

Eksperimentalna verifikacija pojačavača signala za testiranje merila kvaliteta električne energije

Milan Simić, Živko Kokolanski, Dragan Denić, Vladimir Dimčev, Dragan Živanović, Peter Planinšič

Apstrakt—U radu je prikazana procedura za eksperimentalnu verifikaciju pojačavača signala koji se može koristiti u postupku testiranja uređaja za merenje standardnih parametara kvaliteta električne energije. Realizovano rešenje pojačavača uključuje niskopropusni filter, predpojačavač i pojačavač snage, kojima se obezbeđuje odgovarajući naponski nivo od 230 V. Test signali za eksperimentalnu verifikaciju pojačavača obezbeđuju se pomoću računarski podržanog generatora signala, koji je baziran na LabVIEW softverskoj platformi i akvizicionoj kartici NI PCIe 6343. Ovaj generator omogućava generisanje naponskih signala sa različitim poremećajima kvaliteta električne energije, tipičnim za realne elektrodistributivne sisteme. Kao referentni instrument za merenje parametara kvaliteta signala na izlazu pojačavača primenjen je analizator kvaliteta električne energije Fluke 435. U ovom konkretnom slučaju generatorom signala obezbeđeno je više eksperimentalnih test signala sa različitim poremećajima kvaliteta. Neki eksperimentalni rezultati dobijeni referentnim mernim instrumentom prikazani su i analizirani u ovom radu.

Ključne reči—Eksperimentalna procedura, pojačavač signala, generator test signala, merenje kvaliteta električne energije.

I. UVOD

OSNOVNI uzroci smanjenja nivoa energetske efikasnosti u proizvodnji i potrošnji električne energije mogu biti različite kategorije poremećaja parametara kvaliteta u obliku sporih ili brzih promena vrednosti mrežnog napona napajanja, ili u vidu prisustva viših harmonika signala. Kao posledica smanjenog kapaciteta prirodnih energetskih potencijala, što je praćeno i sve većom primenom alternativnih izvora električne energije, obezbeđenje odgovarajućeg nivoa kvaliteta i pouzdanosti isporuke električne energije poslednjih godina dobija sve veći ekonomski značaj. Sa stanovišta prava i interesa potrošača, distributeri su dužni da im u skladu sa ugovorenim obavezama isporučuju kvalitetnu električnu energiju za pouzdan i kvalitetan rad njihovih električnih uređaja i opreme. Shodno tome, kako bi u što značajnijoj meri smanjile mogućnost pojave različitih problema i poremećaja prilikom isporuke električne energije

Milan Simić – Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, (e-mail: milan.simic@elfak.ni.ac.rs).

Živko Kokolanski – Fakultet za elektrotehniku i informacione tehnologije - FEIT, Skoplje, Makedonija (e-mail: kokolanski@feit.ukim.edu.mk).

Dragan Denić – Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: dragan.denic@elfak.ni.ac.rs).

Vladimir Dimčev – Fakultet za elektrotehniku i informacione tehnologije - FEIT, Skoplje, Makedonija (e-mail: vladim@feit.ukim.edu.mk).

Dragan Živanović – Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: dragan.zivanovic@elfak.ni.ac.rs).

Peter Planinšič – Univerzitet u Mariboru, Fakultet za elektrotehniku i računarstvo, 2000 Maribor, Slovenija (e-mail: peter.planinsic@uni-mb.si).

distributivne kompanije moraju kontinualno da prate procese prenosa i potrošnje električne energije. Ove aktivnosti moraju da uključe merenje i analizu izmerenih vrednosti osnovnih parametara i poremećaja kvaliteta električne energije, koji su definisani važećim nacionalnim i međunarodnim standardima kvaliteta [1]. Ovakvim standardima propisane su referentne, odnosno nominalne vrednosti osnovnih parametara kvaliteta električne energije, kao i dozvoljena granična odstupanja.

