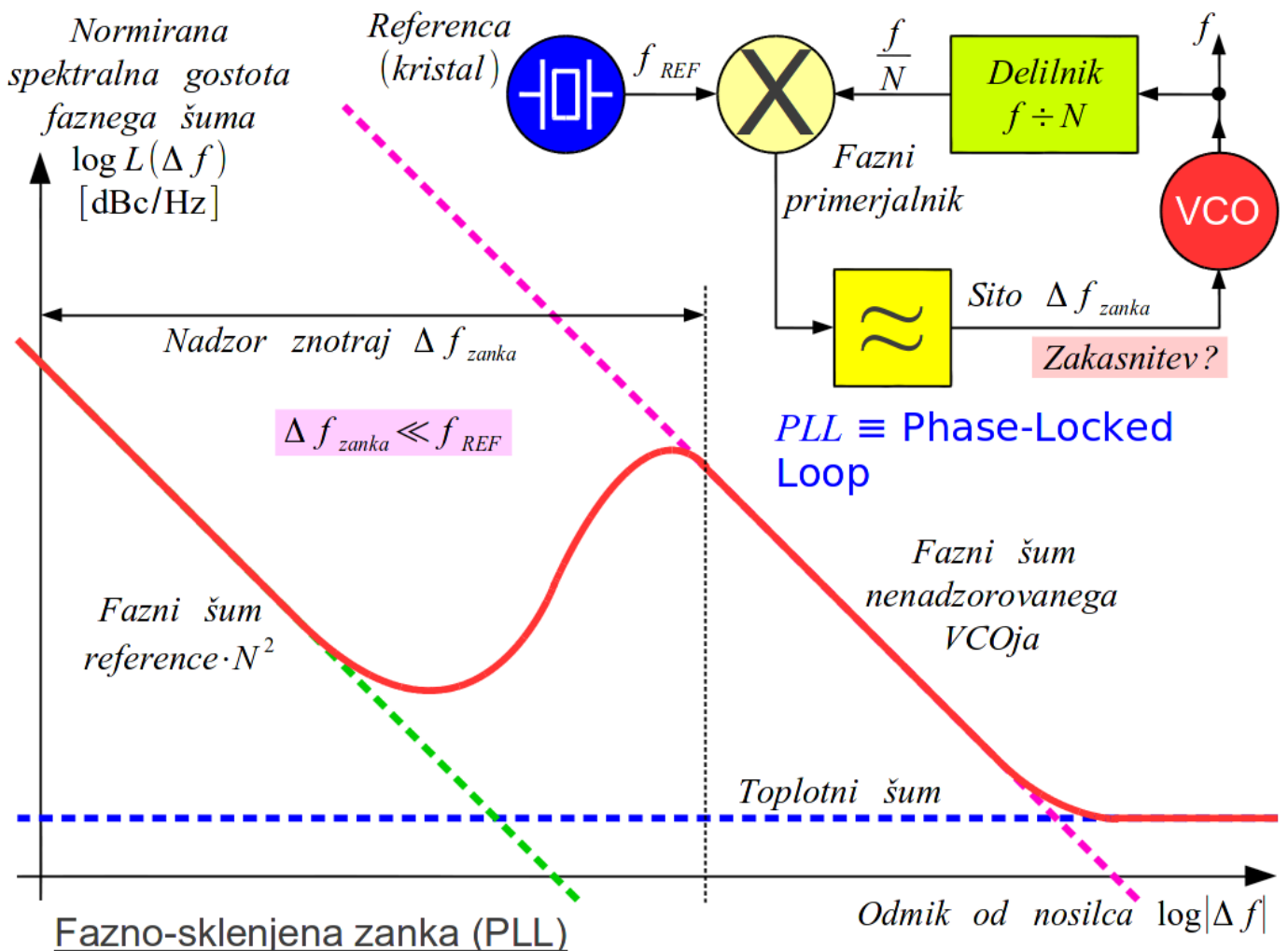


# Visokofrekvenčni vir z ulomkovno zanko

Matjaž Vidmar, S53MV

## 1. Fazno-sklenjena zanka

Frekvenčni sintetizator je bila pred pol stoletja silno komplicirana naprava. Veliko število različnih, ampak stabilnih izhodnih frekvenc se je dalo doseči edino z mešanjem frekvenc dveh ali več kristalnih oscilatorjev. Pojav cenених TTL integriranih vezij družine 74xx (frekvenca ure do 50MHz) v sedemdesetih letih je omogočil številne novosti. Najpomembnejši novosti v radijski tehniki sta bili frekvenčni števec in frekvenčni sintetizator.



Osnovna zamisel frekvenčnega sintetizatorja je ukleniti manj stabilen LC oscilator na visoko stabilen kristalni oscilator. Stabilnost oscilatorja matematično zapišemo kot fazni šum  $L(\Delta f)$ , ki ga merimo v dBc/Hz, to je decibelih glede na nosilec (carrier) v pasovni širini 1Hz. Fazni šum običajno upada s kvadratom odmika od nosilne frekvence  $\Delta f$ . Ceneni digitalni delilniki omogočajo, da frekvenci manj stabilnega VCO (Voltage-Controlled Oscillator, običajno LC oscilator z varikap diodo) in zelo stabilnega, referenčnega kristalnega oscilatorja delimo do skupnega mnogokratnika, kjer ju lahko primerjamo.

Primerjamo lahko frekvenco v FLL (Frequency-Locked Loop) oziroma fazo v PLL (Phase-Locked Loop). Primerjava faze je strožja od primerjave frekvence, zato so frekvenčno-sklenjene zanke kmalu utonile v pozabo. Seveda je pogoj za delovanje fazno-sklenjene zanke, da najprej izenačimo frekvenci. Izhod faznega primerjalnika stalno popravlja frekvenco VCO, da zanka ostane uklenjena.

Sliši se enostavno, a težave načrtovanja naprave se šele začenejajo. Če kot fazni primerjalnik uporabimo množilnik (mešalnik), dobimo na njegovem izhodu poleg fazne razlike še kopico motilnih signalov. Povratna vezava potrebuje nizkoprepustno sito, da te motnje ne modulirajo VCOja in ne pokvarijo izhodnega signala. Nizkoprepustno sito omejuje hitrost delovanja povratne vezave. Pri velikih odmikih od nosilne frekvence  $\Delta f$  fazno-sklenjena zanka ne more več popravljati faznega šuma nenadzorovanega VCOja. Končno, nizkoprepustno sito lahko sploh prepreči uklenitev zanke, če je začetno odstopanje frekvence VCOja preveliko.

Zanesljiv sintetizator torej potrebuje oboje: najprej primerjavo frekvence in nato še primerjavo faze. Množilnik ne zna primerjati frekvence. Obema zahtevama ugotovi primerjalno vezje, ki ga imenujemo črpalka nabojev (charge pump). Črpalka nabojev vsebuje pomnilniško vezje (lahko sta dva D-FF) in dva krmiljena tokovna izvora. V prisotnosti impulzov reference se proži samo gornji D-FF, ki vključi pozitivni tokovni vir, da polni kondenzator  $C_1$  krmilne napetosti VCOja. V prisotnosti impulzov VCOja (deljenih z N) se proži samo spodnji D-FF, ki vključi negativni tokovni vir, da prazni kondenzator  $C_1$  krmilne napetosti VCOja. Črpalka nabojev na ta način primerja frekvenci reference in VCOja.

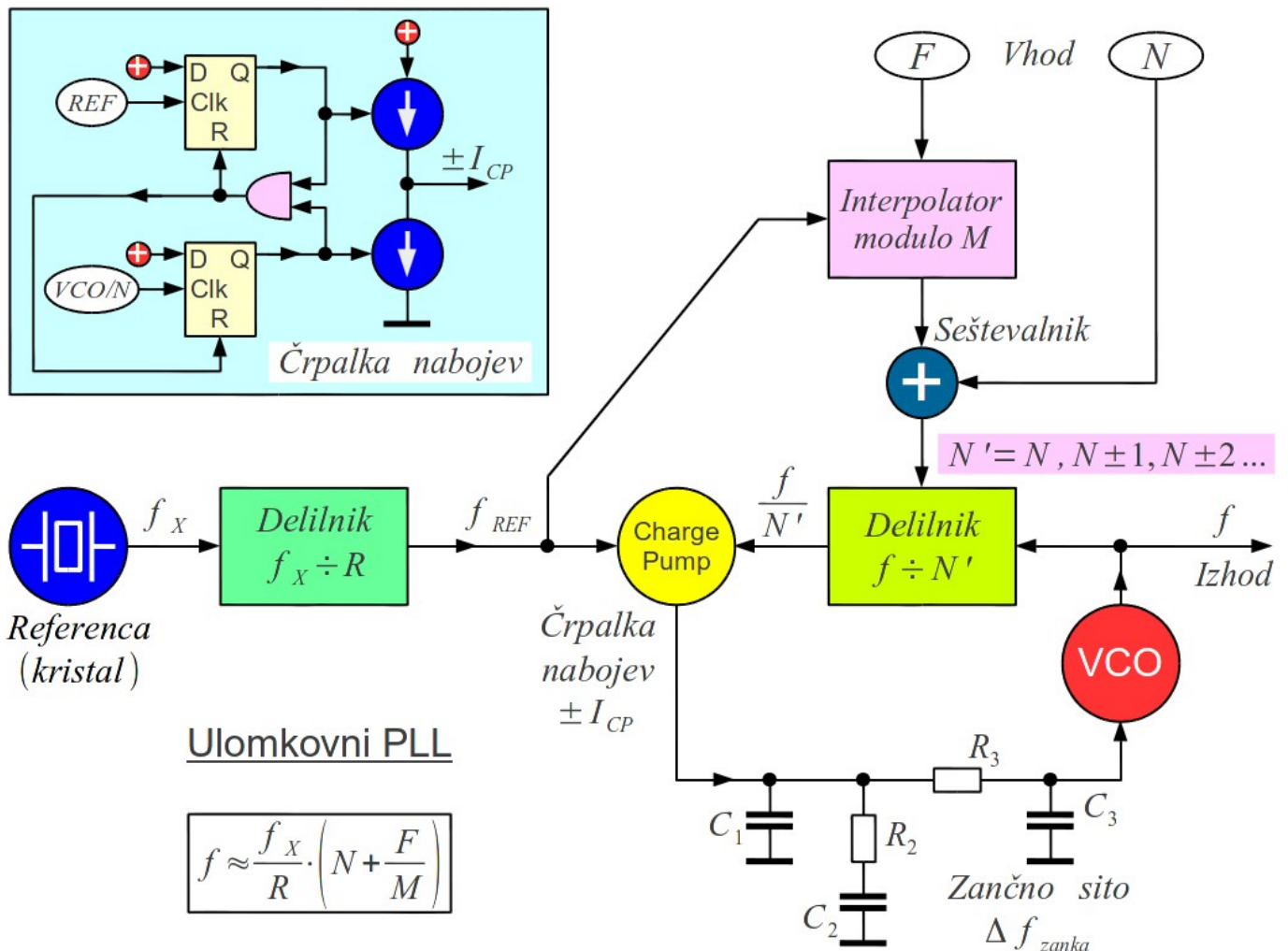
Ko so hkrati prisotni impulzi reference in VCOja, se prožita oba D-FFja, ki vključita oba tokovna vira. AND vrata v tem primeru poskrbijo, da oba D-FFja dobita RESET in se vrneta v začetno stanje. Ko imajo impulzi reference in VCOja isto frekvenco (uklenitev frekvence) in so natančno časovno poravnani (uklenitev faze), sta oba tokovna vira vključena le za kratek trenutek periode, sicer ostaneta oba izključena. V uklenjenem stanju črpalka nabojev zato proizvaja zelo majhne motnje na svojem izhodu, kar silno poenostavi načrtovanje zanke.

Frekvenčni sintetizatorji s fazno-sklenjeno zanko so doživeli svoj razcvet prav z izumom črpalke nabojev. Ena prvih tržno dosegljivih črpalk nabojev v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja je bilo TTL integrirano vezje MC4044 (NE zamešati s CMOS vezji CD4044 oziroma MC14044), ki je končno omogočilo gradnjo enostavnih in kakovostnih frekvenčnih sintetizatorjev. Vezje s črpalko nabojev potrebuje za stabilno delovanje še člen  $R_2 C_2$  v zanknem situ.

Opisana fazno-sklenjena zanka ima eno hudo omejitev: frekvenca primerjave, pri kateri deluje črpalka nabojev, mora biti enaka ali celo podmnogokratnik kanalskega razmaka frekvenc, ki naj jih proizvaja sintetizator. V AM in FM radijskih postajah s kanalskim razmakom 25kHz je zanka dovolj hitra, da uspe popravljati počasna odstopanja frekvence VCOja. V frekvenčnem pasu VHF in nižje kratkoročna stabilnost LC VCOja zadošča. Fazni šum na velikih frekvenčnih odmikih  $L(\Delta f > 25\text{kHz})$  je tu dovolj nizek, da hitri popravki niso potrebni.

V frekvenčnem pasu UHF in višje oziroma pri majhnih kanalskih razmakih pod

100Hz v SSB radijskih postajah in merilnih inštrumentih postane preprosta fazno-sklenjena zanka prepočasna. Načrt primernega frekvenčnega sintetizatorja z več fazno-sklenjenimi zankami ter seštevanjem, odštevanjem, množenjem in deljenjem njihovih frekvenc postane silno kompliciran. Omejitev je v enačbi izhodne frekvence fazno-sklenjene zanke  $f = f_x \cdot N / R$ , kjer morata biti oba modula deljenja reference  $R$  in VCOja  $N$  celi števili.



Kako preprečiti omejitev celoštevilskih deljenj? Silni znanstveniki so že pred desetletji skovali izraz ulomkovna fazno-sklenjena zanka (fractional PLL). Zelo lahko je napisati prazen članek z blokovnim načrtom, ki vsebuje čudežne škatlice, ki jih ne znamo izdelati, kaj šele, da bi se jih dalo kje kupiti? Vse, kar lahko storimo, je to, da modulo deljenja VCOja  $N$  menjamo v vsakem ciklu reference  $f_{REF}$ . Izhodna frekvenca bo skakala med sosednjimi vrednostmi in v povprečju lahko zavzela tudi vrednosti med celoštevilskimi mnogokratniki primerjalne frekvence.

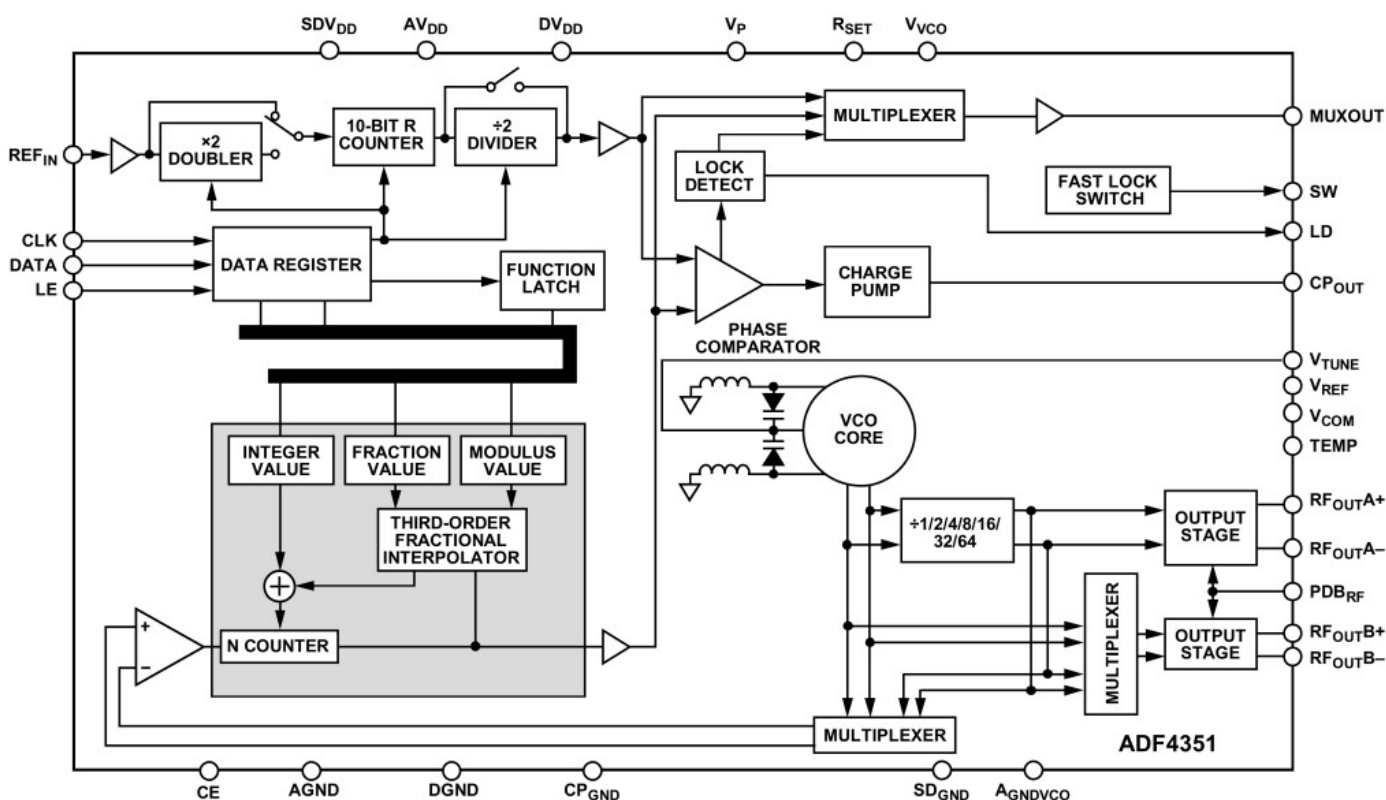
Zgodba ulomkovne zanke vsebuje že na začetku nekaj gnilega. Izhodna frekvenca nujno skače med sosednjimi vrednostmi. fazno-sklenjena zanka nikoli ne doseže uklenitve. Impulzi tokovnih virov črpalke nabojev se ne skrčijo, kar pomeni še dodatne motnje. Pomaga edino ožje zančno sito, da je izhodna frekvenca vsaj približno  $f \approx f_x \cdot (N + F/M) / R$ , kjer je  $F/M$  poljuben ulomek.

Na prelomu tisočletja je izpopolnjena tehnologija izdelave polprevodnikov omogočila nepričakovano rešitev za ulomkovno zanko. Hitrejša vezja omogočajo

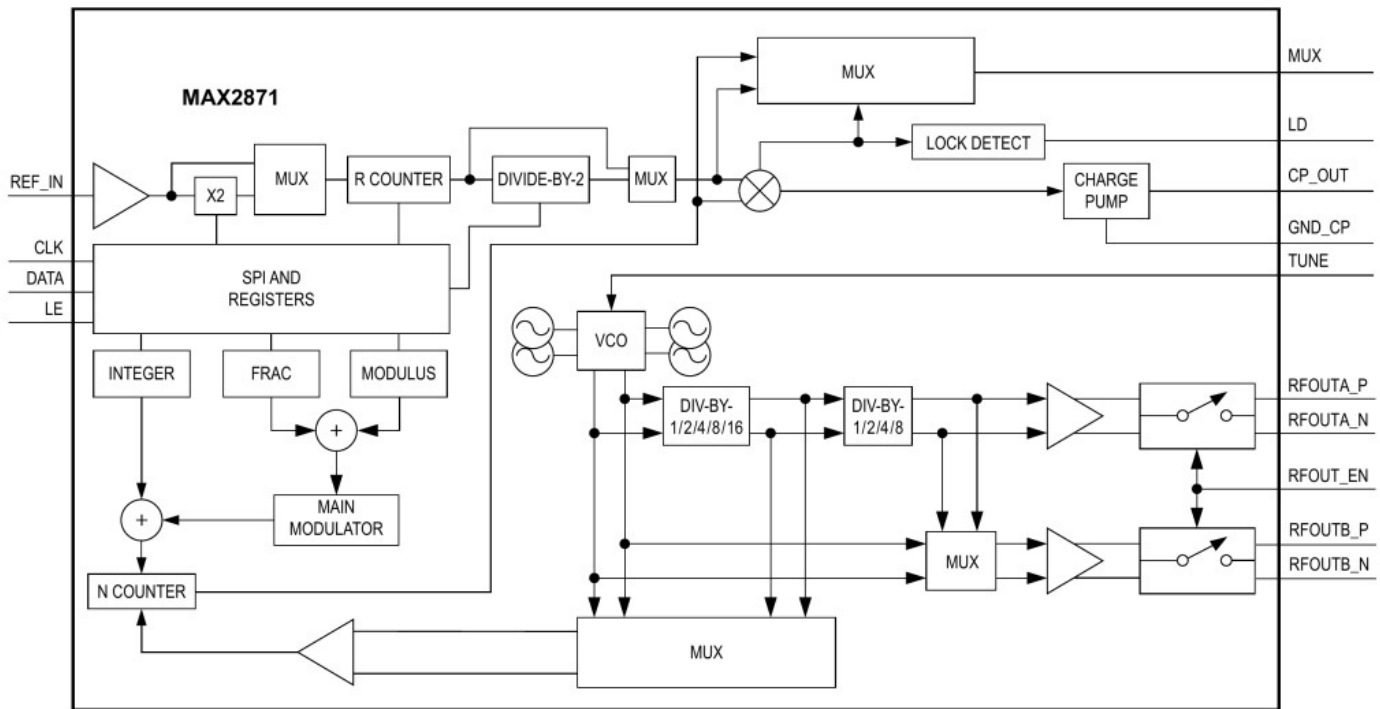
delovanje črpalke nabojev tudi pri frekvencah nad  $f_{REF} \geq 100\text{MHz}$ . Na primer, pri primerjalni frekvenci  $f_{REF} \approx 30\text{MHz}$  je tisočkrat ožja zanka povratne vezave  $\Delta f_{zanka} \approx 30\text{kHz}$  še vedno spodobno hitra, da lahko popravlja fazni šum VCOja. Če s skrbnim načrtovanjem interpolatorja premaknemo spekter motenj ulomkovne zanke na take frekvence, da jih zančno sito večinoma poreže, bo izhodni signal takšnega sintetizatorja razmeroma čist kljub packanju ulomkovne zanke. Motnje interpolacije dodatno slabi člen  $R_3C_3$  v zančnem situ, ki žal poslabša stabilnost zanke.

Ulomkovne zanke so se najprej pojavile v čipovju WiFi radijskih postaj, ki zahtevajo preprost in cenen, ampak učinkovit frekvenčni sintetizator. Proizvajalci polprevodnikov so hkrati ponudili čipe, ki vsebujejo celotno fazno-sklenjeno zanko vključno z VCOjem. Večino čipov je poleg ulomkovne zanke možno programirati tudi za celoštevilsko delovanje kot običajna fazno-sklenjena zanka.

Eden prvih takšnih univerzalnih čipov, ki pokrijejo zelo širok pas frekvenc z notranjimi VCOji, je bil ADF4350 proizvajalca Analog Devices. Slednjemu so hitro dodali še dodatne delilnike, ki omogočajo nižje izhodne frekvence. Izboljšani sintetizator je dobil oznako ADF4351 in pokrije frekvenčni pas 35MHz do 4.4GHz:



Konkurenca pri tem ni stala križem rok. Tovarna Maxim Integrated je kmalu ponudila MAX2870, za njim pa še izboljšano inačico MAX2871. Slednji je izdelan v novejši tehnologiji, da pokrije frekvenčni pas 23.5MHz do 6GHz:



Čipa ADF4351 in MAX2871 sta oba vgrajena v enako QFN ohišje z 32 električnimi priključki in osrednjim "paddle" za hlajenje in ozemljitev. Kar v podatkovnih listih različnih proizvajalcev ne piše, čipa ADF4351 in MAX2871 sta pin-kompatibilna. Lahko ju vgradimo na isto tiskano vezje! Manjše razlike med čipoma so v vrednostih nekaterih zunanjih gradnikov (drugačno zančno sito) in v programiranju številnih notranjih registrov.

Razvoj PLL čipov se nadaljuje. Analog Devices že ponuja še bolj izpopolnjene inačice. Tudi drugi proizvajalci, na primer National Semiconductor (danes Texas Instruments) ponujajo podobne čipe. Vsi novejši izdelki so načrtovani podobno izvornemu ADF4350: imajo vgrajenih več različnih VCOjev, da pokrijejo zelo širok frekvenčni pas tako v celoštevilskem kot v ulomkovnem načinu delovanja. ADF4351 (do 4.4GHz) in MAX2871 (do 6GHz) zaenkrat ostajata cenovno ugodna, sta preprosto dobavljiva in omogočata izdelavo sintetizatorja s širokim frekvenčnim razponom. Novejši čipi zaenkrat ne omogočajo kaj dosti več od ADF4351 oziroma MAX2871, zato je povsem smiselno uporabiti slednja dva.

## 2. Visokofrekvenčni vir

Zahteve za visokofrekvenčne vire so lahko zelo različne. Za meritev občutljivih sprejemnikov potrebujemo vir, ki je zelo dobro oklopljen, da natančno poznamo mikrovolte na izhodu. Obratno meritev anten zahteva vir, ki ima čim višjo izhodno moč, da se izognemo motnjam. Meritev frekvenčnih sit in drugih gradnikov zahteva preletni (sweep) izvor, ki samodejno premika svojo frekvenco v izbranem področju. Končno, zahteve za modulacijo vira so zelo različne, pravi signal generator naj bi omogočal številne različne modulacije.

Če strnemo vse zahteve za različne visokofrekvenčne vire v eno samo nalogo, zelo verjetno ne pridemo nikoli do cilja! Zato sem se odločil za gradnjo preprostega vira. Opustil sem komplicirane modulacije, saj danes digitalije vsak dan prinesejo

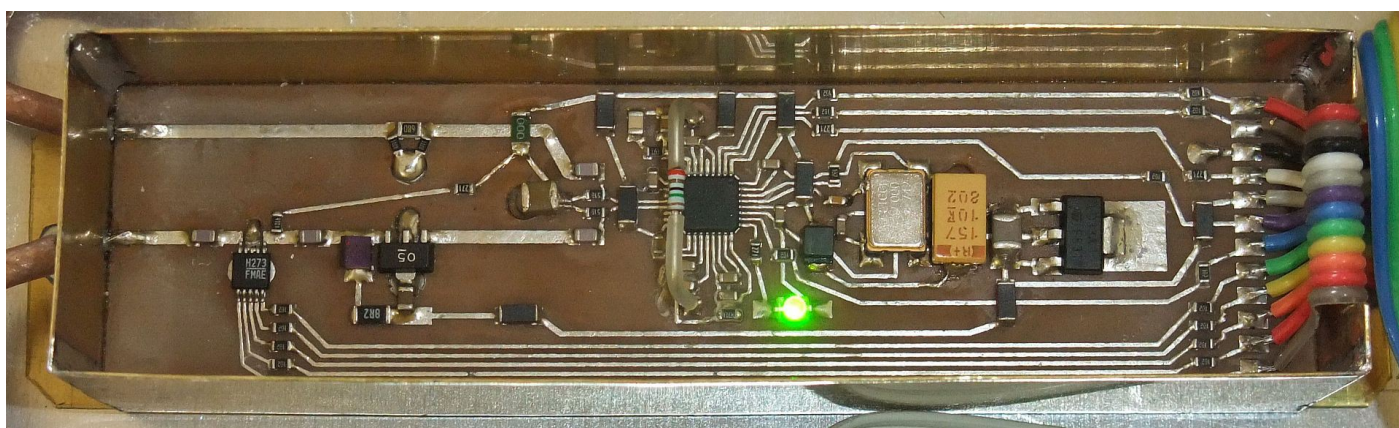




je hitrejši, ampak tudi zanj je TCXO za 32.000MHz odlična izbira.

Oba ADF4351 in MAX2871 imata omejen modulo interpolatorja na 12 bitov. Z uporabo referenčne frekvence 32MHz v ulomkovni zanki je v tem primeru smiselna izbira modulo 4000, kar daje frekvenčne korake sintetizatorja 8kHz. Ti koraki se seveda nanašajo na osnovni frekvenčni pas vgrajenih VCOjev, torej 2200MHz do 4400MHz za ADF4351 oziroma 3000MHz do 6000MHz za MAX2871. Novejši čipi sicer omogočajo višji modulo interpolatorja in gostejše frekvenčne korake, kar pa hkrati prinese tudi več neželenih signalov (brkov) v ulomkovni zanki!

Oba ADF4351 oziroma MAX2871 proizvajata nižje frekvence s pomočjo vgrajenih dvojiških delilnikov z 2, 4, 8, 16, 32, 64 in (samo MAX2871) 128. na ta način izhodna frekvenca doseže navzdol 35MHz (ADF4351) oziroma 23.5MHz (MAX2871). Skladno z vstavljenim delilnikom se deli tudi frekvenčni korak, ki doseže 1kHz že pri frekvencah pod 550MHz pri ADF4351 oziroma pod 750MHz pri MAX2871. Glede na to, da tudi v praksi potrebujemo ožje frekvenčne korake samo pri nižjih frekvencah, je takšna zasnova visokofrekvenčnega vira povsem ugodna.

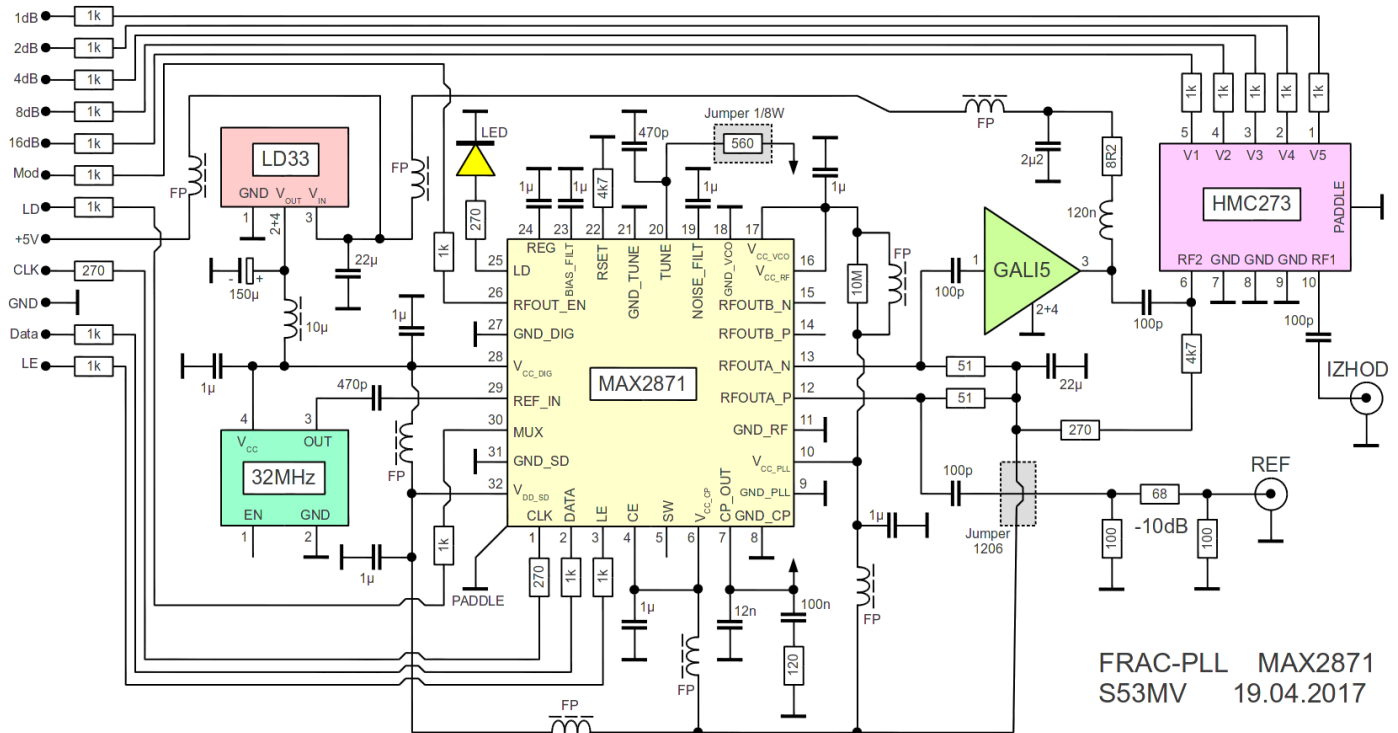


Oba ADF4351 in MAX2871 potrebujeta eno samo napajalno napetost +3.3V za različna notranja vezja: od šumečih digitalij do na motnje silno občutljivega VCO. Kar piše v njihovih podatkovnih listih o stabilizaciji in razvodu napajanja, NE drži. Priporočeni LDO (Low-Drop-Out) napetostni regulatorji radi samo-oscilirajo in katastrofa je tu. Tudi če napetostni regulator še ne samo-oscilira, lahko na določenih frekvencah proizvaja ogromno šuma, ki frekvenčno modulira VCO in pokvari izhodni spekter vira.

Natančne meritve faznega šuma celotnega visokofrekvenčnega izvora so pokazale naslednje. Zadošča en sam napetostni regulator, na primer LD33 ali LM1117-33. Napajanja posameznih stopenj znotraj PLL čipa razklopimo s primernimi blokirnimi kondenzatorji in feritnimi dušilkami. Da sam LD33 ne dodaja preveč šuma, moramo na njegovem vhodu in izhodu uporabiti 10-krat večje blokirne kondenzatorje od priporočenih in šum na izhodu dodatno izsejati s feritno dušilko 10 $\mu$ H. Ojačevalnik GALI5 se napaja neposredno iz +5V pred LD33.

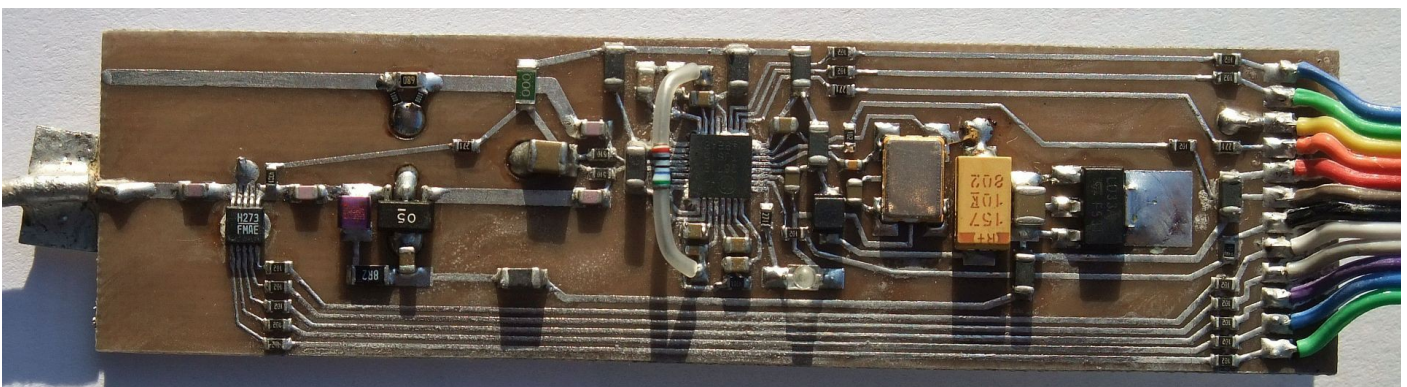
Uspešni ponaredek MAX2871 je pin-kompatibilen z izvornikom ADF4351, zato ga lahko vgradimo na enako tiskano vezje. Razlika med ADF4351 in MAX2871 je le v zančnem situ ulomkovne zanke, da izkoristimo hitrejšo črpalko nabojev MAX2871 in vir daje na izhodu čistejši signal. Podatkovni list MAX2871 zahteva tudi višje vrednosti blokirnih kondenzatorjev 1 $\mu$ F namesto 100nF za ADF4351.

Napajanje +3.3V, TCXO 32MHz, ojačevalnik GALI5 in slabilec HMC273 ostanejo enaki. HMC273 je sicer načrtovan za delovanje samo do 4GHz. Slednje predstavlja omejitev za MAX2871, ki lahko gre preko 6GHz in tam vnaša HMC273 višje slabljenje v nenatančnih korakih.



Oba ADF4351 in MAX2871 sta opremljena z dvema simetričnima izhodoma A in B, torej skupno štirje električni priključki. Simetrični izhod B ni uporabljen in pripadajoči nogici nista nikamor povezani, čeprav podatkovni list svetuje, da neuporabljene izhode vežemo na +3.3V. Simetrični izhod A moramo vedno hkrati uporabljati obe nogici. Ena nogica A krmili verigo GALI5 in HMC273, druga nogica A pa je napeljana preko slabilca 10dB na svojo SMA vtičnico kot pomožni oziroma referenčni izhod za določene meritve.

Oba simetrična izhoda A in B lahko vključimo/izkjučimo tudi neposredno preko nogice 26 (PDB<sub>RF</sub> oziroma RFOUT\_EN) brez zamudnega programiranja notranjih registrov ADF4351 oziroma MAX2871. Nogico 26 lahko torej izkoristimo za preprosto amplitudno ON/OFF modulacijo. Takšna modulacija je uporabna v številnih praktičnih primerih. Ker vklop/izklop izhodne stopnje učinkuje nazaj na VCO, dobimo poleg amplitudne modulacije tudi nekaj neželjene frekvenčne modulacije s kolebom nekaj deset kHz!



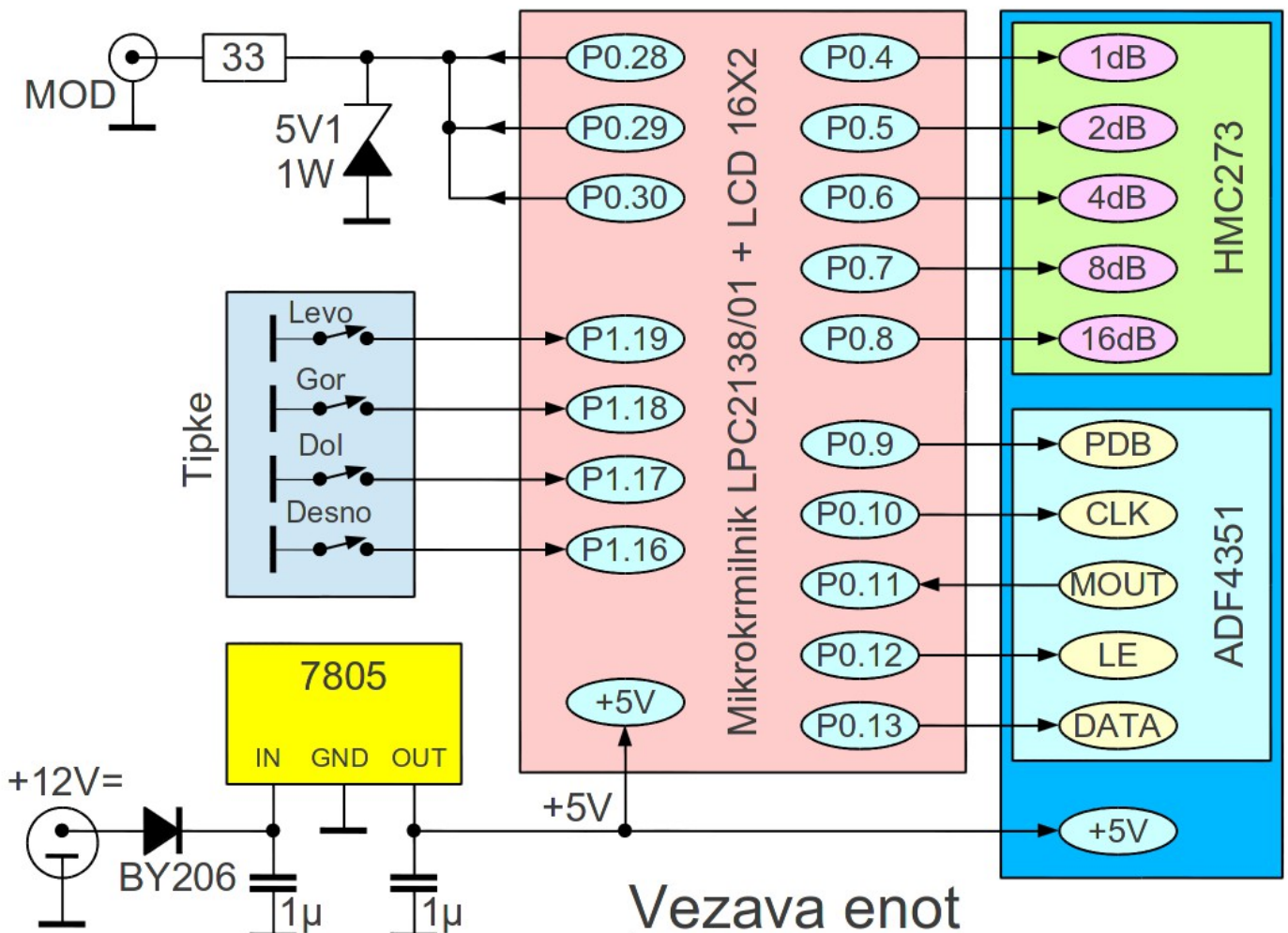


### 3. Mikrokrmilnik

Vsi uporabljeni čipi, ADF4351, MAX2871 in HMC273 so namenjeni upravljanju z mikrokrmilnikom. Za pravilno delovanje ADF4351 oziroma MAX2871 je treba nastaviti šest notranjih registrov preko tri-žičnega vodila SPI: CLK, DATA in LE. V obratni smeri ADF4351 oziroma MAX2871 sporoči uklenitev preko signala MUXOUT oziroma MUX. Modulacijo pripeljemo neodvisno od vodila SPI na vhod  $PDB_{RF}$  oziroma  $RFOUT\_EN$ . Končno, vstavitveno slabljenje HMC273 nastavljamo v korakih po 1dB vse do 31dB preko pet-žičnega vzporednega vodila.

Z izjemo modulacije so vsi krmilni signali visokofrekvenčnega vira razmeroma počasni. Tudi najbolj zanikrni 8-bitni PIC je dovolj hiter mikrokrmilnik za takšno nalogo. Računanje je neprimerno enostavnejše v 32-bitnem mikrokrmilniku, ki je povrh dovolj hiter, da povsem programsko tvori signal modulacije.

V visokofrekvenčnem viru sem brez oklevanja uporabil preverjeno ploščico z 32-bitnim mikrokrmilnikom LPC2138/01, ki je že prirejena krmiljenju primerne LCD modula: dve vrstici po 16 znakov vsaka. Povrh ploščica vsebuje virtualni USB/COM vmesnik FT231, ki omogoča preprosto nalaganje programske opreme (firmware) v pomnilnik FLASH mikrokrmilnika kot tudi računalniško krmiljenje vseh nastavitev visokofrekvenčnega vira.



Gledano s strani mikrokrmilnika potrebuje visokofrekvenčni vir 9 TTL izhodov in en TTL vhod. Kot TTL vhod je smiselno uporabiti priključek P0.11, ki je v mikrokrmilniku LPC2318/01 omejen na open-drain izhod zaradi združljivosti s protokolom I<sup>2</sup>C. Ostali priključki LPC2138/01 od P0.4 do P0.13 so opremljeni s popolnimi CMOS izhodi in lahko krmilijo karkoli.

Gledano s strani visokofrekvenčnega vira je treba vse krmilne TTL signale napeljati skozi primerna nizkoprepustna sita, da visokofrekvenčni signali ne pobegnejo po nepredvidljivi poti, kamor ni treba. Vsak TTL krmilni signal je zato napeljan skozi dva dušilna upora 1k $\Omega$ . Izjemoma gre CLK skozi dva dušilna upora 270 $\Omega$ . Kondenzatorji skozniki bi bili sicer učinkovitejši, ampak lahko preveč upočasnijo TTL krmilne signale.

Visokofrekvenčni vir nastavimo preko štirih tipk: levo, desno, gor in dol. Tipke so preprosta stikala na maso, saj imajo vhodi P1.16-19 vgrajene pull-up upore na napajanje mikrokrmilnika +3.3V. Celoten visokofrekvenčni vir potrebuje napajanje +5V. Ker gre za merilni inštrument, se je smiselno izogniti motnjam stikalnega napajalnika z uporabo preprostega regulatorja 7805. Ker se slednji precej greje, ga je smiselno priviti na zadnjo stranico ohišja. Blokirni kondenzatorji 1 $\mu$ F morajo biti vgrajeni v neposredni bližini 7805, da slednji ne samo-oscilira.

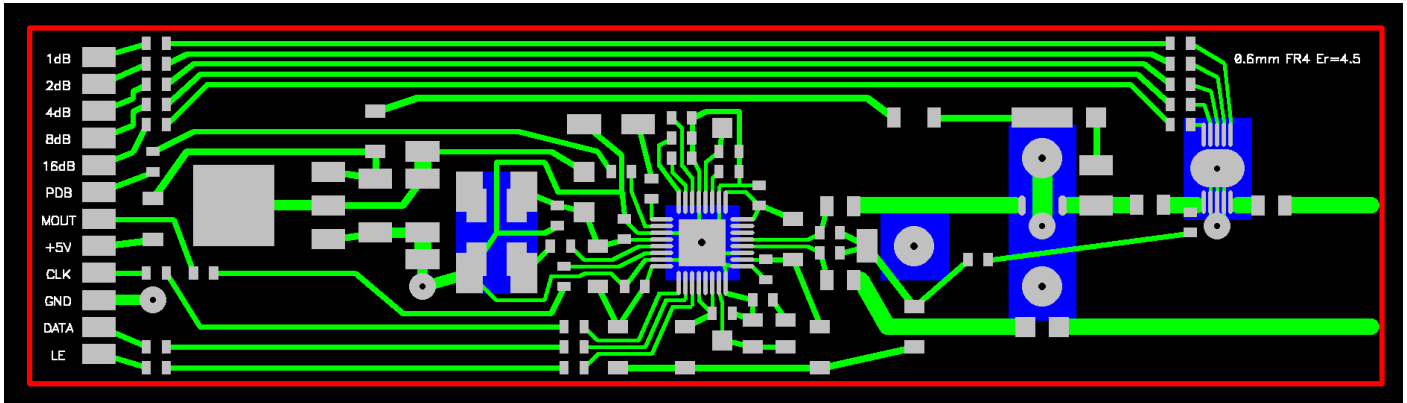


Končno, modulacija ON/OFF je poleg izhoda P0.9 napeljana tudi na izhode P0.28-30. Slednji so vezani vzporedno in napeljeni na zunanjo BNC vtičnico, na primer za krmiljenje lock-in sprejemnika. Zener dioda 5V1-1W in zaporedni upor 33 $\Omega$  ščitata mikrokrmilnik v primeru napačnih zunanjih povezav.

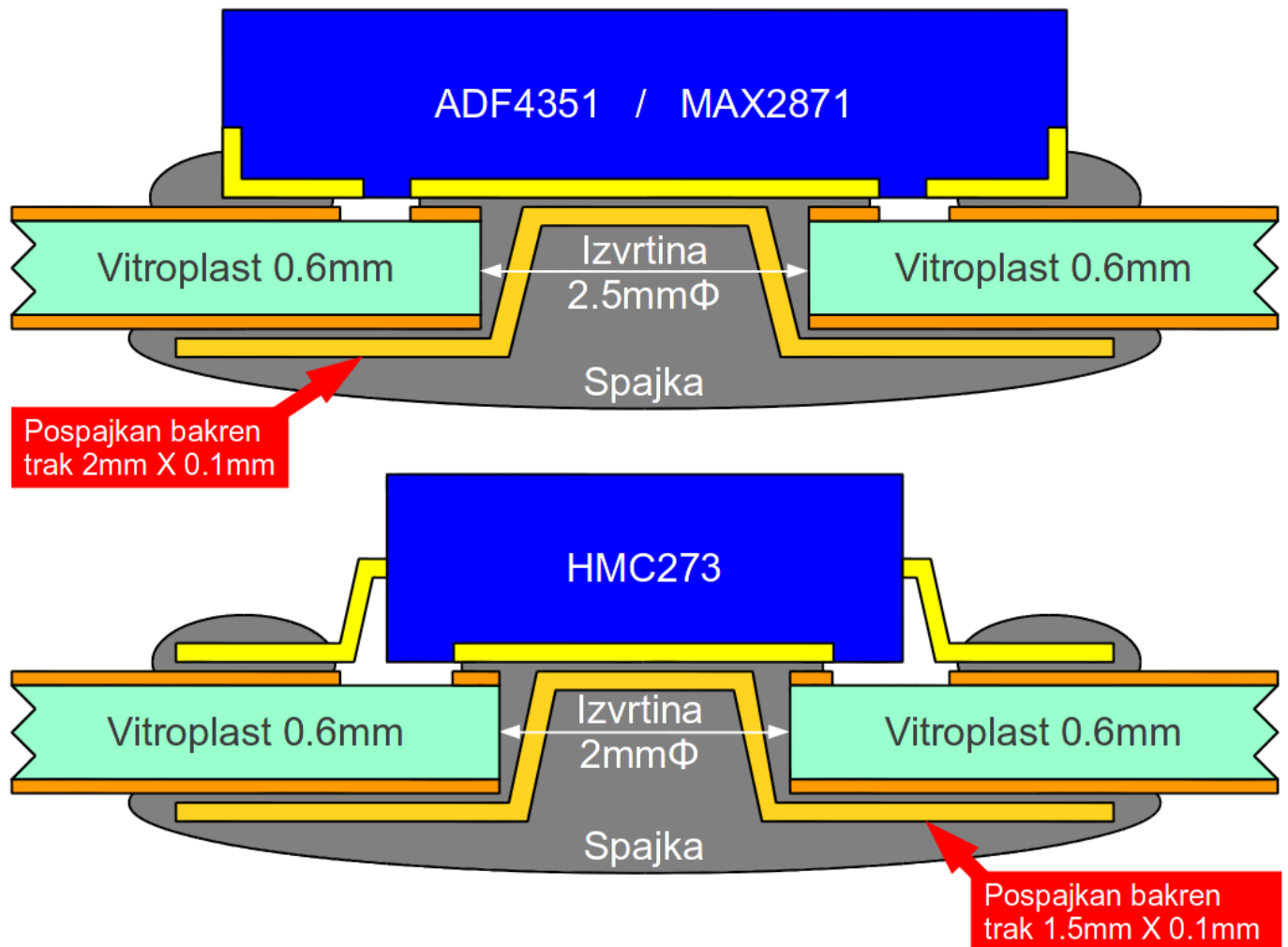
#### 4. Gradnja vira

Gradniki visokofrekvenčnega vira so vgrajeni na dvostransko tiskano vezje iz vitroplasta debeline 0.6mm. Tiskano vezje ima izmere 100mm X 26mm. Spodnja stran ni jedkana, da deluje kot ravnina mase za mikrotrakaste vode in kot spodnja stranica oklopljenega ohišja. Vsi visokofrekvenčni gradniki zahtevajo skrbno vgradnjo in natančno ozemljitev na tiskanem vezju, ki NE predvideva okovinjnih

izvrtin!



Gradnjo začnemo z najzahtevnejšima gradnikoma: PLL čipom ADF4351 oziroma MAX2871 ter slabilec HMC273. PLL čip potrebuje izvrtino premera 2.5mm, slabilec pa 2mm. Oba čipa najprej prispajkamo na gornji strani ter pod mikroskopom z ohm-metrom preverimo pravilnost povezav. Nato z druge strani dodamo manjšo kapljico cina na "paddle" ter nanjo prispajkamo vnaprej pospajkan bakren trak. Končno vse skupaj bogato zalijemo s spajko.

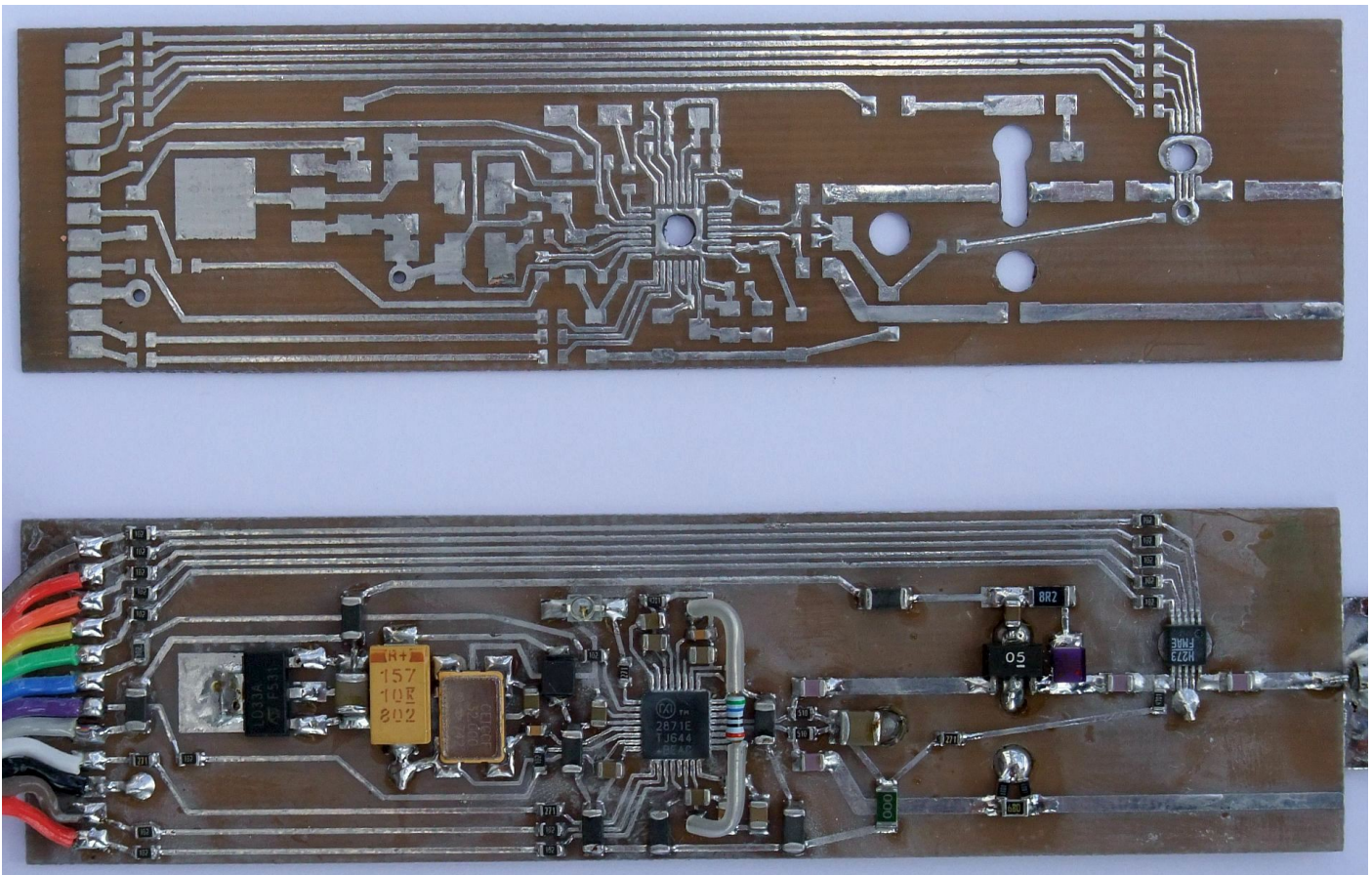


Za ojačevalnik GALI5 z rezkarjem premera 2mm za vitroplast izrezkamo podolgovato odprtino med označenima luknjama premerov 2mm in 3mm. Odprtino pokrijemo s pospajkanim bakrenim trakom na strani mase in dodamo nekaj spajke na strani gradnikov. Šele nato prispajkamo vhod in izhod GALI5. Končno segrejemo in s spajko zalijemo utor pod GALI5, da zagotovimo dobro električno ozemljitev in



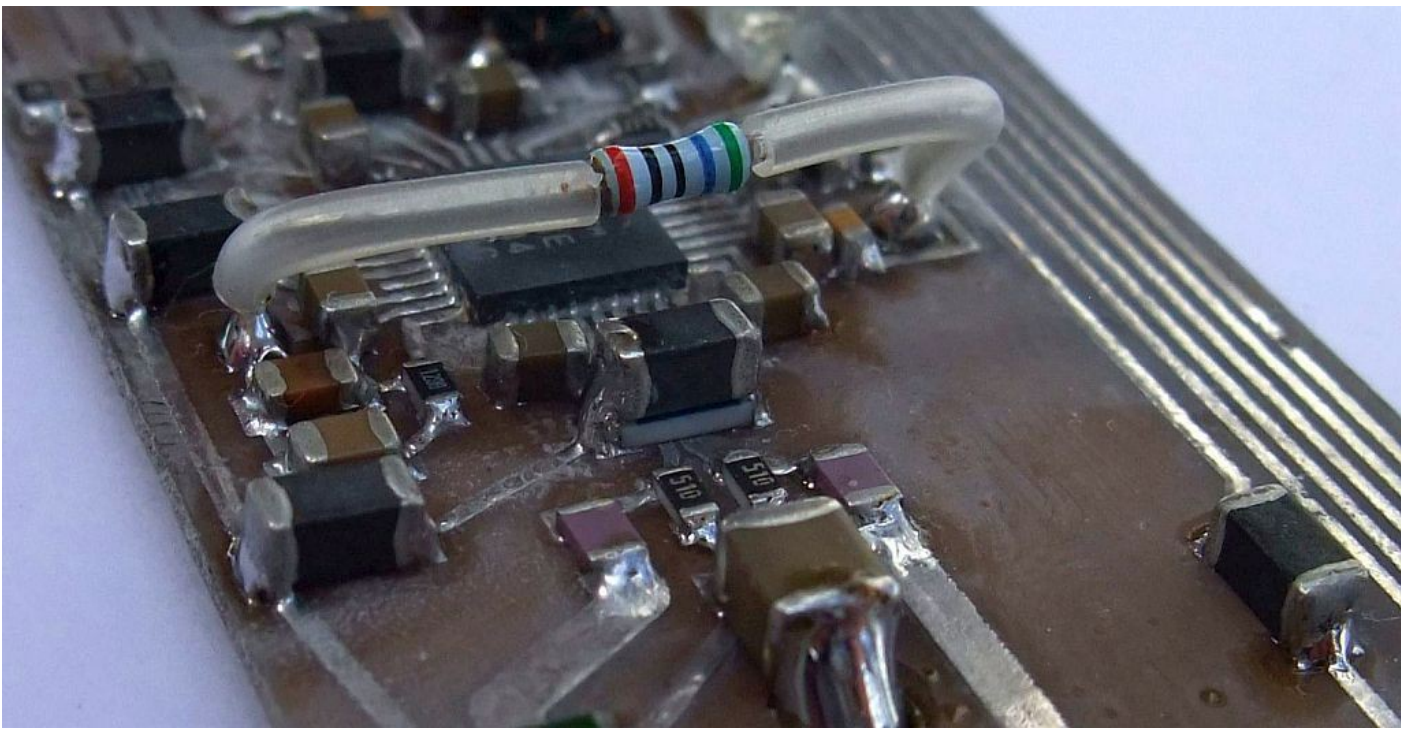
hkrati dobro odvajanje toplote.

Ostanejo še štiri povezave na maso. Kondenzator  $22\mu\text{F}$  je ozemljen preko izvrtine premera 3mm, ki jo na strani mase pokrijemo s pospajknim bakrenim trakom. Ploščati kabel, kristalni oscilator in izhodni slabilec imajo še dodatno povezavo na maso preko bakrene žice premera 0.7mm v izvrtini premera 1mm.

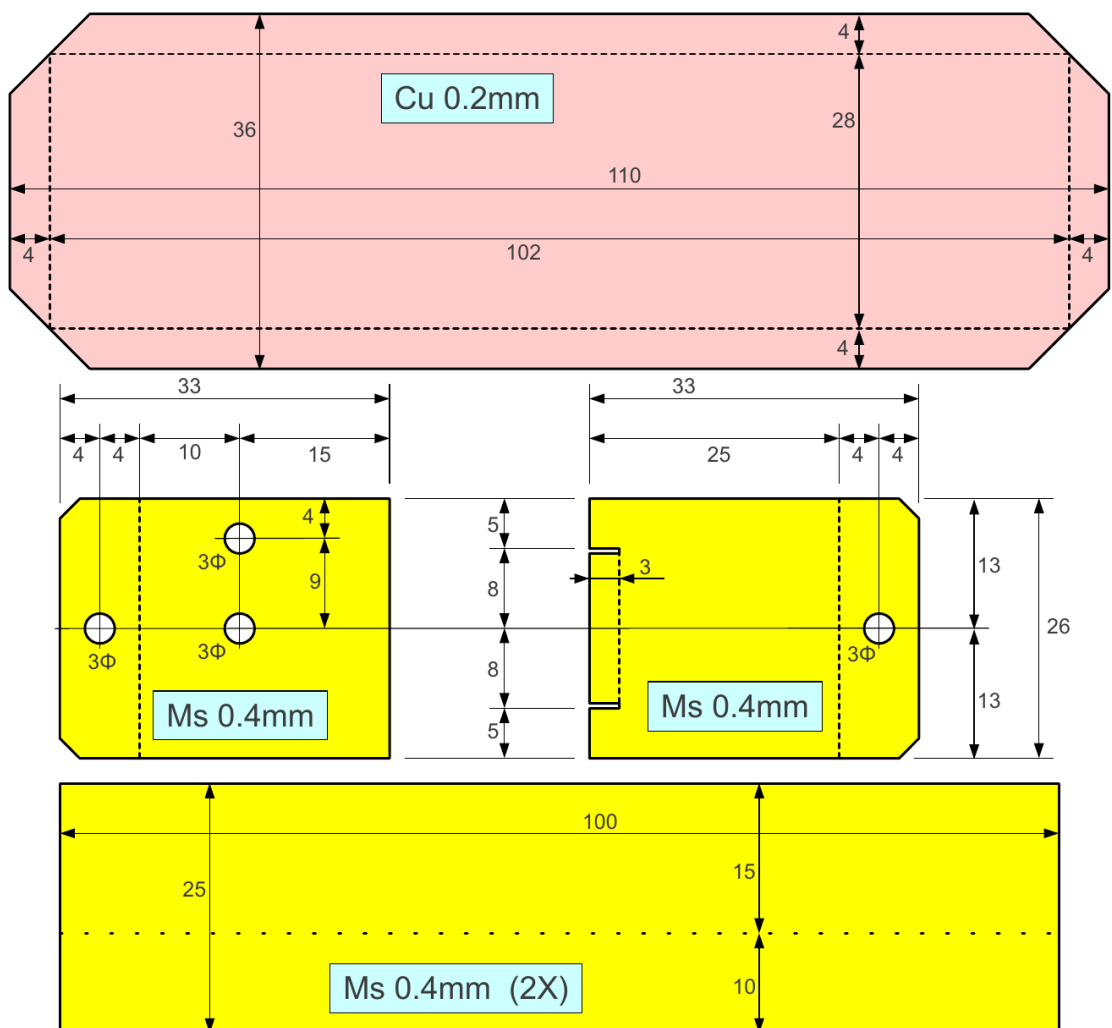


Nato vgradimo ostale SMD gradnike. Očesca na tiskanem vezju so predvidena za upore in kondenzatorje manjših vrednosti SMD velikosti 0603. Feritne dušilke so velikosti 1206. Pod feritno dušilko na izhodu ADF4351/MAX2871 vgradimo upor  $10\text{M}\Omega$ , ki ima nalogo distančnika. Če feritne dušilke ne odmaknemo proč od visokofrekvenčnih vodov, lahko dodatno slabljenje znaša tudi 1dB!





Gornja stran tiskanine potrebuje tudi en mostiček 0R velikosti 1206 za napajanje +3.3V. Dodaten mostiček predstavlja upor  $R_3$  zančnega sita, ki ni SMD, pač pa navaden upor z žičnimi priključki velikosti 1/8W zacinjen na oporišči.

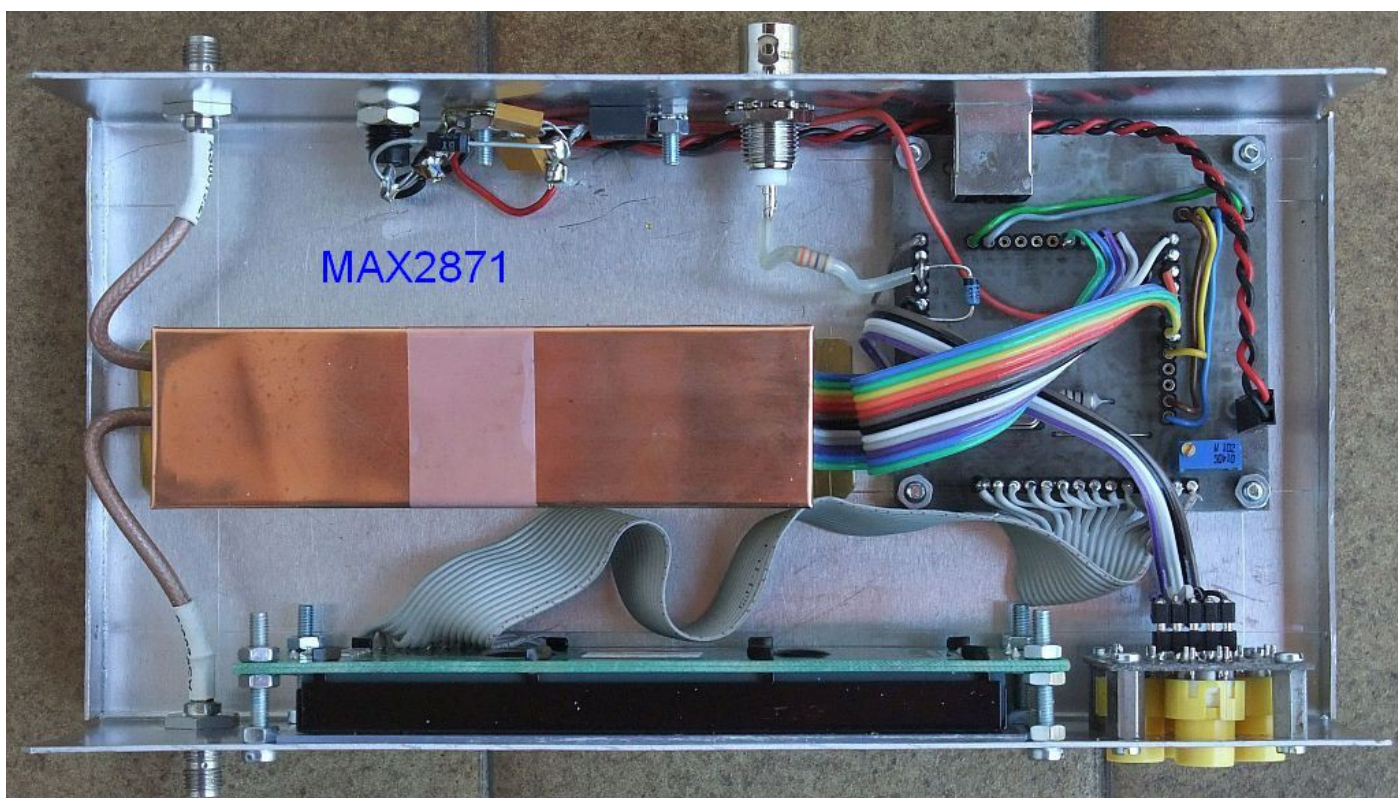
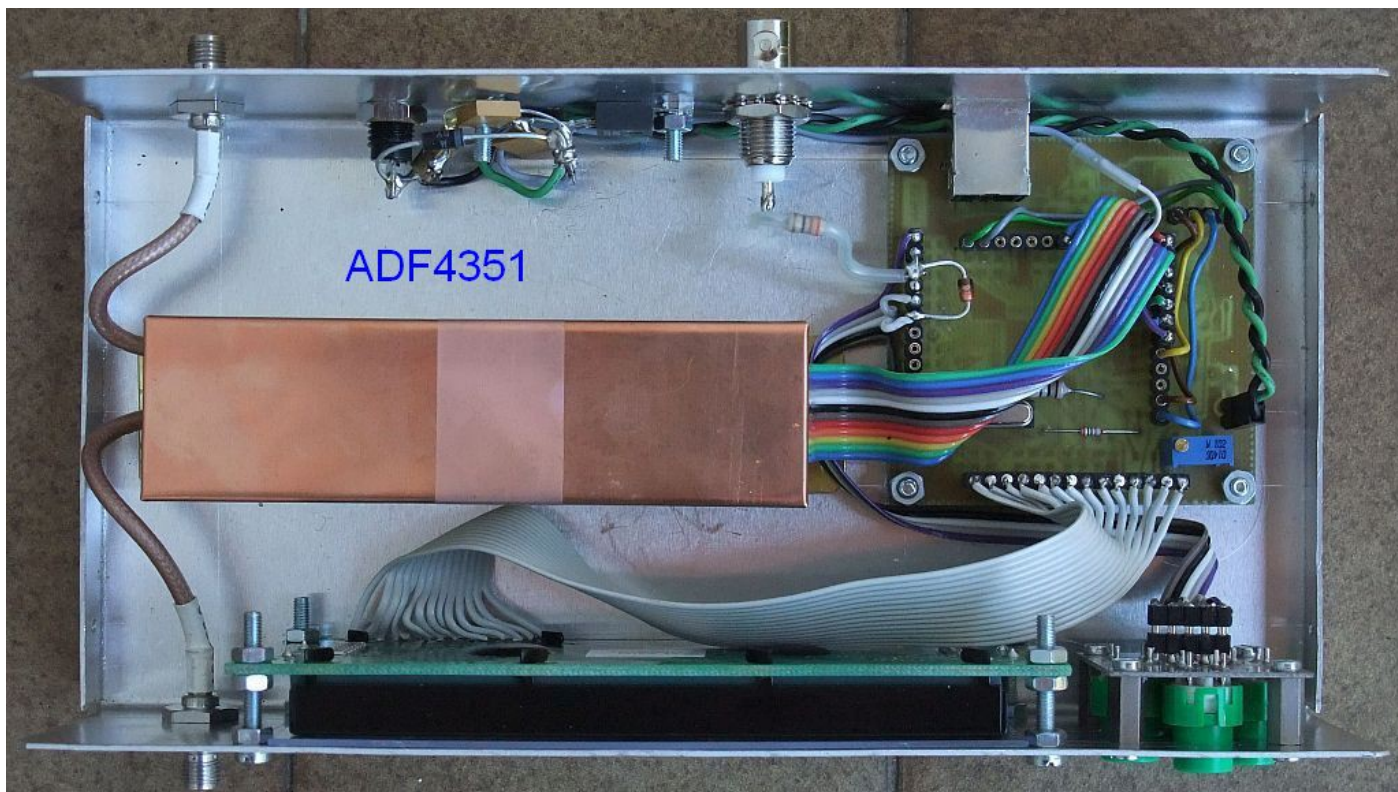


Izdelano tiskano vezje najprej preizkusimo tako, da ga priključimo na mikrorkmilnik z delujočo programsko opremo. Če smo na mikrorkmilniku nastavili smiselno vrednost frekvence, se mora na tiskanini prižgati svetleča dioda, na LCD

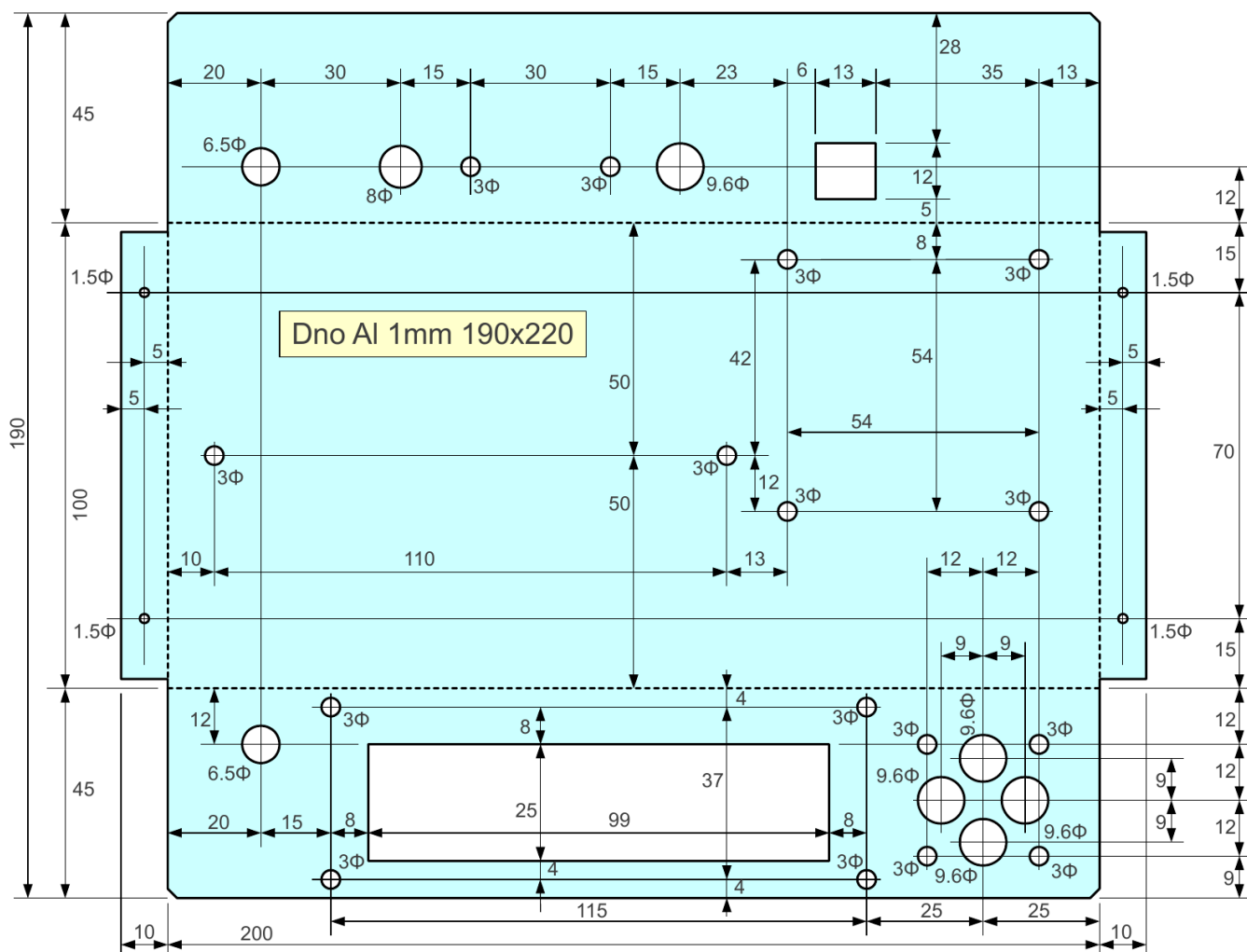


pa mora izginiti znak za neuklenitev "tehtnica". Preizkušeno tiskanino zaspajkamo v okvir iz medeninaste pločevine debeline 0.4mm in nanjo natakemo pokrov iz bakrene pločevine debeline 0.2mm. Oklop obeh izhodni tedflonskih kablečkov spajkamo na stranico okvirja. 12-žilni ploščati kabel za krmilne signale in napajanje je napeljan pod pokrovom skozi pripadajoči utor na drugem koncu okvirja.

Širina tiskanega vezja 26mm je izbrana tako, da ohišje nima rezonanc v delovnem frekvenčnem pasu vira. Mikrovalovni absorber v notranjosti ohišja običajno ni potreben. Pač pa je smiselno pritrčiti bakreni pokrovec z lepilnim trakom. Med inačicama ADF4351 in MAX2871 na zunaj ni razlik!



Celoten visokofrekvenčni vir z mikrokrmilnikom, LCD modulom in tipkovnico je vgrajen v pločevinasto ohišje z izmerami: širina 200mm, globina 100mm in višina 45mm. Višino ohišja določa velikost LCD modula. Slednjemu je prilagojen tudi vrtni načrt dna ohišja iz aluminijeve pločevine debeline 1mm.

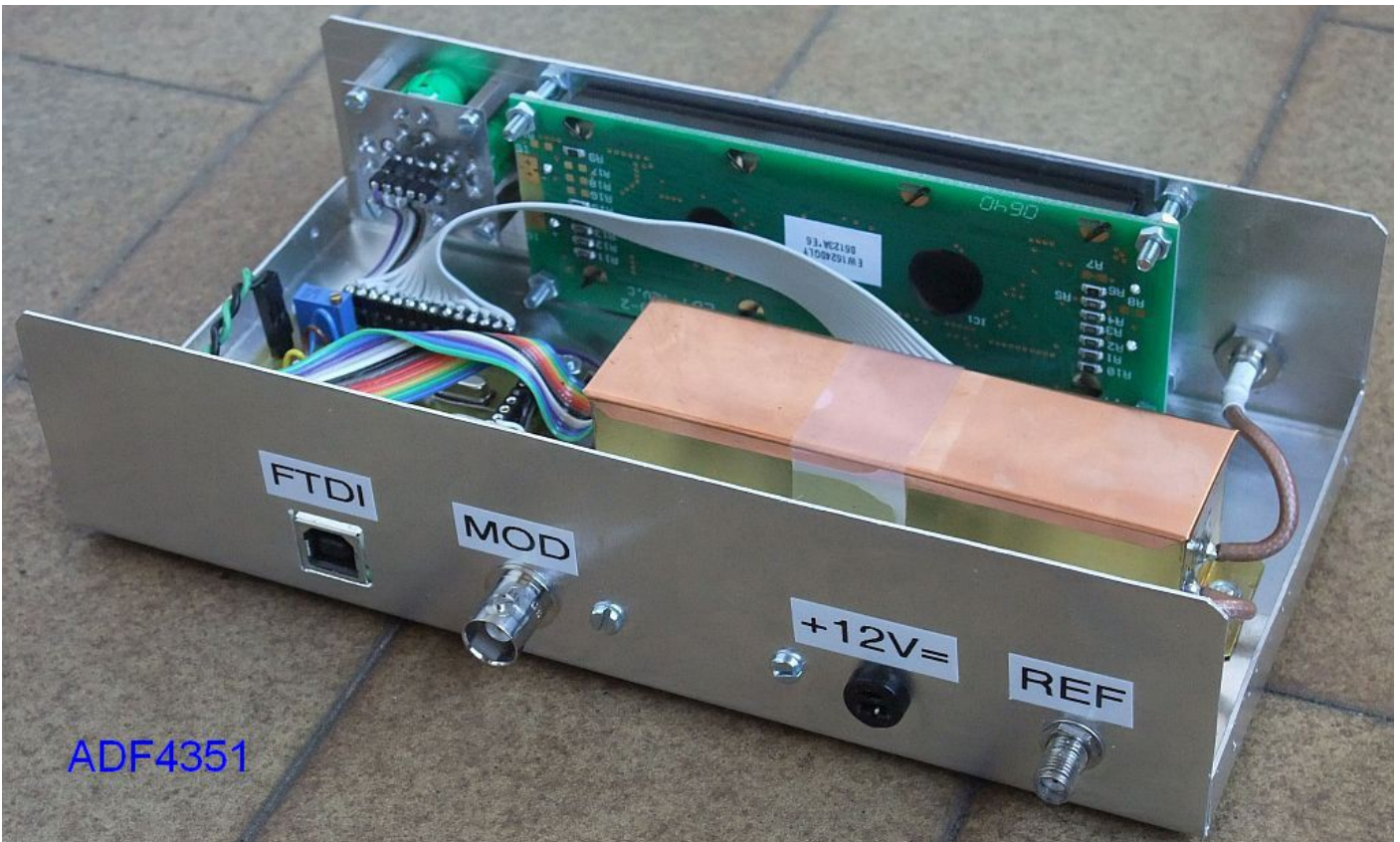


Dno ohišja je prirejeno za vgradnjo tiskanine mikrokrmilnika z izmerami 60mm X60mm in vtičnico USB-B ter vgradnjo manjše tiskanine 30mm X 30mm za tipkovnico s štirimi tipkami. Dodatno nekateri LCD moduli potrebujejo še manjšo tiskanino za podvojevanje krmilne napetosti LCD. Mikrokrmilnik z LPC2138/01 je podrobno opisan v pripadajočem članku, tiskanini s tipkami in s podvojevalnikom napetosti LCD pa v članku o izvoru DDS.

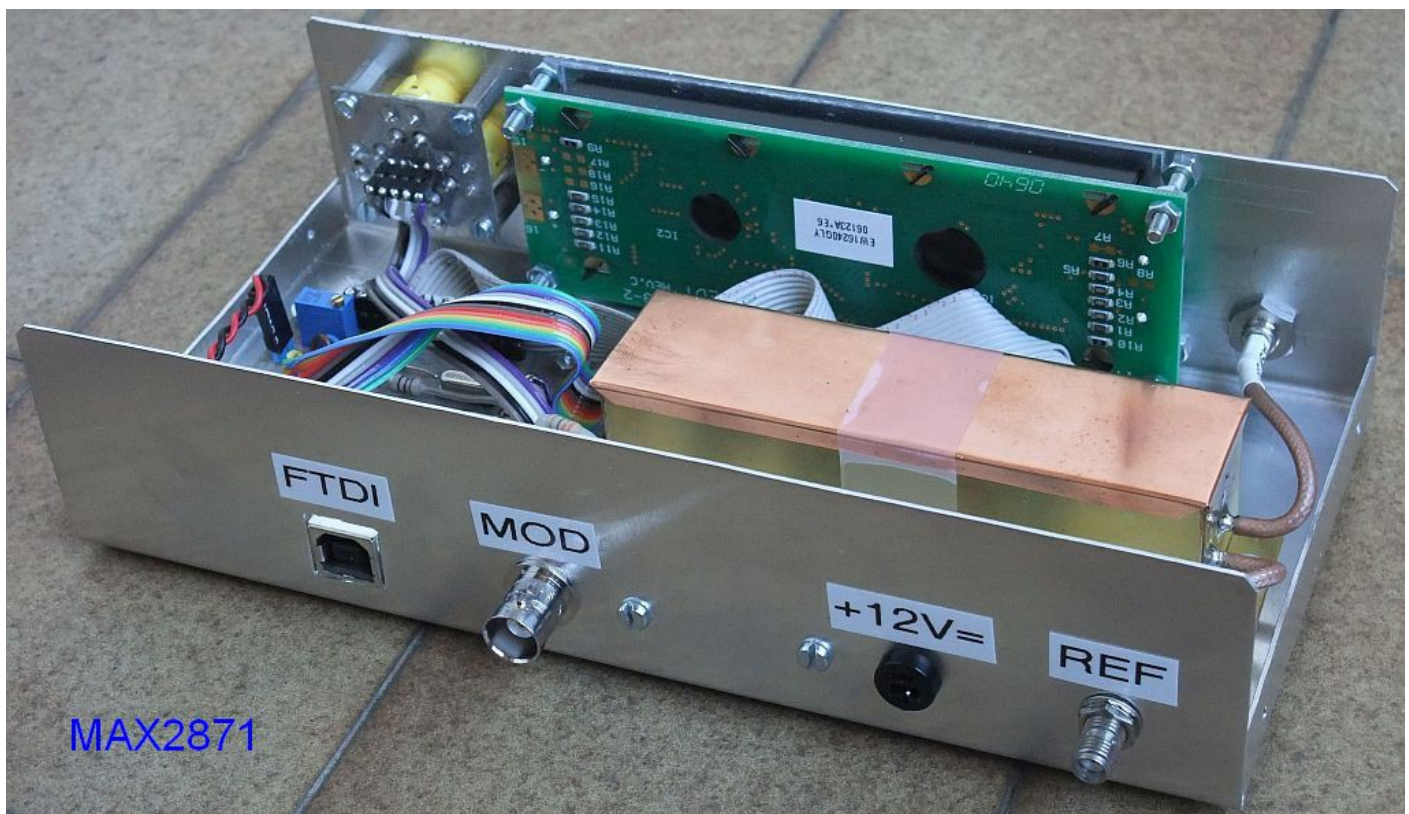
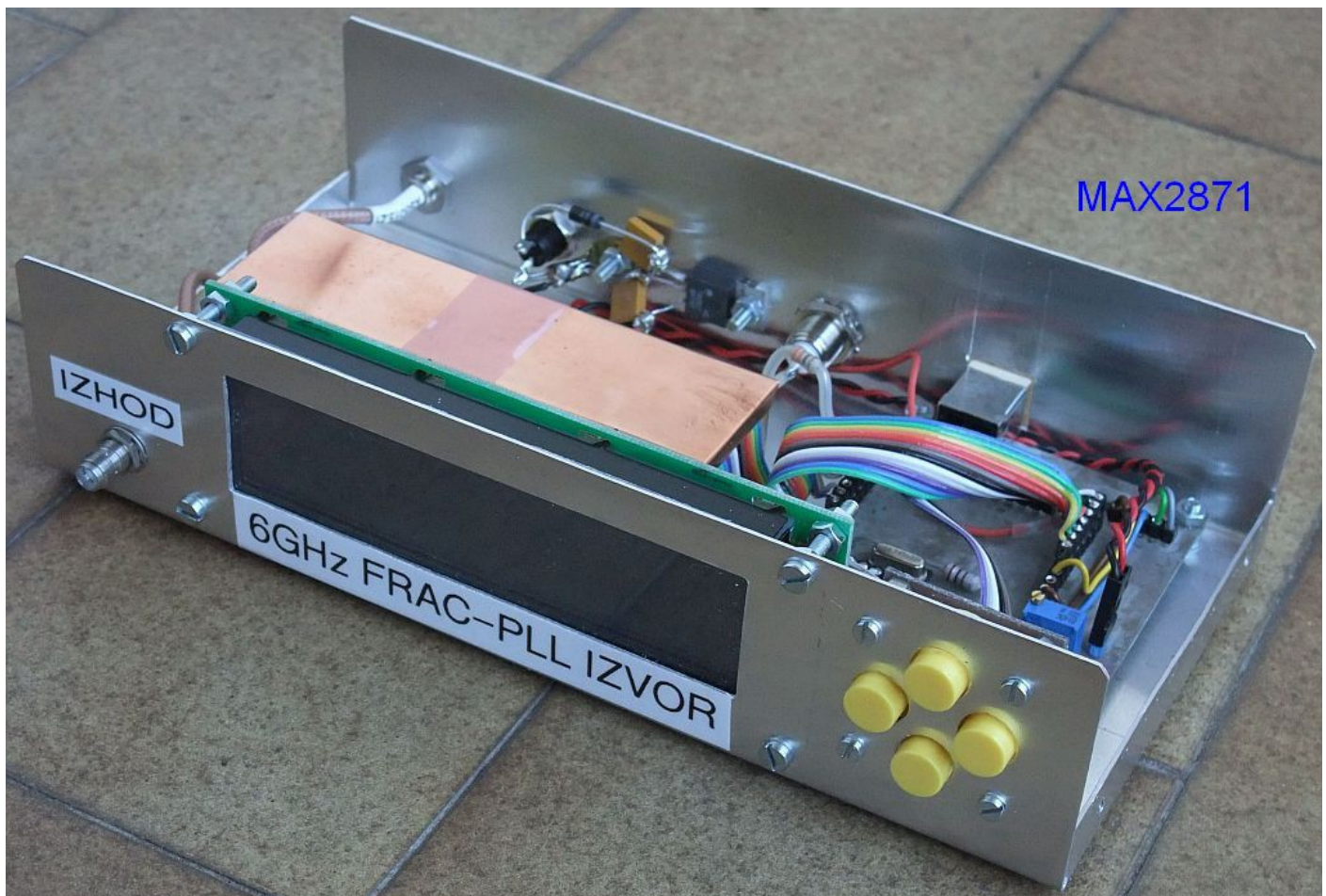
Pokrov ohišja je preprost "U" iz aluminijeve pločevine debeline 0.6mm. Pokrov sega približno 7mm čez prednjo in zadnjo stranico.



ADF4351







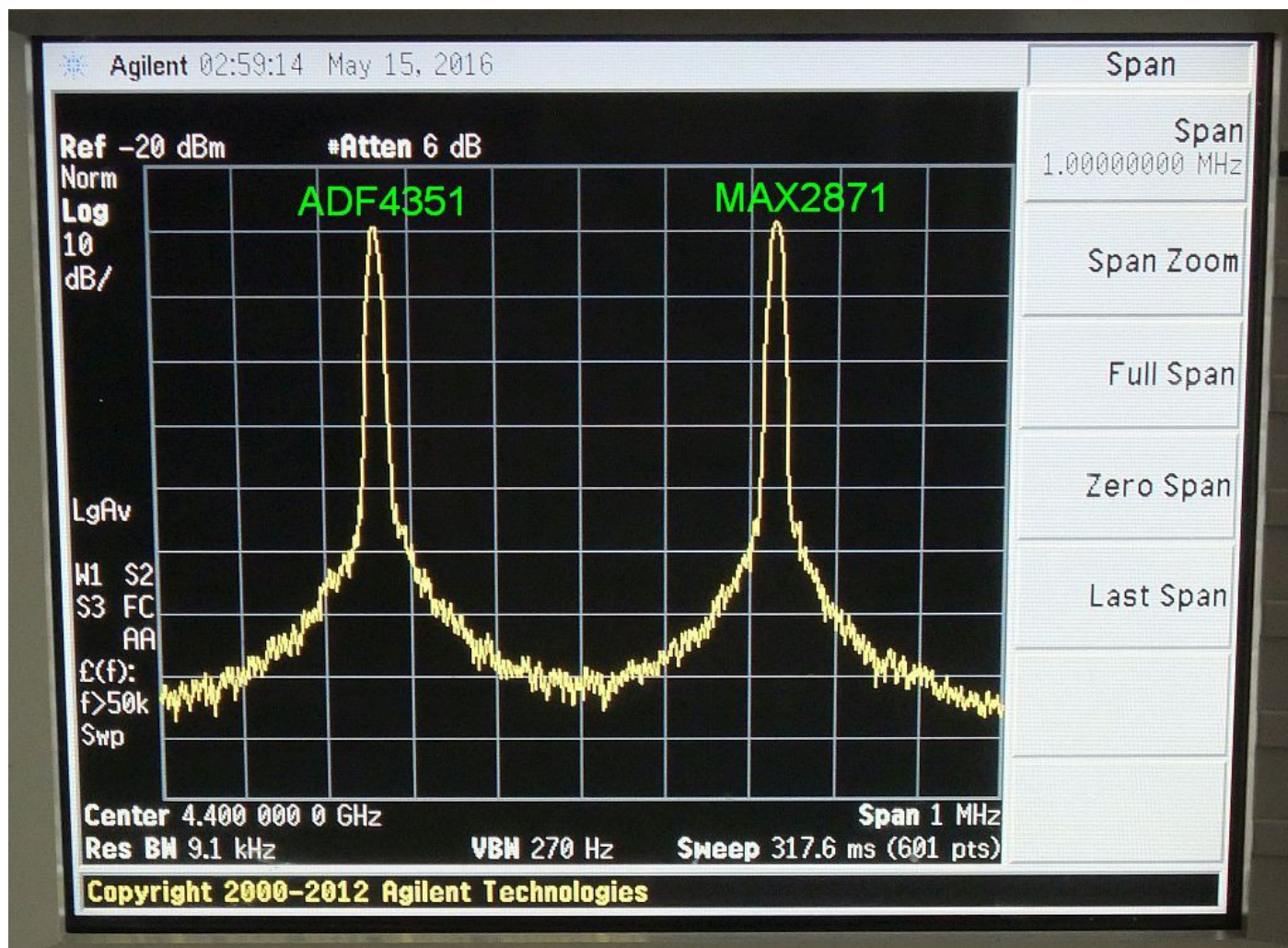
## 5. Lastnosti vira

Ulomkovna zanka je še vedno novost, torej uganka, kako se bo takšen vir obnašal v praksi. Koliko bo širokopasovnega faznega šuma in koliko bo neželjenih diskretnih spektralnih črt, po domače brkov? Izdelane izvore sem zato preizkusil s



spektralnim analizatorjem Agilent E4445A. Slednji vsebuje nastavljivi YIG oscilator, ki je v pogledu faznega šuma za najmanj dva velikostna razreda boljši od LC VCOjev v cenenih PLL čipih.

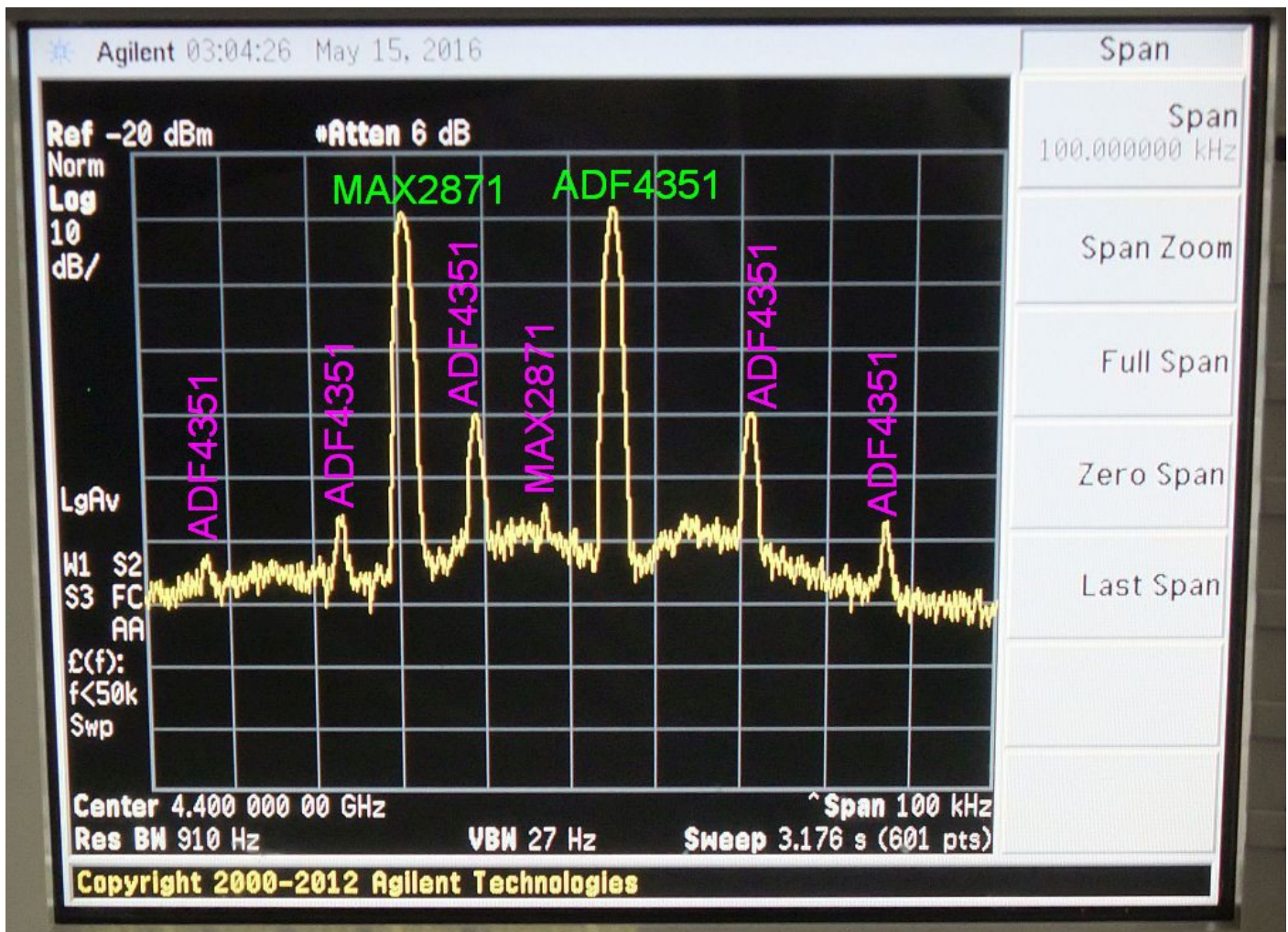
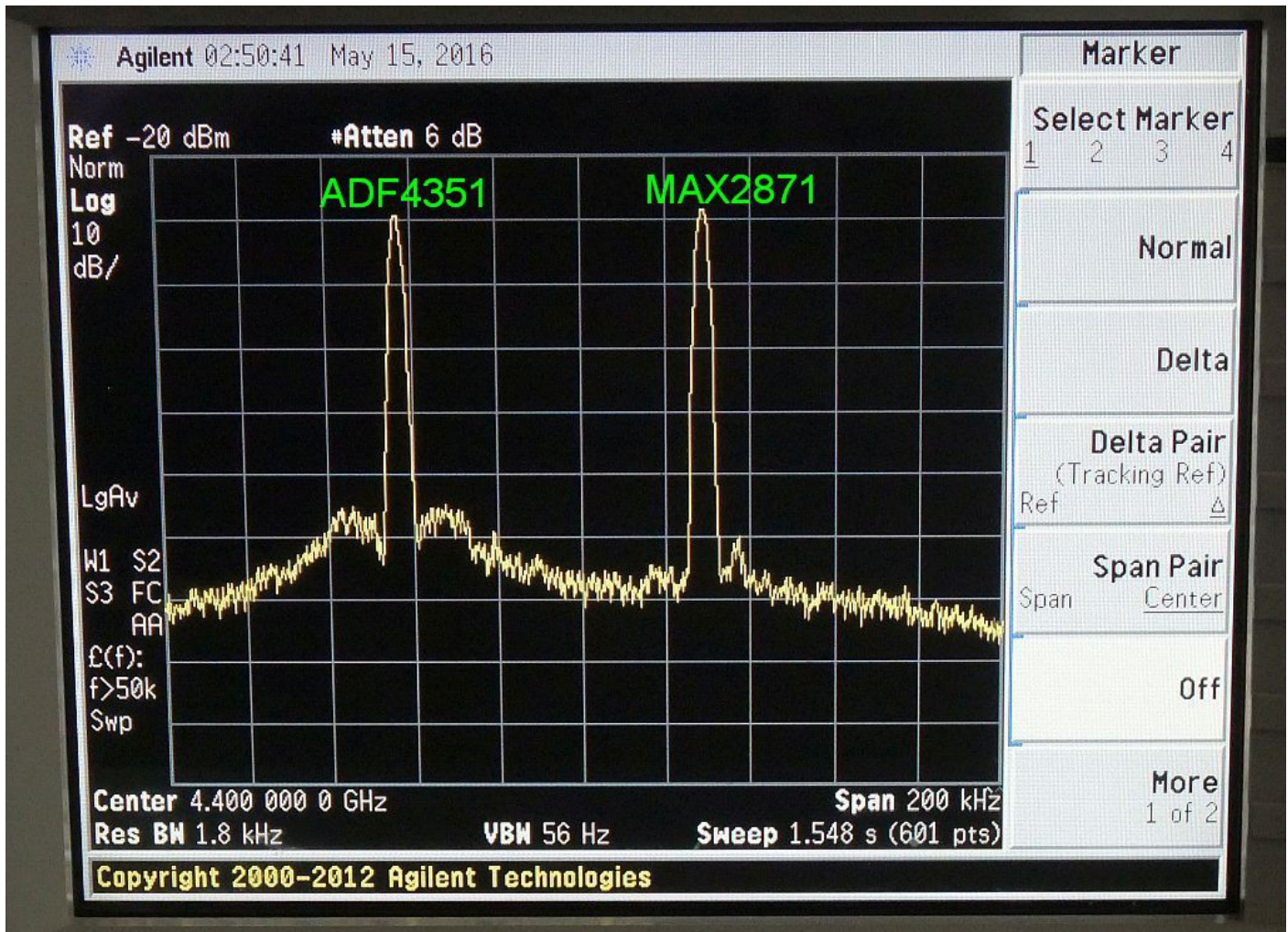
Oba izvora z ADF4351 in MAX2871 sem meril na čim višjih frekvencah, ker vgrajeni delilniki na izhodih obeh čipov znižujejo fazni šum. Smiselna primerjava obeh čipov je na frekvencah v bližini 4.4GHz, kar je tudi najvišja frekvenca, ki jo doseže ADF4351. Ulomkovna zanka, bolj točno interpolator, ima največje težave prav v bližini celoštevilskih mnogokratnikov in pod-mnogokratnikov primerjalne frekvence, saj tam tvori največje brke poimenovane "integer-boundary spurs".



Pri ločljivosti spektralnega analizatorja v velikostnem razredu 10kHz oba čipa ADF4351 in MAX2871 izgledata brezhibna in popolnoma enaka. Razlike med čipoma so opazne šele pri ožjih ločljivostih spektralnega analizatorja. Pri ločljivosti v razredu 2kHz je opazen večji fazni šum starejšega čipa ADF4351.

Načrtovanje ulomkovne zanke je pravzaprav kompromis med faznim šumom nenadzorovanega VCOja na eni strani in motnjami interpolatorja oziroma črpalke nabojev na drugi strani. Z višanjem ojačanja in pasovne širine zanke zadušimo fazni šum nenadzorovanega VCOja ampak hkrati pridobimo motnje digitalij. Oba visokofrekvenčna izvora z ADF4351 in MAX2871 sem skušal nastaviti ojačanje zanke za čim manjši šum in brke.





Šele ločljivost spektralnega analizatorja pod 1kHz odgovori na vprašanje, kaj

se točno dogaja. Ponaredek MAX2871 je izdelan v sodobnejši tehnologiji, ima hitrejšo črpalko nabojev in bolj izpopolnjene algoritme interpolatorja. Izvirnik ADF4351 je izdelan v starejši tehnologiji in tudi po natančnem nastavljanju ojačanja in pasovne širine zanke ima še vedno 10dB višji fazni šum v neposredni okolici nosilca in 20dB višje brke od MAX2871.

Iz meritev sledi, da fazni šum dosega gostoto okoli  $L(\Delta f) \approx -100\text{dBc/Hz}$  na oddaljenosti  $\Delta f = 100\text{kHz}$  od nosilca, kar ustreza navedbam podatkovnih listov in je za sintetizator v enem samem drobnem čipu odličen rezultat. Povečan fazni šum in brke zasledimo le v neposredni bližini nosilca  $\Delta f \ll 100\text{kHz}$ , kjer se boljše izkaže sodobnejši MAX2871. Kakšen oddaljen brk je komaj viden, na primer na mnogokratnikih primerjalne frekvence TCXO 32MHz.

ADF4351 in MAX2871 sicer omogočata različne nastavitve "low-spur mode" oziroma "low-noise mode", ki imajo manjši učinek na spekter motenj. Podatkovni listi žal ne opisujejo notranjega delovanja interpolatorja niti točnih pomenov teh nastavitv. V obeh izdelanih izvorih se je bolje obnesel "low-spur mode", so pa razlike med posameznimi načini delovanja zelo majhne.

Kar podatkovni listi ADF4351 in MAX2871 zamolčijo in je navedeno le v podatkovnih listih novejših čipov, je znatno upadanje moči izhodnega signala na frekvencah nad  $f > 3\text{GHz}$ . Izhodna moč obeh ADF4351 in MAX2871 upade za skoraj 10dB pri 4.4GHz in več kot 15dB pri 6GHz. Navsezadnje niti GALI5 niti HMC273 nista brezhlebna. HMC273 je na primer predviden samo za delovanje v pasu od 500MHz do 4GHz.

Vse, kar lahko storimo, je to, da frekvenčno odvisnost izhodne stopnje PLL čipa, ojačevalnika GALI5 in slabilca HMC273 popravimo v programski opremi. Popravki so potrebni pod 300MHz zaradi frekvenčne odvisnosti dušilke 120nH v napajanju GALI5 in frekvenčno-odvisnega slabljenja HMC273. Na drugi strani so popravki potrebni nad 3GHz zaradi upadanja ojačanja vseh gradnikov.

Obe integrirani vezji ADF4351 in MAX2871 pokrijeta nekoliko širši frekvenčni pas od navedb v podatkovnih listih. ADF4351 se uklene v pasu od 33MHz do približno 4.45GHz. MAX2871 se uklene v frekvenčnem pasu od 22MHz vse do 6.4GHz ali 6.5GHz, odvisno od primerka. Izhodna moč obeh virov dosega več kot 15dBm (30mW) na nizkih frekvencah, upade na 6dBm (4mW) pri 4.4GHz in -2dBm (0.6mW) pri 6.4GHz.

Modulacija je izvedena povsem programsko s prekinitveno rutino FIQ v mikroprocesorju ARM LPC2138/01. Frekvenca prekinitv je nastavljena na kar 1.2288MHz, kar razen pravega ARM z 32-bitnimi ukazi zmore le redkokateri mikroprocesor. V prekinitveni rutini teče programček za NCO (Numerically-Controlled Oscillator), ki proizvaja pravokotnik nastavljive frekvence do 50kHz v korakih po 1Hz.

Pri frekvencah modulacije nad 10kHz se je izkazal hitrejši stari ADF4351, mogoče zaradi nižjih vrednosti blokirnih kondenzatorjev glede na priporočene vrednosti za MAX2871. Torej ponaredek MAX2871 ni najboljši v vseh pogledih, v kakšni lastnosti ga prekaša izvirnik ADF4351.



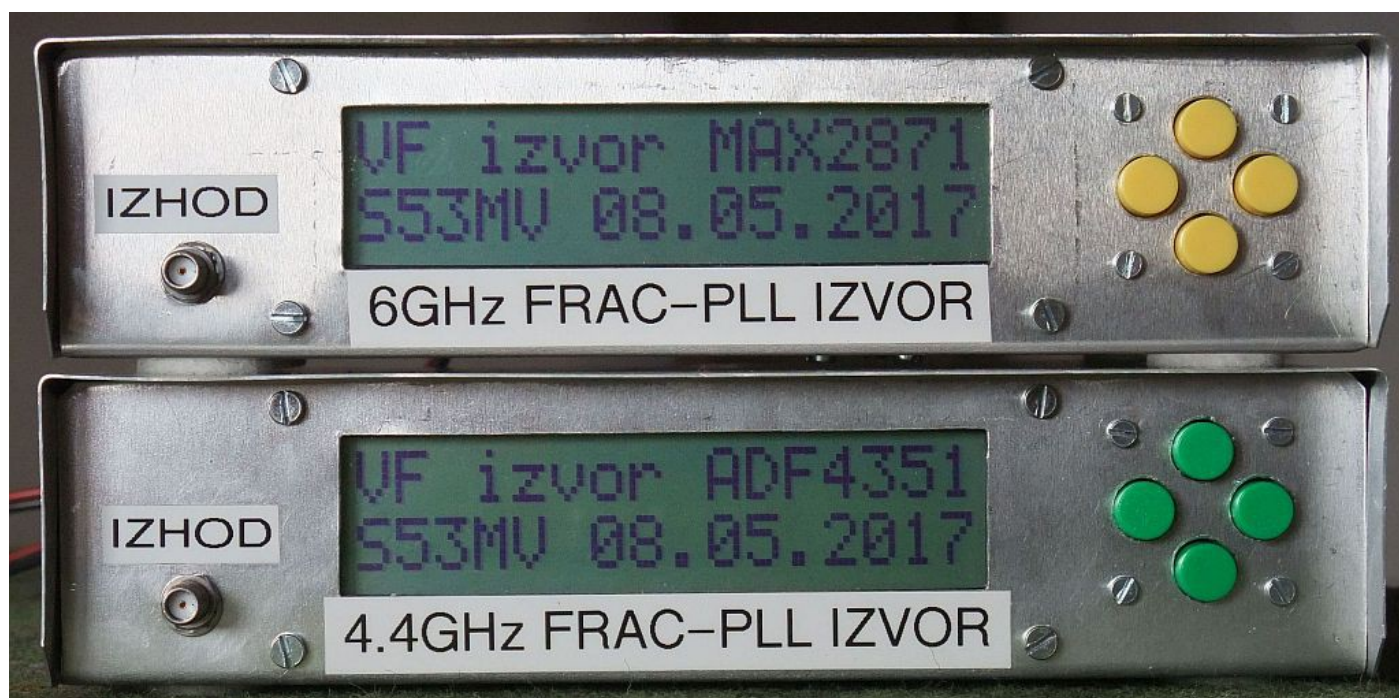
Dvojno oklapanje visokofrekvenčnega vira, notranje medeninasto in zunanje aluminijasto ohišje, se je izkazalo zadostno za večino laboratorijskih poskusov in meritev. Kljub temu, da v medeninastem okvirju ni kondenzatorjev skožnikov, pač pa le zaporedni dušilni upori. Povsem jasno opisani visokofrekvenčni vir ni namenjen merjenju občutljivosti zelo občutljivih sprejemnikov, saj ni zadostno oklopljen niti razpon izhodnega slabilca ne zadošča!

Končno, pri praktični uporabi opisanih visokofrekvenčnih virov moramo upoštevati, da je izhodni signal pravokotne oblike. Še posebno pri nižjih frekvencah, ko so vključeni digitalni delilniki na izhodu! Izhodni signal torej vsebuje obilico harmonikov, močni so predvsem harmoniki lihih redov. Če harmoniki motijo meritev, moramo na izhod dodati zunanje nizkoprepustno sito.

## 6. Uporaba vira

Vgrajena programska oprema (firmware) mikrokrmilnika poleg krmiljenja PLL čipa in slabilca izpisuje pripadajoče nastavitve in stanje visokofrekvenčnega vira na LCD modul z dvema vrsticama po 16 znakov in periodično pošilja isto informacijo tudi na virtualni USB/COM vmesnik. Frekvenco, amplitudo in modulacijo lahko nastavimo preko štirih tipk kot tudi preko virtualnega USB/COM vmesnika.

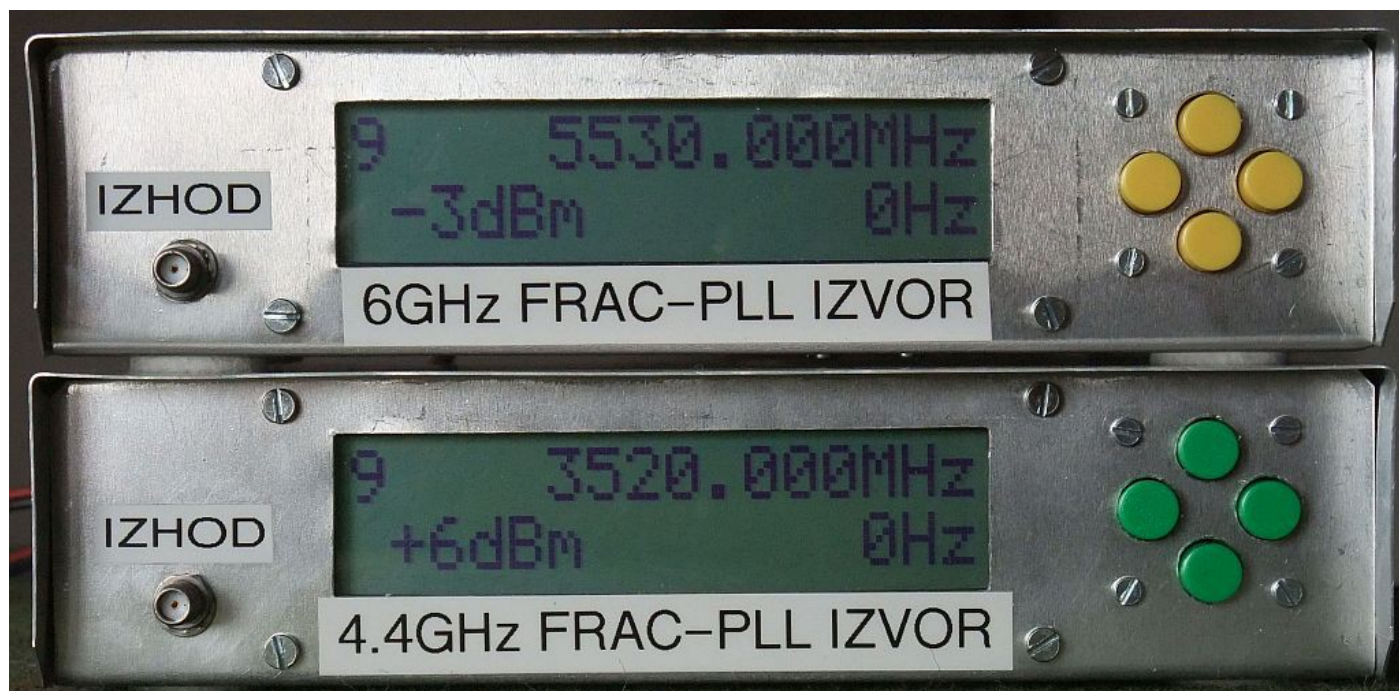
Takoj po vklopu programska oprema predstavi vrsto vira in svojo inačico. Napis ostane na LCD najmanj eno sekundo, preden ga zamenja delovni zaslom.



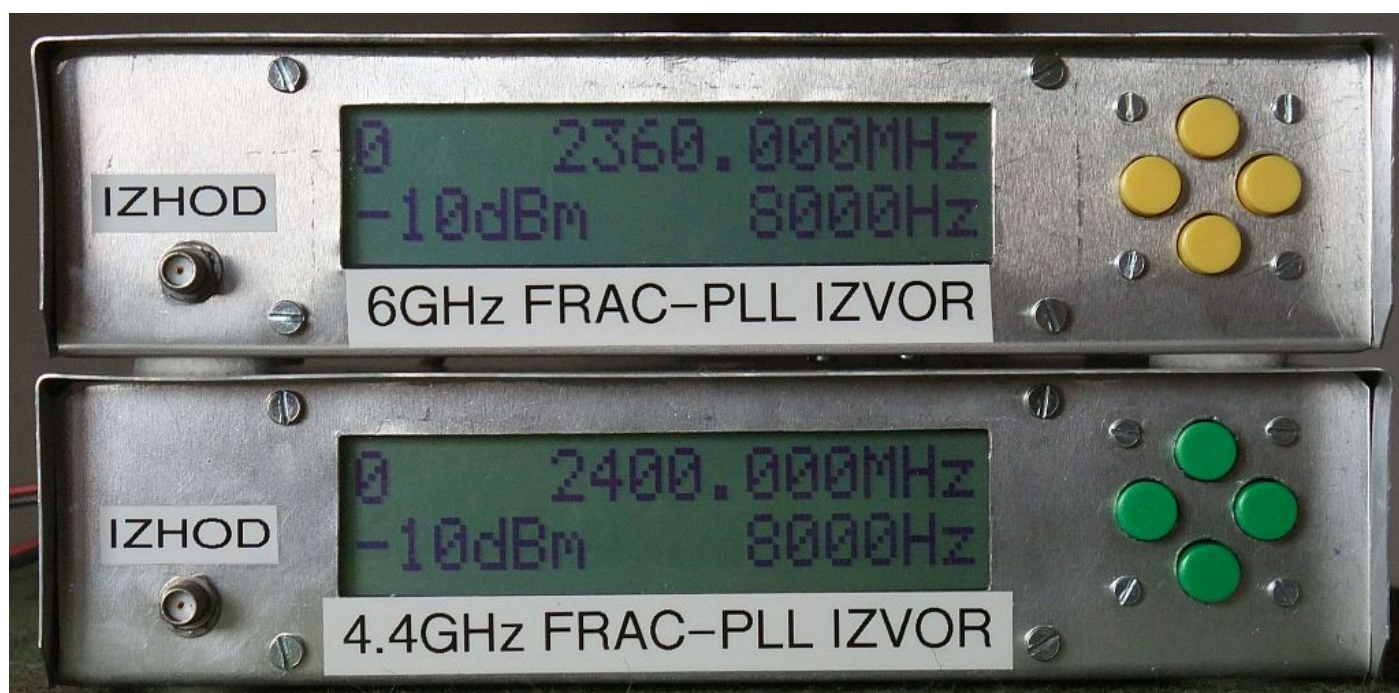
Programska oprema podpira 10 neodvisnih nastavitvev vira (spominov). Vsaka nastavitvev (spomin) vsebuje frekvenco, jakost in modulacijo. V gornji vrstici LCD se najprej izpiše številka nastavitve (spomina), za njo opozorilo in za opozorilom frekvenca v MHz z ločljivostjo 1kHz. V spodnji vrstici LCD se izpiše nastavljen jakost izhodnega signala v dBm in frekvenca ON/OFF modulacije v Hz.



Programska oprema dovoljuje nastavitve frekvence ON/OFF modulacije od 0Hz do 49999Hz s korakom 1Hz. Frekvenca modulacije 0Hz pomeni stalno, nemodulirano (CW) oddajo, torej neprekinjen visokofrekvenčni nosilec na izhodu.



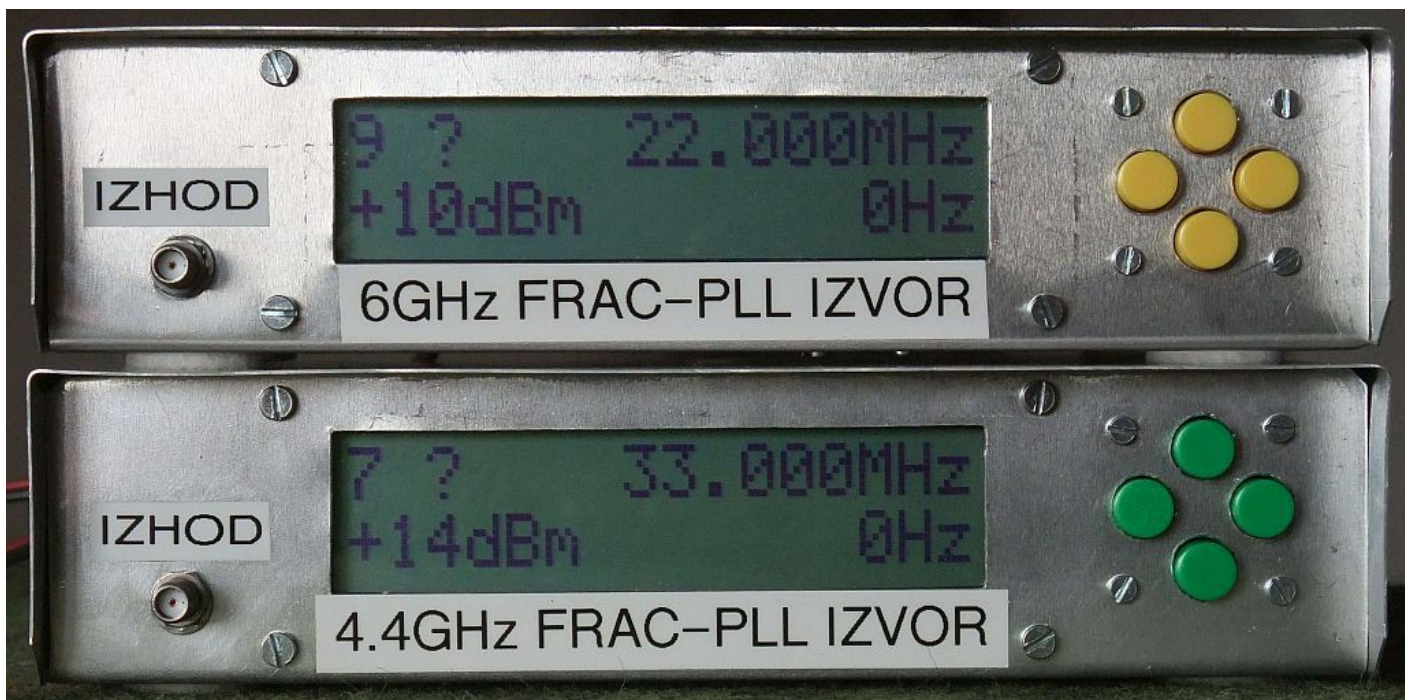
Modulacija ON/OFF naj bi imela razmerje 50/50, kar pri frekvencah nad 10kHz velja le za ADF4351. Pri počasnejšem MAX2871 se razmerje ON/OFF nad 10kHz znižuje. Prikazana jakost se vedno nanaša na moč izhodnega signala v vključenem stanju (ON). Z vklopom modulacije torej povprečna izhodna moč upade za najmanj -3dB glede na izpis na LCD!



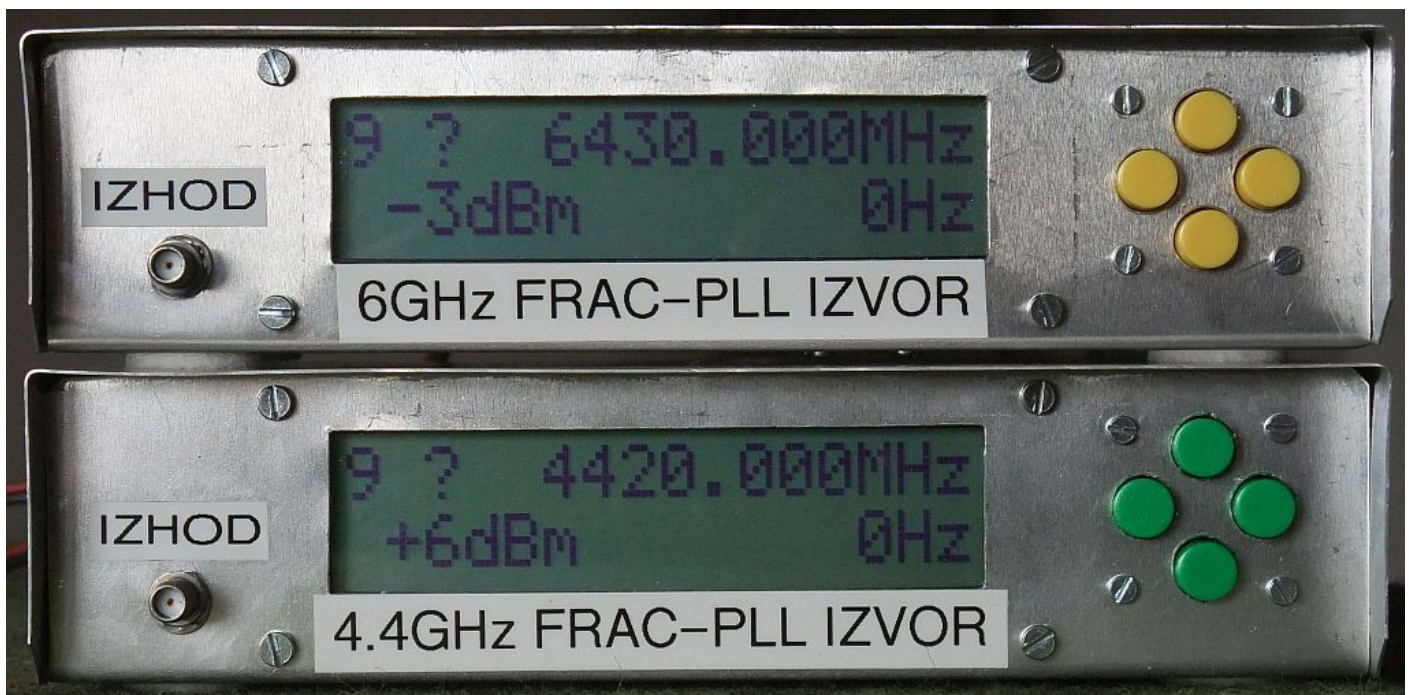
Programska oprema dovoljuje nastavitve frekvence od 0.000MHz vse do 4999.999MHz za ADF4351 oziroma od 0.000MHz do 6999.999MHz za MAX2871. Če je nastavljena frekvenca izven zagotovljenih meja določenega PLL čipa, se kot opozorilo pojavi vprašaj "?".

Na primer prenizka frekvenca.





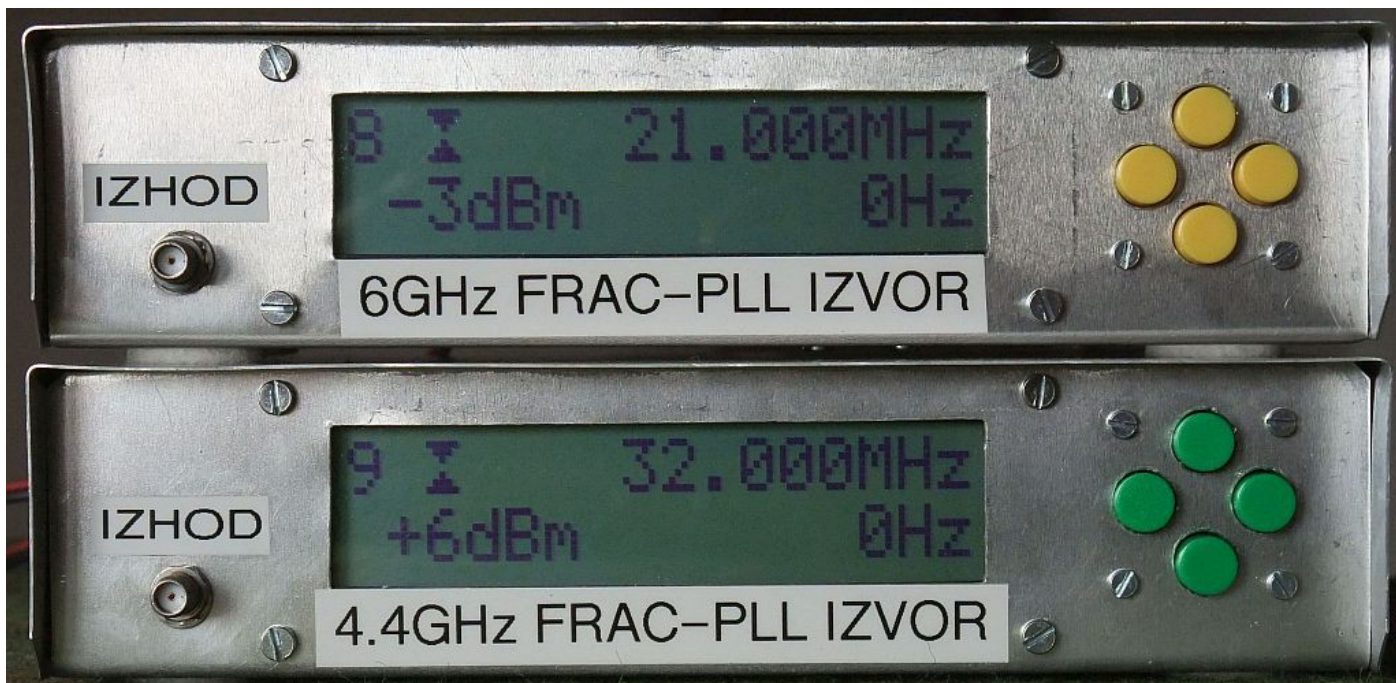
Oziroma previsoka frekvenca.



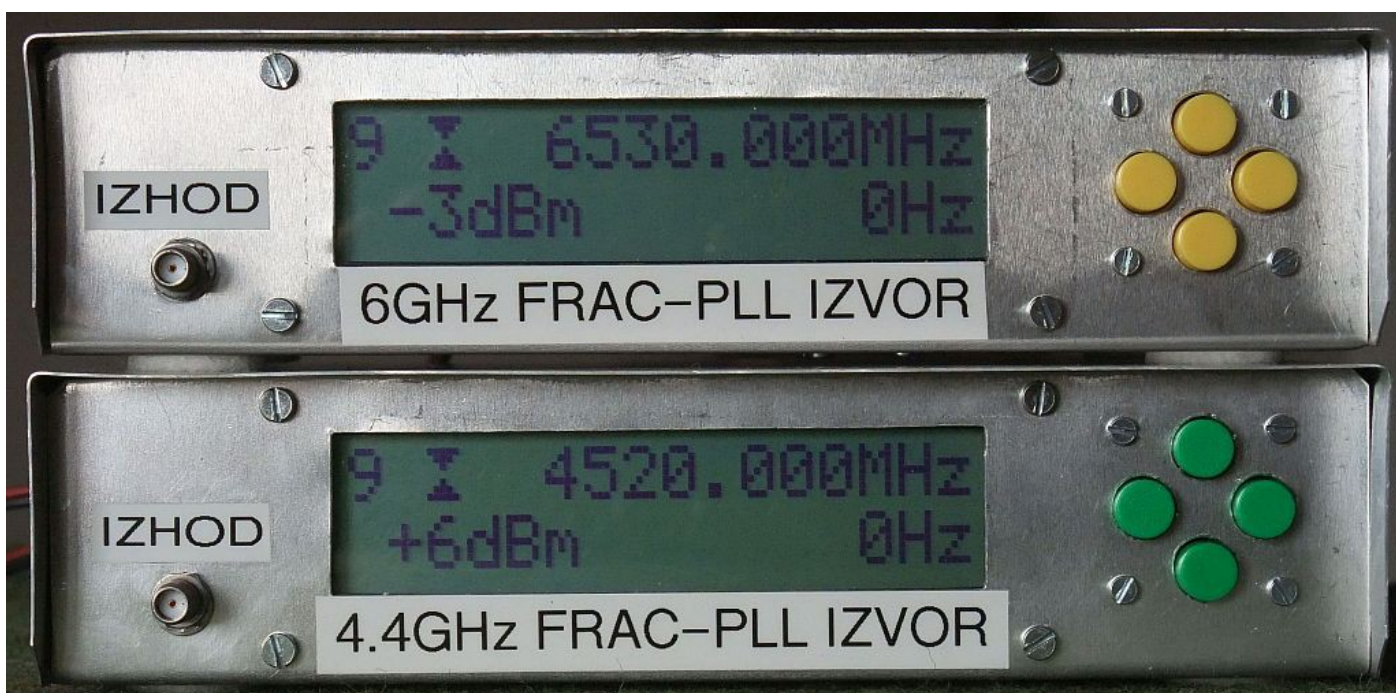
Če se PLL iz kateregakoli razloga ne uklene (neizvedljiva frekvenca, okvara vezja), se namesto vprašaja izpiše znak "tehtnica". "Tehtnica" se pojavi tudi v primeru, ko je visokofrekvenčni vir brez napajanja, mikrokrmilnik pa dobi napajanje preko USB.

Na primer prenizka frekvenca.





Oziroma previsoka frekvenca.

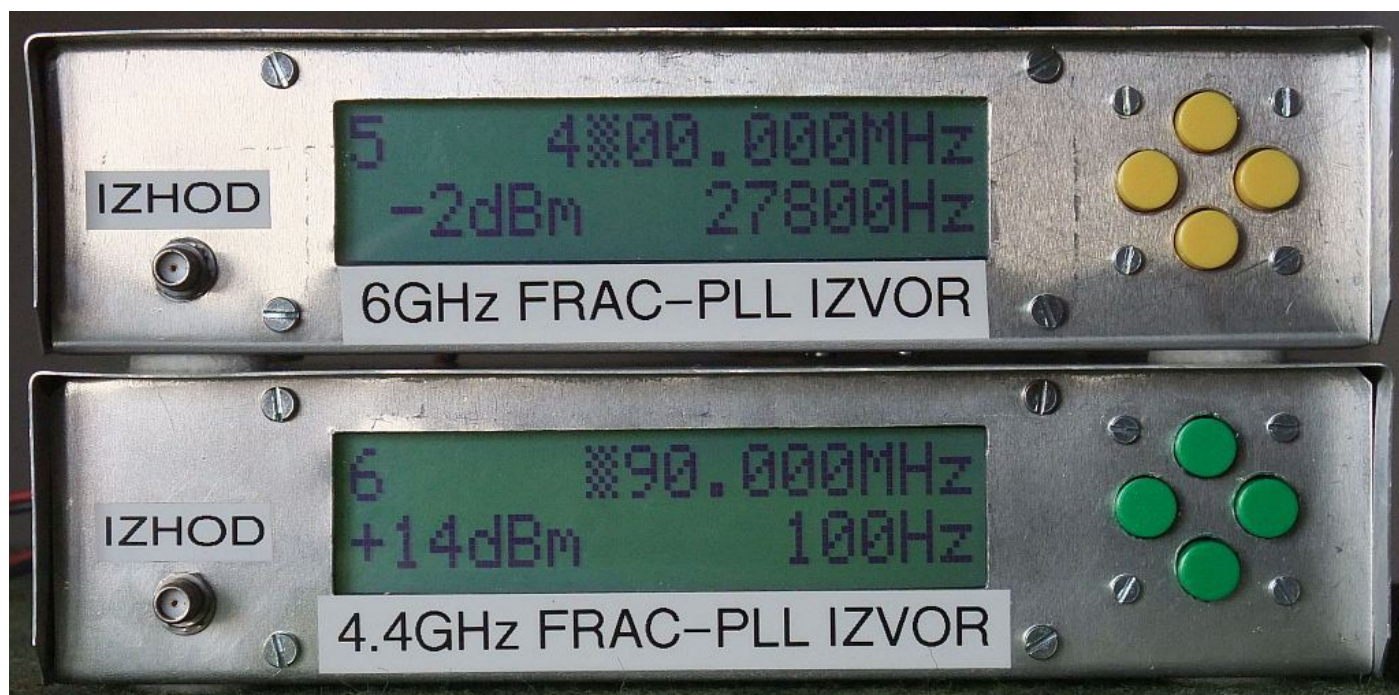


Končno, če notranje vezje PLL čipa ADF4351 oziroma MAX2871 nastavljene frekvence ne more proizvesti zaradi omejitev notranjega delovanja (omejen modulo interpolatorja), se na LCD izmenično izpisujeta nastavljena in izvedljiva frekvenca. Opisani pojav se lahko zgodi samo pri frekvencah nad 550MHz (ADF4351) oziroma nad 750MHz (MAX2871), ko je korak frekvenčnega sintetizatorja večji od 1kHz. Nastavljena frekvenca se vedno zaokrožuje navzdol na izvedljivo frekvenco.

Jakosti izhodnega signala se nastavlja skladno s tistim, kar visokofrekvenčni izvor v resnici zmore na izbrani frekvenci. Programska oprema (firmware) vsebuje tabelo največje in najmanjše jakosti signala, ki jo lahko proizvede visokofrekvenčni vir na dani frekvenci. Tabela ima korak 100MHz. Če skušamo nastaviti jakost izhodnega signala izven izvedljivih meja, programska oprema to samodejno omeji na izvedljivo vrednost.



Visokofrekvenčni vir lahko v celoti nastavimo s štirimi tipkami. S tipkama lev in desno pripeljemo utripajočo značko "šahovnico" na številko, ki bi jo radi spreminjali. S tipkama gor in dol povečujemo oziroma znižujemo vrednost izbrane številke. Če utripajoča značka ni vidna, to pomeni, da izbiramo eno od desetih nastavitv vira (spominov), ki so shranjene v notranjem pomnilniku.



Nastavitve upoštevajo prenos med posameznimi števkami celotnega števila. Če nastavljeno frekvenco 4000.000MHz znižam stotice MHz za ena, dobim 3900.000MHz. Vse nastavitve se takoj preverijo glede na omejitve programske opreme.

Ob vklopu visokofrekvenčnega vira se vseh deset nastavitv prepíše iz pomnilnika FLASH v pomnilnik RAM. Ob vklopu se visokofrekvenčni izvor nastavi na nastavev 0 in kazalec nastavljanja kaže na izbiro pomnilnika, torej utripajoča značka ni vidna.

Trenutno vsebino pomnilnika RAM prepíšemo nazaj v FLASH tako, da hkrati pritisnemo tipki levo in desno. Ker je število vpisov v pomnilnik FLASH omejeno, vpis v FLASH ni samodejen ob izklopu napajanja. Vpis v FLASH se izvede samo v primeru, ko sta vsebini FLASH in RAM različni.

Vse nastavitve visokofrekvenčnega vira lahko opravimo tudi preko virtualnega USB/COM vmesnika z nastavitvami 9600bps, no parity, 1 stop bit. Vsak daljinski ukaz vsebuje črko in eno ali več števil. Jakost uporablja tudi predznak.

<b>A xxx &lt;enter&gt;</b>	<b>... nastavi jakost signala [+/-dBm]</b>
<b>F xxxxxxx &lt;enter&gt;</b>	<b>... nastavi frekvenco [kHz]</b>
<b>M xxxxx &lt;enter&gt;</b>	<b>... nastavi frekvenco modulacije [Hz]</b>
<b>P 123456789 &lt;enter&gt;</b>	<b>... vpiši vse nastavitve v FLASH</b>
<b>R &lt;enter&gt;</b>	<b>... resetiraj izvor</b>
<b>S x &lt;enter&gt;</b>	<b>... izberi spomin [0..9]</b>

Vsak ukaz se zaključi s pritiskom tipke <enter>, kar je lahko <CR>, <LF> ali drug kontrolni znak. Programska oprema razume tudi popravljanje vnosa z znaki <BS> ali <DEL>.

Pri krmiljenju visokofrekvenčnega izvora z računalniškim programom je treba upoštevati načrtovanje mikrokrmilnika in omejitve njegove programske opreme. Mikrokrmilnik uporablja RS-232 voda RTS in DTR za BOOTLOADER in RESET, kar omogoča preprosto nalaganje nove programske opreme s "FlashMagic" ali "lpc21isp". kakršenkoli terminalsi ali drugačen uporabniški program mora pravilno krmiliti oba RTS in DTR, sicer mikrokrmilnik visokofrekvenčnega vira ne more delati.

Zagon kakršnegakoli terminalskega ali krmilnega programa na računalniku bo najverjetneje povzročil RESET visokofrekvenčnega vira. Visokofrekvenčni vir se tedaj ponastavi na vsebino iz FLASH in se dobro sekundo ne odziva na noben ukaz, dokler LCD prikazuje inačico programa. Ko visokofrekvenčni vir ponovno deluje, mora med dvema zaporednima ukazoma preteči najmanj 100ms. Pri ročnem tipkanju to ni vprašljivo, računalniški krmilni program pa je nujno primerno upočasniti.

V obratni smeri visokofrekvenčni vir oddaja vsebino LCD preko virtualnega USB/COM vmesnika z enakimi nastavitvami 9600bps, no parity, 1 stop bit. Vsebina se oddaja občasno oziroma takoj za vsakim sprejetim ukazom, tudi za praznim (samo <enter>) ali neveljavnim ukazom. Znak "šahovnica" se ne oddaja, znak "tehtnica" pa se zamenja z zvezdico "\*". Primer oddaje po resetiranju, PLL potrebuje določen čas za uklenitev, zato zvezdica "\*" v prvi oddaji stanja!

**VF izvor MAX2871**

**S53MV 08.05.2017**

0 \* 2360.000MHz -10dBm 8000Hz

0 2360.000MHz -10dBm 8000Hz

0 2360.000MHz -10dBm 8000Hz

Opisani, preprosti RS-232 vmesnik omogoča avtomatizacijo marsikatere meritve. Počasnost vmesnika ni edina omejitev, tudi uklepanje fazno-sklenjene zanke je razmeroma počasno. Hitrejša programska oprema ne more bistveno pohitriti delovanja uporabljenih čipov za ulomkovni PLL. Opisani visokofrekvenčni vir je kvečjemu uporaben kot zelo počasen preletni generator.

Izvirnik  [fp11.odt](#)

Tiskanje  [fp11.pdf](#)

Tiskana vezja, podatkovni listi in programska oprema  [fp11.zip](#)

\* \* \* \* \*