

Programabilni kristalni oscilator visoke razločljivosti

Janko Koležnik, Boštjan Vlaovič

Elektroinštitut Milan Vidmar, Hajdrihova 2, 1000 Ljubljana, Slovenija
Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija
E-pošta: janko.koleznik@eimv.si

Povzetek. V delu sta predstavljena koncept in izvedba nastavljivega in programirljivega kristalnega oscilatorja z visoko razločljivostjo. Elektronske komponente so večinoma na voljo v izvedenkah, ki omogočajo poleg konstantnih tudi spremenljive vrednosti delovnih parametrov, na primer upori, nastavljivi upori in spremenljivi upori (potenciometri). Osnovna elektronska komponenta, kristalni oscilator, je v praksi večinoma na voljo v izvedenki s konstantno delovno frekvenco. Nekatere izvedenke podpirajo spreminjanje delovne frekvence s korakom reda 10 kHz. Manjša fleksibilnost take komponente lahko v fazi razvoja elektronskih naprav povzroči nepotrebno izgubo časa in manjša nabor izvedenih poskusov. Z uporabo sintetizatorskega vezja in mikrokrmilnika smo zasnovali programirljiv oscilator z možnostjo nastavljanja in spreminjanja delovne frekvence s korakom 1 Hz ter izdelali prototip s fizičnimi dimenzijami in električnimi lastnostmi, ki so primerljive z lastnostmi tovarniško izdelane komponente kristalnega oscilatorja. Zasnovali in izdelali smo programsko opremo za upravljanje oscilatorja med delovanjem v končnem vezju.

Ključne besede: elektronska komponenta, sintetizator, oscilator, mikrokrmilnik, PLL

A High-Resolution Programmable Crystal Oscillator

The paper presents a concept and implementation of the adjustable and programmable high-resolution crystal oscillator. Electronic components are usually available with either constant, adjustable or variable operational parameters, e.g., adjustable or variable resistors (potentiometers). Most crystal oscillators operate only at a constant frequency. Some of them support a variable operating frequency with a 10 kHz resolution. A less flexible component can increase the development time and minimize the set of the tests to be carried out. We have designed a crystal oscillator with an adjustable and variable operational frequency with a 1 Hz resolution. The implemented prototype includes a synthesizer circuit and microcontroller. Its dimensions and electrical properties are similar to those of a typical industrial crystal oscillator. We have also developed the software for the oscillator in-circuit control.

Keywords: electronic component, synthesizer, oscillator, microcontroller, PLL

1 UVOD

Osnovni sestavni deli kompleksnih elektronskih naprav so večinoma elektronske komponente. S pojmom elektronska komponenta označujemo diskretne sestavne sklope, kot so na primer upori, kondenzatorji, integrirana vezja, transformatorji idr. Na trgu so na voljo kot že izdelani proizvodi, pripravljeni za vgradnjo. Elektronske komponente imajo široko paleto različnih lastnosti: obratovalna napetost, tok, moč, fizične dimenzije, oblika, število zunanjih priključkov, delovna

frekvenca in podobne. Delimo jih lahko še na aktivne, pasivne, elektromehanske, spremenljive, nastavljive, konstantne, temperaturno odvisne – vseh mogočih lastnosti, po katerih bi jih lahko uredili oziroma klasificirali, je preveč, da bi jih lahko tukaj navedli. Slika 1.1 prikazuje nekaj osnovnih elektronskih komponent z njihovimi izvedenkami in pripadajočimi simboli.

R				
C				
L				
OSC				

Slika 1.1: Simboli in elektronske komponente R, L, C in OSC

Opazimo lahko, da imajo komponente z upornostjo, kapacitivnostjo in induktivnostjo vsaka po tri tipične predstavnike – izvedenko s konstantno vrednostjo, izvedenko z nastavljivo vrednostjo in izvedenko s spremenljivo vrednostjo. Pri komponenti kristalnega oscilatorja najdemo le izvedenko s konstantno vrednostjo. Zato smo pri razvoju elektronskih naprav omejeni, saj možnost spreminjanja delovne frekvence oscilatorja ni na voljo. Kadar potrebujemo komponento z drugačno vrednostjo delovne frekvence, moramo komponento praviloma nadomestiti z novim primerkom.

