

# Izdelava signalnega generatorja na osnovi mikrokrmilnika STM32G061

Luka Kavčič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za Elektrotehniko, Tržaška cesta 25, Ljubljana  
E-pošta: lk4653@student.uni-lj.si

## Making a signal generator based on Microprocessor STM32G061

*When making or repairing electronic devices we can be much more efficient with proper measuring and testing equipment. We are often unable to solve unexpected problems without it. The problem is that devices like oscilloscope or signal generator can often be too expensive for students or amateurs. Signal generators usually have very low output current and high internal resistance of 50  $\Omega$ . That can be quite a problem with dual channel oscilloscopes since one channel is used to measure the output of our signal generator, making us unable to concurrently measure more than one node.*

*The goal was to make a low-cost signal generator with small output impedance and large output power. Sample frequency is 6 MSps, output frequency is limited to 1 MHz. Output voltage swing is  $\pm 13$  V. Output current is limited to 333 mA. The generator can add up to 6 functions, including noise and DC offset. It is controlled by 3.5-inch touch screen, where we can choose desired functions and set their parameters. The screen contains a graph for easier representation of the output signal. The circuit contains a relay, used for high impedance output. For better compatibility with lab equipment, 50  $\Omega$  output with BNC connector is used.*

## 1 Uvod

V času korone, ko smo bili zaprti doma, smo bili študentje prikrajšani laboratorijev, marsikdo pa je le imel več prostega časa in se je želel začeti ukvarjati z elektroniko. Eden prvih problemov, ki ga srečamo pri delu z elektroniko je pomanjkanje primerne opreme za ustvarjanje in testiranje naših kreacij. Osnovne komponente in mikrokrmilniške ploščice se da kupiti v poceni paketih, vendar pogosto potrebujemo tudi osciloskop in funkcijski generator, ki pa sta zelo draga. Za potrebe amaterjev in študentov ne potrebujemo, da ima signal zelo veliko razmerje signal-šum ali da je amplituda natančna na mV. Je pa zelo uporabno, če lahko odda nekaj W moči, da lahko z njim tudi napajamo manjše vezje. Cilj je bil narediti poceni funkcijski generator, ki lahko deluje tudi kot manjši napajalnik za enosmerne in izmenične signale, obenem pa lahko signalu doda tudi šum ali superponira druge funkcije.

## 2 Vezje

Vezje je sestavljeno iz 3 podvezij. Napajalni del je za generiranje potrebnih enosmernih napetosti. Digitalni del je za generiranje signala in uporabniški vmesnik. Analogni del je za ojačanje signala.

### 2.1 Napajanje

Vezje dobi elektriko iz zunanjega 12 V vira. Za napajanje LCD ekrana in mikrokrmilnika potrebujemo 3,3 V, za kar je uporabljen AMS1117-3.3 linearni regulator napetosti. Na vhodu in izhodu regulatorja je dodan 10  $\mu$ F kondenzator, kot piše v podatkovni tabeli [1].