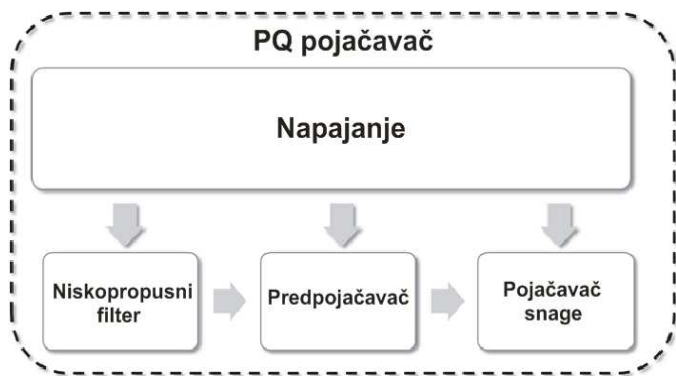
Pouzdana i efikasna kontrola prenosa i potrošnje električne energije podrazumeva primenu savremenih rešenja mernih i informacionih sistema za kontinualni monitoring kvaliteta električne energije. Danas je na tržištu merne opreme prisutan veći broj instrumenata za merenje kvaliteta električne energije od jednostavnijih uređaja do vrlo sofisticiranih rešenja kojima se mogu meriti parametri kvaliteta i registrovati pojave koje utiču na degradaciju kvaliteta električne energije. Relevantni podaci kojima se potvrđuje obezbeđenje optimalnog nivoa kvaliteta elektrodistributivnog sistema mogu se obezbediti samo mernim instrumentima koji su prethodno adekvatno testirani i metrološki verifikovani za primenu u odgovarajuće svrhe [2,3]. Za potrebe metrološke verifikacije neophodno je testiranje ovih uređaja u laboratorijskim uslovima ili direktno na lokacijama udaljenih mernih stanica. Referentna sredstva, naponski ili strujni kalibratori, danas su komercijalno dostupni na tržištu u različitim funkcionalnim rešenjima, kao što su kalibracioni instrumenti Fluke 5500A-PQ ili Fluke 6100B [4].

Eksperimentalna procedura koja je prikazana u ovom radu primenjena je za verifikaciju pojačavača signala realizovanog za potrebe testiranja merača parametara kvaliteta električne energije. Test signali za ulaz pojačavača generišu se pomoću generatora signala kojim se mogu obezbediti naponski signali sa standardnim poremećajima kvaliteta električne energije. To konkretno rešenje računarski podržanog generatora signala detaljno je opisano i prikazano u ranijim publikacijama [5,6].

II. REALIZACIJA POJAČAVAČA SIGNALA

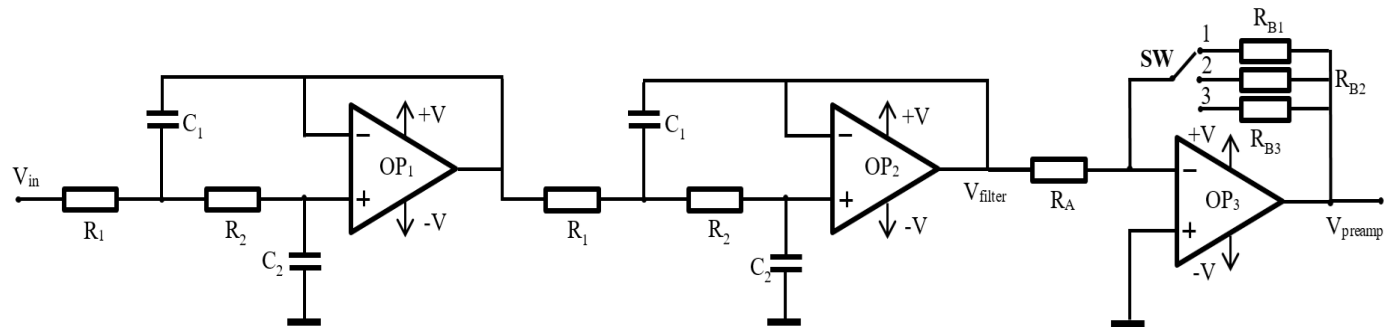
Generalno, signali koji se generišu na izlazu akvizicionih kartica kreću se u opsegu ± 10 V. Kako bi se ovi signali mogli koristiti u procesu testiranja instrumenata za merenje kvaliteta električne energije treba ih pojačati na nominalni naponski nivo od 230 V. Osnovna blok konfiguracija realizovanog rešenja pojačavača signala za testiranje analizatora kvaliteta električne energije (power quality – PQ pojačavač) prikazana je na Sl. 1. Predstavljeno rešenje pojačavača sadrži tri osnovna funkcionalna segmenta: niskopropusni filter za ograničavanje frekventnog opsega ulaznog naponskog signala sa mogućom eliminacijom neželjenih šumova, predpojačavač za pojačanje