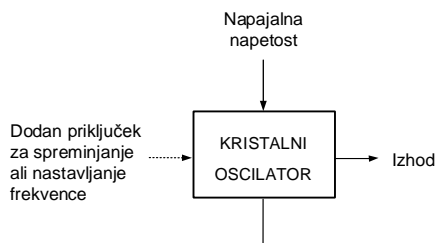
Obstoječe industrijske rešitve programabilnih oscilatorjev v obliki komponent na splošno omogočajo širok frekvenčni razpon (500 MHz), vendar je pri spreminjanju frekvence najmanjši korak zaradi uporabljenega internega celoštevilčnega deljenja sorazmerno velik, reda 10 ali 25 kHz [1, 2].

Prispevek opisuje razvoj koncepta in izvedbo prototipa kristalnega oscilatorja, ki bo poleg konstantne frekvence ponujal tudi možnost nastavljanja in spreminjanja delovne frekvence. Osredinili se bomo na uporabo neceloštevilčnega deljenja v sintezi frekvence s fazno sklenjeno zanko (Phased Locked Loop, PLL) oziroma deljenja z racionalnim deliteljem, s čimer lahko pri sintezi frekvence dosežemo korak 1 Hz.

V poglavju 2 najprej predstavimo koncept delovanja programirljivega oscilatorja. V poglavju 3 je opisana izvedba prototipa, vključno z izbiro komponent za implementacijo posameznih sklopov ter opisom delovanja. V poglavju 4 povzamemo rezultate ter podamo sklepne ugotovitve in ideje za nadaljnje delo.

2 KONCEPT PROGRAMIRLJIVEGA OSCILATORJA

Večinoma so industrijsko izdelani kristalni oscilatorji vgrajeni v majhno, zaprto ohišje z zunanji priključki za napajanje in izhodni signal. Vrednost konstantne delovne frekvence oscilatorja je po navadi natisnjena na vrhnjem delu ohišja. Ker programirljivi kristalni oscilator omogoča spreminjanja delovne frekvence, je treba dopolniti električni simbol, kot je označeno črtkano na sliki 2.1.



Slika 2.1: Simbol programirljivega kristalnega oscilatorja

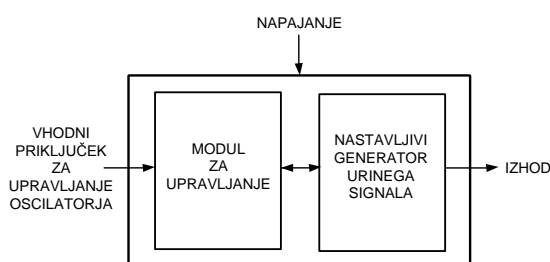
Za načrtovani programirljivi kristalni oscilator želimo, da v čim večji meri izpolnjuje naslednje zahteve:

- fizične lastnosti, kot so dimenzije, teža, oblika in zunanji priključki, naj bodo enake obstoječi komponenti,
- električne lastnosti naj bodo enake ali boljše od obstoječih,
- način uporabe in delovanje oscilatorja naj bosta enaka kot pri obstoječi komponenti,

- dodana naj bo možnost spreminjanja ali nastavljanja frekvence po namestitvi v vezje (in-circuit), po možnosti tudi med samim delovanjem.
- Takšen programirljiv oscilator bi lahko v prototipih ali obstoječih napravah nadomestil industrijski kristalni oscilator. Ob prehodu na serijsko proizvodnjo bi lahko programirljivo različico nadomestili s cenovno ugodnejšo različico s konstantno delovno frekvenco.

2.1 Notranja shema

S pomočjo podanih zahtev predlagamo notranjo funkcionalno shemo na sliki 2.2. Programirljivi oscilator vključuje modul za upravljanje in generator urnega signala.



Slika 2.2: Notranja funkcionalna shema

Modul za upravljanje nadzira nastavitve generatorja, omogoča hranjenje nastavitvev za nemoteno ponovno vzpostavitev delovanja po izpadu napajanja ter vključuje vhodni priključek za izvedbo komunikacije z uporabnikom. Vse navedene funkcionalnosti lahko izvedemo z ustreznim mikrokrmilnikom.

Generator urnega signala lahko izvedemo z vezji s fazno sklenjeno zanko, ki omogočajo sintezo urnih signalov v širokem frekvenčnem razponu, v osnovi pa so krmiljena s kvarčnim kristalom.

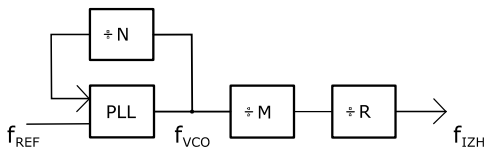
3 RAZVOJ PROTOTIPA

Osnovne gradnike obeh modulov smo izbrali na podlagi primerjave zmogljivosti, velikosti, dostopnosti in cen razpoložljivih proizvodov, predvsem mikrokrmilnikov in vezij za sintezo urnih signalov.

Za izvedbo modula za upravljanje smo izbrali mikrokrmilnik ATMEL AVR ATtiny45 [3]. Zaradi zahtevanih majhnih fizičnih dimezij smo izbrali izvedenko v majhnem ohišju (Small Outline Integrated Circuit, SOIC) z osmimi priključki in dimenzij 6,0 x 5,0 x 1,7 mm.

Nastavljivi generator urnega impulza smo zasnovali z integriranim vezjem Silicon Labs Si5351 [4]. Uporabili smo izvedenko Si5351A z zgolj tremi urnimi izhodi (kanali), majhnim ohišjem (Mini Small Outline Package, MSOP), z desetimi priključki in dimenzijami 3,0 x 5,0 x 1,1 mm. Splošna blokovna shema enega

kanala za sintezo izhodne frekvence je prikazana na sliki 3.1.



Slika 3.1: Sinteza enega kanala s PLL in racionalnimi delitelji v povratni in izhodni veji sintetizatorja

Vežje vsebuje dva racionalna delitelja, N in M , ter celoštevilčni delitelj R , ki je potenca števila 2. Racionalni delitelj N v povratni veji vežja PLL omogoča nastavljanje frekvence napetostno krmiljenega oscilatorja (Voltage-Controlled Oscillator, VCO), racionalni delitelj M v izhodni veji pa določa vrednost izhodne frekvence. Izhodna veja vsebuje celoštevilčni delitelj R , s katerim lahko izhodno frekvenco še dodatno znižamo. Trenutna vrednost izhodne frekvence je odvisna od vseh treh deliteljev in od referenčne frekvence. Slednjo določa kvarčni kristal frekvence 25 MHz.

Racionalni delitelj D lahko vselej matematično predstavimo kot vsoto celega števila a in okrajšanega racionalnega števila (b/c), kot kaže enačba (1). Enačba (2) opisuje matematične povezave med delitelji in izhodno frekvenco. Enačba (3) je zapis racionalnih deliteljev N in M s celimi števili z uporabo enačb (1) in (2). Koeficienti R , a_i , b_i in c_i so cela števila.

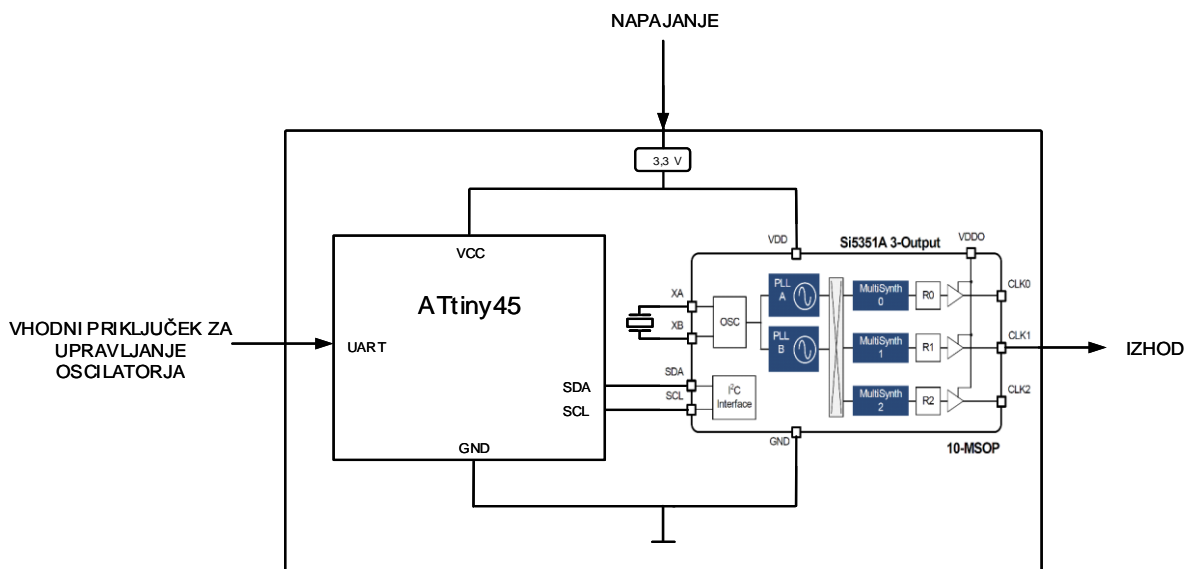
$$D = a + b/c \tag{1}$$

$$f_{izh} = f_{ref}N / (MR) \tag{2}$$

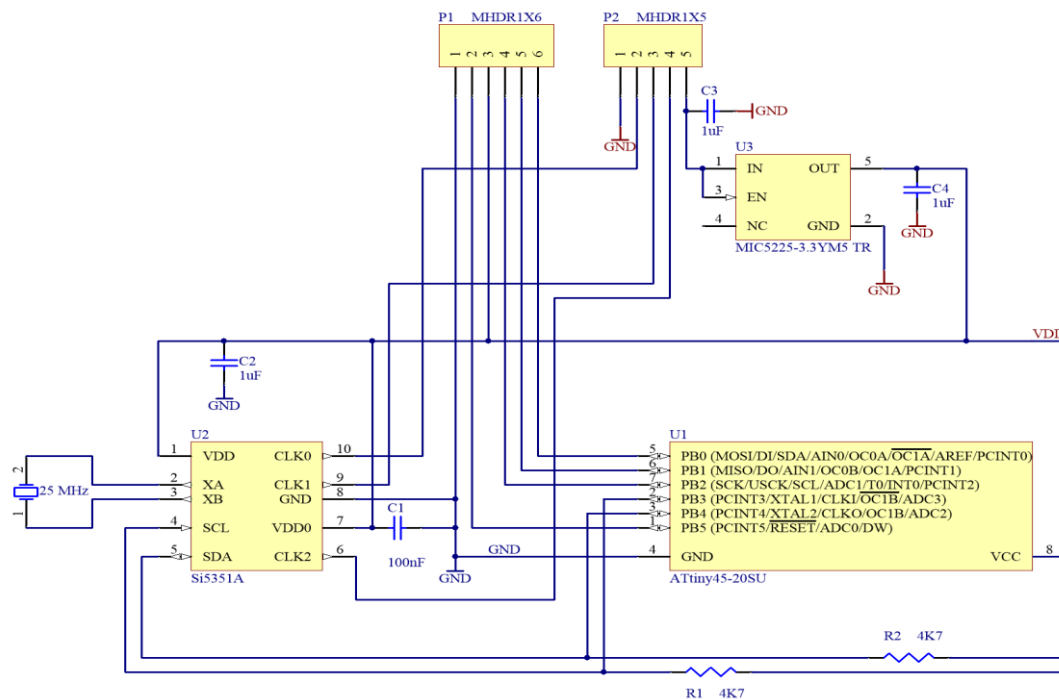
$$f_{izh} = f_{ref}[(a_1 + b_1 / c_1) / ((a_2 + b_2 / c_2)R)] \tag{3}$$

Za sintezo želene frekvence je treba določiti in izračunati f_{vco} , vrednost R ter koeficiente a_i , b_i in c_i . Rešitve enačbe (3), pri katerih nam uspe najti koeficiente b_i z vrednostjo 0, prevedejo deljenje v celoštevilčno. V teh primerih bo trepetanje (jitter) izhodne frekvence manjši. Želeno frekvenco na izhodu sintetizatorja dobimo po vnosu izračunanih delovnih parametrov v krmilne registre sintetizatorja. Izbrani postopek omogoča visoko razločljivost izhodne frekvence, saj ni omejen le na celoštevilčno deljenje. Frekvenčno območje delovanja oscilatorja določa izbira vežja uporabljenega sintetizatorja. Uporabljene komponente programirljivega kristalnega oscilatorja so prikazane na sliki 3.2.

Vežje Si5351A vsebuje tri izhodne kanale in dve vežji PLL, zato lahko hkrati generiramo dve povsem neodvisni izhodni frekvenci, frekvenca tretjega izhoda pa je zaradi souporabe vežja PLL delno v matematični odvisnosti z eno od dveh predhodno izbranih neodvisnih frekvenc. Posledica uporabe racionalnega deljenja je trepetanje faze izhodne frekvence. Izbrani sintetizator uporablja patentirano tehnologijo Multisynth™ podjetja Silicon Labs [6], ki s pomočjo izračuna fazne napake v procesu deljenja popravlja fazo izhodnega signala. Referenčno frekvenco vežja PLL sintetizatorja določa uporabljeni kvarčni kristal frekvence 25 MHz.



Slika 3.2: Notranja shema z izbranimi komponentami



Slika 3.3 Električna shema prototipa programirljivega oscilatorja

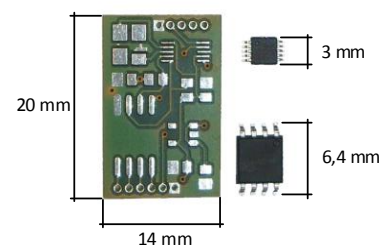
Mikrokrmilnik upravlja vezje za generacijo urnih signalov prek protokola za komunikacijo med integriranimi vezji (Inter-Integrated Circuit, I²C). Uporabnik krmili programirljivi kristalni oscilator z uporabo programske implementacije univerzalnega serijskega protokola (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, UART). Vezje sintetizatorja zahteva napajalno napetost 3,3 V, zato prototip za svoje notranje delovanje vključuje integrirani pretvornik in stabilizator napetosti

3.1 Izvedba prototipa

Zaradi lažjega rokovanja med načrtovanjem in testiranjem smo prvo različico zasnovali na prototipni razvojni ploščici. Uporabili smo mikrokrmilnik v večjem ohišju (Plastic Dual In-Line Package, PDIP). Do visokofrekvenčnega sintetizatorja smo dostopali z uporabo razširitvene ploščice izdelovalca Adafruit [5]. Slednja dodatno vključuje pretvornike napetostnih nivojev s prostorom predvidenim za zunanje priključke. Prva različica prototipa je vsebovala sintetizator s kvarčnim kristalom, mikrokrmilnik, pretvornik in stabilizator napetosti ter zunanje priključke za programiranje mikrokrmilnika in komunikacijo z osebnim računalnikom. Za povezavo z osebnim računalnikom smo izdelali napetostni pretvornik z nivojev 0/3,3 V na mikrokrmilniku na nivoje +/- 12 V na osebnem računalniku ter ustrezen povezovalni kabel. Moderni osebni računalniki večinoma ne vsebujejo zunanjih priključkov za UART, zato smo za povezavo

uporabili univerzalno serijsko vodilo (Universal Serial Bus, USB) in zunanji pretvornik med USB in UART. Prva različica prototipa je omogočila iterativno načrtovanje končne električne sheme programirljivega oscilatorja in hkratni razvoj programske opreme.

Električna shema programirljivega oscilatorja je prikazana na sliki 3.3. Vezje vsebuje le en kvarčni kristal frekvence 25 MHz za referenčno frekvenco f_{REF} , za urni signal mikrokrmilnika pa smo uporabili notranji oscilator s frekvenco 8 MHz. S tem smo število potrebnih komponent dodatno zmanjšali. Tiskanino prototipa programirljivega oscilatorja smo izvedli dvoslojno. Dimezije tiskanine so 20 mm x 14 mm. Na sliki 3.4 so prikazani tiskanina ter integrirani vezji sintetizatorja in mikrokrmilnika.



Slika 3.4: Tiskanina pred spajkanjem

Predviden položaj elementov je na zgornji strani tiskanine. Razmestitev elementov po obeh straneh tiskanine bi dovoljevala še nadaljnje zmanjšanje dimenzij končnega izdelka. Zaradi majhnih dimenzij smo spajkanje izvedli s pomočjo mikroskopa. Na

spodnjem delu tiskanine je predviden prostor za vmesnik za programiranje mikrokrmilnika, desno zgoraj pa prostor za vmesnik za napajanje in izhod programirljivega kristalnega oscilatorja.

3.2 Programska oprema

Programska oprema vključuje razvoj strojne programske opreme za mikrokrmilnik v programskem jeziku C in razvoj programa za osebni računalnik v programskem jeziku Java.

Strojna programska oprema vključuje naslednje funkcionalnosti:

- komunikacija z uporabniškim vmesnikom po protokolu UART,
- komunikacija s sintetizatorjem po protokolu I²C,
- upravljanje visokofrekvenčnega sintetizatorja,
- pomnjenje in inicializacija nastavitvev.

Komunikacija UART je izvedena v smeri od osebnega računalnika proti oscilatorju. Zasnovali smo preprost prenosni paketni protokol, prek katerega uporabniški vmesnik krmili delovanje programirljivega kristalnega oscilatorja.

Paketi vsebujejo informacije o tipu ukaza, številčne vrednosti izračunanih konstant in nadzorno vsoto. Mikrokrmilnik sprejete pakete preveri, obdela in podatke prek vodila I²C posreduje vezju sintetizatorja. Po potrebi nastavitve shrani v notranji električno zbrisljiv pomnilnik (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory, EEPROM). Ob ponastavitvi mikrokrmilnika se shranjene nastavitve preberejo in posredujejo sintetizatorju.

Program za osebni računalnik vključuje naslednje funkcionalnosti:

- uporabniški vmesnik za izbiro zelene frekvence,
- izračun delovnih parametrov sintetizatorja in
- komunikacijo s programirljivim kristalnim oscilatorjem po protokolu UART.

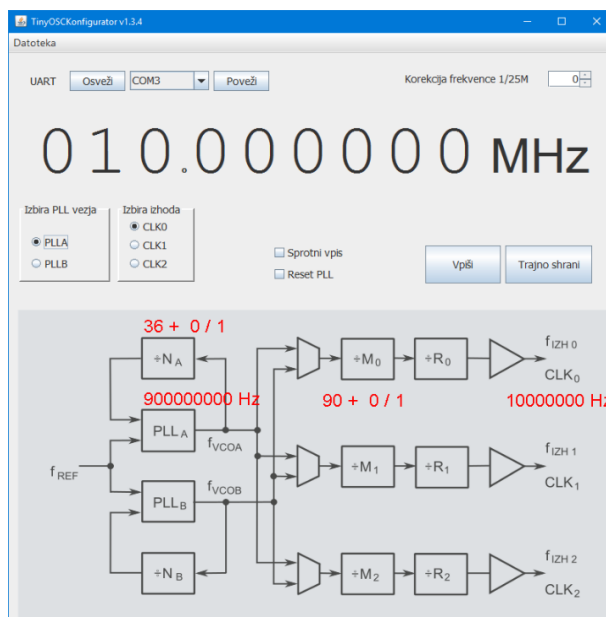
Slika 3.5 prikazuje uporabniški vmesnik za upravljanje nastavitvev delovanja oscilatorja. Uporabnik lahko upravlja oscilator bodisi v realnem času bodisi v pomnilnik mikrokrmilnika vpisuje trajne nastavitve za poznejšo uporabo po resetu vezja ob izgubi napajanja. Med izbiranjem zelene frekvence se sproti izračunavajo koeficienti deliteljev. S pritiskom na gumb "Vpiši" se po serijskem vodilu odpošljejo izbrani in izračunani delovni parametri sintetizatorja. Ti se po prejemu in kontroli vpišejo v notranji pomnilnik mikrokrmilnika in nato v vezje sintetizatorja.

Uporabniški vmesnik omogoča:

- izbiro serijskega vmesnika, na katerega je priključen programirljivi kristalni oscilator,
- izbiro zelene frekvence oscilatorja z ločljivostjo 1 Hz,
- izbiro vezja PLL znotraj sintetizatorja,

- popravke frekvence zaradi odstopanja kvarčnega kristala od njegove nazivne vrednosti,
- shranjevanje parametrov v notranji pomnilnik mikrokrmilnika in
- sproti pregled izračunanih delovnih parametrov sintetizatorja.

Uporabniški vmesnik dodatno vključuje blokovno shemo sintetizatorja, ki prikazuje trenutne delovne parametre sintetizatorja v realnem času.



Slika 3.5: Uporabniški vmesnik za upravljanje oscilatorja

4 SKLEP

Manjša fleksibilnost kristalnih oscilatorjev otežkoča razvoj elektronskih naprav. Prispevek podaja predlog izvedbe kristalnega oscilatorja, ki omogoča nastavljlivo in spremenljivo frekvenco delovanja z visoko razločljivostjo.

