

# Nizkocenovni USB OTG digitalni osciloskop

Aljaž Blatnik, Kaja Jarm, Urban Burnik

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana

E-pošta: aljaz.blatnik@gmail.com

## Affordable USB OTG digital oscilloscope

*Most beginners in electronics or electrical engineering students are sooner or later confronted with the need to observe electrical signals. However, oscilloscopes are often too expensive for small home workshops. The aim of this paper was to design a simple yet useful oscilloscope suitable for the beginner with basic soldering skills, production of the PCB and, at the same time, be better than similar products on the market.*

*Unlike with similar products, a development board has been chosen as the basis of the device, which is the decisive factor in the price of the final product. The user interface is provided on the user's mobile phone or tablet via USB connection, which together with the development board leads to a new approach of building a low-cost oscilloscope device. The design of the input filter is described and the actual measurements of the input stage are presented. The project is partially open source (with the exception of the Android application), and partly accessible free of charge.*

*Key words: oscilloscope, USB, OTG, STM Discovery board*

## 1 Uvod

Pri načrtovanju in delu z elektronskimi vezji, se pogosto srečujemo s potrebo po opazovanju posameznih signalov bodisi na poti skozi točke vezja, bodisi njihove vrednosti na izhodu. Če so se v preteklosti opazovale pretežno le karakteristike periodičnih signalov, pa je v času digitalne tehnike velikokrat potrebno opazovati signal skozi daljše časovno okno. Tu svojo uporabnost pokažejo digitalni spominski osciloskopi, ki so sposobni zajete podatke shraniti v spomin in jih nato uporabniku ponovno prikazati v navidezno ustavljenem času.

Težava, na katerega naleti povprečen začetnik oziroma študent, je njihova cena. Le ta hitro preseže nekaj sto evrov, kar je za začetnika na področju elektronike pogosto preveč [1]. V načinu interakcije z uporabnikom se digitalni osciloskopi grobo ločijo na prosto stoječe naprave z zaslonom in tiste, ki za prikaz podatkov uporabljajo zunanjo, navadno že obstoječo uporabnikovo napravo. Z razvojem in povečevanjem zmogljivosti prenosnih naprav v zadnjih letih to, prej delo in nalogo računalnikov, prevzemajo mobilni telefoni in tablični računalniki. S tem lahko proizvajalci zmanjšajo ceno osciloskopa, saj za zaslon in upravljanje izberejo uporabnikovo napravo. Pri tem za prenos podatkov iz vhodnega dela osciloskopa do naprave uporabljajo različne prijeme, bodisi prek USB priklopa,

Ethernet omrežja ali Bluetooth vmesnika. Spremeni se način interakcije z uporabnikom zaradi zmožnosti, ki jih ponujajo zasloni na dotik, omogočajo pa tudi neposredno shranjevanje podatkov na napravo ter obdelavo podatkov z drugimi programskimi paketi nameščenimi na uporabniškem sistemu.

Naprave nizkega cenovnega razreda (pod stotimi evri), imajo seveda slabše karakteristike delovanja (predvsem majhne pasovne širine) v primerjavi z napravami višjega cenovnega razreda. V večini primerov za prikaz podatkov uporabljajo različne cenene modularne zaslone in okrnjeno število uporabniških gumbov, zaradi česar je delo z njimi neprirodno in pogosto neintuitivno [1]. Nekatere izmed njih, podrobneje opisane v poglavju 2, so primarno namenjene povezovanju z uporabniškimi napravami.

Cilj projekta je bilo načrtovanje in izdelava enostavnega osciloskopa, ki zadovolji potrebam začetnikov oziroma študentov (določene v drugih delih npr. [2]), ter je z uporabo novega pristopa boljši od konkurenčnih izdelkov v danem cenovnem razredu. Njegova cena naj ne presega 30 €, ima naj pasovno širino vsaj 100 kHz, za prikaz podatkov naj uporablja zunanjo napravo (tablični računalnik ali mobilni telefon), ter je primeren za izdelavo v vsaki domači delavnici (brez SMD elementov). Strojna in programska oprema naj bo na voljo brezplačno in deloma odprtokodno. Vhodna stopnja naj omogoča merjenje enosmernih napetosti vsaj od 0 V do 5 V (sonda 1:1) oziroma od 0 V od 50 V (sonda 1:10), ter izmeničnih napetosti. Osciloskop naj ima tudi dva ločena vhoda.