ulaznog signala do odgovarajućeg referentnog nivoa, kao i blok pojačavača snage kojim se omogućava pojačanje signala do nominalnog standardnog naponskog nivoa od 230 V.



Sl. 1. Blok konfiguracija pojačavača signala (PQ pojačavač).

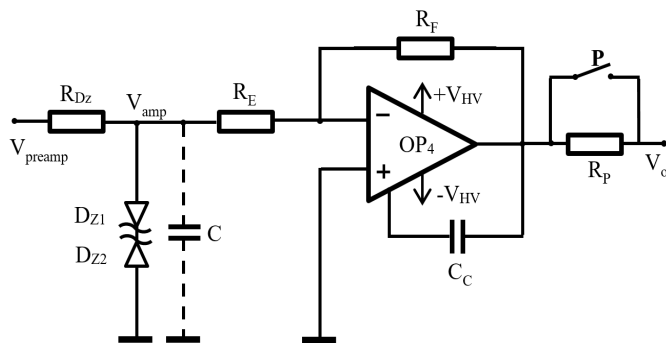
Generalno, filtri se karakterišu preko nekoliko najvažnijih parametara, kao što su: širina propusnog opsega, slabljenje u nepropusnom opsegu, granična frekvencija filtra i red filtra. Svaka vrsta filtra ima neke svoje specifične prednosti. Primera radi, Bessel-ov filter ima najlinearniju fazno-frekventnu k-ku, Butterworth-ov filter ima poprilično ravnu k-ku u propusnom opsegu, dok Chebyshev filter ima najveće slabljenje kada je u pitanju nepropusni opseg. Pri realizaciji "anti-aliasing" filtra treba uzeti u obzir slabljenje od -3 dB na graničnoj frekvenciji filtra. Ako se ovo ne uzme u obzir dolazi do slabljenja signala na višim harmonicima, pri čemu greška izazvana filtrom može dostići i vrednost od 30 %. Kako bi se kontrolisala greška koja nastaje zbog oblika amplitudno-frekventne k-ke filtra [7] treba uvesti parametar CFM (Cut-off Frequency Multiplier) filtra. Ovaj parametar definiše segment propusne karakteristike gde razlika između idealne i realne propusne k-ke filtra ima vrlo malu konstantnu vrednost, recimo 0.1%. Sa porastom reda filtra ovaj CFM parametar se smanjuje, pri čemu treba istaći da za redove filtra veće od četiri dolazi do stabilizacije CFM parametra. Ako se primeni Butterworth-ov filter četvrtog reda, CFM parametar će imati vrednost 2.18. Ovo praktično znači da granična frekvencija filtra mora da bude 2.18 puta veća od frekvencije najvišeg harmonika u spektru signala. Konkretno, u ovom slučaju realizovan je Butterworth-ov niskopropusni filter četvrtog reda u Sallen-key konfiguraciji (kaskadna veza dva dvopolna filtra). Odgovarajuće električno kolo ovog filtra sa kaskadnom vezom predstavljeno je na Sl. 2. sa leve strane.



