

Etaloniranje CCLD predpojačavača naelektrisanja

1. Dragan Lazić
Sektor za metrologiju
Tehnički opitni centar
Beograd, Srbija
astazu.lazic@gmail.com i 0009-0005-1800-7838

3. Miloš Jovanović
Sektor za metrologiju
Tehnički opitni centar
Beograd, Srbija
mjovanovic@raf.rs i 0000-0002-6621-8235

2. Slobodan Subotić
Sektor za metrologiju
Tehnički opitni centar
Beograd, Srbija
slobodansubotic80@gmail.com i 0009-0008-3389-2451

4. Jelena Jovanović
Katedra za merenja
Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu
Niš, Srbija
jelena.jovanovic@elfak.ni.ac.rs i 0000-0001-7238-6393

Abstract—U radu je prikazano etaloniranje CCLD predpojačavača naelektrisanja, tip B&K 2647, tj. predpojačavača sa strujnom pobudom. Metoda se realizuje u Tehničkom opitnom centru primenom etalona za vibracije B&K 3629W.

Ključne reči—vibracije, predpojačavač naelektrisanja, merna nesigurnost

I. UVOD

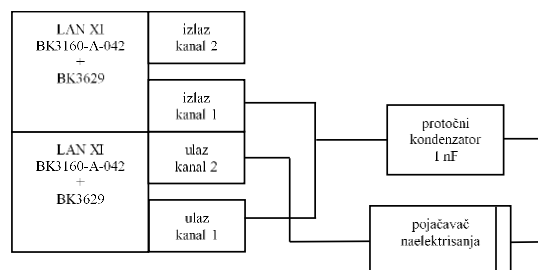
Oprema za kondicioniranje, koja omogućava prirpemu analognih mernih signala pre njihovog transformisanja u digitalni oblik, predstavlja neizbežnu kariku u mernom lancu. Predpojačavači naelektrisanja, CCLD - Constant Current Line Drive, koriste se za kondicioniranje signala na širokom spektru senzora, kao što su mikrofoni, akcelometri, taho sonde, senzori pritiska i sile. Rade se u izvedbama od jednokanalnih, do višekanalnih uređaja, sa i bez baterijskog napajanja. Primenom uređaja sa baterijskim napajanjem omogućena je autonomija rada uređaja nezavisno od akvizicionog sistema, pa na svom izlazu daju AC napon pogodan za dalju obradu, dok jednokanalni predpojačavači naelektrisanja za svoj rad koriste struju za pobudu od samog akvizicionog sistema u rasponu od 4 mA do 20 mA sa DC napajanjem oko 13 V. Namena predpojačavača naelektrisanja je da izvrše konverziju signala sa piezoelektričnog senzora visoke impedanse u električni signal niske impedanse pogodan za dalju distribuciju, obradu i snimanje. Prilagođeni su za rad u širokom temperaturnom opsegu što im omogućava povezivanje sa senzorom blizu mernog mesta gde su prisutne velike promene temperature. Odlikuje ih široki frekvencijski merni opseg od 0,1 Hz do 100 kHz, fiksnog pojačanja (0,1; 0,5; 1; 5; 10; 25 ili 100) mV/pC i malih su dimenzija. Dizajnirani su da signal u vidu naelektrisanja sa senzora konvertuju u električni napon, pojačaju i prilagode za dalju distribuciju ka akvizicionom sistemu sa strujnom pobudom u skladu sa industrijskim standardom IEPE "Integrated Electronics Piezo Electric" [1], kompatibilnim sa drugim proizvođačima (CCLD, ICP, ISOTRON, PIEZOTRON, itd). Na ovaj način omogućena je distribucija mernog signala na velika rastojanja, a samim tim smanjen je uticaj na korisni signal. Pojedini tipovi predpojačavača naelektrisanja imaju integrisani TEDS interfejs "Smart Transducer Interface" IEEE 1451.4 u kome su smešteni podaci o samom predpojačavaču (proizvođač, tip, serijski broj, pojačanje, frekvencijski opseg, identifikacionom broju, itd) kao

i podaci o datumu kalibracije, referentnom pojačanju i fazi što im omogućava brzu identifikaciju i prepoznavanje u mernom lancu. Zavisno od porizvođača, konektori za povezivanje se izrađuju u kombinaciji 10-32 UNF, BNC, 2-pin TNC ili LEMO. Prilikom povezivanja predpojačavača u merni lanac, mora se obratiti pažnja na oznaku gde je ulaz za senzor [2]-[4].