## 2 Pregled obstoječih nizkocenovnih osciloskopov

Projekti, ki sodijo v kategorijo izdelkov določenih v poglavju 1 variirajo tako v zmogljivosti kot v ceni, predvsem pa, ali zahtevajo izdelavo uporabnika ali pa se prodajajo kot končni izdelki [1]. Ravno tako se razlikujejo v načinih prikaza podatkov ter poveztivosti z zunanjimi napravami. Osredotočili se bomo le na tiste, ki sodijo v našo kategorijo bodisi po ciljnih zmogljivosti ali ceni, bodisi po načinu interakcije z uporabnikom (torej z uporabo tabličnih računalnikov ali mobilnih telefonov).

Večina komercialno dostopnih naprav (projekt ni odprtokoden) presega vrednost stotih evrov, kar je po naših ocenah meja za začetnike oziroma študente. Pod ta kriterij tako spadata le dva komercialna osciloskopa, in sicer digitalni spominski osciloskop *06201P* [3] s hitrostjo vzorčenja 5 Msps, pasovno širino 1 MHz,

vhodno napetostjo na območju od 0 do 50 V in zaslonom za prikaz, ter USB osciloskop *PoScope Mega 1* [4] s hitrostjo vzorčenja 1 Msps, vhodno napetostjo na območju od -20 V do 20 V, ter USB priklopom na računalnik (pasovne širine proizvajalec ne navaja).

Pregled nekaterih odprtokodnih projektov glede na podatke avtorjev, se nahaja v Tabeli 1 [1, 5, 6, 7].

	Hitrost vzorčenja	Pasovna širina	Povezljivost	Filter proti prekrivanju	Cena
DSOA Mk3	20 Msps	5 MHz	LPT	✗	~50 €
AVR Scope	15 ksps	5 kHz	brez	✓	~20 €
PPM Scope	1 Msps	500 kHz	RS232	✗	~20 €
Bluetooth Scope	1 Msps	/	Bluetooth	✗	~25 €
DPScope	1 Msps	1.3 MHz	USB	✗	59 €

Tabela 1: Pregled nekaterih odprtokodnih osciloskopov

Poleg zgoraj naštetih odprtokodnih projektov v to kategorijo spada še odprtokodni projekt *OsciPrime* [8], ki za uporabniški vmesnik uporablja androidne naprave s podporo USB gostiteljskega načina. Hitrost vzorčenja je 6 Msps, pasovna širina (tako proizvajalec) 3.3 MHz in ne vsebuje filtra proti prekrivanju. Povezljivost je zagotovljena prek USB vmesnika, cena izdelka pa je v času nastajanja članka 230 €. Naprava deluje s pomočjo androidne aplikacije, ki je na voljo v plačljivi in brezplačni različici.

## 2.1 Zadovoljevanje ciljnim lastnostim osciloskopa

Iz Tabele 1 je razvidno, da sta le osciloskopa *Bluetooth Scope* in *DPScope* [7] potencialno zmožna prikazovanja podatkov na mobilnih telefonih oziroma tabličnih računalnikih, kar je ena izmed ključnih zahtev opisanih v poglavju 1, vendar le *Bluetooth Scope* to možnost v osnovi tudi ponuja. Opaziti je tudi moč, da avtorji različno navajajo vhodne pasovne širine. Najbolj izrazito se to vidi v zadnjem primeru Tabele 1 [7], ko avtor navaja pasovno širino večjo od vzorčevalne frekvence in jo utemeljuje z večkratnim vzorčenjem periodičnega signala. Vprašljiva je tudi povezljivost USB, saj je ta implementirana kot pretvorba RS232 v USB, kar pomeni, da zaradi močnih omejitev hitrosti, ki jih narekuje uporabljeno integrirano vezje, ne moremo vzorčiti in pošiljati podatkov neprekinjeno. Tako lahko, tudi zaradi omejenega pomnilnika, dovolj dobro opazujemo le periodične signale. Če želimo zadovoljiti zahtevam po povezljivosti z uporabniškimi napravami, zmogljivosti vzorčenja in ceni, moramo ubrati nov pristop izvedbe osciloskopa.

