

# Odpravljanje negativne sofazne napetosti pri unipolarno napajanem odštevalnem vezju z operacijskim ojačevalnikom

Marko Petkovšek, Peter Zajec

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, SI-1000 Ljubljana  
E-pošta: marko.petkovsek@fe.uni-lj.si

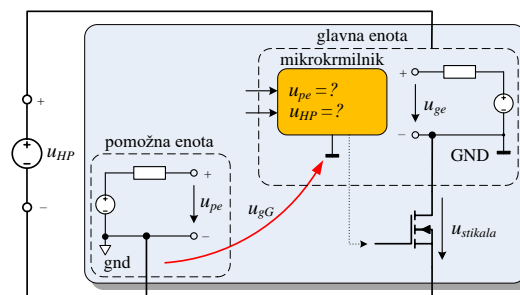
## Elimination of a Negative Common-Mode Voltage of a Single-Supplied Operational Amplifier

**Abstract.** A possible approach for voltage measurement in an electronic device with multiple subunits that do not share a same reference (ground) potential is presented in the paper. The analysed method is based on a modified difference operational amplifier (OP amp) circuit with a single supply voltage. This calls for a special attention during the circuit parameter selection phase, since only a positive voltage is allowed not only on the output, but also on either of the OP amp inputs. With the proposed procedure, the common-mode voltage (CMV), present at both inputs of the signal conditioning circuit is kept within the boundaries that are in case of a rail-to-rail (RRIO) OP amp defined with the supply voltage range.

### 1 Uvod

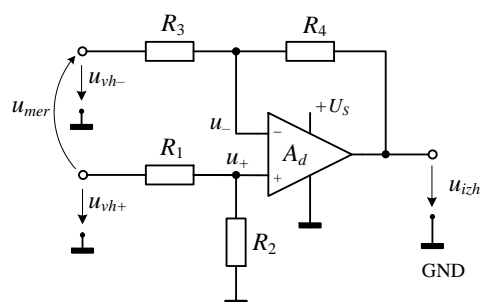
Delovanje sodobnih elektronskih naprav je v veliki meri pogojeno z informacijo o ključnih veličinah, ki jih največkrat zajamemo kar v obliki napetosti. Pri tem je posebno pozornost treba nameniti ustrezni obdelavi merjenega signala, tako zaradi različnih napetostnih nivojev, kot tudi zaradi tega, ker napetosti v kompleksni napravi nimajo skupne referenčne točke. Poenostavljeno shemo take naprave, ki jo sestavljata glavna enota z mikrokrmilniškimi vezjem in pomožna enota, kaže slika 1. S slike je razvidno, da enoti nimata skupnega referenčnega potenciala, saj sta njuna negativna priključka povezana preko močnostnega stikala, ki v primeru napake ali nedovoljenih stanj odklopi močnostni del od njegove napajalne napetosti  $u_{HP}$ . Taka postavitev stikala (low-side switch [1]), ki je prisotna predvsem pri kompleksnejših topologijah (DC/DC ali DC/AC pretvorniki) v nizkonapetostnih avtomobilskih aplikacijah, ima za posledico, da je v primeru izklopljenega stikala napetostna razlika  $u_{gG}$  med enotama lahko precejšnja, predvsem pa je po predznaku negativna. Slednje predstavlja dodaten izziv – sploh v primeru unipolarno napajane merilnega vezja, ki je posledica (tudi) cenovne optimizacije, predvsem pa uporabljenega mikrokrmilnika s spremljajočo periferijo (A/D in D/A pretvorniki, gonilniki, merilniki toka...).

Poleg nivojske prilagoditve v napravah močnostne elektronike večji izziv predstavljajo sevalne motnje zaradi hitrih preklpov močnostnih polprevodniških stikal.



Slika 1. Shema sodobne elektronske naprave.