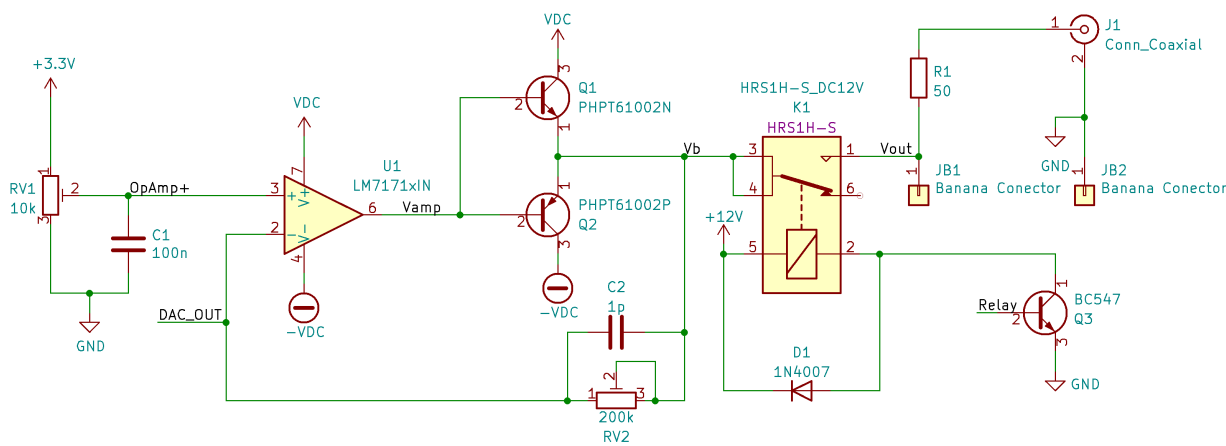
Ker želimo izhod z  $\pm 13$  V, potrebujemo vhodno napetost povečati in obrniti polariteto. Zato je uporabljen izoliran pretvornik enosmernih napetosti, specifično komponenta MPRA2415ZP-10W, ki na vhodu potrebuje 9 V do 24 V, na izhodu pa dobimo 15 V in -15 V. Zemljo na vhodu in izhodu čipa smo vezali kratko. Za večjo stabilnost izhodov sta uporabljena 10  $\mu$ F kondenzatorja. Največji izhodni tok komponente je 333 mA.

Ker so vse napetosti v vezju interno regulirane, vhodna napetost ne potrebuje biti točno 12 V. Najnižja dovoljena vhodna napetost je 9 V zaradi releja in vhoda na MPRA2415ZP-10W, najvišja pa 15 V zaradi toplotnih omejitev AMS1117-3.3. Z dodatkom hladilnika na napetostni regulator bi lahko povečali vhodno napetost do 19 V, kjer bi nas spet omejil rele. Zato je vezje mogoče napajati tudi z baterijami, brez dodatnega vezja za regulacijo napetosti.

### 2.2 Digitalni del

Uporabljen je bil mikrokrmilnik STM32G061C8T6 [2], saj ima visoko hitrost podatkovnega vodila, kar potrebujemo za hitro vzorčenje. Obenem je čip zelo nov, kar pomeni, da še zanj ni veliko komercialnih uporabnikov in je zato na zalogi kljub trenutnim razmeram. Ob mikrokrmilniku je gumb za resetiranje programa in 2 svetleči diodi za indikacijo napajanja in prevelikega signala v izhodni tabeli. Na mikrokrmilnik je vezan tudi 8MHz kvarčni kristal.

Uporabljen je 3,5 palčni ekran na dotik z gonilnim čipom ILI9488 ter čipom za dotik XPT2046, Ima 480x320 barvnih pik in podpira 65536 barv. Za komunikacijo z ekranom na dotik se uporablja protokol SPI. Za pošiljanje in sprejemanje ukazov mikrokrmilnik uporablja vgrajeno



Slika 1: Shema analognega dela vezja.

SPI enoto, ki ustvarja urin cikel ter samodejno sprejema in oddaja pakete osmih bitov podatkov. Mikrokrmilnik deluje s frekvenco 60 MHz. Frekvenca pošiljanja podatkov na ekran je 15 MHz, s čipom za dotik pa komunicira z 468 kHz.

### 2.3 Analogni del

Analogno vezje je sestavljeno iz ojačevalnika in releja. Celotno vezje je na prikazano na shemi (slika 1). Ojačevalnik je zgrajen iz operacijskega ojačevalnika in močnostnih tranzistorjev v B vezavi. Za operacijski ojačevalnik je najpomembnejši parameter stopnja naraščanja signala (ang. Slew Rate), zato je bil izbran ojačevalnik LM7171 [3]. Med spreminjanjem signala se digitalno-analogni pretvornik postavi na najnižje stanje, kar v našem primeru pomeni -13 V. Ker bi to lahko poškodovalo zunanje vezje, potrebujemo rele, da lahko izhod postavimo na visoko-impedančno stanje.

