

UNIVERZA V NOVI GORICI
POSLOVNO-TEHNIŠKA FAKULTETA

**SISTEMSKI TEST GENERATORJA RADIJSKIH
FREKVENC IN URINEGA SIGNALA**

MAGISTRSKO DELO

Mitja Blažič

Mentor: prof. dr. Iztok Arčon

Nova Gorica, 2012

ZAHVALA

Zahvalil bi se direktorju podjetja Instrumentation technologies d.d. Roku Uršiču, ki mi je omogočil pisanje magistrskega dela na to temo, vodji testnega laboratorija Petru Paglovcu in ostalim sodelavcem v podjetju za posredovano znanje in pomoč pri izvedbi systemskega testa ter prof. dr. Iztoku Arčonu za mentorstvo in pomoč pri nastajanju naloge.

NASLOV

Sistemeski test generatorja radijskih frekvenc in urinega signala

IZVLEČEK

Magistrsko delo obravnava sistemsko testiranje generatorja radijskih frekvenc in urinega signala (*»RF & clock generator«*), ki ga je izdelalo podjetje Instrumentation technologies d.d iz Solkana. Za ta namen je bil razvit sistemeski test z ustreznimi podsklopi testiranja omenjenega generatorja za analizo tehničnih lastnosti signalov, ki jih generiramo z generatorjem radijskih frekvenc in urinega signala. Preverjena je bila ustreznost signalov iz priključkov glede na zastavljene specifikacije za množično izdelavo in prodajo omenjene naprave na svetovnem trgu. V sklopu magistrske naloge so bila tudi izvedena vsa potrebna testiranja, analizirali smo meritve in podali ugotovitve o ustreznosti zahtevane kakovosti oz. podali priporočila za izboljšave.

Končni cilj izdelave generatorja je bil dobiti napravo, ki bo zadovoljila internim potrebam pri razvoju in testiranju ostalih inštrumentov podjetja. Analiza meritev je potrdila ustreznost delovanja naprave *»RF & clock generator«* tudi s skupinskim testiranjem z ostalimi instrumenti.

KLJUČNE BESEDE

Generator radijskih frekvenc in urinega signala, sistemeski test, sinusni signali, kvadratni signali, fazni šum, spektralna čistost.

TITLE

System test of radio frequency and clock generator

ABSTRACT

This master thesis describes a system test of a radio frequency and clock generator (*»RF & clock generator«*) made by Instrumentation technologies d.d. from Solkan. Several system tests were developed with relevant sub-tests to analyze the technical characteristics of the signals from generator outputs. We have checked if the signal fulfills the specified characteristic for mass production of the device and sale on the global market. We have performed all the necessary tests and analyzed the measurements. The results showed that the device meets all the required quality parameters. We suggested some recommendations for improvements.

The ultimate goal in the development of the generator was to obtain a device that will satisfy the company's internal needs for developing and testing other instruments. The combined testing with other instruments confirmed that the required specifications of the device were adequate.

KEYWORDS

Radio frequency and clock generator, system test, sine signals, square signals, phase noise, spectral purity.

KAZALO

1	Uvod	1
2	Generatorji frekvenc in generatorji urinih signalov	3
2.1	Generatorji RF frekvenc	3
2.1.1	Napake RF generatorjev	8
2.2	Generatorji urinih signalov	12
2.3	Opis in namen uporabe naprave »RF & clock generator«	15
2.4	Specifikacije naprave »RF & clock generator«	18
3	Opis systemskega testiranja za napravo »RF & clock generator«	21
3.1	Splošno o sistemskem testiranju	21
3.2	Strojna oprema za izvedbo testiranja	23
3.2.1	Osciloskop in spektralni analizator	23
3.2.2	Organizacija in izvedba testiranja	25
4	Testiranje signalov	28
4.1	Rezultati meritev signalov RF izhodov	28
4.1.1	Test faznega šuma	31
4.2	Testiranje izhodnih in vhodnih urinih signalov	34
4.2.1	Rezultati meritev izhoda strojne ure	36
4.2.2	Rezultati meritev izhoda prožilca	39
4.2.3	Rezultati meritev vrat / referenčnega izhoda	41
4.2.4	Rezultati meritev referenčnega vhoda	47

4.3	Ostala testiranja.....	48
4.4	Mehansko testiranje opreme na prednji stranici	48
5	Zaključek	50
	Literatura	51

KAZALO SLIK

Slika 1: Shematični prikaz zgradbe RF generatorja (RF signal generator block diagram, 2011).	4
Slika 2: Časovni potek sinusnega signala napetosti iz RF generatorja.	6
Slika 3: Relativna moč signala iz slike 2 glede na 1 mW referenčne moči (enačba 5) v odvisnosti od frekvence. Vrh na sliki se nahaja pri 500 MHz, njegova relativna moč je 0 dBm.	7
Slika 4: Spekter relativne moči signala P_{dBm} iz testnega RF generatorja znamke HP8656B glede na 1mW referenčne moči. Modra puščica označuje osnovni signal pri 500 MHz, zelena puščica označuje prvo harmonično frekvenco pri 1000 MHz, siva puščica označuje drugo harmonično frekvenco pri 1500 MHz. Rdeča puščica označuje neželeno spektralno komponento pri približno 400 MHz. V spektru je prisoten tudi šum. Njegova povprečna vrednost je -75 dBm.	9
Slika 5: Shematični prikaz nestabilnosti periode (sivo polje) pri periodičnem signalu v časovnem prostoru.	10
Slika 6: Shematični prikaz periodičnega signala z nosilno frekvenco f_c in faznim šumom $\theta(t)$ v frekvenčnem prostoru. Velikost faznega šuma pri frekvenci f glede na signal pri nosilni frekvenci f_c je označen z $L(f-f_c)$ (Kester, 2011).	11
Slika 7: Grafični prikaz spektralne gostote faznega šuma za nosilno frekvenco 106.5 MHz radiofrekvenčnega signala iz oscilatorja AD6IW (Phase noise, 2011). Prikazano je le spektralno območje frekvenc večjih od nosilne frekvence v razponu od 10 Hz do 1 MHz v logaritemski skali.	12
Slika 8: Primer AWG generatorja (Agilent AWG generator, 2011).	13
Slika 9: Shema delovanja AWG generatorja (Find the Right Signal Generator, 2011).	14
Slika 10: Analiza kvadratnega signala (Signals, 2011).	14

Slika 11: Naprava »RF & clock generator« podjetja Instrumentation technologies d.d.....	15
Slika 12: Shema delovanja naprave »RF & clock generator« v RF načinu (Žnidarčič, 2009).	16
Slika 13: Shema delovanja naprave »RF & clock generator« v DDS načinu (Žnidarčič, 2009).....	17
Slika 14: Prednja in zadnja stran naprave »RF & clock generator«. Vsi priključki so nameščeni na zadnji strani. Če jih naštejemo od leve proti desni, so to: 1× standard USB B, 1× RJ45, 5× koaksialni BNC, 1× RS232 DB9, 4× diferencialni lemo, 2× koaksialni SMA, 1× IEC 60320 C14 napajalni.....	19
Slika 15: Shema delovanja spektralnega analizatorja.	24
Slika 16: Postopek organiziranja v skupini pri reševanju napake s pomočjo programa Bugzilla. Pri obrazcu za kreiranje nove napake izberemo ime naprave, področje (programska, strojna oprema), pomembnost napake (1-5), ime osebe, kateri bo naloga dodeljena, in vsebino problema.	26
Slika 17: Diagram aktivnosti v življenjskem ciklu napake (Sistematično testiranje programske opreme v računalniških podjetjih, 2002).....	27
Slika 18: Shema testne postavitve naprave »RF & clock generator«. Priklopljen je na osciloskop, spektralni analizator in PC.	28
Slika 19: Odstopanje amplitude signala od nastavljene vrednosti na celotnem frekvenčnem razponu RF signala.....	30
Slika 20: Fazni šum naprave »RF & clock generator« v odvisnosti od frekvence za pet nosilnih frekvenc (temno modra - 352 MHz, rožnata – 499 MHz, rumena 704 MHz, turkizna 1299 MHz, vijolična 1499 MHz). Skala na osi x je logaritemska.	33
Slika 21: Signal prožilca na VN izhodu je kvadratne oblike, njegova frekvenca je 10 Hz.	35
Slika 22: Signal na NN izhodu strojne ure s frekvenco 100 kHz.....	36

Slika 23: Signal iz VN izhoda strojne ure s frekvenco 100 kHz.....	37
Slika 24: VN signal vrat z 10 % prevajalnim razmerjem.....	45
Slika 25: VN signal vrat z 90 % prevajalnim razmerjem.....	46

KAZALO TABEL

Tabela 1: Specifikacije naprave »RF & clock generator«	18
Tabela 2: Struktura menijev za nastavljanje signalov	20
Tabela 3: Meritve točnosti izbranih frekvenc pri različnih amplitudah RF signala... 29	
Tabela 4: Vrednosti faznega šuma na RF izhodu za različne nosilne frekvence. Rezultati so v dBc/Hz. Pod vsako vrstico z nosilno frekvenco je napisana zgornja dovoljena meja faznega šuma.	32
Tabela 5: Izmerjena amplituda signala na nekalibriranem RF izhodu.....	34
Tabela 6: Rezultati meritev signalov NN izhoda strojne ure	38
Tabela 7: Rezultati meritev signalov VN izhoda strojne ure	38
Tabela 8: Čas vzpenjanja in padanja signalov na NN in VN izhodih strojne ure.....	39
Tabela 9: Rezultati meritev signalov NN izhoda prožilca	40
Tabela 10: Rezultati meritev signalov VN izhoda prožilca	40
Tabela 11: Čas vzpenjanja signalov pri NN in VN izhodu prožilca	41
Tabela 12: Rezultati meritev odstopanja frekvenc signalov VN izhoda vrat od pričakovane vrednosti pri prevajalnem razmerju 10 %.....	42
Tabela 13: Rezultati meritev odstopanja frekvenc signalov VN izhoda vrat od pričakovane vrednosti pri prevajalnem razmerju 50 %.....	43
Tabela 14: Rezultati meritev odstopanja frekvenc signalov VN izhoda vrat od pričakovane vrednosti pri prevajalnem razmerju 90 %.....	44
Tabela 15: Rezultati meritev odstopanja frekvenc signalov za referenčna izhoda NN in VN.....	47

1 UVOD

Danes so časi, ko je hitrost generiranja elektromagnetnih (EM) signalov pomembna na vseh področjih človeške dejavnosti. Naprave, ki proizvajajo signale v milijardnih ponovitvah na sekundo – gigahercih, so del našega vsakdana. In če za dosego takih hitrosti upoštevamo še hitrost, s katero je bila taka naprava industrializirana, in kasneje v velikih nakladah proizvedena, potem so napake neizogibne. Za odkrivanje oz. ugotavljanje napak skrbi področje zagotavljanja kakovosti. Tako pridemo do dveh terminov: kontrola kvalitete in testiranje.

Kontrola kvalitete je skupek aktivnosti, katerih skupni imenovalec je kvaliteta in so povezane v širši proces, katerega rezultat so končni izdelki, dobavljivi kupcu. Za dosego tega cilja uporabljamo testne aktivnosti, ki so osredotočene na iskanje napak predmeta testiranja. Zagotavljanje kakovosti je širši pojem, ki skrbi za analizo, identifikacijo in izboljšave v procesu kontrole kvalitete. Z učinkovitim procesom skrbimo, da ne nastanejo napake pri implementaciji produkta in na ta način olajšamo delo izvajalcem kontrole kvalitete (Kaner in ostali, 2002).

V tem magistrskem delu obravnavamo sistemsko testiranje generatorja radijskih frekvenc (RF) in urinega signala poimenovanega »*RF & clock generator*«, ki je last podjetja Instrumentation technologies d.d iz Solkana (Žnidarčič, 2009). Ta generator je primarno namenjen testnim namenom za razvijalce podjetja ter uporabnike ostalih izdelkov omenjenega podjetja. To so v večini naprave za merjenje pozicije žarka v sinhrotronskih pospeševalnikih delcev. V vlogi testnega inženirja v podjetju sem si s kolegi zastavil cilj pripraviti primeren sistemski test z ustreznimi podsklopi testiranja omenjenega generatorja, s katerim bi preverili, ali tehnične lastnosti signalov, ki jih generirata generatorja radijskih frekvenc in urinega signala, ustrezajo zastavljenim specifikacijam za množično izdelavo in prodajo omenjene naprave na svetovnem trgu. V sklopu magistrske naloge smo tudi izvedli vsa potrebna testiranja, analizirali meritve in podali ugotovitve o ustreznosti zahtevane kakovosti oz. podali priporočila za izboljšave (Function generator and arbitrary waveform generator, 2010).