II. ETALONSKA MERNA OPREMA

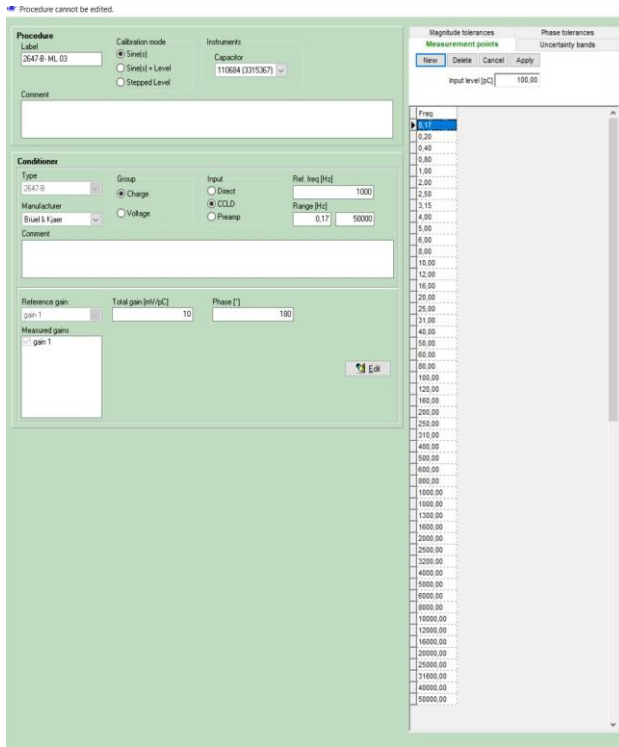
Za etaloniranje predpojačavača tip B&K 2647B pojačanja 10 mV/pC, frekvencijskog opsega od 0,17 Hz do 50 kHz koristi se merna oprema firme Brüel&Kjær, etalon B&K 3629W sa namenski razvijenim softverom za etaloniranje i obradu mernih podataka. Da bi se obezbedila poverljivost u rezultate merenja, sva merna oprema koja se koristi u mernom lancu mora da bude etalonirana i da ima obezbeđenu metrološku sledljivost sa prihvatljivom mernom nesigurnošću. Radi postizanja temperaturne stabilizacije, pre etaloniranja predpojačavača, sva etalonska merna oprema i predpojačavač moraju biti temperirani najmanje 2 sata na temperaturi od 23 °C, dok etaloni moraju biti pod napajanjem. Etaloniranje predpojačavača izvodi se saglasno uputstvu [5] i standardu [6], a prema blok šemi sa Sl. 1.

Mernu opremu sačinjava merni akvizicioni sistem LAN-XI 3160-A-042 sa svoja dva generatorska izlazna kanala i četiri ulazna merna kanala. Generatorski kanali omogućavaju generisanje signala amplitude do 10 V, frekvencije do 51,2 kHz, sa rezolucijom 0,1 mHz, i tačnosti generisanja frekvencije 0,00025%, dok ulazni kanali omogućavaju merenje signala do 10 V, uz A/D konverziju 2x24 bita, brzinu semplovanja 131 kS/s i frekvencijskog opsega do 51,2 kHz. Svojim pobudnim karakteristikama, strujom od 4 mA do 20 mA i naponom napajanja DC do 24 V, svaki kanal omogućava povezivanje CCLD senzora [7].



Sl. 1 Blok šema povezivanja merne opreme

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije [broj ugovora: 451-03-137/2025-03/200102].



Sl. 2 Postupak kreiranja procedure za etaloniranje B&K 2647B

U uputstvu za etaloniranje opisana je metoda koja se primnjuje za etaloniranje predpojačavača tip B&K 2647B. Na Sl. 2. dat je postupak kreiranja procedure za etaloniranje predpojačavača B&K 2647B. Na referentnoj frekvenciji od 1000 Hz, određuje se vrednost referentnog pojačanja za konstantnu pobudu od 100 pC pri sinusnoj pobudi.

Da bi se obezbedila konstantna pobuda od zadatih 100 pC za referentnu vrednost, za kalibraciju predpojačavača pored generatora AC napona $U_g(\omega)$ koristi se i referentni kondenzator kapacitivnosti $C_n=1$ nF do 200 kHz, pa je time omogućena konverzija AC pobudnog napona u naelektrisanje

$$Q_c(\omega) = C_n \cdot U_g(\omega). \quad (1)$$

Ulazni signal sa generatora može se predstaviti u obliku

$$U_g = \hat{U}_g \cdot \sin(2\pi ft + \varphi_g), \quad (2)$$

a izlazni signal iz predpojačavača u obliku

$$U_{iz} = \hat{U}_{iz} \cdot \sin(2\pi ft + \varphi_{iz}), \quad (3)$$

tako da se na osnovu merenja ova dva signala lako može dobiti pojačanje predpojačavača

$$G = \frac{\hat{U}_{iz}}{\hat{U}_g}, \quad (4)$$

kao i faza

$$\varphi = \varphi_{iz} - \varphi_g. \quad (5)$$

Nakon određivanja referentnog pojačanja, pri promeni frekvencije određuje se pojačanje za svaku generisanu mernu tačku. Za svako dobijeno pojačanje u odnosu na referentno određuje se devijacija pojačanja.