Ojačevalnik ima 3 funkcije. Ojači napetost iz območja med 0 V in 3,3 V, na območje med -13 V in 13 V. Največji izhodni tok poveča iz 0,3 mA na 333 mA, če povečamo napajanje, bi omogočal tudi večje tokove.

Deluje tudi kot impedančni pretvornik, ki ga potrebujemo za izboljšanje visokofrekvenčnih karakteristik digitalno-analognega pretvornika. Mikrokrmilnik ima sicer vgrajen operacijski ojačevalnik, vendar ta nima dovolj hitre stopnje naraščanja, zato ga izklopimo. Problem predstavljajo parazitne kapacitivnosti, zaradi katerih še vedno ne moremo dosegati visokih frekvenc. Zunanji operacijski ojačevalnik, v uporabljeni vezavi, je krmljen s spremembo toka skozi upor ter uporovno lestev v digitalno-analognem pretvorniku in drži skoraj konstantno napetost na izhodu digitalno-analognega pretvornika. Zato nas parazitne kapacitivnosti ne ovirajo več, parazitne induktivnosti digitalno-analognega pretvornika pa so mnogo manjše. Podrobneje je ta vezava opisana v poročilu uporabe AN4566 [4].

Za dostop do izhodnega signala sta uporabljena 2 banana priključka, dodatno pa je za 50  $\Omega$  uporom še priključek BNC za večjo kompatibilnost z laboratorijsko

opremo.

## 3 Program

Osnove programa so opisane na diagramu (slika 2). Uporabnik lahko izbira med petimi osnovnimi funkcijami: enosmerna napetost, šum, sinus, pravokotni signal in trikotni signal. Vsaki lahko nastavi napetost, frekvenco, fazni zamik ter delovni cikel. Izbere lahko do šest funkcij, ki jih bo generator seštel in pošiljal na skupen izhod.

Na ekranu je prikazan graf z izhodnim signalom, največjo, srednjo in najmanjšo napetostjo in hitrostjo vzorčenja. Napisane so uporabljene funkcije in njihovi parametri. Z dotikom lahko nastavimo parametre in funkcije, lahko tudi znova izračunamo izhodno tabelo in nastavimo izhod na visoko-impedančno stanje.