Podrobno je bilo potrebno preučiti delovanje vseh sestavnih delov in priključkov ter analizirati funkcionalnost celotne naprave. Posebno pozornost smo posvetili testiranju različnih karakteristik generiranih radijskih frekvenc. Testirali smo

natančnost frekvence in amplitude sinusnega signala, spektralno čistost, razmerje signal/šum, fazni šum, ipd. Izvedeni so bili tudi nekateri testi za preverjanje dolgoročne stabilnosti RF signala. Za reference in primerjave smo uporabili podobne generatorje drugih proizvajalcev višjih cenovnih razredov.

2 GENERATORJI FREKVENC IN GENERATORJI URINIHI SIGNALOV

Generatorji frekvenc so elektronske naprave, ki ustvarjajo EM signale v analogni ali digitalni domeni. Uporabljajo se v načrtovanju, testiranju, odkrivanju tehničnih motenj in popravljanju elektronskih naprav. Generatorji se v grobem ločijo po obliki, amplitudi in pasovni širini signala, ki ga proizvajajo. Glede na to da je generator, ki ga smo ga testirali, skupek generatorja radijskih frekvenc in generatorja urinega signala oz. funkcijskega generatorja, si pogledajmo v nadaljevanju nekaj dejstev in osnovnih značilnosti vsakega posebej.

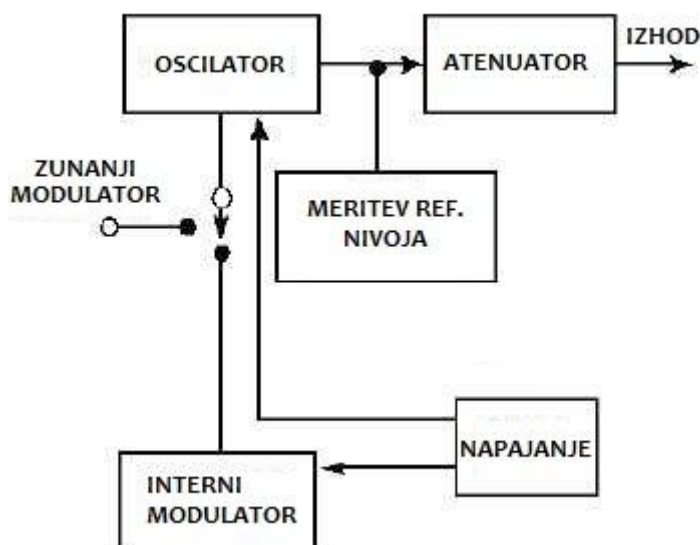
2.1 Generatorji RF frekvenc

Generator radijskih frekvenc (RF generator) je naprava, ki ustvarja analogne sinusne signale v razponu od 3 kHz do 300 GHz, katere največkrat uporabljamo pri načrtovanju elektronskih vezij. RF generatorje je mogoče ustvariti na več načinov. Razvoj elektronskih vezij je v preteklih letih omogočil različne tehnike generiranja radijskih valov. V splošnem ločimo prosto tekoče RF generatorje in sintetične RF generatorje. Ključna značilnost vsakega signalnega generatorja je frekvenčno območje, ki ga pokriva (RF radio frequency signal generator, 2011).

Prosto tekoči RF generatorji so dandanes vse redkeje v uporabi, ker frekvenca, ki jo oddajajo, običajno »drsi« oz. se spreminja. Imajo pa to prednost, da proizvajajo zelo čist signal z nizkim nivojem šuma. Večina današnjih RF generatorjev uporablja frekvenčne sintetizatorje. Uporaba te tehnike omogoča nastavitve frekvenc s kar največjo natančnostjo izhodnega signala. Natančnost je lahko odvisna bodisi od zelo preciznega notranjega oscilatorja reference ali pa od zaklepa signala na zunanjo referenco (RF radio frequency signal generator, 2011).

Slika 1 prikazuje shemo zgradbe RF generatorja. Naloga oscilatorja je, da proizvede signal, ki bo natančno frekvenčno nastavljen na katerikoli točki frekvenčnega območja. Oscilatorsko vezje vključuje skupino tuljav in kondenzatorjev, s katerimi se nastavi želena frekvenca s pomočjo induktivne kapacitivnosti. Če želimo osnovni signal obogatiti z dodatno frekvenco, ga lahko moduliramo. Funkcija modulatorja je proizvodnje modulacijskega signala s pomočjo drugega oscilatorja, ki se superponira na signal iz glavnega oz. osnovnega oscilatorja. Glavni modulaciji sta amplitudna

modulacija (AM) in frekvenčna modulacija (FM). FM je postopek spreminjanja frekvence nosilnega signala v ritmu modulatorskega signala - informacije. FM v nasprotju z amplitudno modulacijo (AM) omogoča večji dinamični razpon informacijskega signala in je posledično manj dovzeten za motnje. Modulacijo je možno priključiti tudi iz zunanega vira. Na izhodni signal iz generatorja običajno vpliva še atenuator oz. uporovni slabilec, ki skrbi za slabljenje signala, v kolikor je absolutna moč na izhodu generatorja prevelika. Natančnost amplitude RF signala je tako odvisna od natančnosti atenuatorja. Potrebno je še zagotoviti ohranitev absolutne točnosti amplitude izhodnega signala s pomočjo kalibriranja oz. umerjanja. Pri kalibraciji uporabimo znan vhodni signal in opazujemo izhodni signal merilnega sistema. Postopek kalibracije vzpostavi zvezo med vhodno in izhodno vrednostjo merilnega sistema (RF radio frequency signal generator, 2011).



Slika 1: Shematični prikaz zgradbe RF generatorja (RF signal generator block diagram, 2011).

Signal iz RF generatorjev lahko prikažemo v časovnem ali frekvenčnem prostoru. Primer 500 MHz signala iz RF generatorja HP 8657B v časovnem prostoru je prikazan na sliki 2.

Sinusni signal opišemo z naslednjim izrazom (Bergelj, 2004):

$$U = U_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad (1)$$

kjer je T perioda, U_0 pa amplituda sinusnega signala. Namesto periode pogosto navajamo frekvenco (f) sinusnega signala, ki je podana kot $f = 1/T$.

Povprečna moč sinusnega signala na časovno enoto je podana z (Press in ostali, 1986):

$$\bar{P} = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} \frac{U^2}{R} dt \quad (2)$$

kjer je R karakteristični upor, na katerega priključimo RF signal pri merjenju moči, T_p pa je časovni interval, v katerem računamo povprečne moči. Ta interval je tipično mnogo večji od periode sinusnega signala T , saj povprečimo preko veliko število nihajev.

Za primerjavo moči signalov pri različnih frekvencah vpeljemo relativno moč P_{rel} , ki jo definiramo s pomočjo logaritma razmerja moči (P) dveh signalov:

$$P_{REL} = 10 \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (3)$$

ali razmerja amplitud napetosti (U) teh dveh signalov:

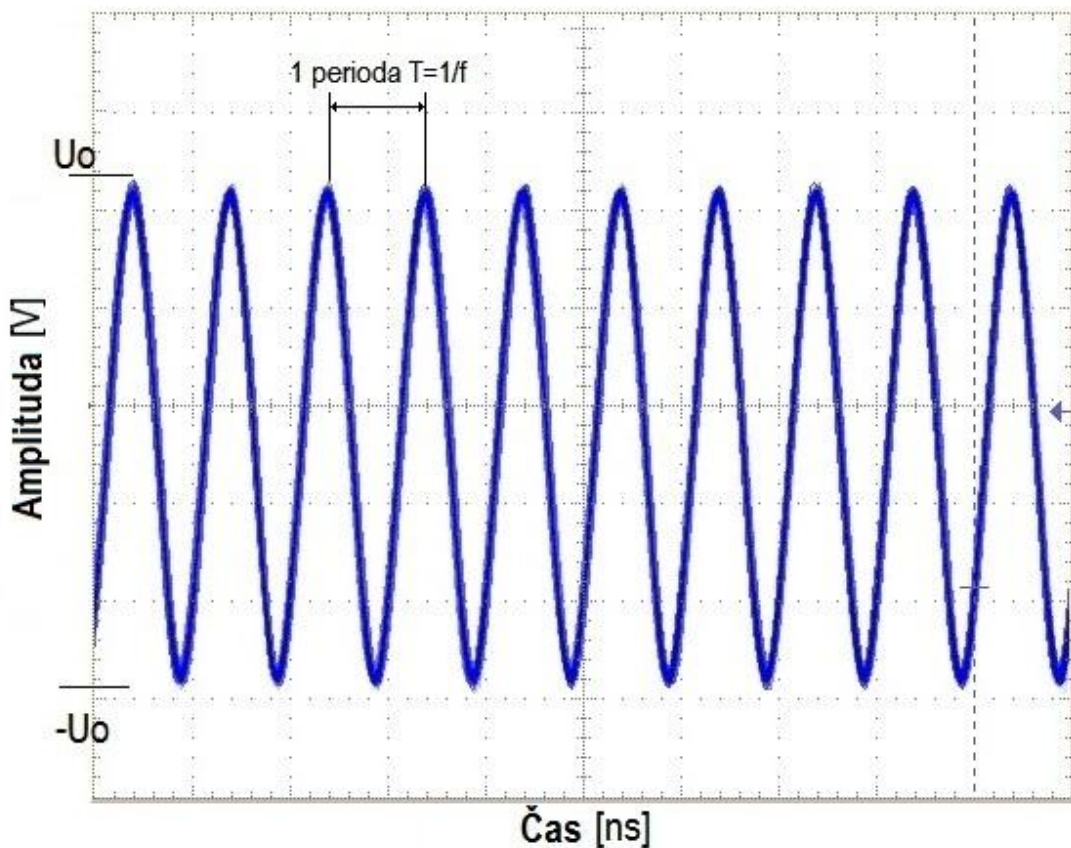
$$P_{REL} = 20 \log\left(\frac{U_1}{U_2}\right) \quad (4)$$

Enota relativne moči je decibel (dB).

V primeru, ko želimo prikazati moč signala relativno glede na neko v naprej podano vrednost moči P_0 , uporabimo enako logaritemsko zvezo kot v enačbi (3).

$$P_{dBm} = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_0} \right) \quad (5)$$

Običajno je za referenčno moč P_0 izbrana vrednost 1 mW. Enota za relativno moč tedaj označimo z dBm, s čimer poudarimo, da je moč podana relativno na moč 1 mW.



Slika 2: Časovni potek sinusnega signala napetosti iz RF generatorja.

Pri analizi sinusnih signalov si lahko učinkovito pomagamo s Fourierovo transformacijo, s katero pretvorimo signal iz časovnega v frekvenčni prostor (Press in ostali, 1986).