Sl. 2. Električna šema Butterworth niskopropusnog filtra četvrtog reda (kaskadna veza sa leve strane) i invertujućeg predpojačavača (desna strana).

Osnovna ideja pri projektovanju bloka predpojačavača bila je da se omogući pojačanje signala sa izlaza standardnih D/A konvertora, kao što je slučaj kod izlaza standardne akvizicione kartice. Konkretno, u praktičnim aplikacijama na izlazu D/A kartice uglavnom se dobijaju signali u opsegu ± 2.5 V, ± 5 V ili ± 10 V. U skladu sa tim, kao referentna vrednost napona na izlazu predpojačavača definisan je maksimalni opseg ± 10 V. To znači da rešenje predpojačavača mora da ima promenljivo pojačanje sa diskretnim vrednostima 4, 2 ili 1, u zavisnosti od vrednosti opsega ulaznog signala (± 2.5 V, ± 5 V ili ± 10 V, respektivno). Ovakav tip predpojačavača može se jednostavno implementirati primenom klasičnog operacionog pojačavača, bilo invertujućeg ili neinvertujućeg tipa, sa prekidačem kojim se bira potrebni nivo pojačanja. Rešenje predpojačavača koje je primenjeno u ovom slučaju dato je na Sl. 2. sa desne strane. Operacioni pojačavači sa Sl. 2. OP1, OP2 i OP3 snabdeveni su simetričnim naponom napajanja $\pm V$. Konkretno, korišćeni su niskošumni pojačavači OP07 sa malim offset naponom [8].

Uloga pojačavača snage je da signal sa predpojačavača koji je u opsegu ± 10 V pojača na nominalni napon distributivne mreže od 230 V. Pojačavač snage realizovan je primenom visoko naponskog operacionog pojačavača APEX PA97 [9]. Električno kolo ovog pojačavača snage prikazano je na Sl. 3.

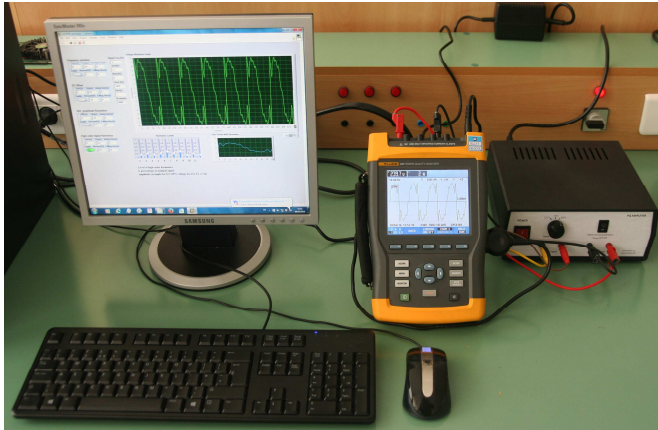


Sl. 3. Električna šema pojačavača snage sa kolom APEX PA97.

Primenjeni operacioni pojačavač APEX PA97, označen kao OP4 na Sl. 3, može da obezbedi struju od 10 mA pri naponu od 500 V (snaga od 5 W), što je dovoljno za testiranje uređaja za merenje kvaliteta električne energije ili za napajanje nekih električnih uređaja manje snage. Ovaj pojačavač snage napaja se simetričnim naponom napajanja od $V_{HV} = \pm 410$ V. Rešenje je realizovano u invertujućoj konfiguraciji, sa obezbeđenim nominalnim pojačanjem ulaznog signala od 40 puta.