### 3.1 Perioda vseh funkcij

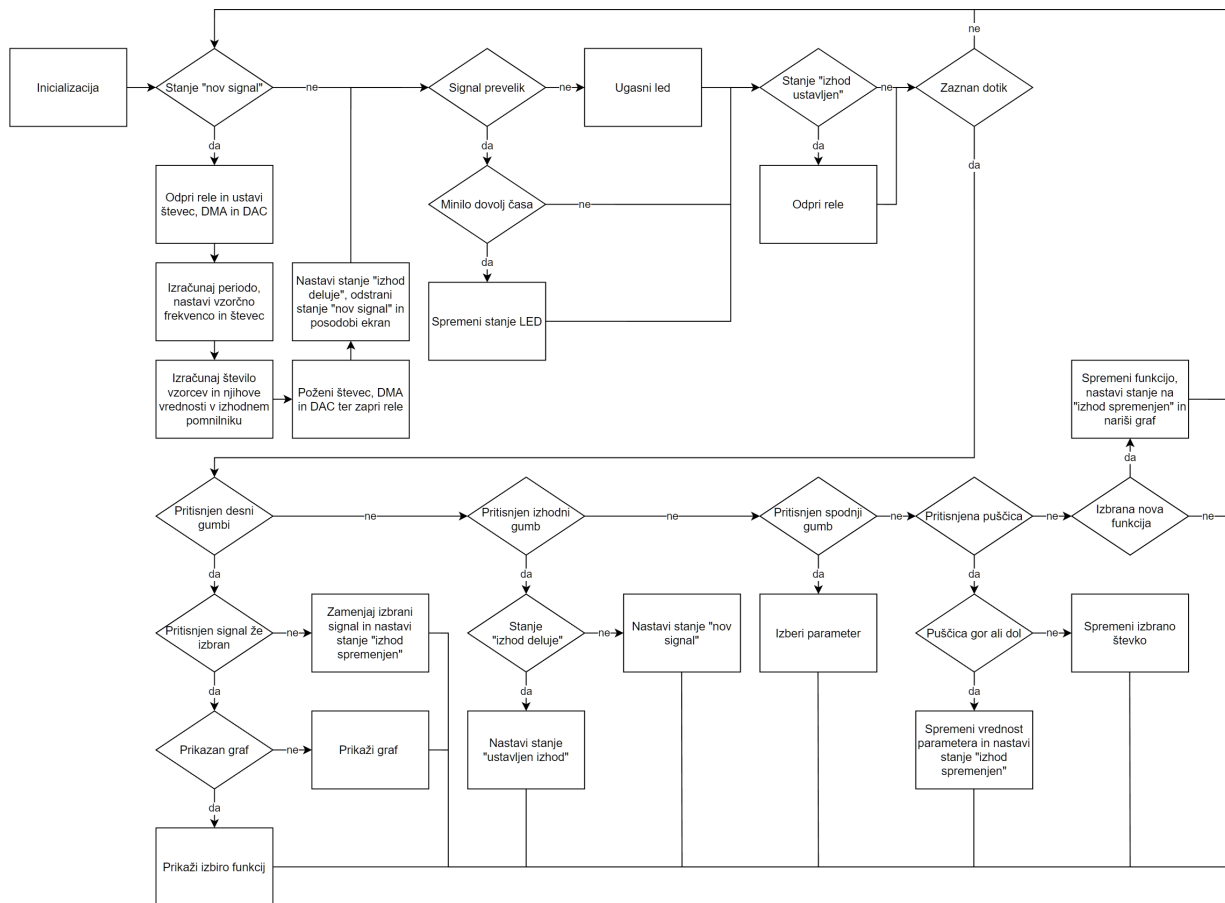
Za izračunanje periode signala vzamemo prvi dve frekvenčno odvisni funkciji. Vsaki priredimo redukcijski faktor 1 in zapišemo naslednjo enačbo. (1)

$$\frac{f_1}{k_{r1}} \approx \frac{f_2}{k_{r2}} \quad (1)$$

Če je ena stran enačbe večja od druge, ji povečamo redukcijski faktor za 1. Faktor povečujemo toliko časa, dokler obe strani nista približno enaki. Skupna perioda je  $\frac{f_1}{k_{r1}}$ . Ta postopek ponovimo za vse frekvenčno odvisne funkcije. Glede na končno frekvenco izberemo primerno vzorčno frekvenco in nastavimo števec.

### 3.2 Perioda vzorčenega signala

Perioda signala pred in po vzorčenju nista vedno enaki. Točno število vzorcev v periodi se določi z deljenjem vzorčne frekvence s frekvenco signala. Dobljen rezultat je realno število, mi pa potrebujemo celo število. Zato rezultat pomnožimo z naravno-številsko konstanto. Če ima nova številka dovolj manjšo razliko do najbližjega celega števila, bo to naše novo število vzorcev v periodi. Konstanto povečujemo in ta postopek ponavljamo, dokler ni število vzorcev v preizkušeni periodi večje od



Slika 2: Diagram programa.

največjega števila vzorcev v tabeli. Končno število vzorcev je največji večkratnik periode, ki ga še lahko zapišemo v izhodno tabelo. Več period signala je uporabnih, saj se tako dodane aperiodične funkcije ne ponovijo vsako periodo signala, temveč le ob ponovitvah celotne tabele.

### 3.3 Računanje signala

Za računanje vrednosti izhodnega signala so uporabljene parametrične enačbe funkcij. Za izračunanje sinusa je uporabljena funkcija  $\sin()$ , za izračunanje šuma pa funkcija  $\text{rand}()$ , obe funkciji najdemo v knjižnici "math.h".