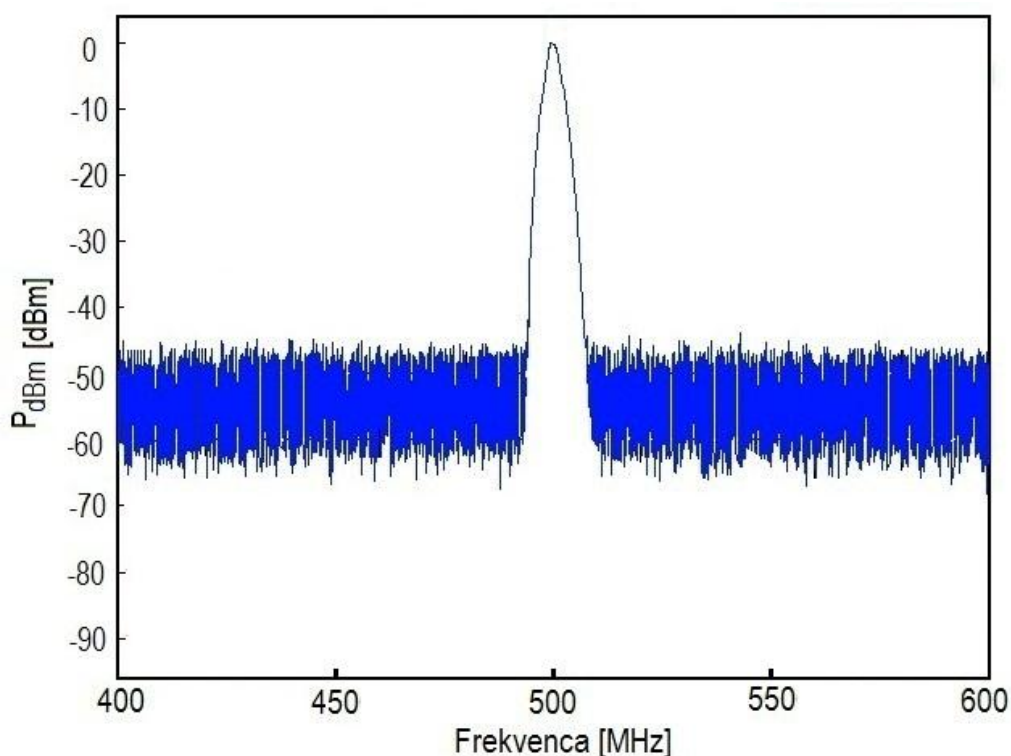
$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{2\pi i f t} dt \quad (6)$$

pri čemer je $h(t)$ signal v časovnem prostoru, $H(f)$ pa Fourierova transformiranka v frekvenčnem prostoru.

Moč posameznih spektralnih komponent signala podaja kvadrat magnitude Fourierove transformiranke:

$$P(f) = |H(f)|^2 \quad (7)$$

Na sliki 3 je prikazan signal iz slike 2 v frekvenčnem prostoru. Prikazana je relativna moč glede na 1 mW referenčne moči (enačba 5) v odvisnosti od frekvence. Glavni vrh v spektru ustreza vodilnemu sinusnemu signalu s frekvenco 500 MHz. Poleg vodilnega signala pa v tem prikazu lahko vidimo, da so v signalu poleg glavne prisotne še druge frekvence, ki predstavljajo šum. V časovni predstavitvi signala (slika 2) teh dodatnih frekvenc ne opazimo, ker je njihova amplituda za več redov velikosti manjša od amplitude vodilnega signala. Zato smo v frekvenčnem spektru izbrali prikaz spektralne moči v logaritemski skali, s čimer omogočimo natančno določanje razmerja moči med močnim vodilnim signalom in šibkimi signali pri drugih frekvencah.

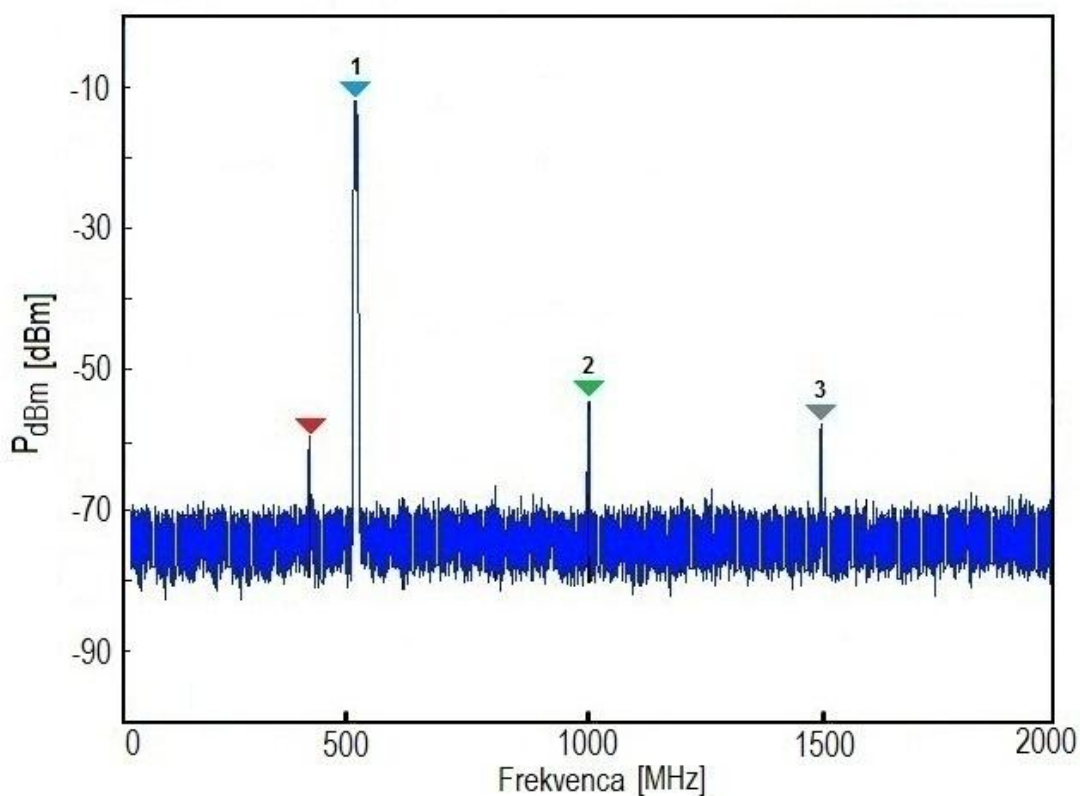


Slika 3: Relativna moč signala iz slike 2 glede na 1 mW referenčne moči (enačba 5) v odvisnosti od frekvence. Vrh na sliki se nahaja pri 500 MHz, njegova relativna moč je 0 dBm.

2.1.1 Napake RF generatorjev

Prva nezaželena značilnost RF generatorjev so višje harmonične frekvence in neželene spektralne komponente (ang. spurious signals), ki so stranski produkti vseh RF generatorjev. Višje harmonične frekvence so večkratniki osnovne frekvence. Neželene spektralne komponente pa so različnih frekvenc in amplitud. Na sliki 4 je označena s svetlo modro puščico nosilna frekvenca 500 MHz, z zeleno prva višja harmonična frekvenca na 1000 MHz in s sivo puščico druga višja harmonična frekvenca pri 1500 MHz. Iz iste slike je razbrati, da je prva harmonična frekvenca močnejša kot druga, in enako bi veljalo za vsako naslednjo višjo harmonično frekvenco. Rdeča puščica označuje relativno močno neželeno spektralno komponento pri približno 400 MHz. V spektru opazimo tudi prisotnost relativno šibkega signala na celotnem frekvenčnem območju, ki predstavlja šum. Relativna moč tega šuma naključno varira v odvisnosti od frekvence, zato običajno podajamo kar povprečno vrednost relativne moči šuma $P_{povp_šum}$ na izbranem frekvenčnem intervalu. Pomembna karakteristika RF signala je razmerje med močjo signala pri glavni frekvenci in povprečno močjo šuma P_{SNR} (SNR – signal to noise ratio). To razmerje definiramo v logaritemski skali:

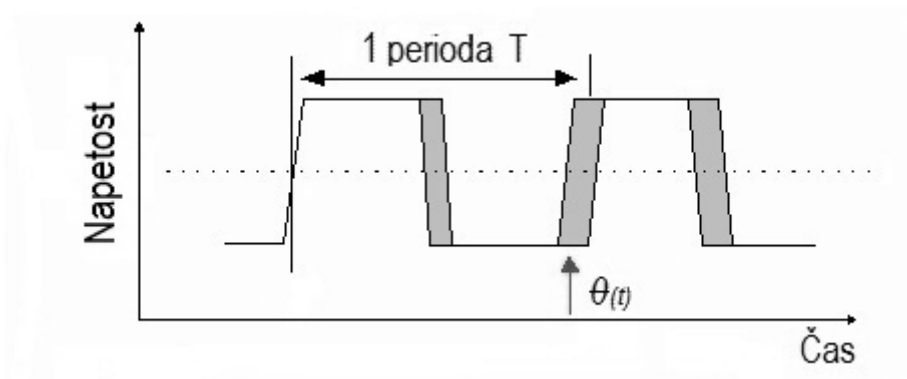
$$P_{SNR} = 10 \log \left(\frac{P_{signal}}{P_{povp_šum}} \right) \quad (8)$$



Slika 4: Spekter relativne moči signala P_{dBm} iz testnega RF generatorja znamke HP8656B glede na 1mW referenčne moči. Modra puščica označuje osnovni signal pri 500 MHz, zelena puščica označuje prvo harmonično frekvenco pri 1000 MHz, siva puščica označuje drugo harmonično frekvenco pri 1500 MHz. Rdeča puščica označuje neželjeno spektralno komponento pri približno 400 MHz. V spektru je prisoten tudi šum. Njegova povprečna vrednost je -75 dBm.

Vsak RF generator proizvaja določeno raven faznega šuma. To je pojav hitrih, kratkih in naključnih nihanj v fazi vala, ki jo povzročajo nestabilnosti v časovnem prostoru (ang. jitter).

Nestabilnost periode shematično prikazuje slika 5 za primer kvadratnega signala.



Slika 5: Shematični prikaz nestabilnosti periode (sivo polje) pri periodičnem signalu v časovnem prostoru.

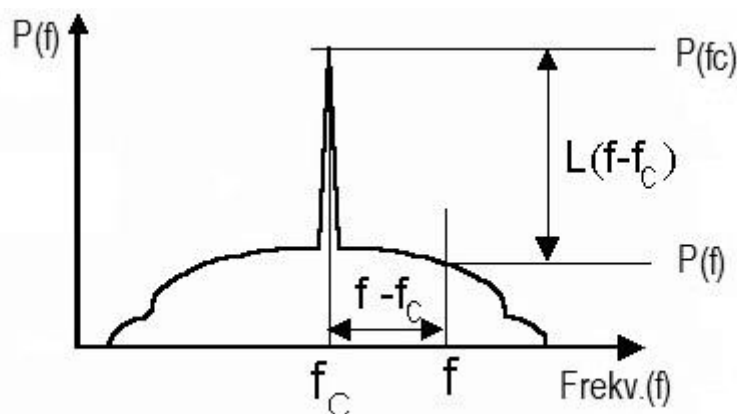
Sinusni signal $U(t)$ s frekvenco f , pri katerem faza naključno varira v času $\theta(t)$, opišemo z naslednjim izrazom (Hajimiri in Lee, 1998):

$$U(t) = U_0 \sin(2\pi f_c t + \theta(t)) = A \sin\left(2\pi f_c \left(t + \frac{\theta(t)}{2\pi f_c}\right)\right) \quad (9)$$

V enačbi (9), $\theta(t)$ predstavlja fazni šum (FŠ), ki ga lahko zaznamo kot šum periode nihanja $J_{F\dot{S}}$ in ga izrazimo kot:

$$J_{F\dot{S}} = \frac{\theta(t)}{2\pi f_c} \quad (10)$$

Slika 6 shematično prikazuje, kako določamo velikost faznega šuma v frekvenčnem prostoru. Zaradi faznega šuma se v spektru poleg signala nosilne frekvence pojavi signal še pri drugih frekvencah, ki so večje in manjše od nosilne. Na sliki je shematično prikazano, kako določimo velikost FŠ pri frekvenci f relativno na velikost signala pri nosilni frekvenci f_c .



Slika 6: Shematični prikaz periodičnega signala z nosilno frekvenco f_c in faznim šumom $\theta(t)$ v frekvenčnem prostoru. Velikost faznega šuma pri frekvenci f glede na signal pri nosilni frekvenci f_c je označen z $L(f-f_c)$ (Kester, 2011).

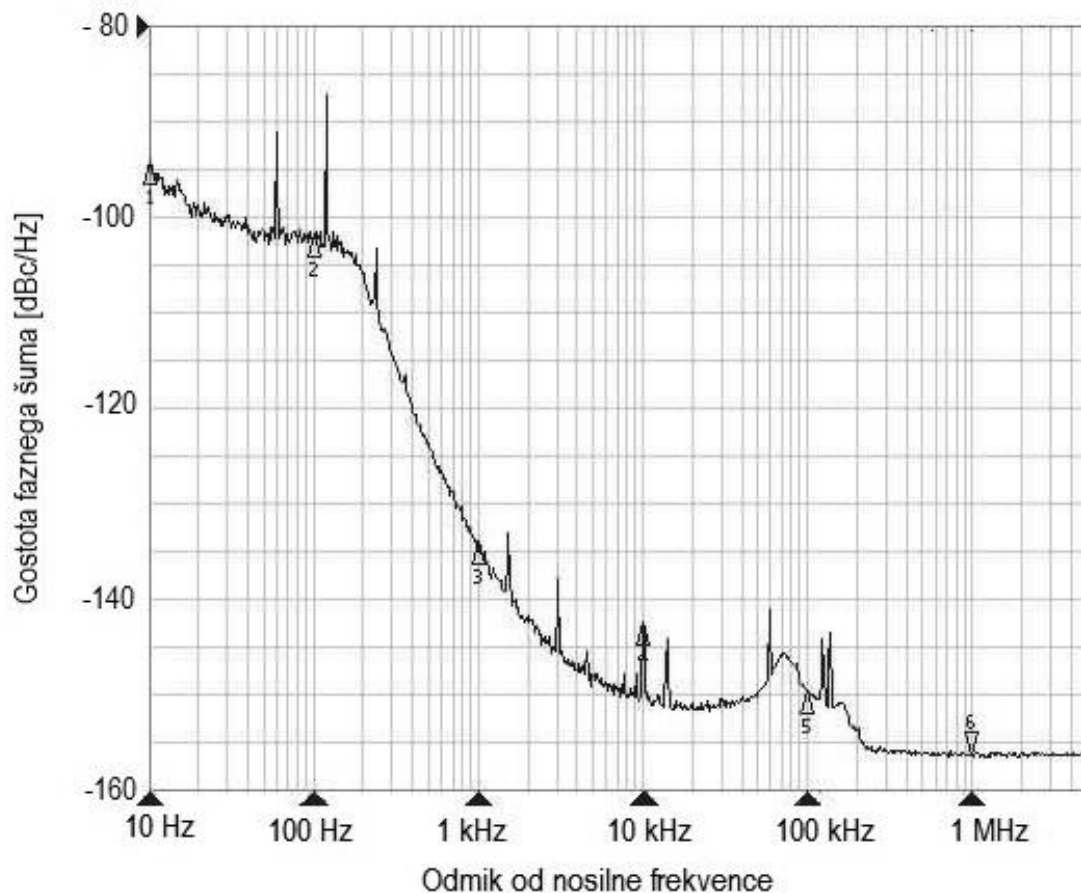
Velikost faznega šuma pri frekvenci f glede na signal pri nosilni frekvenci f_c je podan v logaritemski skali kot razmerje moči signalov pri frekvenci f ($P(f)$) in pri nosilni frekvenci f_c ($P(f_c)$) (Kester, 2011).

$$L(f - f_c) = 10 \log \left[\frac{P(f)}{P(f_c)} \right] \quad (11)$$

Pri meritvah faznega šuma v praksi merimo velikost faznega šuma v pasovni širini 1 Hz okoli frekvence f , in podajamo njegovo povprečno vrednost. Enota za gostoto faznega šuma v pasovni širini 1 Hz je dBc/Hz (RF radio frequency signal generator, 2011).

Slika 7 grafično prikazuje primer povprečne spektralne gostote faznega šuma v frekvenčnem območju 10 Hz do 1 MHz odmika od nosilnega signala s frekvenco 106.5 MHz. Izvor signala je radiofrekvenčni oscilator AD6IW.

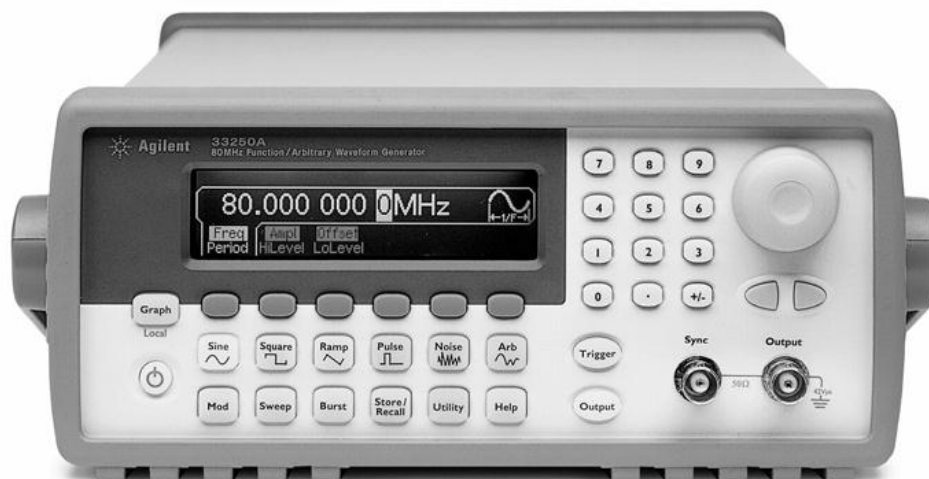
V tem razponu je vidno značilno pojevanje signala pri višjih frekvencah od -94 dBc/Hz pri 10 Hz do -156 dBc/Hz pri 1 MHz, opazne pa so tudi različne ostre spektralne komponente (vrhovi), ki ponazarjajo znatna povečanja v gostoti faznega šuma pri določenem frekvenčnem odmiku.



Slika 7: Grafični prikaz spektralne gostote faznega šuma za nosilno frekvenco 106.5 MHz radiofrekvenčnega signala iz oscilatorja AD6IW (Phase noise, 2011). Prikazano je le spektralno območje frekvenc večjih od nosilne frekvence v razponu od 10 Hz do 1 MHz v logaritemski skali.

2.2 Generatorji urinih signalov

Podobno kot RF generatorje, generatorje urinih signalov največkrat uporabljamo pri načrtovanju vezij, testiranju in popravilih elektronskih naprav. Generatorje urinih signalov danes dobimo v funkcijskih oz. AWG (Arbitrary Waveform Generator) generatorjih (slika 8). Funkcijski generatorji ustvarjajo periodične električne signale različnih oblik (kvadratna, sinusna, žagasta) ali pa delujejo v pulznem načinu. AWG generatorji so podobni funkcijskim generatorjem s to razliko, da so sposobni tudi ustvarjati valovanja poljubnih oblik, katere si izbere uporabnik sam (Arbitrary Waveform Generator, 2011).



Slika 8: Primer AWG generatorja (Agilent AWG generator, 2011).

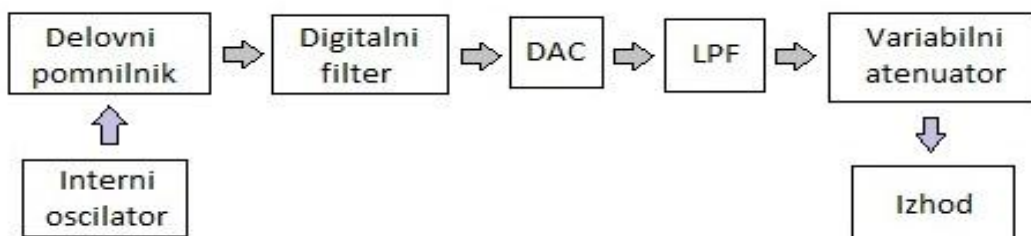
AWG generatorje delimo v dve glavni kategoriji: generatorji z variabilno uro in generatorji z direktno digitalno sintezo signala (Direct Digital Synthesis – DDS). Slednji bazira na frekvenčnem sintetizatorju. Pomanjkljivost takega generatorja je fiksna urina frekvenca, kar pomeni, da se ponovitev valovanja spreminja s spreminjanjem obravnavanega intervala. Rezultat tega je, da so DDS AWG generatorji sposobni natančno ustvariti le valovanje, ki je enako količniku DDS urne frekvence in valovne dolžine (ali njenih mnogokratnikov). To lahko povzroči nestabilnosti, ki so lahko kritične za nekatere aplikacije (Arbitrary Waveform Generator, 2011).

Dve pomembni lastnosti AWG generatorjev sta tudi amplitudna ločljivost in hitrost. Amplitudna ločljivost je pogojena z digitalno analognim (D/A) pretvornikom (naprava, ki signal zapisan v digitalni obliki, pretvori v analogno obliko, v tem primeru napetost). Tako na primer 12 bitni D/A pretvornik omogoča 4096 amplitudnih korakov. Hitrost ponavljajočih valovanj je odvisna od dveh dejavnikov: dolžine vala glede na število vzorcev, potrebnih za simulacijo vala, in najvišjo frekvenco ure (Arbitrary Waveform Generator, 2011).

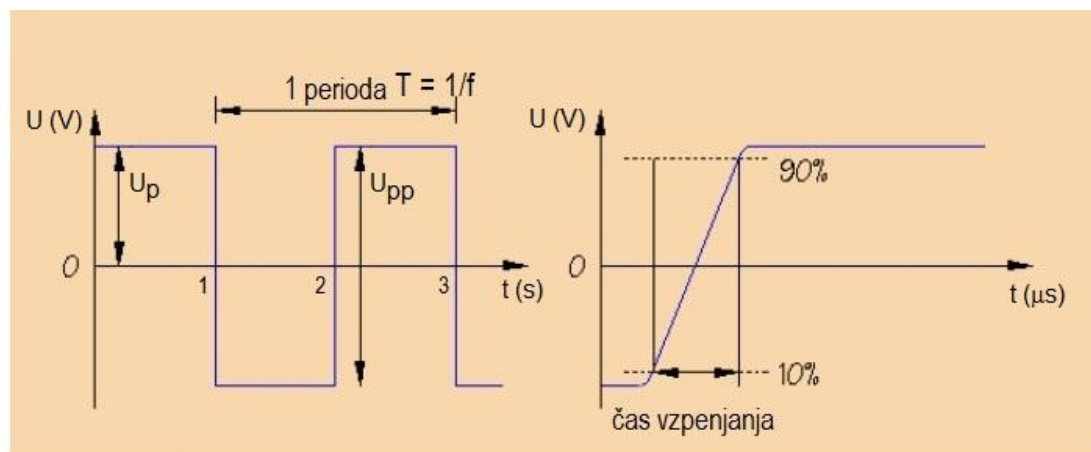
Omenjeni generatorji imajo tudi možnost spreminjanja časa signala v aktivnem stanju glede na celoten čas periode. Temu času pravimo prevajalno razmerje (ang. duty cycle). Levi graf na sliki 10 prikazuje signal s 50 % prevajalnim razmerjem, kar pomeni, da je polovica periode v višjem amplitudnem območju, polovica pa v

nižjem. S spreminjanjem prevajalnega razmerja spreminjamo tudi delež signala v višjem amplitudnem območju.

Slika 9 prikazuje shemo delovanja AWG generatorja. Signal oz. valovanje iz internega oscilatorja potuje skozi delovni pomnilnik do digitalnega filtra in nato skozi digitalno-analogni pretvornik do analognega filtra nizko prepustnih frekvenc. Ta dva filtra skrbita za izboljšavo kvalitete signala s pomočjo zviševanja efektivnega vzorčenja preko interpolacije ter za odstranjevanje motenj v signalu. Preden se signal pojavi na izhodu, mu variabilni atenuator določi amplitudo.



Slika 9: Shema delovanja AWG generatorja (Find the Right Signal Generator, 2011).



Slika 10: Analiza kvadratnega signala (Signals, 2011).

Slika 10 prikazuje primer kvadratnega signala iz AWG generatorja. Frekvenco določimo tako kot pri vseh periodičnih signalih – glede na čas trajanja periode $f=1/T$. Amplituda je lahko podana kot višina pozitivnega dela signala U_p (ang. peak voltage – napetost v najvišji točki) ali kot napetostna razlika med spodnjim in zgornjim nivojem signala U_{pp} (ang. peak-to-peak voltage). Čas vzpenjanja in padanja signala

(ang. rise, fall time) je definiran kot čas, v katerem signal naraste od 10 % do 90 % amplitude oz. pade iz 90 % na 10 % amplitude (Signals, 2011).

2.3 Opis in namen uporabe naprave »RF & clock generator«

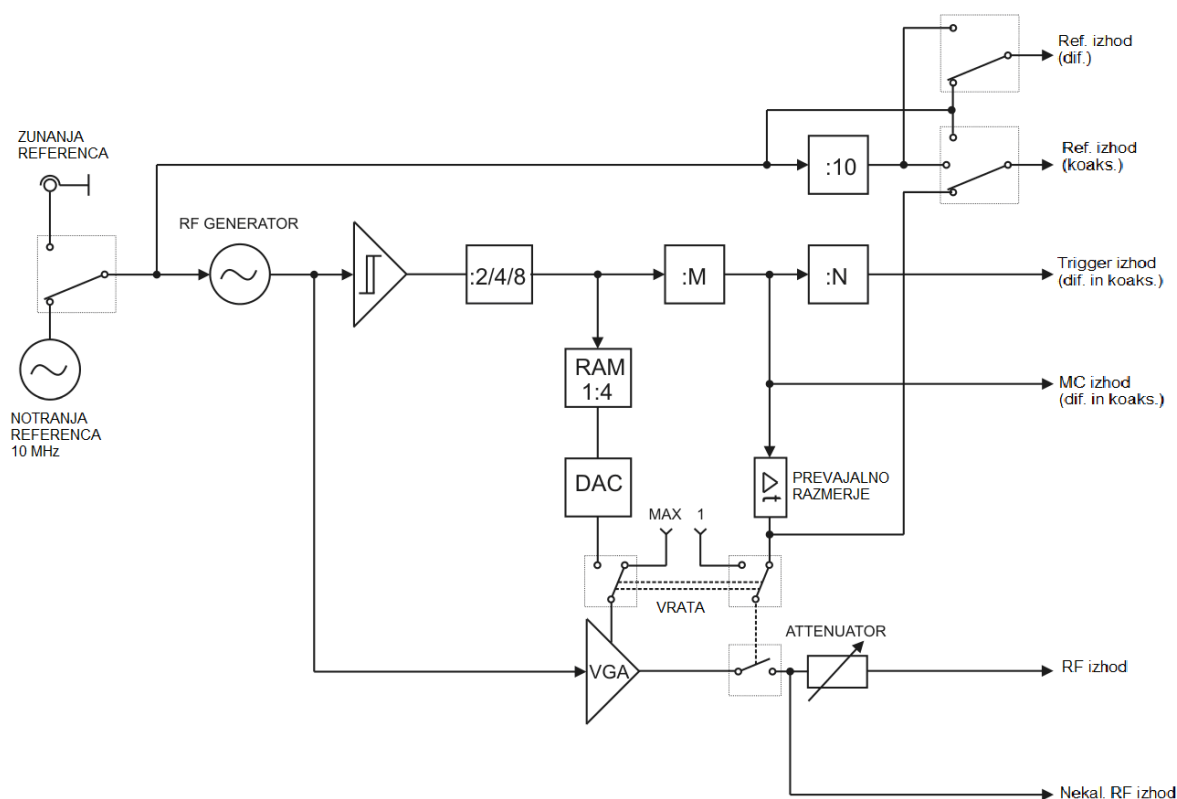
Pred zasnovo primernege systemskega testa z ustreznimi podsklopi testiranja omenjenega generatorja, s katerim bi preverili ali tehnične lastnosti signalov ustrezajo zahtevam, se moramo najprej seznaniti z nekaj dejstvi o omenjeni napravi. Naprava »RF & clock generator« (slika 11) je skupek treh konvencionalnih generatorjev, in sicer RF generatorja v razponu od 250 MHz do 2 GHz (tabela 1) ter dveh funkcijskih generatorjev – generatorja strojne ure in generatorja prožilca (ang. trigger). Nepogrešljivo funkcionalnost predstavlja tudi prevajalno razmerje, s katerim lahko prekinjamo signal (0 % – 100 %). Naprava se uporablja predvsem v razvojne in testne namene ostalih inštrumentov iz družine Libera podjetja Instrumentation technologies d.d. Generator deluje v dveh načinih: RF in DDS.



Slika 11: Naprava »RF & clock generator« podjetja Instrumentation technologies d.d.

Kadar je generator v RF izbranem načinu, delujejo vsi izhodi in vhodi, ko je v DDS načinu, pa delujejo vsi izhodi, razen RF izhoda. RF frekvenca in frekvenca strojne ure sta pogojeni s harmoničnim številom pospeševalnika delcev, zato je poljubno nastavljanje obeh frekvenc v RF načinu nekoliko okrnjeno. V DDS načinu, kjer sta RF izhoda izklopljena, je nastavljanje vseh frekvenc poljubno, seveda v določeni pasovni širini, ki jo generator omogoča.

Shema na sliki 12 predstavlja delovanje naprave »RF & clock generator« v RF načinu. Iz enega izmed dveh izvorov referenc, se signal razcepi v dve veji. Po zgornji signal potuje na nizkonapetostni (NN) diferencialni izhod lemo in visokonapetostni (VN) koaksialni izhod BNC (Bayonet Neill–Concelman). Oba imata možnost uporabe desetkratnega delilnika.

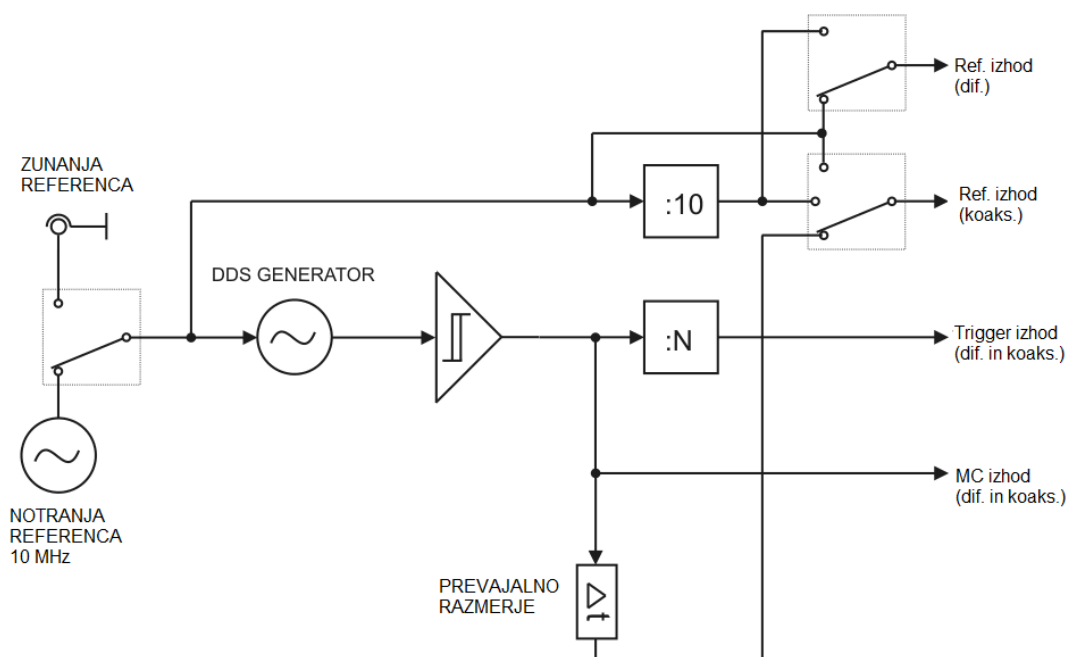


Slika 12: Shema delovanja naprave »RF & clock generator« v RF načinu (Žnidarčič, 2009).

Po spodnji veji referenčni signal najprej potuje skozi generator radijskih frekvenc. Tu se signal cepi proti variabilnemu ojačevalniku, od koder signal konča na enem od RF

izhodov. Lahko pa gre skozi vrata, kjer z ustreznim prevajalnim razmerjem doseže VN referenčni izhod. Druga veja iz RF generatorja pretvori sinusni signal v kvadratnega s Schmittovim prožilnikom in preko več delilnikov potuje do izhodov VN in NN izhoda prožilca (trigger izhod) in izhod strojne ure (MC izhod). Pomnilnik in digitalno-analogni pretvornik služita za ustvarjanje signalov poljubnih oblik.

Na sliki 13 je prikazana poenostavljena shema iz slike 12, torej delovanje »RF & clock generatorja« v DDS načinu. Iz enega izmed dveh izvorov referenc, se signal razcepi v dve veji. Zgornja je identična tisti iz RF načina. Signal potuje na NN diferencialni lemo izhod in VN koaksialni BNC izhod. Tudi tu imata možnost uporabe desetkratnega delilnika. Signal v drugi veji iz DDS generatorja skozi Schmittov prožilnik preko delilnika konča na VN in NN izhodu prožilca oz. gre še pred delilnikom na izhod strojne ure ali z določenim prevajalnim razmerjem do koaksialnega referenčnega izhoda.



Slika 13: Shema delovanja naprave »RF & clock generatorja« v DDS načinu (Žnidarčič, 2009).

2.4 Specifikacije naprave »RF & clock generator«

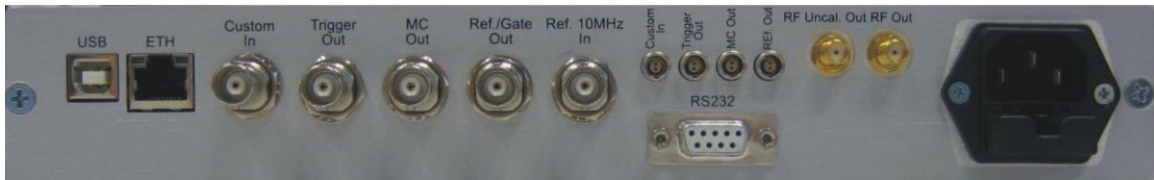
Tabela 1 prikazuje lastnosti posameznih signalov na priključkih naprave »RF & clock generator«. Za lažjo predstavo vseh priključkov je dodana slika 14, ki prikazuje sprednjo in zadnjo stranico naprave. V tabeli 2 je prikazana še struktura menijev.

Do priključkov za merjenje signalov smo dostopali s koaksialnimi ali diferencialnimi kablji z ustreznimi priključki, priklopljenimi na osciloskop ali spektralni analizator. USB, mrežni in RS232 priključek smo imeli priključen na PC.

Tabela 1: Specifikacije naprave »RF & clock generator«

Obratovalna napetost	110/220 V AC / 0,2 A maksimalno.
Referenčni vhod (Ref. 10MHz In)	10 MHz BNC (5V – VN), samodejna zaznava.
Izhod strojne ure (MC Out)	Nastavljiva frekvenca. BNC (5V – VN) in lemo (0,8V – NN). Nastavljiva frekvenca od 100 kHz – 20833 kHz
Izhod prožilca (Trigger Out)	Nastavljiva frekvenca prožilca glede na strojno uro. VN in NN izhod. Nastavljiva frekvenca od 0,1 Hz – 1000 Hz.
Referenčni izhod (Ref./Gate Out)	Izbira med 1 MHz, 10 MHz in prekinjanim signalom (nastavljanje prevajalnega razmerja) VN in NN izhod.
RF izhod (RF Out)	Nastavljiva frekvenca od 250 MHz – 2 GHz. Nastavljiva amplituda od +15 dBm do –58 dBm).
Nekal. RF izhod RF Uncal. Out	Nastavljiva frekvenca od 250 MHz – 2 GHz. Amplituda ni nastavljiva.
Vrste povezav	Mrežni priključek (RJ-45), USB priključek (USB B 2.0), serijski priključek (RS232).

front panel



back panel

Slika 14: Prednja in zadnja stran naprave »RF & clock generator«. Vsi priključki so nameščeni na zadnji strani. Če jih naštejemo od leve proti desni, so to: 1× standard USB B, 1× RJ45, 5× koaksialni BNC, 1× RS232 DB9, 4× diferencialni lemo, 2× koaksialni SMA, 1× IEC 60320 C14 napajalni.

V tabeli 2 so zajeti vsi meniji in podmeniji za nastavljanje signalov naprave »RF & clock generator«.

Obstajata še 2 podmenija (v RF in DDS načinu), ki nista prikazana v tabeli 2:

- Status:
 - Nadzor nad napetostmi in temperaturo na vezju;
 - Nadzor nad obrati ventilatorja;
 - Nadzor nad dodeljenem IP naslovu;
- Config:
 - Nastavljanje omrežnih nastavitev (ethernet vklop/izklop, IP naslov, maska omrežja);
 - Nastavitev celotnega menija na privzeto stanje;
 - Nastavljanje referenčnih izhodov na 1 MHz, 10MHz ali Gate – samo VN izhod).

Tabela 2: Struktura menijev za nastavljanje signalov

Način	Nastavitev	Opis	Delovno območje
RF	RFf	RF frekvenca	250 MHz – 2000 MHz
	MCf	Frekvenca strojne ure	50 kHz – 20 MHz (avtomatično nastavljena glede na harmonično število)
	H	Harmonično število	32 – 40000
	GATE	Prevajalno razmerje	0% – 100%
	TRIG	Prožilec	0,1 Hz – 1003 Hz
	RF OUT	Moč RF signala	+15 dBm do –58 dBm
DDS	MCf	Frekvenca strojne ure	10 kHz – 20 MHz
	GATE	Prevajalno razmerje	0% – 100%
	TRIG	Prožilec	1 Hz – 1000 Hz

3 OPIS SISTEMSKEGA TESTIRANJA ZA NAPRAVO »RF & CLOCK GENERATOR«

3.1 Splošno o sistemskem testiranju

Sistemsko testiranje vsebuje procese, kjer z več različnimi testi ugotavljamo funkcionalnosti sistema in odkrivamo napake. Najsi testiramo programsko ali strojno opremo, namen je vedno potrditi ustreznost in točnost testiranca v primerjavi z začetnimi specifikacijami. Sistemski test tako predstavlja simulacijo dejanskega življenjskega scenarija testnega objekta v predvidenem delovnem območju. Rezultat systemskega testa se smatra za pozitivnega, če so vrednosti testiranih signalov znotraj mej pričakovanih odstopanj. Možno je tudi testiranje izven predvidenih mej delovanja naprave, da vidimo, kako se sistem obnaša v takih primerih (Davis, 2011).

Sistemski test je v našem primeru vseboval naslednje podsklope: integracijsko testiranje, performančno testiranje, dolgotrajno testiranje. Navedeni testi so bili izbrani na podlagi ustreznosti za testirani inštrument, da nam čimbolj potrdijo ustreznost naprave ob zaključku testiranja. Produktni vodja je podal zahteve in specifikacije testni ekipi. Člani te ekipe smo se nato odločili za vrsto, obseg in način testiranja. Dovoljena odstopanja rezultatov od specifikacij so posredovali razvijalci, na podlagi vgrajenih elektronskih komponent, temperaturnega območja delovanja naprave in razvojnega testiranja. Ustrezne inštrumente za opravljanje meritev signalov smo izbrali glede na tip signala in vrsto meritve.

Integracijsko testiranje se začne po končanem testiranju enot (npr. ena funkcionalnost). To je proces, ki kontrolira komponente, ki so že bile posamično stestirane v sklopu testiranja enot. Pri integracijskem testiranju se testira več komponent skupaj, lahko po vrsti, lahko pa po logičnih sklopih. Večkrat pa se pod integracijskimi testi razume vse komponente in ne le nekaj skupaj. V integracijskih testih se kontrolira funkcionalnost projekta. Izvedejo se testni primeri, ki zadevajo funkcionalnost. Praktično smo pri našem projektu uporabili to vrsto testiranja tako, da smo med testiranjem performans in funkcionalnosti, hkrati preverili še delovanje programske opreme (Križnik, 2002).

Performančno testiranje pokriva širok spekter inženirskih in funkcionalnih ocen, kjer se izdelku ali sistemu ugotavlja karakteristike oz. ustreznost in odstopanje od specifikacij (Performance testing, 2011).

Dolgotrajno testiranje zajema teste, ki trajajo nekaj ur, dni ali tednov. Namen je, da v daljšem časovnem obdobju odkrijemo napake, ki v kratkoročnih testih ostanejo skriti (Kaner in ostali, 2002).

Pri testiranju se pričakuje, da bomo v najkrajšem času odkrili čim več napak ali morebitne vzroke napake in vse tudi dokumentirali ter poročali. K temu lahko veliko pripomore avtomatsko testiranje, ki ga izvedemo s pomočjo računalniškega nadzora, s katerim vodimo potek testiranja. Pri tem povežemo med seboj osebni računalnik, merilni instrument ter merjenca (npr. slika 18). V našem primeru smo s pomočjo »Matlab« programske opreme na osebni računalniku sprogramirali testno proceduro, s katero smo vodili potek analize (Matlab - The Language Of Technical Computing, 2011). Testna procedura, v tem primeru skripta, nastavi, odčita in po želji analizira vrednosti iz merjenca in merilnega instrumenta (Brockman, 2009). Ko imamo tak sistem vzpostavljen, imamo ponovljiv testni postopek in s tem zmanjšano možnost napake meritve zaradi človeškega faktorja.

V našem primeru je sistemski test zajemal naslednje testne podsklope:

- Sinusna signala radijskih frekvenc:
 - RF izhod;
 - Točnost frekvence;
 - Točnost amplitude;
 - Test faznega šuma;
 - Primerjalni testi;
 - Nekalibriran RF izhod;
 - Točnost amplitude;
- Kvadratni signali urinih signalov;
 - Izhod strojne ure;
 - Točnost frekvence;
 - Točnost amplitude;
 - Čas vzpenjanja in padanja;

- Izhod prožilca;
 - Točnost frekvence;
 - Točnost amplitude;
 - Čas vzpenjanja in padanja;
- Izhod vrat / referenčni izhod ;
 - Točnost frekvence;
 - Točnost amplitude;
 - Točnost prevajalnega razmerja;
- Referenčni izhod;
 - Točnost frekvence;
 - Točnost amplitude;
- Referenčni vhod;
- Ostala testiranja;
 - Stresni test;
 - Točnost napajanj;
 - Komunikacija;
- Mehansko testiranje opreme na prednji stranici;
 - Gumbi, zaslon.

3.2 Strojna oprema za izvedbo testiranja

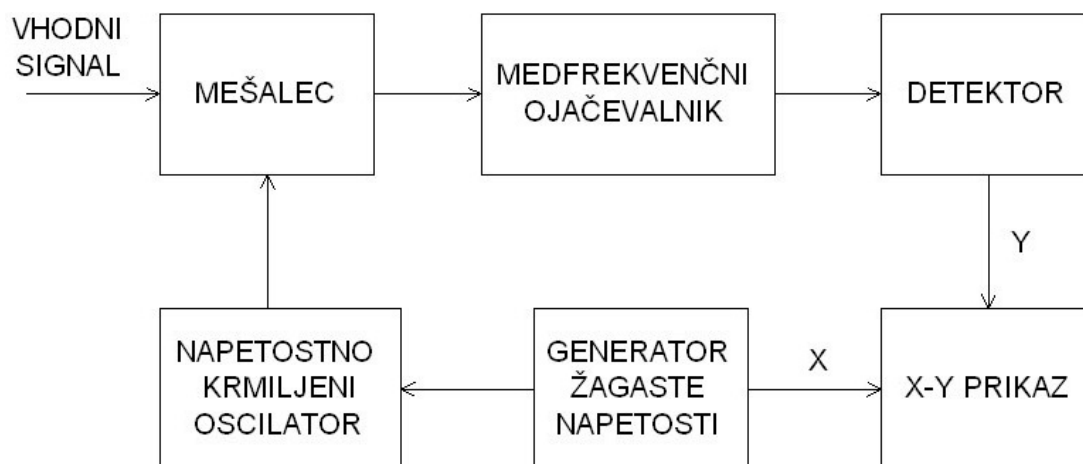
3.2.1 Osciloskop in spektralni analizator

Signal iz generatorjev lahko opazujemo z osciloskopi ali spektralnimi analizatorji. Osciloskop nam signal prikaže v časovnem prostoru, spektralni analizator pa v frekvenčnem.

Pri analognem osciloskopu je slika osvežena hkrati s ponovitvijo vhodnega signala. Digitalni osciloskop pomehi trenutno velikost vhodnega signala v rednih, kratkih časovnih intervalih. Pravimo, da osciloskop vzorči vhodni signal. Velikost intervalov določi na podlagi izbrane horizontalne občutljivosti. Digitalni osciloskop vzorči dovolj pogosto, da lahko kasneje iz niza zajetih vzorcev nariše potek vhodnega signala, ki je na sliki 2 narisana s polno modro črto. Osciloskop izmerjene vrednosti vhodnega signala sproti zapisuje v pomnilnik. Shranjene signale iz pomnilnika

osciloskop riše na ekran. Do risanja pride kasneje, ko je potrebno število vzorcev že shranjeno v pomnilniku. Zato je slika na zaslonu osciloskopa stalna in ne utripa ne glede na hitrost ponavljanja vhodnega signala (Ponikvar, 2007).

Spektralni analizator (shema na sliki 15) je v bistvu superheterodinski sprejemnik, ki ga elektronsko uglašujemo tako, da z žagasto napetostjo krmilimo napetostno krmiljen oscilator (VCO – voltage controlled oscillator). Ta žagasta napetost pomeni istočasno os x na zaslonu. Vhodni signal mešamo s signalom VCO in ga preko medfrekvenčnega ojačevalnika vodimo na os y , tako da je vertikalni odklon proporcionalen amplitudi vhodnega signala. Če bomo torej počasi preleteli z žagasto napetostjo celo frekvenčno področje VCO, bomo na izhodu mešalnika dobili široko področje frekvenc, na izhodu medfrekvenčnega ojačevalnika pa le frekvenco, ki jo ta prenaša. Spektralna črta na zaslonu je torej prevajalna funkcija medfrekvenčnega ojačevalnika, širina črte pa njegova pasovna širina. Pogosto želimo to pasovno širino tudi spreminjati. Med vsemi različnimi spektralnimi analizatorji so danes najbolj zmogljivi merilniki za radijsko in mikrovalovno področje frekvenc. Radijski oz. mikrovalovni spektralni analizatorji pokrijejo širok frekvenčni pas (razmerje med najnižjo in najvišjo merjeno frekvenco, npr. 9 kHz – 3 GHz), obvladajo veliko dinamiko jakosti vhodnih signalov (razmerje med najšibkejšim in najmočnejšim merjenim signalom preko 120 dB) in hkrati zmorejo razločiti signale, ki so frekvenčno zelo blizu (Kozjek in Oštrek, 2007).



Slika 15: Shema delovanja spektralnega analizatorja.

Strojna oprema uporabljena za potrebe testiranja je vključevala:

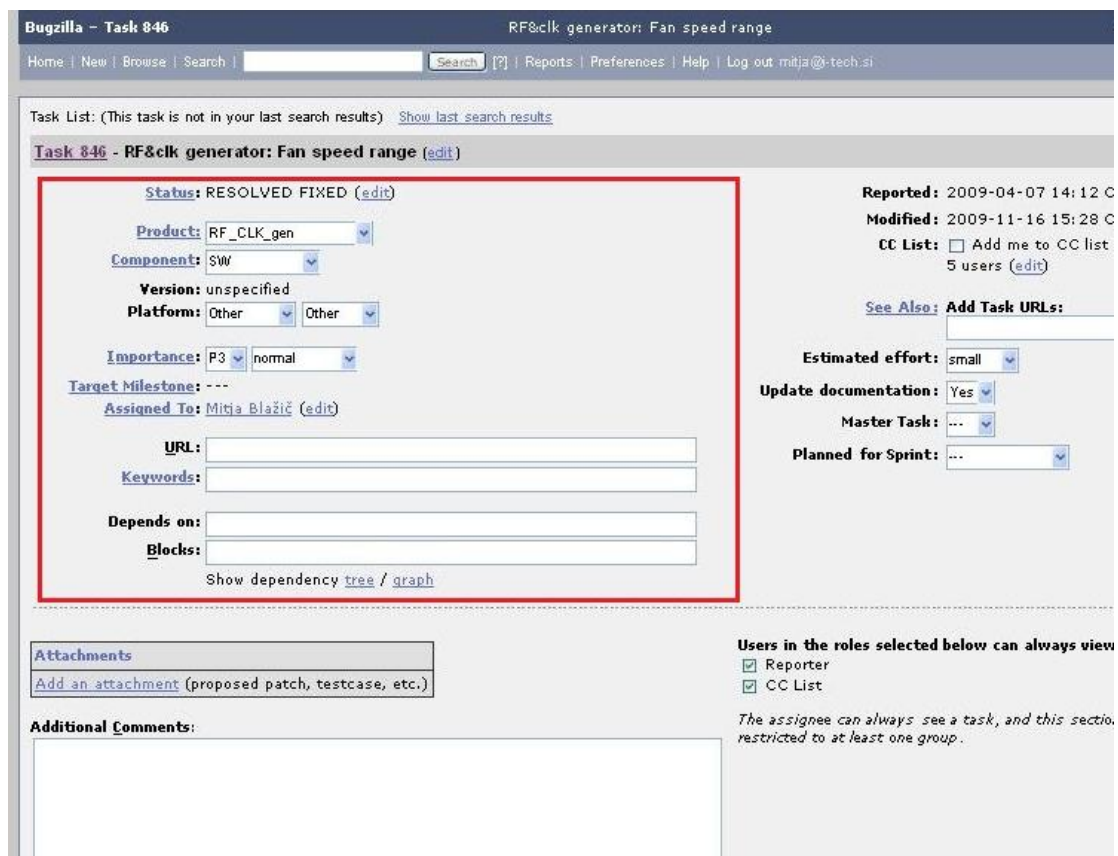
- Osciloskop Tektronix TDS 3034. Uporabljen za meritve signalov iz VN in NN priključkov. Osnovne karakteristike: 4 kanalen, 300 MHz pasovna širina, avtomatske meritve (čas vzpenjanja in padanja, frekvence, amplitude, prevajalnega razmerja ...);
- Spektralni analizator Rohde&Schwarz FSP. Uporabljen za meritve RF signalov. Pasovna širina merjenja od 9 kHz do 3 GHz, amplitudno območje od -140 do +30 dBm.

3.2.2 Organizacija in izvedba testiranja

V projekt izdelave naprave »*RF & clock generator*« nas je bilo vključenih 5 oseb – projektni vodja (tudi v vlogi razvijalca strojne opreme), produktni vodja, razvijalec programske opreme, vodja kontrole kvalitete in testni inženir.

Odkrivanje napake poteka po naslednjem postopku: pred začetkom testiranja je testna ekipa pripravila testne procedure v skladu z zahtevami, nakar smo nadaljevali z izvajanjem testiranja. Pomembna je kvaliteta teh testnih primerov, vodenje njihovega izvajanja ter zapisovanje njihovih rezultatov. Prav tako pomembno je zapisovanje napak za posamezno verzijo izdelane programske ali strojne opreme, njihovo arhiviranje in označevanje ter arhiviranje verzij produkta. Nujno je, da najdeno napako vpišemo v orodje za sledenje napakam. To orodje mora omogočati arhiviranje napak in ne sme pustiti zbrisati napake iz svoje baze. V vsakem trenutku mora imeti podatek, kakšen je status napake in kdo se ukvarja z njo. Takšno orodje za zasledovanje napak je na primer Bugzilla, programska oprema podjetja Firefox (Križnik, 2002).

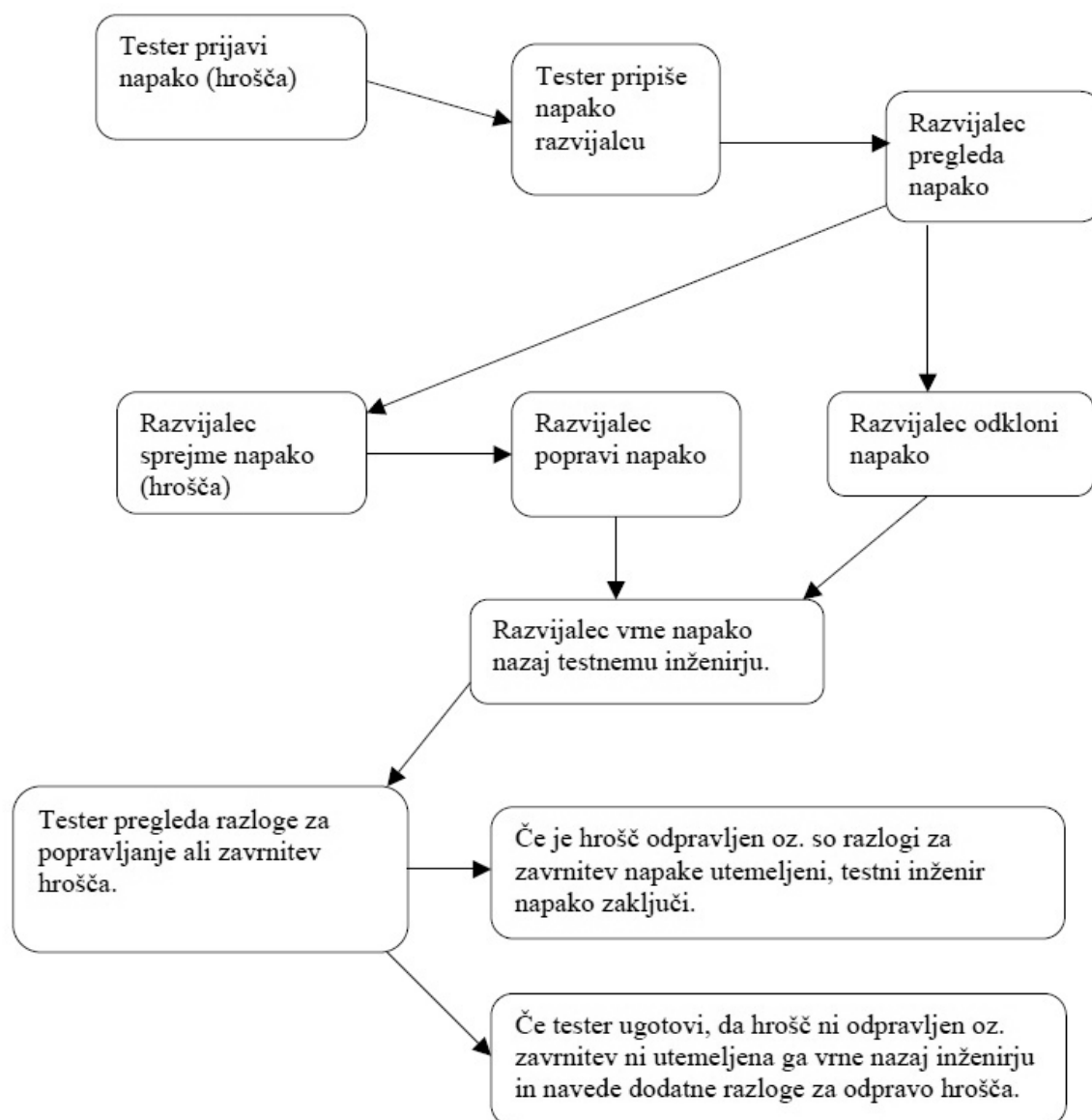
Ko je napaka odkrita, jo testni inženir vpiše v orodje za sledenje napak (glej sliko 16). V tem trenutku je potrebno določiti inženirja, ki bo zadolžen za odpravo te napake.



Slika 16: Postopek organiziranja v skupini pri reševanju napake s pomočjo programa Bugzilla. Pri obrazcu za kreiranje nove napake izberemo ime naprave, področje (programska, strojna oprema), pomembnost napake (1-5), ime osebe, kateri bo naloga dodeljena, in vsebino problema.

Ponavadi ga določi testni inženir ali pa vodja projekta. Napaka spremeni status iz »nov« (ang. new) v status »zadolžen« (ang. assigned). Kdo je ta razvijalec, ki je odgovoren za napako, je pomembno zapisati, saj se lahko skozi več verzij programa ta podatek izgubi, kar ima lahko za posledico nerešeno napako. Razvijalec nato pregleda napako in oceni situacijo. Lahko sprejme napako in jo začne reševati ali pa jo zaradi različnih razlogov ovrže. Če razvijalec potrди napako, jo mora odpraviti in javiti testnemu inženirju, ki je našel napako, ali je bila napaka res odpravljena. Napaka dobi status »rešena« (ang. resolved), ko pa testni inženir potrди, da je napaka odpravljena, dobi status »preverjeno« (ang. verified). Nato testni inženir zaključi krog napake. Če se razvijalec odloči, da prijavljena napaka ni v njegovi domeni oz. da to sploh ni napaka, ga preda drugemu inženirju oziroma ga vrne testnemu inženirju z navedenim vzrokom zavrnitve. Vzroki zavrnitve so lahko različni, npr:

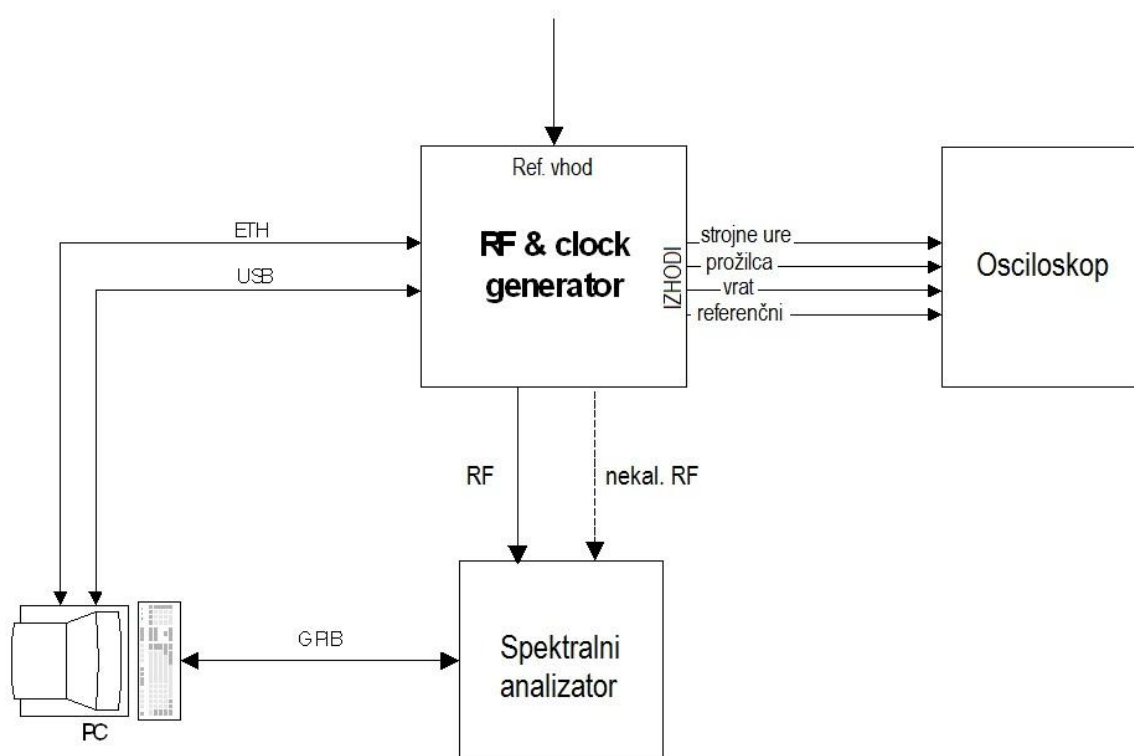
»to ni problem dizajna« ali »napaka se ne da reproducirati« ... Napaka v tem primeru dobi status »zaprta« (ang. closed). Napaka je lahko dvojniki kakšne druge napake. V tem primeru dobi status podvojena (ang. duplicated). Nikoli pa se ne da nobene napake izbrisati in vedno lahko preverimo v kakšnem stanju je napaka ter v kateri verziji je bila odpravljena. Pogledamo lahko tudi celotno zgodovino napake (Križnik, 2002). Zaporedje aktivnosti v življenjskem ciklu napake je predstavljeno na sliki 17.



Slika 17: Diagram aktivnosti v življenjskem ciklu napake (Sistematično testiranje programske opreme v računalniških podjetjih, 2002).

4 TESTIRANJE SIGNALOV

Vsa testiranja in rezultati meritev so bili osnovani na petih vzorcih naprave »RF & clock generator«. Na sliki 18 je prikazana postavitve testnih inštrumentov za testiranje teh naprav. Podroben opis sledi v nadaljevanju.