Posledica sevalnih motenj na celotno merilno progo od zajema ključnih veličin za delovanje naprave do mikrokrmilnika s krmilnim algoritmom v njem je lahko nestabilno ali pa celo popolnoma nepredvidljivo delovanje naprave, čemur se želimo seveda v čim večji meri izogniti [2]. Prva izbira za merjenje napetosti v sodobnih napravah močnostne elektronike bi torej lahko bilo kar klasično odštevalno (diferenčno) vezje, ki je podano na sliki 2. Poleg preproste zasnove in cenenosti je glavna odlika diferenčnega vezja vezana na visoko stopnjo dušenja sofazne napetosti  $u_{CM,OP}$  (vezano na podatek CMRR; common-mode rejection ratio), ki je definirana kot srednja vrednost napetosti na vloh  $u_+$  in  $u_-$ . Ob predpostavki, da je diferenčno ojačenje ojačevalnika zelo veliko ( $A_d \rightarrow \infty$ ), postane diferenčna napetost ( $u_{DM} = u_+ - u_- \rightarrow 0$ ) enaka 0, to pa pomeni, da je sofazna napetost enaka kar  $u_{CM,OP} = u_+$ , torej napetosti na + vhodu ojačevalnika. Glede na kataloške podatke splošnih operacijskih ojačevalnikov, pa tudi bolj namenskih diferenčnih ali celo instrumentacijskih ojačevalnikov [3, 4] je razpon sofazne napetosti omejen na območje napajalne napetosti, z nekaj redkimi izjemami, ki dopuščajo prekoračitev območja za maksimalno 0,5 V nad zgornjo (npr. +3,3 V) oz. pod spodnjo (GND) napajalno napetostjo [5, 6].



Slika 2. Odštevalno vezje.

Za zanesljivo delovanje naprave s slike 1 je ključnega pomena pomeriti ne samo napetosti  $u_{ge}$  glavne enote, kjer se nahaja tudi mikrokrmilnik in kar lahko storimo z vezjem s slike 2, temveč tudi napetosti pomožne enote  $u_{pe}$  in napajalne napetosti močnostnega dela  $u_{HP}$  in to v vseh obratovalnih stanjih naprave. A za merjenje napetosti  $u_{pe}$  in  $u_{HP}$  vezje s slike 2 ni primerno, saj je poleg merjene napetosti ( $u_{mer}$ ) treba upoštevati še napetostno razliko  $u_{gG}$  med obema enotama. V najslabšem primeru lahko  $u_{gG}$  zavzame vrednost napetosti  $u_{HP}$ , po predznaku pa je negativna ( $u_{gG} = -60$  V) in tako prispeva k bistveni spremembi – tudi v področje negativnih vrednosti – sofazne napetosti  $u_{CM,OP}$ , kar pa ni dovoljeno. V nadaljevanju bo zato analizirano delovanje modificiranega odštevalnega vezja, s katerim je mogoče kompenzirati negativno sofazno napetost na vhodih operacijskega ojačevalnika.

## 2 Merjenje napetosti z modificiranim odštevalnim vezjem

Negativni sofazni napetosti  $u_{CM,OP}$  na vhodih operacijskega ojačevalnika se lahko izognemo z dodatnim virom referenčne napetosti, kot ga kaže slika 3 [7]. Izhodna napetost vezja  $u_{izh}$  je definirana kot:

$$u_{izh} = \frac{R_2}{R_1+R_2} \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) u_{vh+} + \frac{R_1}{R_1+R_2} \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) u_{REF} - \frac{R_4}{R_3} u_{vh-}, \quad (1)$$

kar lahko ob enakosti upornosti  $R_1 = R_3$  in  $R_2 = R_4$  zapišemo preprosteje:

$$u_{izh} = \frac{R_2}{R_1} (u_{vh+} - u_{vh-}) + u_{REF} = \frac{R_2}{R_1} u_{mer} + u_{REF}. \quad (2)$$