III. UTICAJNE VELIČINE ZA PRORAČUN MERNE NESIGURNOSTI

Merna nesigurnost je parametar pridružen rezultatu merenja i koji opisuje rasipanje merene vrednosti, a koje bi moglo da se razumno pripiše merenoj veličini. To je procenjena vrednost svakog merenja, i predstavlja interval u kome se nalazi prava vrednost merene veličine. Pripisuje se višestrukom ponavljanju merenja, mernoj opremi koja se koristi, primenjenoj metodi, osoblju koje izvodi merenje, uticajnim parametrima okoline, kao i samom merilu koje je predmet etaloniranja. Na osnovu navedenog, usvojena su dva tipa merne nesigurnosti, tip A i tip B. Tip A se dobija iz serije ponovljenih merenja i statističkom analizom dobijenih mernih rezultata, dok se tip B dobija procenama, putem iskustva baziranog na dostupnim informacijama. Zajedno ove dve merne nesigurnosti čine kombinovanu mernu nesigurnost koja se može iskazati na sledeći način

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2}. \quad (6)$$

Nije moguće uvek odrediti sve uticajne veličine koje utiču na mernu nesigurnost, ali je iskustveno moguće prepoznati i proceniti one koje imaju najbitniji doprinos [8]. Uticajne veličine za proračun merne nesigurnosti kao i model, dati su u DKD-R 3-2 „Calibration of conditioning amplifiers for dynamic application“ [6]. Procena svih doprinosa i ukupne merne nesigurnosti rezultata etaloniranja je od osnovne važnosti za sve koji koriste rezultate merenja i data je u standardu SRPS ISO/IEC 17025:2017 [9]. Bez ovih podataka se ne može oceniti poverenje u rezultate obavljenih merenja i izvršiti njihovo poređenje. Da bi se merna nesigurnost garantovala sa većom verovatnoćom, uveden je parametar proširena merna nesigurnost, tako da se dobijeni rezultat merenja daje u obliku

$$Y = y \pm U. \quad (7)$$

Prvi korak u proceni merne nesigurnosti je kreiranje matematičkog modela koji opisuje funkcionalnu zavisnost merene veličine Y od ulaznih promenljivih X_i . Uticajne veličine koje se uzimaju u razmatranje pri proračunu merne nesigurnosti predpojačavača naelektrisanja date su u Tabeli I. Uticaj frekvencije i rezolucije nije razmatran jer vrednosti nisu dominantne i zanemarive su u budžetu merne nesigurnosti. Matematički model za proračun budžeta merne nesigurnosti dat je u sledećem obliku

$$\delta U = u(V_{out}) + u(C) + u(V_{in}) + u(V_T) + u(G_{RE}), \quad (8)$$

dok je proširena merna nesigurnost sa faktorom pokrivenosti $k=2$, odnosno 95%, data kao

$$U = k \cdot \delta U, \quad (9)$$

a konačni rezultat merenja dat je u obliku

$$G = g \pm U. \quad (10)$$

TABELA I. UTICAJNE VELIČINE ZA PRORAČUN MERNE NESIGURNOSTI

$u(V_{out})$	Uticaj nesigurnosti generisanja naizmeničnog napona pomoću generatora.
$u(C)$	Uticaj nesigurnosti vrednosti kapacitivnosti kondenzatora.
$u(V_{in})$	Uticaj nesigurnosti merenja naizmeničnog napona.
$u(V_T)$	Uticaj promene temperature na merenje pojačanja.
$u(G_{RE})$	Zaostali uticaji koji utiču na merenje pojačanja (npr. slučajni efekat pri ponovljenim merenjima; eksperimentalna standardna devijacija srednje aritmetičke vrednosti).

IV. OPIS UTICAJNIH VELIČINA ZA PRORAČUN MERNE NESIGURNOSTI

Svaka uticajna veličina u budžetu proračuna merne nesigurnosti daje svoj doprinos. Iskustveno ili iz preporuka za proračune mernih nesigurnosti, za svaku veličinu usvaja se funkcija raspodele kao i verovatnoća koja odgovara tom podatku. Merna nesigurnost je parametar pridružen rezultatu merenja, koji opisuje rasipanje izmerenih vrednosti koje se mogu razumno pripisati merenoj veličini. To je procenjena vrednost svakog merenja, i predstavlja interval u kome se nalazi prava vrednost merene veličine.

Nijedna uticajna veličina nije u značajnoj korelaciji sa bilo kojom drugom veličinom [5]. Proširena merna nesigurnost se usvaja za faktor pokrivanja $k=2$, $U=0,026\%$.

Za nominalno pojačanje pojačavača naelektrisanja od 10 pC/mV i 1000 Hz za B&K 2647B dobijena je merna nesigurnost: $G=9,9925 \text{ pC/mV} \pm 0,026\%$ odnosno, $G=9,9925 \text{ pC/mV} \pm 0,0026 \text{ pC/mV}$.

Na osnovu uticajnih veličina i nepredvidivih uticaja koji se mogu javiti usled etaloniranja kondenzatora, povezivanja opreme, etaloniranja analizatora signala zaokruživanja u samom programu kao i same procene da se etaloniranje kondenzatora ne može raditi ispod 20 Hz, odnosno 10 Hz, usvaja se merna nesigurnost za ceo frekvencijski opseg i pojačanje koje je 0,25% od merene vrednosti.

U Tabeli II date su dominantne uticajne veličine koje ulaze u proračun budžeta merne nesigurnosti pri etaloniranju predpojačavača naelektrisanja za referentnu frekvenciju od 1000 Hz. Za svaku uticajnu veličinu dati su izvori nesigurnosti i pridružena je odgovarajuća raspodela. Za uticajne veličine za koje podatke o mernoj nesigurnosti koristimo iz uverenja o etaloniranju, usvojena je normalna raspodela. To je slučaj sa nesigurnošću generisanja naizmeničnog napona, nesigurnošću vrednosti kapacitivnosti kondenzatora kao i nesigurnošću merenja naizmeničnog napona. Etaloniranje predpojačavača se vrši u laboratorijskim uslovima na $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ pa se za uticajnu veličinu V_T , tj. promenu temperature, uzima pravougaona raspodela. Za zaostale uticajne veličine koje su prisutne pri merenju usvaja se normalna raspodela.

U Tabeli III dat je prikaz budžeta merne nesigurnosti koji je dobijen na osnovu matematičkog modela (8), sa brojnim vrednostima koje dalje ulaze u proračun kombinovane merne nesigurnosti.

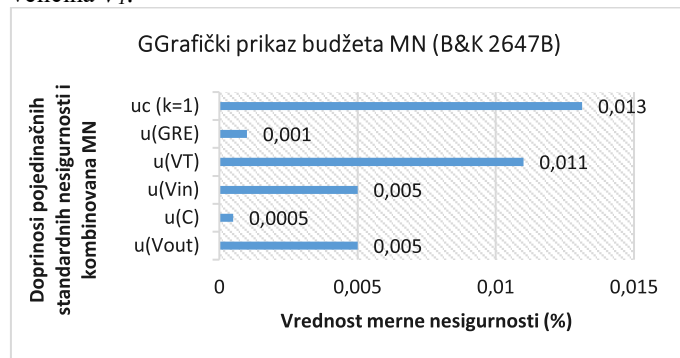
TABELA II. OPIS UTICAJNIH VELIČINA

$u(V_{out})$	Uticaj nesigurnosti generisanja naizmeničnog napona pomoću generatora: je komponenta merne nesigurnosti koja potiče od definisane proširene nesigurnosti etaloniranja naizmeničnog napona LAN XI generatora za 1000 Hz 0,01% na 100 mV. Merna nesigurnost pri normalnoj raspodeli iznosi 0,005%, $u(V_{out})/2$.
$u(C)$	Uticaj nesigurnosti vrednosti kapacitivnosti kondenzatora 1 nF: je komponenta koja potiče od etaloniranja kondenzatora i uzima se iz uverenja o etaloniranju i za 1000 Hz iznosi 0,001%. Merna nesigurnost pri normalnoj raspodeli iznosi 0,0005%, $u(C)/2$.
$u(V_{in})$	Uticaj nesigurnosti merenja naizmeničnog napona: je komponenta merne nesigurnosti koja potiče od definisane proširene nesigurnosti etaloniranja naizmeničnog napona LAN XI pri etaloniranju ulaznog kanala za 1000 Hz 0,01% na 1000 mV. Merna nesigurnost pri normalnoj raspodeli iznosi 0,005%, $u(V_{in})/2$.
$u(V_T)$	Uticaj promene temperature na merenje osetljivosti pojačavača: uticaj promene temperature se odnosi na pojačavač koji se etalonira i iz specifikacije iznosi da je 100 ppm/K za uslove $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$. Procenjena nesigurnost je 0,02%. Raspodela je pravougaona pa je doprinos 0,011%, $u(V_T)/\sqrt{3}$.
$u(S_{RE})$	Zaostali uticaji koji utiču na merenje odnosa napona (npr. slučajni efekat pri ponovljenim merenjima; eksperimentalna standardna devijacija srednje aritmetičke vrednosti): za procenu od 0,002% i normalnu raspodelu dobija se da je 0,001%, $u(S_{RE})/2$.