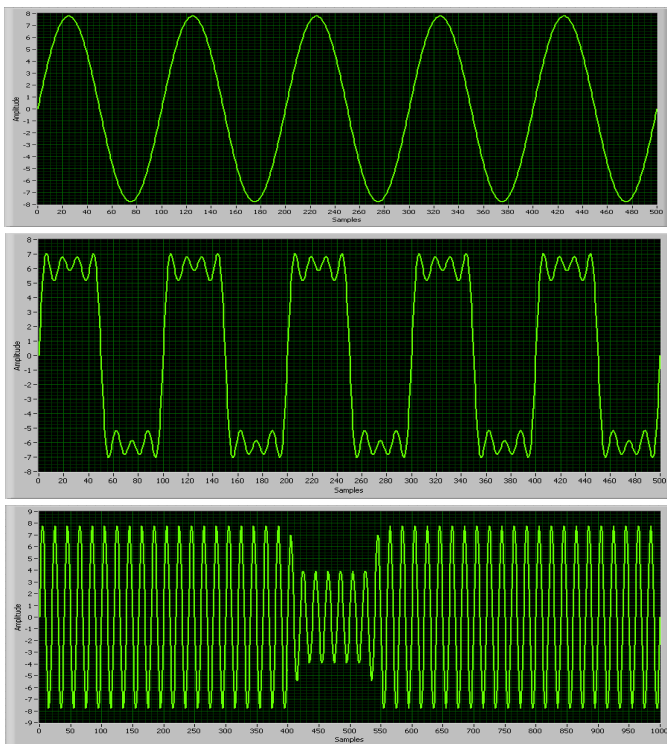
III. EKSPERIMENTALNA PROCEDURA

Eksperimentalna provera realizovanog pojačavača signala za testiranje merača kvaliteta električne energije izvršena je primenom softverski podržanog generatora signala sa tipičnim poremećajima kvaliteta, uz podršku PQ mernog instrumenta Fluke 435. Prikaz eksperimentalnog sistema sa generatorom signala, pojačavačem i mernim instrumentom dat je na Sl. 4.



Sl. 4. Grafička ilustracija eksperimentalnog sistema.

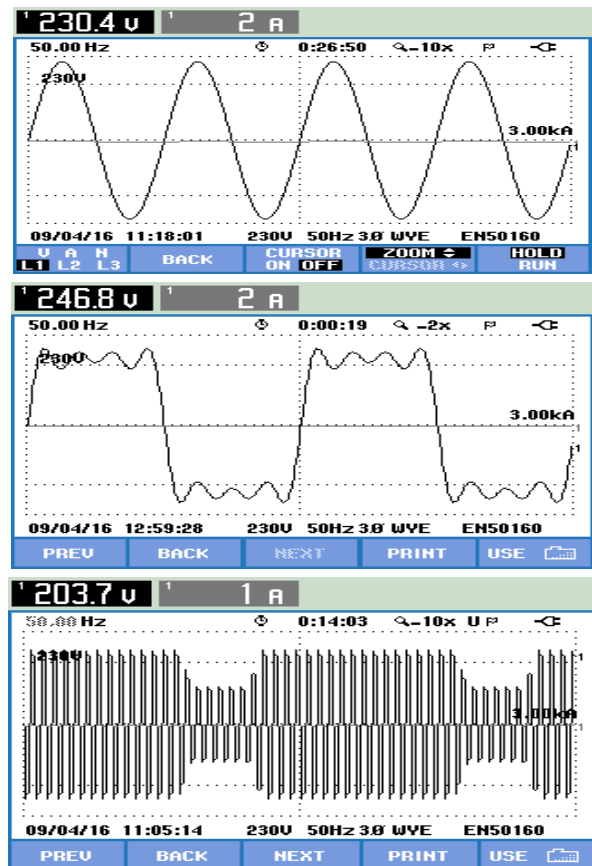
Kao generator signala za testiranje pojačavača primenjen je softverski podržan generator referentnih naponskih signala sa standardnim poremećajima kvaliteta električne energije. Ovaj generator baziran na LabVIEW aplikativnom softveru i kartici za akviziciju podataka NI PCIe 6343 detaljno je predstavljen u nekim prethodnim publikacijama [5,6]. Za potrebe testiranja generisano je više različitih signala sa varijacijom poremećaja kvaliteta. Na Sl. 5. predstavljeni su neki specifični primeri test



Sl. 5. Primeri signala za testiranje pojačavača (idealni naponski signal, viši neparni naponski harmonici i pad napona).

signala sa različitim poremećajima kvaliteta (idealni naponski signal, viši neparni naponski harmonici i pojava pada napona).