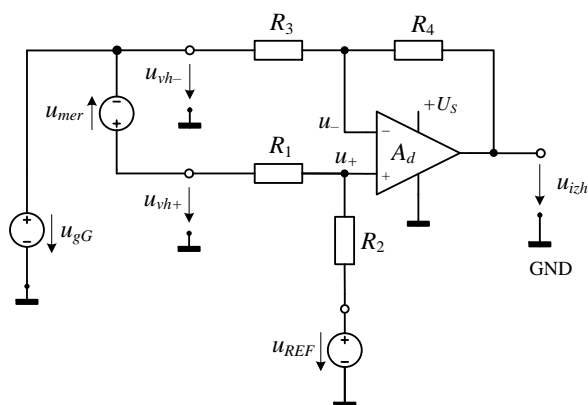
S primerno izbiro ojačenja (razmerje upornosti) in referenčne napetosti  $u_{REF}$  v modificiranem vezju lahko torej poskrbimo, da sofazna napetost:

$$u_{CM,OP} = u_+ = \frac{R_2}{R_1+R_2} u_{vh+} + \frac{R_1}{R_1+R_2} u_{REF}, \quad (3)$$

na vhodih operacijskega ojačevalnika v nobenem izmed obratovalnih pogojev naprave (vezano na  $u_{gG}$ ) ne bo negativna.

V prvem koraku izračunamo vrednost ojačenja  $G$ , in sicer tako, da bo za maksimalni razpon  $\Delta u_{mer,max}$  merjene napetosti ( $u_{pe}$  ali  $u_{HP}$ ) na vhodu vezja dosežen maksimalni razpon napetosti na izhodu – upoštevajoč seveda maksimalno izhodno napetost  $u_{izh,max} = 3,3$  V (enako pozitivni napajalni napetosti) in največjo (sicer negativno) vrednost napetosti na vhodu  $u_{vh-}$ , na katerega je priključena negativna sponka merjene napetosti, torej  $u_{gG,max}$ :

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{u_{izh,max}}{\Delta u_{mer,max} - u_{gG,max}} = G. \quad (4)$$



Slika 3. Modificirano odštevalno vezje.

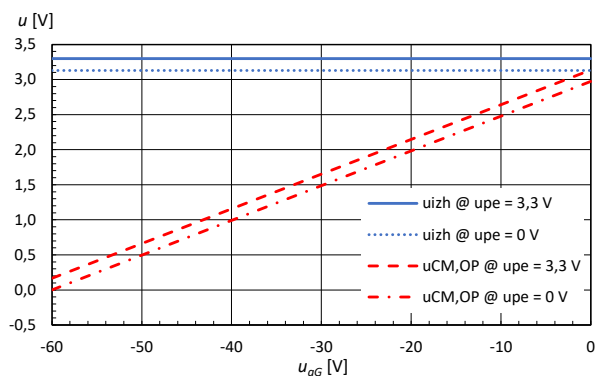
V drugem koraku sledi izračun referenčne napetosti upoštevajoč (2) in pogoja iz (3), da mora biti  $u_+ \geq 0$  tudi, ko je merjena napetost enaka 0, hkrati pa je za vhod  $u_{vh-}$  ponovno upoštevan najbolj neugoden primer, ko je  $u_{gG} = u_{gG,max}$ :

$$u_{REF} = -u_{gG,max} \frac{R_2}{R_1}. \quad (5)$$

## 3 Rezultati

V nadaljevanju so podani simulacijski rezultati za primer merjenja napetosti  $u_{pe}$  v območju od 0 V do 3,3 V in napetosti  $u_{HP}$  v območju od 0 V do 60 V. Posledično je glede na sliko 1 napetostna razlika med potencialoma gnd in GND v najslabšem primeru (izklopljeno stikalo) enaka  $u_{gG,max} = -60$  V. S to napetostjo je definiran tudi najbolj negativni potencial (torej  $-60$  V), ki je v primeru izklopljenega močnostnega stikala pripeljan na vhod vezja za merjenje napetosti in je eden izmed ključnih pogojev za izračun vrednosti elementov merilnega vezja. Pri tem je predpostavljeno, da je napajanje operacijskega ojačevalnika izvedeno z unipolarno napetostjo (+3,3 V in GND) in da je OP ojačevalnik tipa RRIO (rail-to-rail input and output), torej, da deluje v skladu s pričakovanji tudi, ko je napetost na njegovem vhodu ali izhodu na obeh skrajnih mejah napajalne napetosti.