Zahteve so, da lahko uporabnik sešteje več enakih funkcij, obenem pa se ne shranjuje vrednosti posameznih funkcij zaradi omejenega pomnilnika. Zato so uporabljeni kazalci na funkcije, ki jim s parametrom "funct" določimo, na katero funkcijo kažejo. Funkcijam podamo tudi ostale parametre in vzorec, v katerem računamo. Funkcije nam vrnejo vrednost funkcije v tem vzorcu kot število s plavajočo vejico. Vrednost vzorca v izhodni tabeli je seštevek 6 vrednosti funkcij, preslikano v 12 bitna ne predznačeno število.

### 3.4 Zaslon

Prikaz na zaslon se posodablja le v primeru dotika. Na desni strani zaslona je prikazanih 6 gumbov, na katerih

so prikazane izbrane funkcije in njihova napetost in frekvenca. Spodaj desno je prikazan gumb, ki prikazuje trenutno stanje izhoda, zelena pomeni delujoč signal, rumena pomeni, da se signal na izhodu in parametri na zaslonu razlikujejo, rdeča pa da je izhod ugasnjen. Spodaj so prikazani gumbi s parametri izbranega signala, nad njimi pa vrednost izbranega parametra in gumbi s puščicami. Ena od števk vrednosti parametra je označena z rdečo, s pritiskom na puščico gor ali dol se ta številka poveča ali zmanjša, s pritiskom na puščico levo ali desno pa spremenimo, katera številka je označena.

V sredini ekrana je graf, ki kaže izhodni signal. Skaliran je tako, da izhodni signal sega od zgornjega do spodnjega roba in da je na ekranu prikazanih nekaj period. Narisane so tudi 3 horizontalne črte za prikaz minimalne, maksimalne in srednje vrednosti, na desnem robu so te vrednosti napisane. Na levem robu sta napisani vzorčna frekvenca in razmerje med vzorci in število pik na ekranu.

Spodnji in desni gumbi so normalno modri, če so izbrani pa rdeči. Če pritisnemo na že izbran desni gumb, se nam čez graf prikažejo gumbi za izbiro signala.

## 4 Omejitve

### 4.1 Periodičnost

Za doseganje največje hitrosti digitalno-analognega pretvornika ter sprostitve jedra mikrokrmilnika je uporabljen DMA. To omogoča prepisovanje tabele vrednosti na izhod digitalno-analognega pretvornika brez uporabe ciklov procesne enote in zagotavlja časovno konstanten razmak med vzorci. Ta tabela mora biti periodična, kar onemogoča generiranje aperiodičnih signalov. Zaradi omejenega spomina mikrokrmilnika je tabela omejena na največ 4096 vrednosti. Zaradi omejitve periodičnosti vzorčenega signala in cikličnega prenosa podatkov iz spomina pa ne moremo uporabiti celotne tabele.

### 4.2 Kvantizacija in preciznost DAC

Digitalno-analogni pretvornik je 12-bitni, kar mu omogoča 4096 izhodnih stanj. Če predpostavimo, da je izhod popolnoma linearen in brez pogreškov, je najmanjša razlika napetosti na izhodu 6,35 mV. V realnosti ima procesor efektivno število bitov 11,5 in nekaj najmanj pomembnih bitov napake ter šuma. Pri majhnih izhodnih napetostih pride do izraza tudi prehod skozi ničlo B ojačevalne stopnje. Zato ojačevalnik ni primeren za uporabo pri izhodni napetosti manjši od 0,5 V.

## 5 Možne izboljšave

### 5.1 Digitalno sito

Ker je uporabljen realni digitalno-analogni pretvornik ter je na izhodu analogno sito za zagotavljanje stabilnosti, se realni in željeni signal nekoliko razlikujeta. Rešitev bi bila implementacija digitalnega filtra, ki bi kompenzirale te pogreške. Ker se vrednosti vzorcev izračunajo pred izvajanjem, se sito ne potrebuje računati v dejanskem času in je lahko časovno zahtevno.