Zasnovan programirljiv oscilator ima primerljive fizične dimenzije in električne lastnosti z obstoječimi industrijskimi različicami (tabela 4.1).

Tabela 4.1: Primerjava lastnosti prototipa z obstoječimi industrijskimi različicami oscilatorjev

Lastnost	Industrijski oscilator	Prototip
Dimenzije	20 x 13 x 7 [mm]	20 x 14 x 4 [mm]
Frekvenca	ena, konstantna	8 kHz - 160 MHz
Poraba	30 - 50 mA	30 - 40 mA
Stabilnost	+/- 50 ppm	+/- 30 ppm
Trepetanje faze	50 ps pk-pk	35 - 100 ps pk-pk
Cena	1 - 10 EUR/kos	4 EUR/kos

Izdelani prototip izpolnjuje večino zastavljenih ciljev. Povsem primerljivi obstoječim oscilatorjem so fizične

dimenzije, način uporabe in samo delovanje. Električne lastnosti bi se z dodatno pretvorbo izhodnih napetostnih nivojev na nivo 5 V lahko še bolj približale obstoječim. Spreminjanje in nastavljanje frekvence se je med testiranjem prototipa potrdilo kot delujoče in uporabno.

V nadaljevanju bi bilo treba tiskanino izvesti s spajkanjem elementov na obeh njenih straneh in jo na ta način dodatno zmanjšati, da bi bila primerna za vgradnjo v kovinsko ohišje, v kakršno so tipično vgrajeni obstoječi kristalni oscilatorji.

Podatek o korekciji frekvence je zaradi kvarčnega kristala lasten vsakemu primerku nastavljivega generatorja urnega signala posebej. Ob podpori dvosmerne komunikacije z osebnim računalnikom bi lahko omogočili branje in ponovno uporabo predhodno že izmerjenega in shranjenega podatka za korekcijo.

Ocenjujemo, da smo z delujočim prototipom uspešno potrdili predlagano funkcionalno shemo. Predstavljeni kristalni oscilator visoke razločljivosti lahko nadomesti industrijsko različico kristalnega oscilatorja.

LITERATURA

- [1] Abracon Corporation, "ASEMP", Ultra Miniature Pure Silicon™ Clock Oscillator, na spletu, www.abracon.com/Oscillators/ASEMP.pdf (17.2.2017).
- [2] Dallas Semiconductor, "Econ Oscillator/Divider", na spletu, <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/DS1077.pdf> (17.2.2017).
- [3] Atmel, "Atmel 8-bit AVR Microcontroller with 2/4/8K Bytes In-System Programmable Flash", Rev. 2586QS–AVR–08/2013, 2013, San Jose, CA, Združene države Amerike, na spletu, http://www.atmel.com/images/atmel-2586-avr-8-bit-microcontroller-attiny25-attiny45-attiny85_datasheet-summary.pdf (17.2.2017).
- [4] Silicon Labs, "I²C Programmable any frequency CMOS Clock Generator and VCXO", na spletu, <https://www.adafruit.com/datasheets/Si5351.pdf> (17.2.2017).
- [5] Adafruit Industries LLC, "Adafruit Si5351 Clock Generator Breakout", 2016, New York, NY, Združene države Amerike, na spletu, <https://learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-si5351-clock-generator-breakout.pdf> (17.2.2017).
- [6] Silicon Labs, "Innovative DSPLL® and MultiSynth Clock Architecture Enables High-Density 10/40/100G Line Card Designs", na spletu, <https://www.silabs.com/documents/public/white-papers/DSPLL-MultiSynth-Clock-Architecture.pdf> (5.3.2017).

Janko Koležnik je diplomiral na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru. Zaposlen je kot raziskovalec na Elektroinštitutu Milan Vidmar v Ljubljani. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo integracijo sistemov in razvoj interdisciplinarnih programske opreme.

Boštjan Vlaovič je doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru. Deluje na področju elektronike in telekomunikacij s poudarkom na komunikacijskih in mikroročunalniških sistemih. Pri raziskovalnem delu se posveča formalni verifikaciji heterogenih komunikacijskih sistemov z elementi sočasnosti.