Za merjenje napetosti  $u_{pe}$  je glede na (4) in (5) izračunana vrednost napetostnega ojačenja enaka  $G = 0,0521$ , referenčne napetosti pa  $u_{REF} = 3,128$  V. Kaj to pomeni v praksi, je razvidno s slike 4. Namreč, izhodna napetost vezja  $u_{izh}$  glede na (2) ne more biti nižja od izračunane referenčne napetosti  $u_{REF}$ , saj je v primeru  $u_{pe} = 0$  V izhodna napetost  $u_{izh} = u_{REF}$ , po drugi strani pa je maksimalna izhodna napetost v primeru, ko je  $u_{pe} = 3,3$  V, omejena z višino napajalne napetosti ( $u_{izh} = 3,3$  V). Celoten razpon vhodne napetosti  $\Delta u_{pe,max} = 3,3$  V je torej preslikan na relativno nizek razpon izhodne napetosti  $\Delta u_{izh,max} = 0,172$  V. Vzrok temu je seveda »obremenjenost« vezja z napetostjo  $u_{gG}$ .

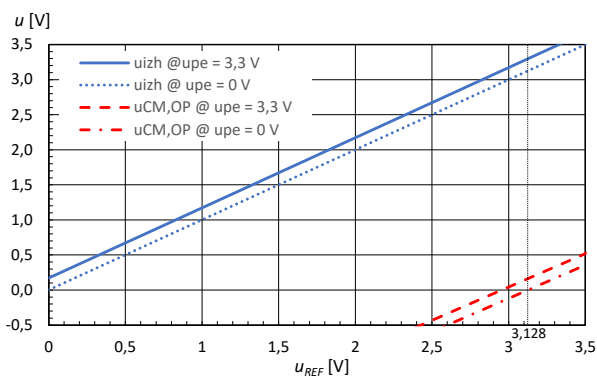


Slika 4. Izhodna napetost vezja  $u_{izh}$  in sofazna napetost na vhodu ojačevalnika  $u_{CM,OP}$  pri merjenju napetosti  $u_{pe}$  v odvisnosti od napetosti  $u_{gG}$ .

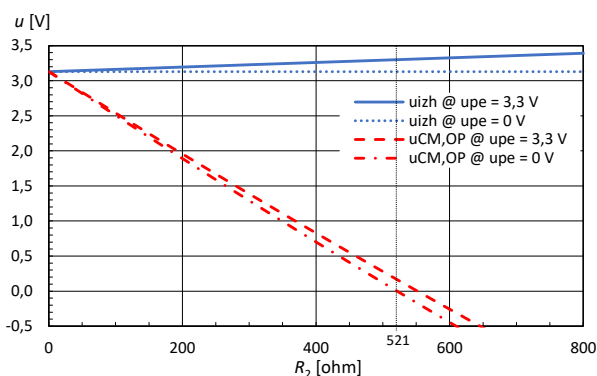
Na sliki 4 sta poleg potekov obeh skrajnih vrednosti izhodne napetosti  $u_{izh}$  (za  $u_{pe}$  pri 3,3 V in 0 V) podana tudi poteka sofazne napetosti  $u_{CM,OP}$  na vhodih operacijskega ojačevalnika v odvisnosti od višine napetosti  $u_{gG}$ . Razvidno je, da se sofazna napetost na vhodu op. ojačevalnika spreminja glede na višino napetosti  $u_{gG}$ , pri čemer je njena minimalna vrednost (0 V) dosežena, ko je  $u_{gG} = -60$  V in je merjena napetost  $u_{pe} = 0$  V.

Tako višina referenčne napetosti kot vrednost ojačenja  $G$  imata seveda velik vpliv na delovanje vezja. Glede na nizek razpon izhodne napetosti s predhodne slike bi lahko hitro (a napačno) sklepali, da lahko z nižjo referenčno napetostjo in višjim ojačenjem razpon izhodne napetosti razširimo. A temu ni tako, kar je razvidno s slike 5, na kateri je za izračunano vrednost napetostnega ojačenja  $G = 0,0521$  in najneugodnejši primer, ko je  $u_{gG} = u_{gG,max} = -60$  V, podan potek izhodne napetosti  $u_{izh}$  in napetosti  $u_{CM,OP}$  za obe skrajni vrednosti merjene napetosti  $u_{pe}$  v odvisnosti od napetosti  $u_{REF}$ . Izbrana vrednost  $u_{REF}$  mora seveda rezultirati v pozitivni  $u_{CM,OP}$  tudi v primeru minimalne vrednosti merjene napetosti  $u_{pe} = 0$  V, kar je izpolnjeno pri  $u_{REF} \geq 3,128$  V (upoštevajoč (5) izračunana vrednost  $u_{REF} = 3,128$  V je na x-osi dodatno označena). Razvidno je, da je pri nižjih vrednostih referenčne napetosti  $u_{CM,OP}$  negativna (nedovoljena!), pri višjih pa pozitivna, hkrati pa pri izbrani vrednosti referenčne napetosti (in ojačenja  $G$ ) izhodna napetost  $u_{izh}$  pri maksimalni vhodni napetosti ( $u_{pe} = 3,3$  V) ravno doseže vrednost napajalne napetosti. Razlika med potekoma  $u_{CM,OP}$  za obe skrajni vrednosti merjene napetosti  $u_{mer} = u_{pe}$  je relativno majhna (0,165 V), kar je ob upoštevanju (3) in  $u_{vh+} = u_{gG} + u_{mer}$  ter predpostavljene številske podatke seveda logično.

Vpliv ojačenja  $G$  oziroma razmerja upornosti na potek izhodne napetosti ter na razmere v vezju je podan na sliki 6. Pri tem je upoštevana (predhodno izračunana) referenčna napetost  $u_{REF} = 3,128$  V in nejneugodnejši primer, ko je  $u_{gG} = u_{gG,max} = -60$  V. Z računsko določenim ojačenjem (4) mora sofazna napetost  $u_{CM,OP}$  na vhodih operacijskega ojačevalnika biti pozitivna tudi pri minimalni vhodni merjeni napetosti  $u_{pe} = 0$  V. Kot je videti s slike 6, zavzame napetost  $u_{CM,OP}$  pozitivne vrednosti za vse vrednosti ojačenj  $G$ , ki so manjša od 0,0521, kar v primeru izbrane upornosti  $R_1 = 10$  k $\Omega$  pomeni za vse upornosti  $R_2$ , ki so manjše od 521  $\Omega$ .



Slika 5. Izhodna napetost vezja  $u_{izh}$  in sofazna napetost na vhodu ojačevalnika  $u_{CM,OP}$  pri merjenju napetosti  $u_{pe}$  v odvisnosti od referenčne napetosti  $u_{REF}$ .

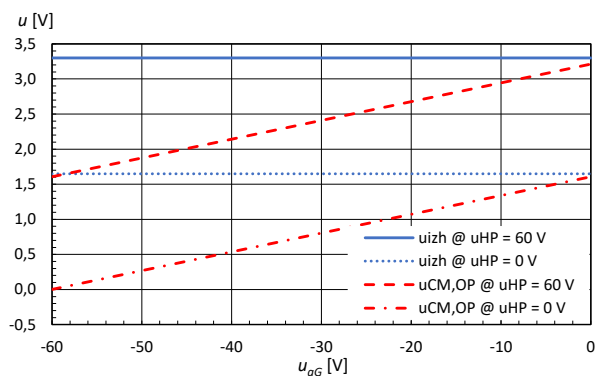


Slika 6. Izhodna napetost vezja  $u_{izh}$  in sofazna napetost na vhodu ojačevalnika  $u_{CM,OP}$  pri merjenju napetosti  $u_{pe}$  v odvisnosti od ojačenja (upornosti  $R_2$ ).

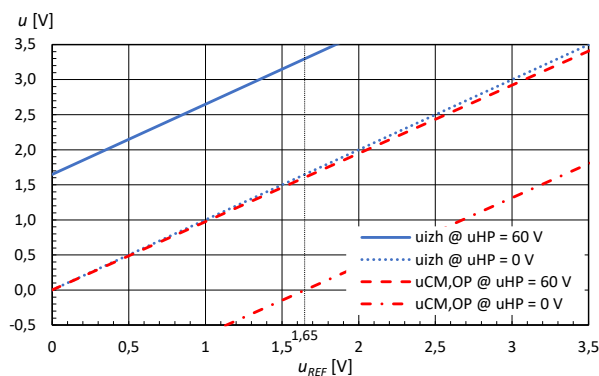
A glede na predhodno podano željo po večjem ojačenju, ki ga lahko dosežemo ravno z večjo upornostjo  $R_2$ , morebitno zmanjševanje vrednosti upornosti ni smiselno. Podobno kot prej lahko tudi zdaj ugotovimo, da pri izbrani vrednosti upornosti izhodna napetost  $u_{izh}$  pri maksimalni vhodni napetosti ( $u_{pe} = 3,3$  V) ravno doseže maksimalno vrednost napajalne napetosti.

Kot je bilo prikazano za merjenje napetosti  $u_{pe}$ , lahko napravimo tudi za meritev napetosti močnostnega dela  $u_{HP}$ . Upoštevajoč (4) in (5) je izračunana vrednost napetostnega ojačenja modificiranega diferencialnega vezja z dodatno referenčno napetostjo enaka  $G = 0,0275$ , referenčna napetost pa  $u_{REF} = 1,65$  V. Za navedena parametra je na sliki 7 podan potek izhodne napetosti  $u_{izh}$  za obe skrajni vrednosti merjene napetosti  $u_{HP}$  (za  $u_{HP}$  pri 60 V in 0 V) v odvisnosti od napetosti  $u_{gG}$ . Kot je razvidno, je razpon izhodne napetosti  $\Delta u_{izh,max}$  tokrat absolutno gledano precej večji (1,65 V), saj je glede na (2) pri merjeni napetosti 0 V izhodna napetost enaka  $u_{REF} = 1,65$  V, pri maksimalni merjeni napetosti  $u_{HP} = 60$  V pa zavzame maksimalno vrednost napajalne napetosti (3,3 V). Prav tako je večja (1,606 V) tudi razlika med potekoma sofazne napetosti  $u_{CM,OP}$  za obe skrajni vrednosti merjene napetosti.

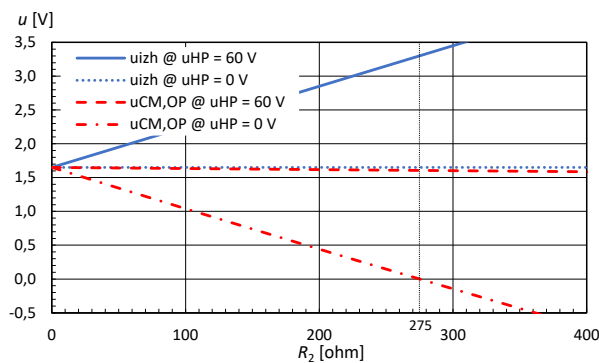
Vpliv referenčne napetosti  $u_{REF}$  in ojačenja  $G$  na potek izhodne  $u_{izh}$  in sofazne napetosti  $u_{CM,OP}$  na vhodih op. ojačevalnika pri merjenju napetosti  $u_{HP}$  je podan na slikah 8 in 9.



Slika 7. Izhodna napetost vezja  $u_{izh}$  in sofazna napetost na vhodu ojačevalnika  $u_{CM,OP}$  pri merjenju napetosti  $u_{HP}$  v odvisnosti od napetosti  $u_{gG}$ .



Slika 8. Izhodna napetost vezja  $u_{izh}$  in sofazna napetost na vhodu ojačevalnika  $u_{CM,OP}$  pri merjenju napetosti  $u_{HP}$  v odvisnosti od referenčne napetosti  $u_{REF}$ .



Slika 9. Izhodna napetost vezja  $u_{izh}$  in sofazna napetost na vhodu ojačevalnika  $u_{CM,OP}$  pri merjenju napetosti  $u_{HP}$  v odvisnosti od ojačenja (upornosti  $R_2$ ).

Če merjeni napetosti  $u_{pe}$  in  $u_{HP}$  ne bi bili obremenjeni z napetostjo  $u_{gG}$  (oz. ko je  $u_{gG} = 0$  V), bi sofazna napetost  $u_{CM,OP}$  bila vedno pozitivna, zato bi glede na (2) lahko uporabili precej večje ojačenje  $G$  ( $G_{pe} = 1$  in  $G_{HP} = 0,055$  – enako za meritev  $u_{ge}$ ) ter kar klasično diferenčno vezje oz. predlagano z  $u_{REF} = 0$  V. Na ta način bi seveda na izhodu v obeh primerih dobili maksimalni razpon  $\Delta u_{izh,max} = 3,3$  V (namesto 0,172 V oz. 1,65 V) za predviden maksimalni razpon vhodnih napetosti  $\Delta u_{pe,max} = 3,3$  V in  $\Delta u_{HP,max} = 60$  V.

## 4 Zaključek

V prispevku je osvetljena tematika diferenčnega merjenja napetosti z modificiranim odštevalnim vezjem z unipolarnim napajanjem. S predlaganim postopkom za izračun parametrov vezja je mogoče izvesti meritev napetosti tako, da na vhodih operacijskega ojačevalnika ni prisotne negativne sofazne napetosti. Kot je razvidno iz simulacijskih rezultatov, je delovanje modificiranega odštevalnega vezja odvisno od dveh ključnih parametrov, in sicer ojačenja  $G$  in referenčne napetosti  $u_{REF}$ . Njun vpliv na delovanje vezja je prikazan na primeru merjenja dveh različno visokih napetosti (3,3 V in 60 V). Ker je pri predlaganem postopku za izračun parametrov vezja treba upoštevati tudi za pojav negativne sofazne napetosti »odgovorno« napetostno razliko  $u_{gG}$  med obema enotama s slike 1, je uporaben razpon izhodne napetosti za obe merjeni napetosti precej nižji, kot bi bil v primeru, ko bi napetosti bili referirani proti skupni referenčni točki glavne enote (GND) in bi torej bila napetost  $u_{gG} = 0$  V.

Zaradi precej nenavadnih vrednosti izračunanih parametrov – predvsem referenčne napetosti, ki jo je težko realizirati z na trgu (tudi cenovno) dostopnimi komponentami [8] - [10] – je posebno pozornost pri praktični realizaciji merilnega vezja treba nameniti izbiri komponent, a slednje presega tematiko tega članka.

## Literatura

- [1] Texas Instruments. "Basics of Power Switches," Application report [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/an/slva927a/slva927a.pdf>. [June 20, 2020].
- [2] B. Deutschmann, G. Winkler, P. Kastner, "Impact Of Electromagnetic Interference On The Functional Safety Of Smart Power Devices For Automotive Applications," Elektrotechnik & Informationstechnik, vol. 135, no. 4-5, pp 352-359, 2018.
- [3] Texas Instruments. "INA117" [Online]. Dosegljivo: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina117.pdf>. [20.6.2020].
- [4] Analog Devices. "AD628" [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD628.pdf>. [20.6.2020].
- [5] ON Semiconductor. "NCV5230" [Online]. Dosegljivo: [www.onsemi.com/pub/Collateral/NE5230-D.pdf](http://www.onsemi.com/pub/Collateral/NE5230-D.pdf). [20.6.2020].
- [6] Texas Instruments. "TLV9001" [Online]. Dosegljivo: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv9001.pdf>. [20.6.2020].
- [7] M. Petkovsek, P. Zajec, "Extending the Input Common-Mode Voltage Range of Single-Supply OP Amps," Proceeding of the I2MTC conference 2020, May 25-27 2020, Dubrovnik, Croatia.
- [8] Texas Instruments. "LM4140 High Precision Low Noise Low Dropout Voltage Reference," [Online]. Dosegljivo: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm4140.pdf> [20.6.2020].
- [9] Analog Devices. Precision Series Sub-Band Gap Voltage Reference [Online]. Dosegljivo: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADR130.pdf> [30.6.2020].
- [10] Y. Liu, C. Zhan, L. Wang, J. Tang, G. Wang, "A 0.4-V Wide Temperature Range All-MOSFET Subthreshold Voltage Reference With 0.027%/V Line Sensitivity," IEEE Trans. on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 65, no. 8, pp. 969–973, Aug. 2018.