### 5.2 Programska kalibracija

Nastavitev enosmerne napetosti in ojačenja je izvedena analogno z regulacijskimi potenciometri. Boljša bi bila uporaba digitalne kompenzacije. Z uporabo integriranega analogno digitalnega pretvornika bi izmerili izhod ojačevalnika ter spremenili izhodno tabelo za korekcijski faktor. To bi omogočalo samodejno kalibracijo. Lahko bi tudi odpravili napake v izhodnem signalu zaradi segrevanja uporovne lestve v digitalno-analognem pretvorniku. Zmanjšala bi ceno ploščice, saj bi lahko potenciometre zamenjali z navadnimi upori.

### 5.3 Izhodna stopnja

Za povečanje maksimalnega izhodnega toka je bila uporabljena B izhodna močnostna stopnja, ki predvsem pri majhnih signalih povzroči popačenja ob prehodu skozi 0 V. Z implementacijo AB izhodno močnostne stopnje bi lahko ta popačenja zmanjšali. Problem implementacije AB je povečana poraba energije in dodatno segrevanje komponent, ki se mi pri načrtovanju ni zdela smiselna. Lahko bi uporabili tudi G izhodno stopnjo, ki bi

omogočala manjše izgube na tranzistorjih in manjša popačenja pri majhnih signalih, vendar bi potem potrebovali več komponent in dvignili ceno ter kompleksnost izdelka.

## Literatura

- [1] LCSC. *AMS1117 Datasheet*. Teh. poročilo. URL: [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/2001081204\\_Shikues-AMS1117-1-2\\_C475600.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/2001081204_Shikues-AMS1117-1-2_C475600.pdf).
- [2] ST. *Datasheet - STM32G061x6/x8*. Teh. poročilo. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32g061f6.pdf>.
- [3] Texas Instruments. *LM7171 Datasheet*. Teh. poročilo. URL: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm7171.pdf?HQS=dis-mous-null-mouser-mode-dsf-pf-null-ww&ts=1656418847677&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm7171.pdf?HQS=dis-mous-null-mouser-mode-dsf-pf-null-ww&ts=1656418847677&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.com%252F).
- [4] ST. *Application note AN4566: Extending the DAC performance of STM32 microcontrollers*. Teh. poročilo. URL: [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/dm00129215-extending-the-dac-performance-of-stm32-microcontrollers-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00129215-extending-the-dac-performance-of-stm32-microcontrollers-stmicroelectronics.pdf).
- [5] Donald Neamen. *Microelectronics Circuit Analysis and Design*. en. Sep. 2009. URL: <https://www.mheducation.com/highered/product/microelectronics-circuit-analysis-design-neamen/M9780073380643.html> (pridobljeno 21. 1. 2022).
- [6] Iztok Fajfar in Jernej Olensek. *Osvojimo C C89, C99 in primeri programiranja mikrokrmilnikov*. Slovenian. OCLC: 1267933000. Ljubljana: Zalozba FE, 2020. ISBN: 978-961-243-409-0. URL: <http://fajfar.eu/Osvojimo-C.pdf> (pridobljeno 21. 1. 2022).
- [7] Saso Tomazic in Savo Leonardis. *Diskretni signali in sistemi*. sl. OCLC: 1016112762. Ljubljana: Zalozba FE, 2017. ISBN: 978-961-243-344-4. URL: [http://www.fe.uni-lj.si/objava/fakulteti/zalozba\\_in\\_trgovina/prenos/Tomazic-Leonardis-DiskretniSignaliInSistemi.pdf](http://www.fe.uni-lj.si/objava/fakulteti/zalozba_in_trgovina/prenos/Tomazic-Leonardis-DiskretniSignaliInSistemi.pdf) (pridobljeno 30. 6. 2022).
- [8] ST. *RM0444 Reference Manual - STM32G0x1*. Teh. poročilo. URL: [https://www.st.com/resource/en/reference\\_manual/rm0444-stm32g0x1-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0444-stm32g0x1-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf).