic@uns.ac.rs)

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

kratkom intervalu. Superkondenzatori pronalaze sve širu primenu, pa je potrebno poznavati njihove karakteristike kako bi se mogli adekvatno predstaviti u simulacijama i prilikom projektovanja novih uređaja. Ovaj rad se bavi sistemom za određivanje dve vrlo važne karakteristike superkondenzatora: modul i faznog stava impedanse superkondenzatora na frekvencijama u opsegu od 1 mHz do 50 Hz.

II. POSTAVKA PROBLEMA

Najčešći model superkondenzatora jeste model koji, pored kapacitivnosti C ima rednu R_s i paralelnu (otočnu) R_o otpornost. Redna otpornost predstavlja otpor priključnih krajeva i ploča superkondenzatora, a paralelna otpornost modeluje realan dielektrik. U ovom radu će se, kao test primer, koristiti superkondenzator [4] nazivne kapacitivnost 100 F, nazivnog napona 2.7 V, serijske otpornosti reda desetina m Ω i paralelne otpornosti reda 10 k Ω . Autori su rešavanju ovog problema pristupili polazeći od klasične šeme za određivanje kapacitivnosti elektrolitskog kondenzatora merenjem napona i struje, kao što je prikazano na Sl. 1.



Sl. 1 Osnovna šema za merenje napona i struje na polarisanom kondenzatoru

Ovo kolo je, po svojoj konstrukciji, slično kolu za merenje otpornosti UI metodom naponskim spojem. U kolu se nalazi izvor jednosmernog napona E , na koji se dodaje naizmenična komponenta iz generatora funkcije G . Uloga pomoćnog kondenzatora C , redno vezanog sa voltmetrom, je da potiskuje jednosmernu komponentu napona na krajevima C_x . U tom slučaju voltmetar V meri samo preostalu naizmeničnu komponentu napona.

Ako se ovakva šema primeni za merenje impedanse superkondenzatora javljaju se sledeća ograničenja:

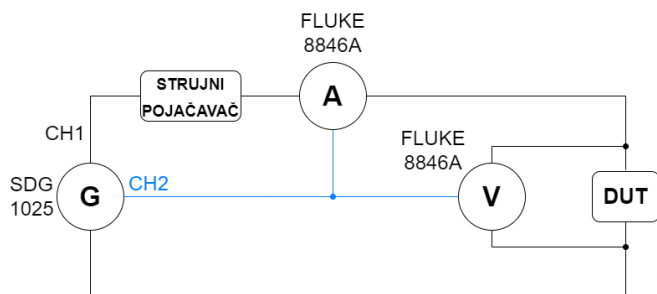
1. Kako bi pomoćni kondenzator C uspešno filtrirao jednosmernu komponentu i pri najnižim vrednostima frekvencije, njegova kapacitivnost bi morala biti

izuzetno visoka – reda Farada.

- Pri visokim vrednostima frekvencije signala, očekivana vrednost modula impedanse superkondenzatora je reda $m\Omega$, pa otpornost vodova dolazi do izražaja.
- Raspoloživi instrumenti namenjeni za merenje napona i struje nisu u stanju da mere pri frekvencijama manjim od 3 Hz.

III. PREDLOG REŠENJA

Kako bi se rešili navedeni problemi, autori predlažu rešenje prikazano na Sl. 2. Pomoćni kondenzator C je izbačen pa se filtriranje jednosmerne komponente napona vrši softverskim putem. Superkondenzator, na šemi označen kao DUT (*Device Under Test*), je vezan četvorožično kako bi se uticaj otpornosti vodova eliminisao. Zbog nemogućnosti multimetara da ispravno mere efektivnu vrednost signala na frekvencijama manjim od 3 Hz, multimetri su konfigurisani da rade u DC režimu. Prikupljanjem odbiraka signala napona i struje direktnim očitavanjem rezultata analognodigitalne (A/D) konverzije i korišćenjem softverskih alata mogu biti određene amplitude (efektivne vrednosti, takođe) napona i struje.