Kao referentni merni uređaj na izlazu testiranog pojačavača primenjen je analizator kvaliteta električne energije tipa Fluke 435. Pomoću standardnog USB interfejsa može se obezbediti direktna komunikacija između računara i analizatora kvaliteta Fluke 435, tako da se rezultati merenja i signali snimljeni na displeju tokom eksperimentalnog procesa mogu jednostavno prebaciti u računar, snimiti i spremiti za dodatnu statističku obradu. Talasni oblici naponskih signala sa izlaza pojačavača, snimljeni na grafičkom displeju referentnog instrumenta Fluke 435, predstavljeni su na Sl. 6. Dati talasni oblici odgovaraju prethodno opisanim test signalima koji su prikazani na Sl. 5.



Sl. 6. Talasni oblici test signala snimljeni na grafičkom displeju referentnog instrumenta Fluke 435.

IV. MERNI NESIGURNOST POJAČAVAČA

Najvažniji segment u metrološkoj verifikaciji realizovanog pojačavača je proračun pojedinačnih komponenta standardne merne nesigurnosti, uključujući i ukupni budžet nesigurnosti. Komponente naponske merne nesigurnosti pojačavača signala su proračunate u skladu sa zahtevima relevantnog dokumenta Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement [10]. Merni sistem za procenu komponenta nesigurnosti uključuje referentni kalibrator Fluke 5500A [4] za generisanje signala za ulaze pojačavača i 6 ½ digitalni multimetar Fluke 8846A [11] za merenje napona na izlazu pojačavača. Na kalibratoru Fluke 5500A definisana je konstantna vrednost RMS napona kojom se obezbeđuje da nominalna vrednost napona na izlazu

TABELA I
BUDŽET MERNE NESIGURNOSTI – STANDARDNA, KOMBINOVANA I PROŠIRENA MERNI NESIGURNOST IZLAZNOG NAPONA POJAČAVAČA

Izvor merne nesigurnosti	Tip	Oznaka	Nesigurnost za 50 Hz [V]	Nesigurnost za 1 kHz [V]	Tip raspodele	Faktor pokrivanja	Standardna nesigurnost za 50 Hz [V]	Standardna nesigurnost za 1 kHz [V]	
Standardna devijacija	A	u_A	0.0020162	0.0010954	Normalna	1	0.0020162	0.0010954	
Nesigurnost kalibratora	B	u_{B1}	0.06907905	0.0690213	Normalna	2.58	0.026774826	0.026752442	
Rezolucija kalibratora	B	u_{B2}	0.00001	0.00001	Ravnomerna	1.732050808	5.7735E-06	5.7735E-06	
Nesigurnost multimetra	B	u_{B3}	0.3630381	0.3629226	Normalna	2.58	0.140712442	0.140667674	
Rezolucija multimetra	B	u_{B4}	0.0005	0.0005	Ravnomerna	1.732050808	0.000288675	0.000288675	
							Kombinovana	0.14325	0.14319
							Proširena $k = 1.96$	0.28077	0.28066

ima RMS vrednost od 230 V. Merenje RMS napona na izlazu pojačavača obavljeno je za dve različite frekvencije signala, 50 Hz i 1 kHz, pri čemu je izvršeno ukupno 10 mernih ciklusa. Vremenski interval između dva uzastopna merenja podešen je na 5 minuta. Ukupni budžet nesigurnosti merenja napona na izlazu pojačavača, koji obuhvata proračun standardne merne nesigurnosti tipa A i tipa B, kombinovanu mernu nesigurnost i proširenu mernu nesigurnost, prikazan je u Tabeli 1. Izmerene RMS vrednosti napona i odgovarajuće vrednosti standardne devijacije, za različite frekvencije signala, date su u Tabeli 2.

TABELA II
IZMERENE RMS VREDNOSTI NAPONA I STANDARDNE DEVIJACIJE

Redni broj merenja	50 Hz	1 kHz
	V_{RMS} [V]	V_{RMS} [V]
1	230.056	229.877
2	230.065	229.877
3	230.072	229.871
4	230.068	229.872
5	230.063	229.869
6	230.051	229.872
7	230.062	229.869
8	230.068	229.868
9	230.071	229.866
10	230.059	229.869
St. devijacija	0.00638	0.00346
St. devij. / \sqrt{n}	0.00202	0.00110
V_{SR} [V]	230.064	229.871

Budžet komponenata merne nesigurnosti obuhvata procenu nesigurnosti tipa A (standardna devijacija srednje vrednosti rezultata merenja), merne nesigurnosti tipa B (nesigurnost i rezolucija kalibratora, odnosno multimetra), kombinovane i na kraju proširene merne nesigurnosti.

Standardna devijacija srednje vrednosti rezultata merenja (nesigurnost tipa A) određena je na osnovu sledeće realcije:

$$u_A(V) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (V_{RMSi} - V_{SR})^2} \quad (1)$$

Merna nesigurnost tipa B dobijena je na osnovu podataka iz specifikacija proizvođača korišćenih instrumenata kalibratora Fluke 5500A i multimetra Fluke 8846A. Po specifikacijama uređaja [4] apsolutna nesigurnost kalibratora definiše se kao $\Delta V_{cal} = \pm (0.03 \% \text{ od merene vrednosti} + 60 \mu V)$. Uzimajući u obzir da je rezolucija kalibratora $V_{cal-res} = 10 \mu V$, nesigurnost kalibratora tipa B (u_{Bcal}) može se odrediti iz sledeće relacije:

$$u_{Bcal}^2(V) = u_{B1}^2 + u_{B2}^2 = \left(\frac{\Delta V_{cal}}{2.58}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{V_{cal-res}}{\sqrt{3}}\right)^2 \quad (2)$$

Apsolutna naponska nesigurnost digitalnog multimetra, na bazi specifikacija mernog instrumenta [11], može se odrediti kao $\Delta V_{mul} = \pm (0.06 \% \text{ od merene vrednosti} + 0.0225 \% \text{ od mernog opsega})$. Rezolucija multimetra je $V_{mul-res} = 1 \text{ mV}$, tako da se nesigurnost multimetra tipa B (u_{Bmul}) može odrediti kao:

$$u_{Bmul}^2(V) = u_{B3}^2 + u_{B4}^2 = \left(\frac{\Delta V_{mul}}{2.58}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{V_{mul-res}}{\sqrt{3}}\right)^2 \quad (3)$$

Kombinovana merna nesigurnosti pojačavača signala može se odrediti na bazi prethodno izračunatih pojedinačnih mernih nesigurnosti tipa A i tipa B, primenom sledeće relacije:

$$u_{CAMP}(V) = \sqrt{u_A^2 + u_{Bcal}^2 + u_{Bmul}^2} \quad (4)$$

Proširena merna nesigurnost pojačavača signala određena je za potrebni nivo poverenja od 95%, što odgovara vrednosti faktora pokrivanja $k = 1.96$. Koristeći vrednost kombinovane nesigurnosti, proširena merna nesigurnost određena je kao:

$$u_{EXP}(V) = k u_{CAMP}(V) = 1.96 u_{CAMP}(V) \quad (5)$$

Budžet merne nesigurnosti u Tabeli 1 pokazuje da vrednosti proširene merne nesigurnosti pojačavača iznose: $\pm 0.28077 \text{ V}$ i $\pm 0.28066 \text{ V}$, pri frekvencijama 50 Hz i 1 kHz, respektivno.

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu je opisano rešenje eksperimentalnog sistema za metrološku verifikaciju pojačavača signala realizovanog za potrebe testiranja merila kvaliteta električne energije. Nivo signala na izlazu pojačavača odgovara nominalnom naponu

distributivnog sistema od 230 V, što se obezbeđuje primenom niskopropusnog filtra, predpojačavača i pojačavača snage. Eksperimentalna verifikacija pojačavača obavljena je pomoću računarski podržanog generatora test signala i profesionalne merne instrumentacije (PQ analizatora, kalibratora i digitalnog multimetra). U cilju eksperimentalne verifikacije pojačavača generisano je više različitih test signala sa varijacijom tipičnih poremećaja kvaliteta električne enegrije. Neki eksperimentalni rezultati dobijeni referentnim PQ instrumentom Fluke 435 predstavljeni su u radu. Za detaljniju metrološku verifikaciju obavljena je analiza naponske merne nesigurnosti pojačavača, u skladu sa relevantnim dokumentom Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. U skladu sa tim, određene su vrednosti pojedinačnih komponenata standardne nesigurnosti i procenjen je ukupni budžet merne nesigurnosti pojačavača.

ZAHVALNICA

Rezultati predstavljeni u ovom radu deo su istraživanja na nacionalnom naučnom projektu iz programa Tehnološkog razvoja, broj TR 32019, finansiranog od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] *Power Quality Application Guide, Voltage Disturbances, PQ Standard EN 50160*, Copper Development Association, 2004.
- [2] A. Ferrero, "Measuring electric power quality: Problems and perspectives," *Measurement*, vol. 41, no. 2, pp. 121-129, 2008.
- [3] L. F. Auler, R. D'Amore, "Power quality monitoring controlled through low-cost modules," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, no. 3, pp. 557-562, 2009.
- [4] *Fluke 5500A-PQ, Multi-product Calibrator – Operator Manual*, Fluke Corporation, December 1994, Rev.11, 7/06.
- [5] M. Simić, D. Denić, D. Živanović, D. Taskovski, V. Dimcev, "Development of a data acquisition system for the testing and verification of electrical power quality meters," *JPE – Journal of Power Electronics*, vol. 12, no. 5, pp. 813-820, 2012.
- [6] M. Simić, D. Živanović, D. Denić, "Development of the signal generator applied to testing of instruments for electrical power quality measurement," *Facta Universitatis - Series Electronics and Energetics*, vol. 25, no. 3, pp. 193-201, 2012.
- [7] M. Szmajda, K. Gorecki, J. Mroczka, J. Borkowski, "Antialiasing filters in power quality digital measurement systems", Polish Academy of Science, vol. 12, no. 4, 2005.
- [8] *Ultralow offset voltage operational amplifier datasheet*, Analog Devices Rev. G, 2011.
- [9] *Power operational amplifiers, APEX PA97DR datasheet*, Apex Microtechnology Rev. 1, 2012.
- [10] *ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, International Standard Organization, Geneva, 1993.
- [11] *Fluke 8845A/8846A Digital Multimeter – Manual*, Fluke, July 2006.

ABSTRACT

Procedure for experimental verification of the signal amplifier, applicable in the process of testing the devices for measurement of standard electrical power quality parameters, is shown in the paper. Realized amplifier solution includes preamplifier, low pass filter and power amplifier for providing the appropriate voltage level of 230 V. Test signals for amplifier experimental verification are provided by computer supported signal generator, based on LabVIEW software platform and acquisition card NI PCIe 6343. This generator enables generation of voltage signals with various electrical power quality disturbances, typical for real electrical power distribution systems. As the reference instrument, suitable for measurement of electrical power quality parameters from signal amplifier output, the power quality analyzer Fluke 435 is used. In this specific case, a number of experimental test signals with various signal quality disturbances are provided by signal generator. Some experimental results obtained by reference measuring device are presented and analyzed in this paper.

Experimental Verification of Signal Amplifier for Testing the Electrical Power Quality Meters

Milan Simić, Živko Kokolanski, Dragan Denić, Vladimir Dimčev, Dragan Živanović, Peter Planinšič