## 3 Izvedba

Zaradi zahteve po možnosti izdelave tiskanine v domači delavnici in težavnosti primerni začetnikom (brez SMD elementov) opisani v poglavju 1, se nabor predvsem osrednjih mikrokrmilnikov in analogno-digitalnih pretvornikov precej zoži. Po pregledu dela na tem področju, opisanem v poglavju 2, smo se odločili da

uberemo nov pristop in osciloskop zgradimo s pomočjo razvojne ploščice, zanjo pa dodatno razvijemo potrebno vhodno stopnjo. Projekt smo tako razdelili na dva segmenta, in sicer centralno procesno enoto z AD pretvornikom (poglavje 3.1) in vhodno stopnjo (poglavje 3.2) v obliki modula za razvojno ploščo.

### 3.1 Centralno procesna enota

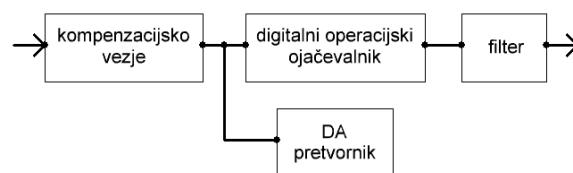
Za delo je bila po pregledu izdelkov na trgu izbrana razvojna ploščica podjetja STMicroelectronic, in sicer STM32F4 – Discovery board [9]. Razlogi za izbor zgoraj omenjene ploščice so:

1. Cenovna dostopnost (strošek prib. 15€)
2. Vgrajen programator, povezljiv prek USB priključka
3. Zmogljiv ARM Cortex-M4 mikrokrmilnik
4. Trije neodvisni 12 bitni analogno-digitalni pretvorniki s hitrostjo vzorčenja do 2.4 Msps
5. Vgrajena možnost USB priklopa v polni-hitrosti (ang. full-speed – teoretično 12 Mb/s)
6. Dobra podpora izdelku

S tem smo poenostavili izdelavo ključnega dela merilnega sistema. Odločilna prednost ki jo vidimo je vgrajen programator na sami razvojni ploščici, kar začetniku omogoča enostavno delo. Poleg zgoraj omenjenih lastnosti opazimo prednost tudi v neodvisni uporabi razvojne ploščice za razvoj in učne namene, ko le te ne uporabljamo kot osciloskop.

### 3.2 Vhodna stopnja

Vhodna stopnja vsebuje vse običajne strukture osciloskopa do AD pretvornika, ki je že vsebovan v mikrokrmilniku razvoje ploščice. Sestavljajo jo vhodno kompenzacijsko vezje, digitalno krmiljeni operacijski ojačevalnik in filter. Zaradi želene lastnosti po opazovanju tudi izmeničnih signalov, je bil strukturi dodan digitalno-analogni pretvornik za nastavljanje enosmerne komponente, ki prestavi opazovani signal v področje delovanja analogno-digitalnega pretvornika. Blokovna struktura vhodne stopnje je grobo predstavljena na Sliki 1.



Slika 1: Posplošena blokovna struktura vhodne stopnje

Mikrokrmilnik STM32F407 na razvojni ploščici Discovery board sicer vsebuje DA pretvornik, vendar je bil ta, zaradi striktnega ločevanja signala na poti do AD pretvornika, nadomeščen s pomožnim integriranim vezjem. Digitalno krmiljeni ojačevalnik je bil dodan zaradi želje po opazovanju majhnih signalov in v izogib mehanskim delom ali digitalnim stikalom za nastavljanje ojačanja, kar močno poceni končni izdelek.

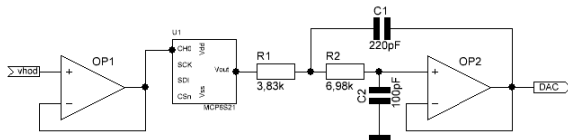
Kompensacijsko vezje ustreza standardni vhodni upornosti 1 Mohm in vhodni kapacitivnosti 20 pF. Merimo lahko enosmerne signale med 0 V in 6 V ali izmenične med -3 V in 3 V (sonda 1:1) ali med 0 V in 60 V za enosmerne in -30 V in 30 V za izmenične (sonda 1:10). Za primer prevelikih vhodnih amplitud, so kompenzacijskemu vezju dodane zaščitne Schottky diode.

### 3.2.1 Načrtovanje filtra

Ob pregledu obstoječih odprtokodnih izdelkov (poglavje 2) smo ugotovili, da večina le teh ne vsebuje ustreznih vhodnih filtrov za preprečevanje prekrivanja spektra ali pa je ta namenjen le izločevanju visokofrekvenčnega šuma. Ustrezen filter je potreben za pravilno delovanje, zaradi omejitve s prostorom in potrebe po enostavni izdelavi je bilo tako izbrano Butterworthovo sito drugega reda. Ob uporabi AD pretvornika v 10 bitnem načinu vzorčenja to po enačbi (1) pomeni razmerje med signalom in šumom približno -62 dB [10].

$$SNR_{dB} \approx 6.02 \cdot n + 1.761 \quad (1)$$

Pri filtru drugega reda tako razmerje narekuje pasovno širino pod 100kHz, kar pa je za opazovanje signalov, ki se pogosto pojavljajo v digitalni tehniki (SPI, I2C, RS232-TTL) malo. Pri načrtovanju filtra lahko izkoristimo lastnosti, ki jih v strukturo vnaša digitalno krmiljeni ojačevalnik. Izsek iz sheme vhodne stopnje z digitalnim ojačevalnikom in filtrom prikazuje Slika 2.



Slika 2: Shema povezave digitalno krmiljenega ojačevalnika in filtra

Pasovna širina digitalno krmiljenega ojačevalnika se spreminja z izbiro stopnje ojačanja, je največja pri ojačanju 1 in najmanjša pri ojačanju 10 [11]. Skupaj s prenosno karakteristiko nizko prepustnega sita tako tvori vhodni filter proti prekrivanju. Pasovna širina se z takšno izvedbo poveča na 200 kHz, zaporno območje pa se teoretično nahaja od frekvence 1,2 MHz dalje. Meritev karakteristike celotne vhodne stopnje je prikazana v poglavju 4.

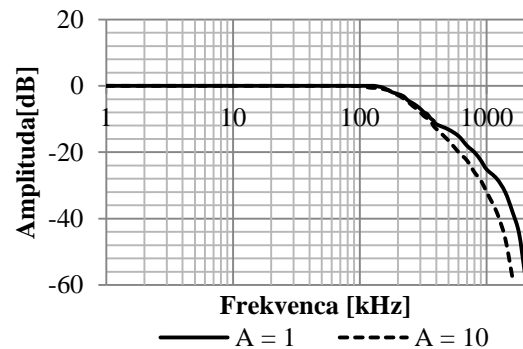
### 3.3 Povezljivost in napajanje

Razvojna ploščica (mikrokrmilnik) ima za povezljivost, poleg običajnih načinov za povezavo med integriranimi vezji, na voljo tudi USB in Ethernet vmesnik. Ker je za uporabniško interakcijo in prikaz podatkov predvidena uporaba mobilnih telefonov ali tabličnih računalnikov, je bil za povezavo izbran USB način. Mikrokrmilnik podpira USB različice 2.0 pri vseh treh standardnih hitrostih prenosa podatkov, ima možnost delovanja kot naprava ali gostitelj, ravno tako pa podpira USB OTG način delovanja.

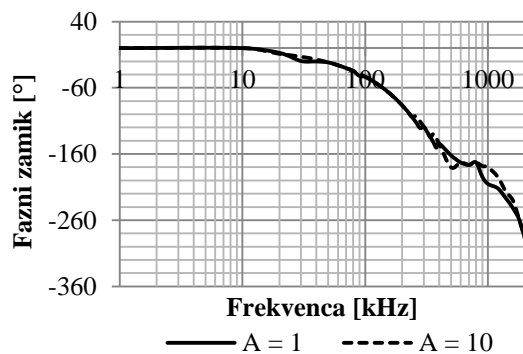
Osciloskop lahko napajamo z napajalnikom prek priključka za programiranje razvojne plošče ali prek USB OTG kabla iz gostiteljske naprave. Pri običajnem delovanju osciloskop za svoje delovanje porablja približno 0.85 W električne energije.

## 4 Meritve vhodne stopnje

Zaradi karakteristike digitalnega ojačevalnika in nizkoprepustnega sita opisane v poglavju 3.2.1, je karakteristika v frekvenčnem prostoru odvisna od izbire ojačanja. Izbiramo lahko med ojačanjem  $A = 1, 2, 4, 5, 8$  in  $10$ . Integrirano vezje ponuja tudi večje stopnje ojačanja, a le te vnašajo več šuma v izhodni signal in zato niso predvidene za uporabo [5]. Na Sliki 3 je prikazana izmerjena amplitudna karakteristika na Sliki 4 pa izmerjena fazna karakteristika vhodne stopnje v frekvenčnem prostoru pri faktorju ojačitve digitalno krmiljenega operacijskega ojačevalnika  $1 (A = 1)$  in  $10 (A = 10)$ , kar predstavlja mejne vrednosti delovanja sistema.



Slika 3: Amplitudna karakteristika vhodne stopnje



Slika 4: Fazna karakteristika vhodne stopnje

Pri amplitudni karakteristiki je njen potek prikazan le do območja zanesljive meritve amplitude, saj pri moči signala približno -58 dB dosežemo mejo ločljivosti merilne naprave (analogni osciloskop Hameg). Pri frekvenci 1,2 MHz (polovica vzorčevalne frekvence) je pri ojačanju 1 velikost amplitude -28 dB pri ojačanju 10 pa -38 dB. Rezultat ni vzpodbuden, vendar bi za doseg cilja (-62 dB) morali uporabiti filter višje stopnje, kar pomeni večje stroške in kompleksnost vezja, ali pa zmanjšati pasovno širino, kar pomeni nezmožnost opazovanja nekaj osnovnih signalov komunikacij med integriranimi vezji omenjenimi v poglavju 3.2.1. Dana

karakteristika tako predstavlja kompromis med funkcionalnostjo osciloskopa in pravilnim filtriranjem.

Pri tem je treba dodati, da zgoraj napisano velja za osnovni način delovanja, torej vzorčenje z 2,4 Msps. Ker pa mikrokrmilnik STM32F407, ki ga uporabljamo, vsebuje tri neodvisne AD pretvornike [9], lahko frekvenco vzorčenja z vzporednim, a časovno zamaknjenim delovanjem dveh oziroma treh AD pretvornikov na enem vhodu, povečamo. V tem primeru načrtovan filter ustreza danim zahtevam.

## 5 Razprava

Z uporabo razvojne plošče smo se izognili težavam, ki jo začetnikom predstavljajo SMD elementi, tako dobili dovolj zmogljiv in cenovno dostopen mikrokrmilnik, ter uporabnikom omogočili nadaljnjo uporabo razvojne plošče za lastno delo. Glavna prednost pred konkurenčnimi izdelki, opisanimi v poglavju 2, je vsebovanost filtra proti prekrivanju in povezljivost z napravami, ki jih uporabnik pozna, s čimer povečamo tudi uporabniško interakcijo. Karakteristika filtra nam omejuje pasovno širino, le ta pa je približno desetkrat manjša od vzorčevalne frekvence in je v našem primeru 200 kHz. Čeprav v primerjavi s konkurenco to ne pomeni izboljšanje v smislu specifik osciloskopa, lahko le tako zagotovimo pravilno delovanje z vidika vzorčenja. Hkrati je treba poudariti, da navedena pasovna širina v našem primeru pomeni resnično uporabno območje, medtem ko pri napravah poglavja 2 temu (zaradi nevsebovanosti ustreznih filtrov) ni tako. Osciloskop je prvenstveno namenjen opazovanju signalov in ne le merjenju frekvence zato je navajanje pasovne širine kot polovico vzorčevalne frekvence nesmiselno in se lahko v naštetih primerih šteje za zavajanje uporabnikov.

V zelenem cenovnem območju smo tako izboljšali tudi prikaz in upravljanje osciloskopa, kar nam omogoča uporabna zunanje prenosne naprave (mobilni telefon ali tablični računalnik). Omejitev za uporabo računalnika ni, vendar tako izgubimo občutek resnično prenosne in kompaktne naprave. Razen projekta *OsciPrime* [8], nobena izmed naprav nizkega cenovnega razreda ne omogoča povezljivosti in upravljanja osciloskopa na zgoraj omenjen način. V obzir je treba vzeti tudi porabo same naprave, saj je ta lahko odločilni dejavnik pri napajanju prek gostiteljske naprave. Odvisna je od hitrosti vzorčenja, hitrosti sistemske ure, načinu delovanja USB vmesnika, ojačanja digitalno krmiljenega operacijskega ojačevalnika itd. Problem smo v tem primeru delno rešili tako, da aplikacija na uporabniški napravi prevzema popoln nadzor nad delovanjem razvojne ploščice, kar omogoča preklapljanje v energijsko manj potrošne načine delovanja, ko ne potrebujemo polne hitrosti ali ko uporabnik ne opazuje signala, in s tem podaljšali čas dela pri dani kapaciteti baterije. To nam omogoča zmogljiva struktura mikrokrmilnika STM32F4, ki temelji na arhitekturi ARM Cortex-M4 ob skrbnem načrtovanju delovanja perifernih enot. Osciloskop lahko napajamo tudi neodvisno od gostiteljske naprave, s čimer se izognemo zgoraj opisanemu problemu.

Omejitev, na katero hitro naletimo pri načrtovanju sistema, je hitrost prenosa prek USB vmesnika. V primeru želje po vzorčenju z višjo frekvenco lahko podatke namesto neprekinjeno pošiljamo v ustavljenem času za kar pa potrebujemo več spomina, vendar tako preidemo v višji cenovni razred, kar pa ni izvorni namen tega projekta.

Nadaljnje delo vidimo predvsem v programskem delu sistema, deloma pa tudi v izboljšavi vhodne stopnje predvsem pri uporabi vhodnega filtra višjega reda.

## 6 Sklep

Z izbiro gradnje osciloskopa okoli končne razvojne plošče, z načrtovanjem ustreznega filtra proti prekrivanju ter z možnostjo upravljanja prek uporabnikove naprave smo izboljšali uporabniško izkušnjo, poenostavili izdelavo ter znižali končne stroške naprave. Projekt je deloma odprtokoden (z izjemo aplikacije na sistemu Android), preostali del pa je na voljo za brezplačno uporabo. Tako je osciloskop zaradi strukture, cenovne dostopnosti in odprtokodnosti primeren za začetnike in študente kot uvod v spoznavanje elektronike in mikrokrmilniških sistemov.

## Literatura

- [1] G. Anzziani, „Digital oscilloscopes for hobbyists,“ *Gabotronics*, 22 8 2013. [Elektronski]. Dostopno: <http://www.gabotronics.com/resources/hobbyists-oscilloscopes.htm>. [Poskus dostopa 2 7 2014].
- [2] J. González J. in C. Odiwo C., „Design of an Educational Oscilloscope,“ v *IEEE EDUCON Education Engineering 2010*, Madrid, Apain, 2010.
- [3] „Digital Storage Oscilloscope,“ JYE Tech Ltd., 2 11 2010. [Elektronski]. Dostopno: <http://www.jyetechnology.com/Products/LcdScope/eDSO062.htm> l. [Poskus dostopa 2 7 2014].
- [4] „PoScope Mega1,“ PoLabs, [Elektronski]. Dostopno: <http://www.poscope.com/PoScopeMega1>. [Poskus dostopa 2 7 2014].
- [5] D. L. Jones, „DSOA Mk3,“ 10 1998. [Elektronski]. Dostopno: <http://alternatezone.com/electronics/dsoamk3.htm>. [Poskus dostopa 2 7 2014].
- [6] J. Weaver, „PPMScope for Windows,“ 17 4 2014. [Elektronski]. Dostopno: <http://jonw0224.tripod.com/ppmscope.html>. [Poskus dostopa 2 7 2014].
- [7] G. Maichen, „DPScope - Low-Cost USB Oscilloscopes,“ [Elektronski]. Dostopno: <http://www.pdamusician.com/dpscope/overview.html>. [Poskus dostopa 2 7 2014].
- [8] „OsciPrime - an Open Source Android oscilloscope,“ Nexus-Computing Switzerland, [Elektronski]. Dostopno: <http://www.osciprime.com/>. [Poskus dostopa 2 7 2014].
- [9] „STM32F4DISCOVERY,“ STMicroelectronics, [Elektronski]. Dostopno: <http://www.st.com/stm32f4-discovery>. [Poskus dostopa 3 7 2014].
- [10] M. E. V. Valkenburg, *Analog Filter Design*, Oxford: Oxford University Press, 1982.
- [11] Microchip, „Single-Ended, Rail-to-Rail I/O, Low Gain PGA,“ Microchip Technology Inc., Chandler, Arizona, 2012.