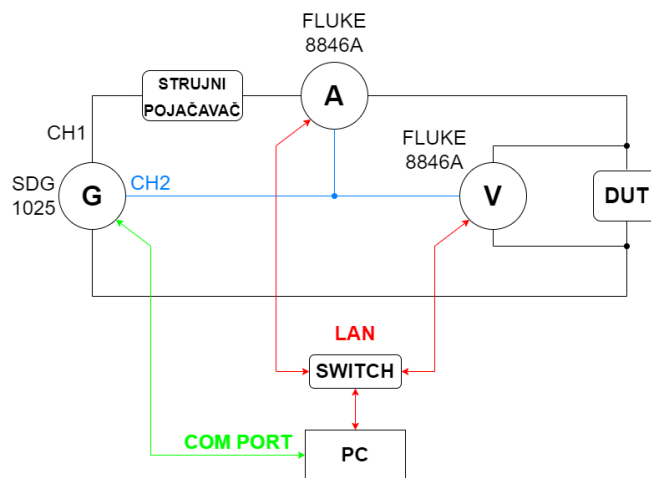
Sl. 2 Prikaz predloženog električnog kola

Kao ampermetar i voltmetar su korišćeni FLUKE 8846A [6] digitalni 6- $\frac{1}{2}$ cifarski multimetri koji imaju *multi-slope* A/D konvertor kao i mogućnost programiranja putem SCPI (*Standard Commands for Programmable Instruments*) komandi. Ampermetar i voltmetar su povezani u šemu za četvorožično merenje impedanse. Opseg merenja ampermetra je postavljen na 1 A, a opseg voltmetra na 1 V. Kao izvor naizmeničnog signala koristi se Siglent SDG 1025 [7] dvokanalni generator funkcija koji generiše, na svom prvom kanalu, sinusni signal amplitude 0.5 V i frekvencije u rasponu od 1 mHz do 50 Hz. Generisan napon je superponiran na jednosmernu komponentu kako bi se obezbedilo ispravno polarisanje superkondenzatora. Za pojačavanje strujnih mogućnosti funkcijskog generatora korišćen je baferski (jediničnog naponskog pojačanja) strujni pojačavač koji, na svom izlazu, daje vrednost struje do 2 A.

Sinhronizacija rada dva multimetra je izvedena korišćenjem eksternog trigera u obliku povorke pravougaonih impulsa dobijenih na drugom kanalu dvokanalnog izvora. Multimetri su podešeni da prihvate eksterni triger signal. Korišćenjem eksternog trigera eliminiše se pojava fazne greške usled neistovremenog odabiranja napona i struje. Raspon frekvencija periodičnog signala je veoma širok. Prilikom

odabiranja tri periode signala najmanje frekvencije vrednosti 1 mHz, uzimanje odbiraka traje 50 minuta. Pri povećanju frekvencije se smanjuje vreme merenja na postavljenoj frekvenciji. Ukupno trajanje merenja počevši od najniže pa sve do najviše frekvencije je oko dva sata.

Posle obavljenog umrežavanja dobijeno kolo je predstavljeno na Sl. 3.



Sl. 3 Konačan izgled šeme za merenje

Strujni pojačavač je četvoropol, ali je na blok šemi predstavljen kao dvopol, kako bi šema bila lakša za čitanje. Multimetri su povezani na LAN (*Local Area Network*) dok je generator funkcije povezan na jedan COM port na računaru. Upravljanje celokupnim sistemom se vrši preko računara na kome se nalazi skripta napisana u Python [8] programskom jeziku. Operater ovakvog sistema treba da unese željene frekvencije naizmeničnog signala i pokrene skriptu. Kao izlaz, skripta isporučuje vrednosti modula impedanse i faznog stava u zavisnosti od frekvencije, u tabelarnom i grafičkom obliku.

IV. KONTROLA SISTEMA I OBRADA PODATAKA

Kontrola sistema se vrši pomoću skripta napisane u Python programskom jeziku. Korišćene su biblioteke za mrežnu i serijsku komunikaciju [9], biblioteka *scipy* [10] za matematičke proračune i *matplotlib* [11] za grafički prikaz podataka. Kontrola sistema se odvija po sledećem principu:

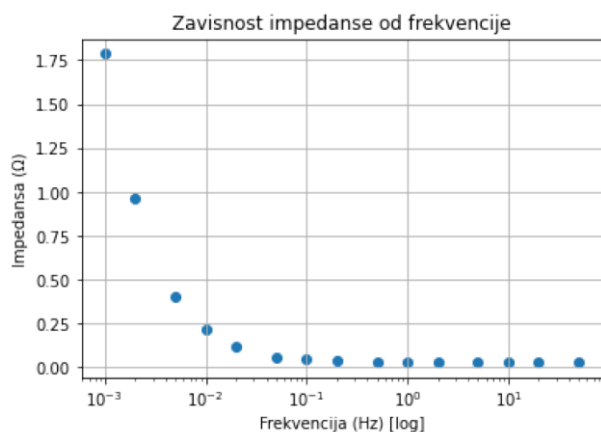
- provera prisutnosti uređaja,
- postavljanje uređaja u početna stanja,
- ciklus merenja,
- obrada podataka i
- prikaz podataka.

U ciklusu merenja se vrši odabiranje talasnih oblika napona i struje. Na kraju ciklusa merenja od multimetara se traže podaci koji pristižu u obliku liste vrednosti pojedinačnih odbiraka. Za određivanje amplituda i faznih stavova napona i struje, prikupljeni odbirci se prosleđuju funkciji *curve_fit* [12] koja je deo *scipy* biblioteke. Pored odbiraka, funkcija zahteva i definiciju očekivanog talasnog oblika. Za napon je to suma jednosmerne i prostoperiodične komponente poznate frekvencije, dok se za struju (u ustaljenom režimu) očekuje samo prostoperiodična komponenta. Kao povratne vrednosti, funkcija *curve_fit* vraća vrednosti jednosmerne i naizmenične

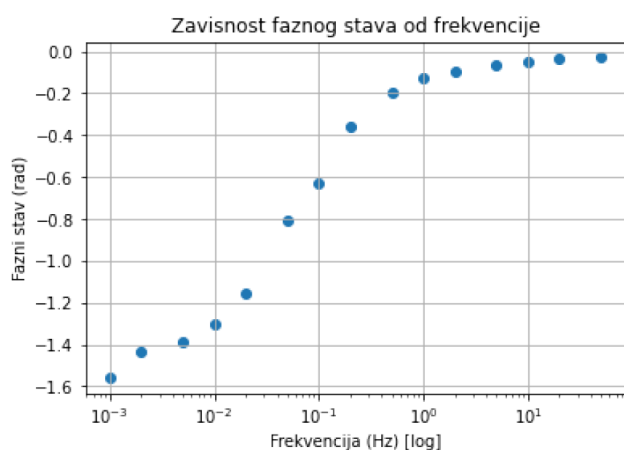
komponente napona, naizmeničnu komponentu struje i fazne stavove za obe veličine. Količnik vrednosti amplitude napona i struje predstavlja vrednost modula impedanse. Fazni stav impedanse se dobija oduzimanjem faznih stavova napona i struje. Na kraju izvršavanja skripte podaci se zapisuju u CSV (*Comma Separated Values*) fajl koji se može naknadno obrađivati. Dodatno, rezultati obrade se prikazuju grafički pomoću biblioteke *matplotlib* kako bi se dobio grafički prikaz vrednosti koje su merene.

V. DISKUSIJA

Predloženi sistem je u potpunosti realizovan i izvršena su merenja. Podešen je da uzima sedam odbiraka po periodu. Merenje se vrši tokom tri periode signala na svakoj zadatoj frekvenciji. Parametar NPLC (*Number of Power Line Cycles*) je podešen na 0.02, što je najmanja moguća vrednost. Za mrežnu učestanost 50 Hz definisano je vreme integraljenja od 0.4 ms. Na kraju ciklusa rada dobijeni su grafici na kojima je predstavljena zavisnost vrednosti modula impedanse i faznog stava od frekvencije signala. Na Sl. 4 i 5 je dat prikaz navedenih zavisnosti, pri čemu je x-osa na kojoj se nalazi frekvencija predstavljena u log razmeri.

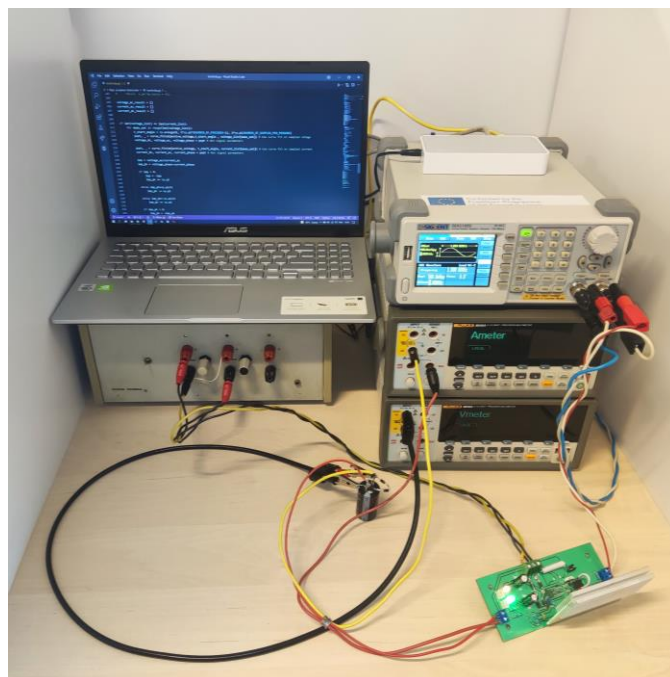


Sl. 4 Zavisnost vrednosti modula impedanse od frekvencije signala



Sl. 5 Zavisnost vrednosti faznog stava od frekvencije signala

Na Sl. 6 je data fotografija opreme koja je korišćena u ovom radu.



Sl. 6 Prikaz realizovanog sistema

VI. ZAKLJUČAK

Prikazani sistem je uspešno realizovan. Primećeno je da postoji prelazni proces prilikom promene frekvencije signala pa je potrebno sačekati sa merenjem dok se ne postigne ustaljeno stanje. Ovde je potrebno dodatno ispitati prelazne procese i optimizovati vreme čekanja, gde, sa povećanjem frekvencije, prelazni procesi kraće traju. Dalji planovi uključuju simuliranje rada sistema i određivanje merne nesigurnosti ovakvog merenja impedanse i faznog stava superkondenzatora na unapred zadatim frekvencijama. Ove simulacije bi se realizovale u Python programskom jeziku, koristeći Monte Karlo princip. U daljem razmatranju i testiranju može se povećati vrednost NPLC-a kod nižih frekvencija kako bi princip rada *multi-slope* A/D konvertora došao do izražaja u potiskivanju smetnji mrežne učestanosti. Na nižim frekvencijama je moguće povećavati broj odbiraka po periodu. Pri višim frekvencijama (kraće periode) postoji ograničenje u pogledu vrednosti vremena integraljenja.

Na osnovu dosadašnjih merenja se stiče utisak da nema potrebe za prevelikim brojem odbiraka po periodu, kao i da nema potrebe za povećanjem broja perioda. Moguće obrazloženje je činjenica da se poznaje talasni oblik napona i struje, pa zbog toga *curve_fit* funkcija već na osnovu malog broja odbiraka uspeva da odredi potrebne parametre signala napona i struje.

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] Jha, Deepu & Karkaria, Vispi & Karandikar, Parashuram & Desai, R.S.. (2022). Statistical modeling of hybrid supercapacitor. Journal of Energy Storage. 46. 103869.
- [2] Chakraborty, Sohini & N.L, Mary. (2022). Review - " An Overview on Supercapacitors and Its Applications. Journal of The Electrochemical Society. 169. 10.
- [3] Zhang, Jianan & Zhang, Xiaoyu & Xue, Dongping & Huicong, Xia & Jiang, Su. (2021). Supercapacitors. 10.
- [4] <https://www.xump.com/science/Super-Capacitor-100F-2.7V.cfm>
- [5] https://www.hioki.com/global/learning/usage/lcr-meters_4.html
- [6] <https://us.flukecal.com/products/data-acquisition-and-test-equipment/bench-multimeters/8845a8846a-65-digit-precision-multime>
- [7] <https://siglentna.com/product/sdg1025/>
- [8] <https://www.python.org/>
- [9] <https://pyvisa.readthedocs.io/en/latest/>
- [10] <https://scipy.org/>
- [11] <https://matplotlib.org/stable/index.html>
- [12] https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.curve_fit.html

ABSTRACT

This paper presents the implemented measurement system for measuring the impedance modulus and phase angle of a

supercapacitor. The system consists of a two-channel function generator, two digital multimeters and a buffer current amplifier connected into an electrical circuit used for four-wire resistance measurement. The Siglent SDG 1025 function generator is used as the signal generator, which generates a sine wave signal superimposed on a DC value. Two FLUKE 8846A 6-1/2 digit digital multimeters are used as digital multimeters, one of which is used as a voltmeter and the other as an ammeter. The capacitance of the supercapacitor is of the order of hundreds of Farads, so it is necessary to use a current amplifier to provide the required current. In order to synchronize the operation of the devices, they are networked and managed using a computer that contains a script written in the Python programming language. The frequencies at which the impedance modulus and phase position are measured are in the range of 1 mHz to 50 Hz.

Measurement system for determining the modulus and phase angle of the impedance based on virtual instrumentation

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