

Korišćenje integrišućeg analogno-digitalnog konvertora za karakterizaciju superkondenzatora u uslovima visokog prisustva šuma

Milan Šaš, član ETRAN i *Member, IEEE*, Nikola Vukajlović, član ETRAN i *Member, IEEE*, Slavica Medić, Dragan Pejić, član ETRAN i *Member, IEEE*

Apstrakt—U radu je analizirana opravdanost korišćenja integrišućeg analogno-digitalnog konvertora (IADC) prilikom karakterizacija superkondenzatora (SC) u uslovima prisustva šuma. Prilikom karakterizacije SC namenjenih za automobilsku industriju, neophodno je ispitivanje vršiti u uslovima bliskim uslovima eksploatacije. Za razliku od ćelija SC koje su namenjene za napon od nekoliko volti, SC su predviđeni za rad na preko 100 V. Za napajanje SC potrebnim naponom i strujom korišćen je prekidački izvor. Iako postoje izlazni filteri čija je namena da što više potisnu smetnje na prekidačkoj frekvenciji, u talasnom obliku napona postoje smetnje, koje proizvode još veće smetnje u talasnom obliku struje. Za karakterizaciju SC u uslovima visokog prisustva šuma korišćeni su integrišući AD konvertori kod kojih je poznato da vrše potiskivanje smetnji na višim.

Cljučne reči— superkondenzator; integrišući AD konvertor; šum; Python.

I. UVOD

Korišćenje integrišućeg AD konvertora (IADC) je opravdano u industrijskim uslovima gde se očekuje da, u procesu merenja, budu prisutne smetnje visoke frekvencije. U procesu karakterizacije modula i faznog stava superkondenzatora (SC) na niskim frekvencijama potrebno je koristiti visoke vrednosti struje (10 A) i napona (100 V). Kako bi dobili visoke vrednosti napona i struje može se koristiti prekidački izvor napajanja, kao što je prikazano u radovima [1] i [2]. Mana korišćenja prekidačkog izvora napajanja jeste unošenje visoko-frekventnih smetnji u signal napona i struje.

II. METOD

U [3] su analizirani razni aspekti SC: modelovanje, estimacija, balansiranje raspodele naelektrisanja i tehnike zaštite. Dat je pregled najčešće korišćenih električnih

modela SC. Postoji niz metoda prilagođenih odabranom električnom modelu (na primer, procedura specifikovana u IEC 62576:2018) ili čak određivanju samo jednog parametra SC: SoH (State of Health), SoP (State of Power), SoC (State of Charge)...

S druge strane, Elektrohemijaska spektroskopija impedanse (Electrochemical Impedance Spectroscopy - EIS) [4], bazirana na pobuđivanju SC korišćenjem sinusoidnih pobudinih signala na različitim frekvencijama može precizno okarakterisati SC u frekvencijskom domenu. EIS daje najtačnije rezultate, ali je postupak skup, često nije primeren, posebno kad nije neophodno dobijanje elemenata modela nego samo procena nekog od bitnih parametara. EIS postupak se dodatno komplikuje u slučaju SC, ako se želi snimati karakteristike SC u radnim uslovima, pri naponskim i strujnim uslovima sličnim uslovim u eksploataciji.

U ovom radu je SC napajan iz prekidačkog izvora koji je u stanju da obezbedi tražene naponske i strujne uslove. Zbog korišćenja prekidačkog izvora postoje visoko-frekventne (VF) smetnje u naponskom i strujnom talasnom obliku. U ovom radu su za prikupljanje odbiraka napona i struje SC korišćeni raspoloživi multimetri čiji rad se bazira na primeni IADC.

A. Integrišući AD konvertor

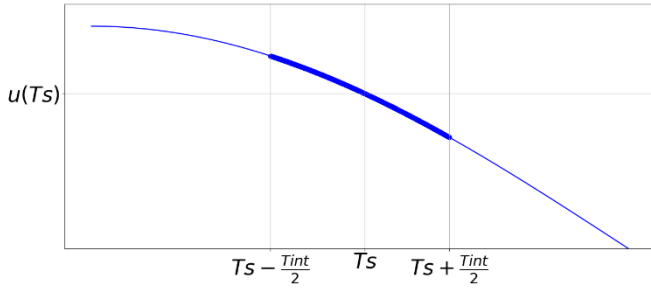
Posebnu klasu ADC čine integrišući AD konvertori [5]. IADC vrše usrednjavanje (integraljenje) ulaznog napona u toku vremenskog intervala trajanja T_{int} . IADC se odlikuju velikom rezolucijom, tačnošću i linearnošću koja zavisi od malog broja komponenti, prvenstveno od tačnosti i stabilnosti referentnog napona. Nedostatak IADC je što su spori, pa se koriste u situacijama jednosmernih ili sporopromenljivih napona, gde je dovoljna mala učestanost odabiranja, kao što su pokazni instrumenti i multimetri. Postupak integraljenja ulaznog signala se pokazuje kao dobro rešenje u potiskivanju smetnji, pa se IADC koriste u industrijskim uslovima. Na Sl.1 je data ilustracija prostoperiodične veličine, takve da je njena perioda duža od vremena integraljenja, $T_{int}/T < 1$, dovedene na ulaz IADC [6]. Obeležen je interval u kojem se vrši usrednjavanje ($T_s - T_{int}/2$, $T_s + T_{int}/2$). Umesto vrednosti odbirka $u(T_s)$ koja bi se dobila primenom *Sample-and-Hold* (S&H) pristupa, integracionim postupkom se dobija srednja vrednost na intervalu [7], određena izrazima (1)-(3).

Milan Šaš – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: milansas@uns.ac.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0001-7986-9910>)

Nikola Vukajlović – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: nikolavuk@uns.ac.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0003-3912-9277>)

Slavica Medić – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: slavicam@uns.ac.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0001-9680-4895>)

Dragan Pejić – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: pejicdra@uns.ac.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0002-8380-018X>)



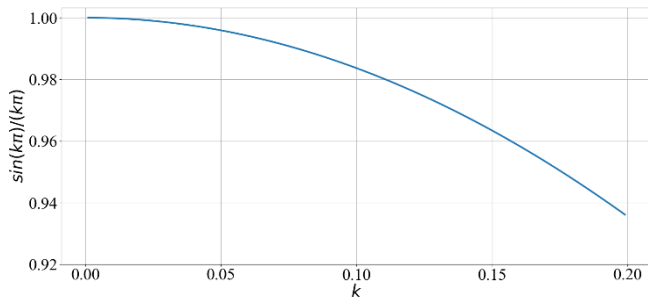
Sl. 1. Ilustracija vremena integraljenja

$$U_{int} = \frac{1}{T_{int}} \int_{T_s - T_{int}/2}^{T_s + T_{int}/2} U_m \cos(\omega t + \varphi) dt \quad (1)$$

$$U_{int} = u(T_s) \frac{\sin(k\pi)}{k\pi} = u(T_s) \cdot A \quad (2)$$

$$k = \frac{T_{int}}{T}, \quad A = \frac{\sin(k\pi)}{k\pi} \quad (3)$$

Nakon integraljenja, umesto da se dobije $u(T_s)$, dobija se U_{int} . Iz (2) se vidi da između dobijene vrednosti U_{int} i željene vrednosti $u(T_s)$ postoji konstanta srazmere (korekcionni faktor A), koja zavisi samo od odnosa $k=T_{int}/T$. Parametar k se može posmatrati kao relativno iskazano vreme integraljenja u odnosu na periodu posmatranog signala. Na Sl. 2 je data zavisnost korekcionnog faktora A od vrednosti k .

Sl. 2. Korekcionni faktor A u zavisnosti od $k=T_{int}/T$

Razmatrane su vrednosti $0 < k < 0.2$, pri čemu se za korekcionni faktor dobijaju vrednosti $0.93 < A < 1.00$. Čak i kada je period integraljenja jednak petini periode ($k=0.2$), ako se ne bi koristila korekcija, dobilo bi se odstupanje manje od 7%. Primenom korekcije (2) se ova greška može u potpunosti otkloniti.

B. IADC u prisustvu šuma

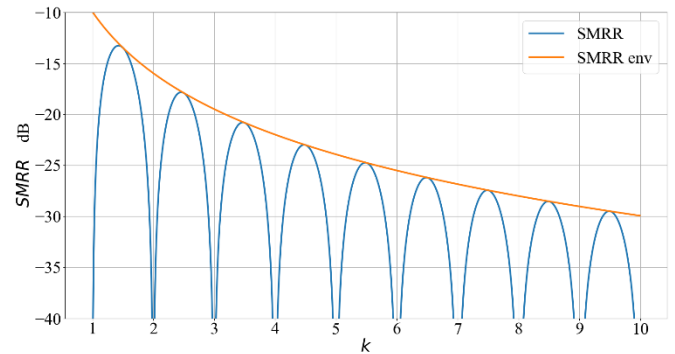
Prednost IADC koja direktno potiče iz načina funkcionisanja jeste otpornost na smetnje čije se dejstvo u procesu integraljenja smanjuje. Parametar koji opisuje kvalitet IADC u smislu potiskivanja smetnji je SMRR (Series Mode Rejection Ratio). SMRR predstavlja odnos dobijene nestabilnosti rezultata na izlazu IADC koja potiče od smetnje na ulazu.

Neka se posmatra izvođenje (1)-(3) kao opis situacije gde na ulazu nema korisnog napona, nego samo postoji prostoperiodična smetnja periode T , takvo da je T kraće od T_{int} ($T_{int}/T > 1$). Kako je ulazni napon nula, sve što se dobije na izlazu IADC predstavlja smetnju. Ako izraz (2) posmatramo pri maksimalnoj vrednosti smetnje na ulazu ($u(T_s)=U_m$), rezultat konverzije U_{int} predstavlja amplitudu smetnje na

izlazu IADC. SMRR iskazan u dB dat je izrazom (4).

$$SMRR = 20 \log \left(\frac{u(T_s)}{U_{int}} \right) = 20 \log \left(\left| \frac{\sin(k\pi)}{k\pi} \right| \right) \quad (4)$$

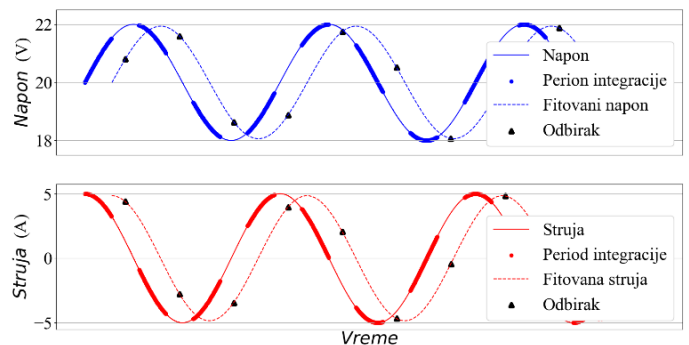
Na Sl. 3 je prikazana zavisnost $SMRR(k)$. Za komponente smetnje čija je perioda ceo broj puta kraća od T_{int} se teorijski gledano dobija beskonačno potiskivanje smetnje (k je ceo broj). Envelopa $SMRR_{env}$ predstavlja granicu najmanjeg potiskivanja koja se dobija kada je $\sin(k\pi)=1$, odnosno u situaciji kada je T_{int} celobrojni umnožak polovine periode šuma T .

Sl. 3. $SMRR(k)$ i $SMRR_{env}(k)$

C. Primena IADC u merenju impedance

U [5] je prikazano korišćenje dva multimetra sa ugrađenim IADC za merenje aktivne snage. Jedan multimetar je konfigurisan kao voltmetar, a drugi kao ampermetar, pa se množenjem odbiraka napona i struje dobijaju vrednosti odbiraka trenutne snage.

Sličnim postupkom se, na osnovu odbiraka napona i struje, polazeći od Omovog zakona, može dobiti informacija o impedansi. Na Sl. 4. su tankom linijom prikazani talasni oblici napona i struje. Zadebljani delovi ilustruju periode integraljenja. Na kraju svakog perioda integraljenja se dobija rezultat AD konverzije, kroz koje je postupkom fitovanja nacrtan prostoperiodičan signal. Na osnovu (2) je neophodno svaku vrednost odbirka napona i struje korigovati faktorom A . Razlog za ovo je vidljiv na Sl. 4 gde se jasno uočava razlika u amplitudi između ulaznog signala i signala dobijenog fitovanjem. Kod merenja impedanse, gde se deljenjem amplitude napona i struje dobija moduo impedanse, nije neophodna korekcija faktorom A , jer deljenjem dolazi do potiranja multiplikativne greške.



Sl. 4. Ilustracija odabiranja napona i struje primenom dva IADC

Na Sl. 4 se uočava isto fazno pomeranje između talasnog oblika napona i fitovanog napona, kao i struje i fitovane

struje. Kako se fazni stav impedanse dobija oduzimanjem faznog stava napona i faznog stava struje, dolazi do potiranje aditivne fazne greške.

III. SIMULACIJA

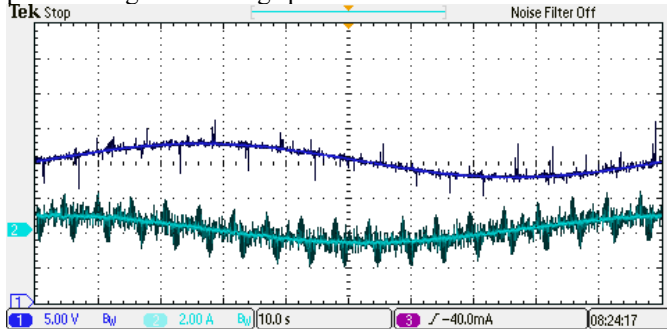
Ako se posmatra idealan kondenzator opisan konstitutivnom relacijom (5) i pretpostavi napon na krajevima kondenzatora kao suma korisne komponente frekvencije f i šuma na frekvenciji prekidanja f_{sw} takvoj da je n puta veća od f (6), za struju se dobija (7).

$$i_c(t) = C \frac{du_c(t)}{dt} \quad (5)$$

$$u_c(t) = U_m \sin(2\pi ft) + U_n \sin(2\pi nft) \quad (6)$$

$$i_c(t) = 2\pi fC [U_m \cos(2\pi ft) + nU_n \cos(2\pi nft)] \quad (7)$$

Iz (7) se vidi da se u struji kondenzatora javlja smetnja n puta veće amplitude. U slučaju prekidačkog naponskog izvora koji je korišćen u ovom istraživanju, čak i nizak nivo smetnji u naponskom talasnom obliku, će za posledicu imati visok nivo smetnji u struji, kao što je prikazano na Sl. 5. Treba naglasiti da izrazi (6) i (7) reprezentuju uprošćeni slučaj jer je u njima smetnja predstavljena jednom harmonijskom komponentom, dok je u realnosti smetnja prekidačkog izvora šireg spektra.



Sl. 5. Signali napona i struje merenih osciloskopom

Simulacionim putem je ispitan uticaj smetnje u naponskom i strujnom talasnom obliku na vrednost modula i faznog stava SC. Pretpostavljen je talasni oblik napona i struje dat u (8) i (9),

$$u_c(t) = U_m \sin(2\pi ft) + u_n(t) \quad (8)$$

$$i_c(t) = I_m \cos(2\pi ft) + i_n(t) \quad (9)$$

pri čemu je:

- $f = 1$ Hz frekvencija osnovnog signala napona i struje,
- $u_n(t)$ i $i_n(t)$ naponski i strujni šum, uniformne raspodele vrednosti, generisan učestanošću 15 kHz,
- odabiranje je rađeno primenom IADC na dve periode, sa po 15 tačaka po periodu, pri vremenu integraljenja $T_{int} = T/30$.

Odbirci napona $\{U_k\}$ i struje $\{I_k\}$ se prosleđuju programskom modulu koji vraća amplitudu U_m^F i fazni stav φ_U^F fitovanog prostoperiodičnog oblika napona, odnosno amplitudu I_m^F i fazni stav φ_I^F fitovanog prostoperiodičnog oblika struje. Moduo impedanse Z se izračunava kao količnik fitovanih amplituda napona i struje U_m^F / I_m^F , a fazni stav impedanse se dobija oduzimanjem faznih stavova

$\varphi_U^F - \varphi_I^F$. Dobijeni rezultati su prikazani u Tabeli 1 za tri različita nivoa zašumljenosti napona i struje. Svaka od tri situacije predstavlja rezultat 10000 ponavljanja izvršenih primenom Python skripte korišćenjem funkcije *curve_fit* iz biblioteke *scipy* [8].

TABELA 1
REZULTATI SIMULACIJE

	n_U/U_m	n_I/I_m	δZ	$\Delta\varphi$
Slučaj 1	40 %	200 %	2.6 %	1.4 °
Slučaj 2	20 %	100 %	1.3 %	0.7 °
Slučaj 3	5 %	50 %	0.8 %	0.3 °

U tabeli je dat opseg naponskog n_U/U_m i strujnog n_I/I_m šuma, iskazan relativno u odnosu na amplitudu sinusne komponente napona i struje, dodatno je prikazano relativno rasipanje dobijenih vrednosti za moduo δZ , kao i apsolutno iskazano rasipanje faznog stava $\Delta\varphi$, računatih po (10) i (11),

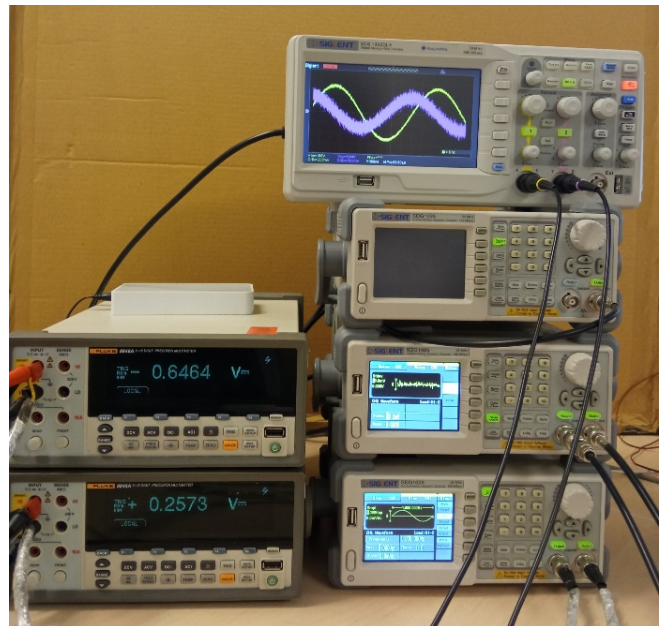
$$\delta Z = 100 \frac{Z_{\max} - Z_{\min}}{2 \cdot Z_{\text{avg}}} \quad (10)$$

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}{2} \quad (11)$$

gde je $Z_{\max}$ i $Z_{\min}$ najveća i najmanja dobijena vrednost, dok je Z_{avg} srednja vrednost modula impedanse. Slično, $\varphi_{\max}$ i $\varphi_{\min}$ predstavljaju najveću i najmanju vrednost faznog stava impedanse. Iz Tabele 1 se vidi da se i pri visokom nivou naponske smetnje od 40 % i strujne smetnje od 200 %, dobija relativno rasipanje vrednosti modula impedanse 2.7 %, a rasipanje faznog stava iznosi 1.4 °.

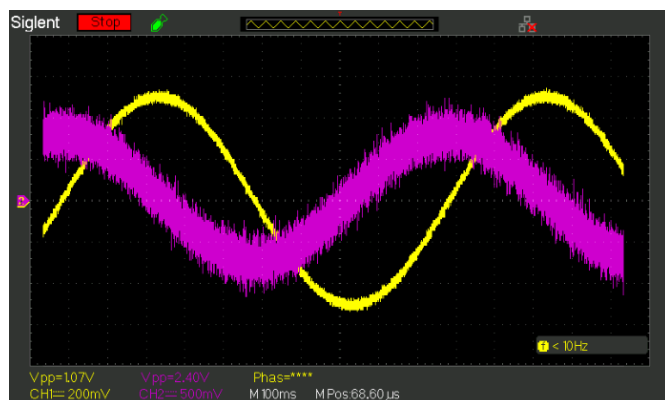
IV. EKSPERIMENT

Na Sl. 6 je data fotografija korišćene opreme. Korišćena su tri dvokanalna funkcijaska generatora SIGLENT 1025 [9]. Donji generator daje dva prostoperiodična napona frekvencije 1 Hz, međusobno fazno pomerena za 90 °; srednji generator proizvodi dva nezavisna šuma, standardne devijacije 30 mV i 300 mV, gde je 300 mV maksimalna vrednosti napona šuma koji se može dobiti.



Sl. 6. Eksperimentalna postavka

Šumom manje amplitude se želi oponašati zašumljenost napona a šumom veće amplitude zašumljenost struje SC. Gornji generator pravougaonom povorkom impulsa frekvencije 15 Hz definiše trenutke odabiranja. Sabiranjem po jednog prostoperiodičnog napona i jednog šuma dobijeni su zašumljeni naponi prikazani na Sl. 7. Kao voltmetri koriste se dva FLUKE 8846A [10] multimetra koji poseduju IADC, za razliku od eksperimenta prikazanom u [1] gde su multimetri konfigurisani kao ampermetar i voltmetar.



Sl. 7. Generisani naponi sa šumom

Merenja su vršena sa i bez šuma. Rezultati su dati u Tabeli 2.

TABELA 2
REZULTATI MERENJA

	Moduo		Faza	
	AVG (Ω)	STD (Ω)	AVG ($^\circ$)	STD ($^\circ$)
Sa šumom	1.5011	0.0078	-89.43	0.07
Bez šuma	1.4961	0.0077	-89.51	0.10

Na osnovu rezultata prikazanih u Tabeli 2 može se zaključiti da se dobijaju približno isti rezultati za srednju vrednost i standardnu devijaciju modula i faznog stava impedanse, bez obzira da li se merenje sprovodi na naponima sa ili bez šuma.

V. ZAKLJUČAK

U radu je prikazano rešenje otporno na visok nivo smetnji u naponskom i strujnom signalu, na primeru merenja modula i faznog stava impedanse SC napajanog iz prekidačkog naponskog izvora. Na osnovu rezultata simulacija i merenja može se zaključiti da metoda koja je prikazana u ovom radu, ima pogodnosti u primenama kada signali koji se mere imaju visok nivo šuma. Visoka otpornost na šum je posledica dva razloga: a) korišćenja IADC za koje se od ranije zna da vrše potiskivanje uticaja VF smetnji i b) korišćenje postupka fitovanja prilikom određivanja amplitude i faznog stava napona i struje, a potom modula i faznog stava impedanse SC.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija kroz projekat broj 451-03-47/2023-01/200156 "Inovativna, naučna i umetnička

istraživanja iz domena delatnosti FTN-a".

LITERATURA

- [1] M. Šaš, D. Pejić, N. Gazivoda, Đ. Novaković, B. Vujčić, "Merni sistem za određivanje modula i faznog stava impedanse baziran na virtuelnoj instrumentaciji," etran.rs. [online]. Available: https://www.etrans.rs/2022/zbornik/etrans-22_radovi/125-ml3.4.pdf. [accessed: 11-may-2023].
- [2] M. Šaš, D. Pejić, N. Gazivoda, Đ. Novaković, B. Vujčić, And Members, "Simulaciona Analiza Metode Pogodne Za Metrološku Karakterizaciju Impedanse Na Niskim Frekvencijama," Etran.Rs. [Online]. Available: https://www.etrans.rs/2022/Zbornik/Etran-22_Radovi/126-ML3.5.Pdf. [Accessed: 11-May-2023].
- [3] F. Naseri, S. Karimi, E. Farjah, and E. Schaltz, "Supercapacitor management system: A comprehensive review of modeling, estimation, balancing, and protection techniques," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 155, no. 111913, p. 111913, 2022.
- [4] A. C. Lazanas and M. I. Prodromidis, "Electrochemical impedance Spectroscopy—A tutorial," ACS Meas. Sci. Au, 2023.
- [5] U. Pogliano, "Use of integrative analog-to-digital converters for high-precision measurement of electrical power," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 50, no. 5, pp. 1315–1318, 2001.
- [6] W. G. K. Ihlenfeld, E. Mohns, H. Bachmair, G. Ramm, and H. Moser, "Evaluation of the synchronous generation and sampling technique," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 52, no. 2, pp. 371–374, 2003.
- [7] J. Wu, R. Zhong, Y. Sui, Y. Zhao, C. Wan, and L. Zheng, "High-precision time interval measurement method based on sliding scaled time-to-digital conversion circuit," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 71, pp. 1–9, 2022.
- [8] "scipy.optimize.curve_fit — SciPy v1.10.1 Manual," Scipy.org. [Online]. Available: https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.curve_fit.html. [Accessed: 11-May-2023].
- [9] "SDG1025 (DISCONTINUED > SEE SDG1032X)," Siglent, 20-Apr-2016. [Online]. Available: <https://siglentna.com/product/sdg1025/>. [Accessed: 11-May-2023].
- [10] "8845A/8846A 6.5 Digit Precision Multimeters," Flukecal.com. [Online]. Available: <https://us.flukecal.com/products/data-acquisition-and-test-equipment/bench-multimeters/8845a8846a-65-digit-precision-multime>. [Accessed: 11-May-2023].

ABSTRACT

In this paper the justification for using the integrating analog-digital converter (IADC) when characterizing supercapacitors (SC) in the presence of noise is analyzed. During the characterization of SC intended for the automotive industry, it is necessary to perform the test in conditions close to the conditions of exploitation. Unlike SC cells, which are designed for a voltage of a few volts, SCs are designed to work at over 100 V. A Switched-mode power supply was used to provide the SC with the necessary voltage and current. Although SMPS has output filters whose purpose is to suppress interference at the switching frequency as much as possible, there is interference in the voltage waveform, which produces even greater interference in the current waveform. To characterize the SC in conditions of high presence of noise, integrating AD converters were used, which are known to suppress interference at higher frequencies.

Using an integrating analog-digital converter for the characterization of supercapacitors in conditions of high presence of noise

Milan Šaš, Nikola Vukajlović, Slavica Medić, Dragan Pejić