TABELA III. BUDŽET MERNE NESIGURNOSTI

Uticajna veličina x_i	Procena x_i (%)	SN $u(x_i)$ (%)	Funkcija raspodele	Koef. oset. c_i	Doprinos SN $u(y)=c_i \cdot u(x_i)$ (%)
V_{out}	0,01	0,01·0,5	normalna	1	0,005
C	0,001	0,001·0,5	normalna	1	0,0005
V_{in}	0,01	0,01·0,5	normalna	1	0,005
V_T	0,02	0,02·0,58	pravoug.	1	0,011
S_{RE}	0,002	0,002·0,5	normalna	1	0,001
$G=9,9925 \text{ pC/mV} \quad k=1$					0,013

Grafički prikaz pojedinačnih doprinosa standardnih mernih nesigurnosti u odnosu na kombinovanu mernu nesigurnost dat je na Sl. 3. Na osnovu Tabele III i Sl. 3. se može uočiti da je dominantna uticajna veličina V_T , tj. promena temperature. Na osnovu podatka iz specifikacije proizvođača da je temperaturni koeficijent 100 ppm/K, i da je dozvoljena promena temperature u laboratoriji za vreme etaloniranja $\pm 2^\circ\text{C}$, analizirana je uticajna veličina V_T .



Sl. 3 Grafički prikaz budžeta merne nesigurnosti etaloniranja B&K 2647B

V. ZAKLJUČAK

Sva merna oprema koja se koristi pri etaloniranju predpojačavača naelektisanja ima metrološku sledivost do Nacionalnih metroloških instituta. Primenom etalonske merne opreme i kreiranom procedurum u programu B&K 3629W omogućeno je etaloniranje predpojačavača naelektrisanja tipa B&K 2647B. Jednostavnim izmenama u proceduri mogu se etalonirati i predpojačavači drugih proizvođača sličnih metroloških karakteristika i različitih pojačanja.

Iako se iz budžeta merne nesigurnosti etaloniranja B&K 2647B i odgovarajućeg grafičkog prikaza vidi da je uticaj promene temperature dominantan, u realnim uslovima ovaj parametar je sveden na minimum. Samo etaloniranje traje manje od dva sata, dok se predpojačavač naelektrisanja za vreme etaloniranja nalazi fiksiran na mermernom bloku. Za vreme etaloniranja varijacija temperature u laboratoriji je manja od $\pm 0,5$ °C.

REFERENCE/LITERATURA

- [1] Introduction to Piezoelectric Accelerometers with Integral Electronics (IEPE), SBN 978-3-319-08077-2, Felix Levinzon 2014
- [2] Charge to CCLD Converter Types 2647-A, B, -C, -D, -D-001, -D-002, -D-003, -D-004 and -E, Product Data, BRÜEL&KJÆR, Nærum - Denmark

- [3] Charge Amplifier, In-line Charge Amplifier Module, https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/003-073e.pdf
- [4] High-Performance Charge Amplifiers, <https://www.pcb.com/industrial-sensors/electronics/charge-amplifiers>
- [5] C.43.069 - Uputstvo za etaloniranje predpojačavača naelektrisanja u sistemu BK 3629, avgust 2023.
- [6] DKD-R 3-2 Calibration of conditioning amplifiers for dynamic application, 2019
- [7] Operational Manual for Vibration Calibration System Type 3629, Version 3.0.1.239
- [8] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement – GUM, BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 2008
- [9] SRPS ISO/IEC 17025:2017, Opšti zahtevi za kompetentnost laboratorija za ispitivanje i laboratorija za etaloniranje

ABSTRACT

The paper presents the calibration of the CCLD charge preamplifier, specifically the B&K 2647 type, i.e., a preamplifier with current excitation. The calibration method is applied in the Technical Testing Center using the vibration standard B&K 3629W.

CALIBRATION OF THE CCLD CHARGE PREAMPLIFIER

Dragan Lazić, Slobodan Subotić, Miloš Jovanović,
Jelena Jovanović