Slika 18: Shema testne postavitve naprave »RF & clock generator«. Priklopljen je na osciloskop, spektralni analizator in PC.

4.1 Rezultati meritev signalov RF izhodov

Največja pozornost izmed vseh priključkov naprave »RF & clock generator« je pripadala izhodu radijskih frekvenc (RF izhod), ki proizvaja signal sinusne oblike. Signalu iz RF izhoda smo kot vedno preverjali točnost frekvence in amplitude ter opravili še nekaj dodatnih testov. Meritve razmerja signal/šum nismo izvajali, smo se pa zato osredotočili na meritev faznega šuma. V kolikor bi bilo razmerje signal/šum slabo, bi se to odražalo tudi na meritvah faznega šuma.

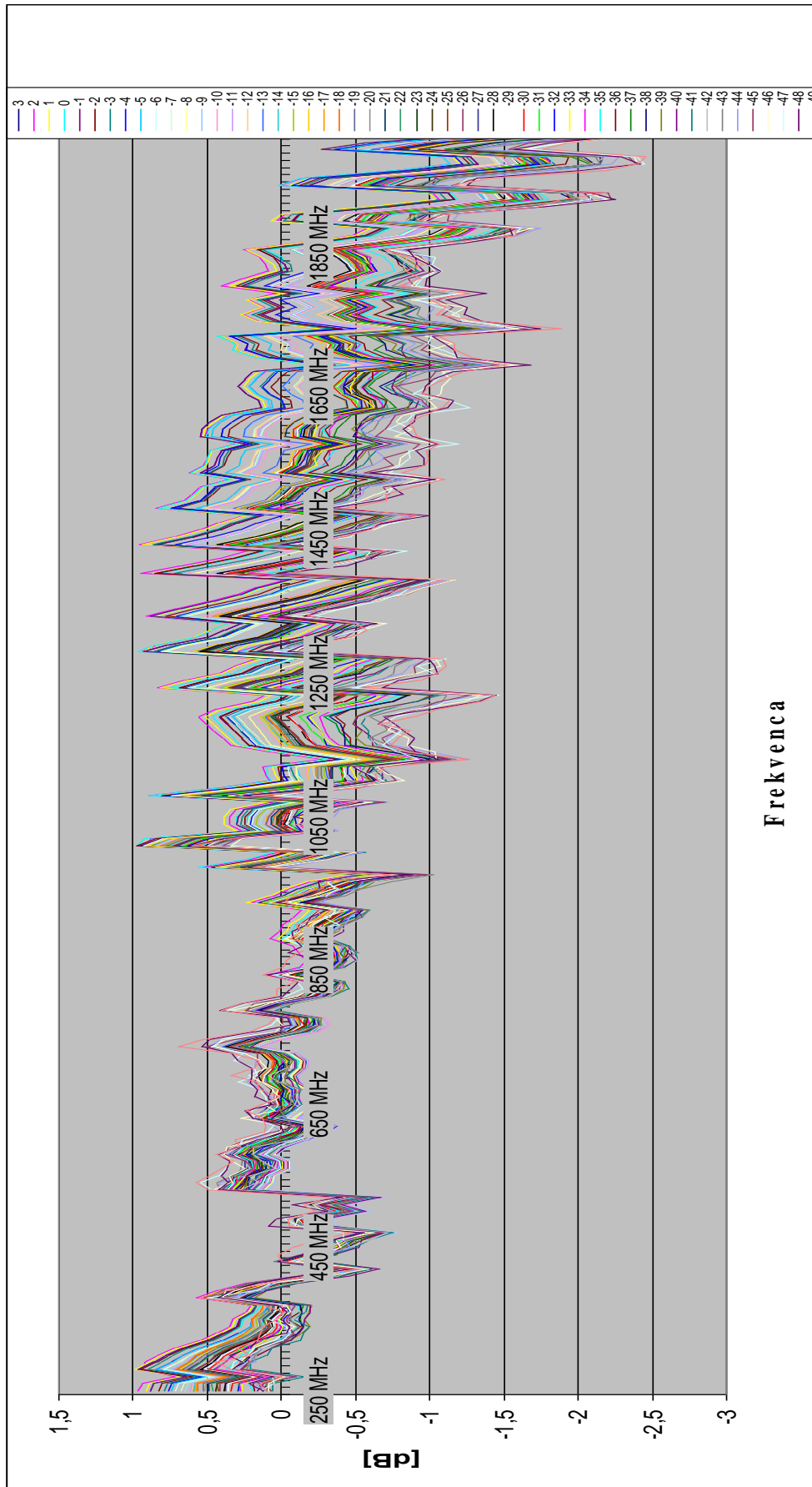
Meritve signala so bile opravljene s spektralnim analizatorjem R&S FSP, ki smo ga krmilili na daljavo skupaj z napravo »RF & clock generator« preko PC-ja. Testne

procedure za samodejno testiranje smo imeli pripravljene v Matlabu. Tabela 3 vsebuje podatke o izmerjenih frekvencah na treh območjih pri treh amplitudnih nivojih. Ker je bil RF izhod na vseh testnih napravah »RF & clock generator« pred testom kalibriran, so odstopanja minimalna. Dovoljeno odstopanje je ± 0.005 MHz. Iz meritev je razvidno, da amplituda signala ne vpliva na točnost frekvence. Če bi hoteli frekvenco nastaviti točneje, bi potrebovali natančnejšo kalibracijsko metodo.

Tabela 3: Meritve točnosti izbranih frekvenc pri različnih amplitudah RF signala

Nastavljena frekvenca	250 MHz	1000 MHz	2000 MHz
Odstopanje od pričakovane frekvence pri 0 dBm [MHz]	$-0,0004 \pm 0,0001$	$-0,0003 \pm 0,0001$	$-0,0004 \pm 0,0001$
Odstopanje od pričakovane frekvence pri -20 dBm [MHz]	$-0,0004 \pm 0,0001$	$-0,0003 \pm 0,0001$	$-0,0004 \pm 0,0001$
Odstopanje od pričakovane frekvence pri -40 dBm [MHz]	$-0,0004 \pm 0,0001$	$-0,0003 \pm 0,0001$	$-0,0004 \pm 0,0001$
Dovoljeno odstopanje je 0.005 MHz			

Točnost amplitud signalov pri določenih frekvencah smo testirali podrobneje, ker je za nas to ključnega pomena na tem priključku. Izvedli smo test, pri katerem smo na celotnem frekvenčnem območju 250 MHz – 2000 MHz s korakom po 10 MHz merili odstop amplitude glede na nastavljeno vrednost. Taka meritev je bila opravljena za razpon relativnih moči od +3 dBm do -49 dBm. Pri nižjih relativnih močeh nismo testirali, ker so te moči praktično zanemarljive. Pri višjih relativnih močeh od 3 dBm pa tudi ni bilo mogoče testirati na celotnem frekvenčnem območju zaradi strojnih omejitev naprave. Naprava »RF & clock generator« namreč pri najvišji frekvenci 2 GHz proizvede le 3 dBm moči. Ta moč linearno raste z nižanjem frekvence in tako pri 250 MHz lahko dosežemo 15 dBm. Na sliki 19 je prikazano odstopanje amplitude od nastavljenе vrednosti na celotnem frekvenčnem razponu za vsako izmed 53-ih izbranih amplitud.



Slika 19: Odstopanje amplitude signala od nastavljene vrednosti na celotnem frekvenčnem razponu RF signala

Zahteve smo imeli zastavljene takole:

- Od 250 MHz do 1450 MHz. Dovoljen odstop amplitude v pozitivno 1 dBm, v negativno smer pa 1,5 dBm.
- Od 1460 MHz do 2000 MHz. Dovoljen odstop amplitude v pozitivno 1 dBm, v negativno smer pa 2,5 dBm.

Izmerjeni signali so se v nekaj primerih približali zgornji in spodnji meji dovoljenih odstopanj, vendar je niso presegli. Pri testiranju smo ugotovili, da temperatura v merjenih instrumentih igra veliko vlogo pri rezultatih na RF izhodu. Zato so bile vse naprave za doseg takšnih rezultatov prižgane vsaj 2 uri pred meritvami, da se je temperatura naprav stabilizirala. Meritve so potekale v temperaturno stabilnem okolju. Za doseganje boljših rezultatov, kar se tiče točnosti amplitude, bi morali poskusiti z boljšo oz. natančnejšo kalibracijsko metodo, ki pa v času systemskega testa ni bila na voljo.

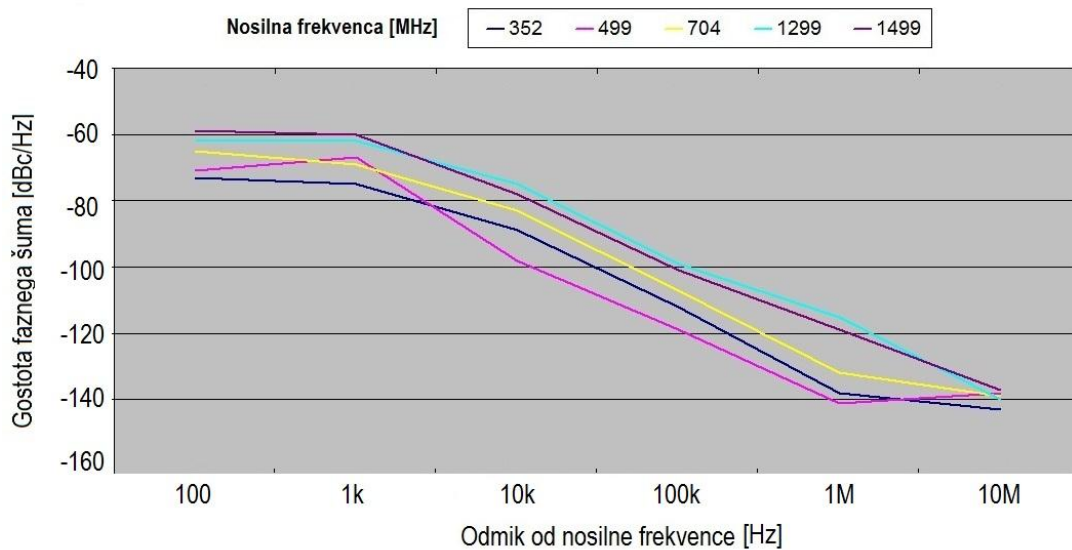
4.1.1 Test faznega šuma

Test faznega šuma je potekal pri petih različnih nosilnih frekvencah na RF izhodu naprave »*RF & clock generator*«. Vsaki izmed nosilnih frekvenc smo izmerili fazni šum pri šestih frekvencah odmaknjenih od nosilne frekvence za 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz in 10 MHz (tabela 4). Frekvenca 10 MHz odmika od nosilne frekvence je zgornja meja meritev faznega šuma, ker se od tu naprej motnje smatrajo že kot neželen šum, in ne več kot fazni šum. Meritev je potekala tako, da smo s spektralnim analizatorjem izmerili relativno gostoto moči signala v frekvenčnem pasu 1 Hz okrog izbrane frekvence odmaknjene od nosilne frekvence. Meritev smo opravljali z natančnostjo 1 dBc/Hz.

Tabela 4: Vrednosti faznega šuma na RF izhodu za različne nosilne frekvence. Rezultati so v dBc/Hz. Pod vsako vrstico z nosilno frekvenco je napisana zgornja dovoljena meja faznega šuma.

	100 Hz	1kHz	10 kHz	100 kHz	1 MHz	10 MHz
352 MHz	-73	-75	-89	-112	-138	-143
Maks. šum	-65	-65	-80	-100	-120	-120
499 MHz	-71	-67	-98	-119	-141	-138
Maks. šum	-65	-65	-80	-100	-120	-120
704 MHz	-65	-69	-83	-107	-132	-139
Maks. šum	-60	-60	-75	-100	-120	-120
1299 MHz	-62	-62	-75	-99	-115	-140
Maks. šum	-58	-58	-70	-90	-110	-120
1499 MHz	-59	-60	-78	-101	-119	-137
Maks. šum	-55	-55	-70	-90	-110	-120

Za lažje razumevanje rezultatov iz tabele 4 so na sliki 20 prikazani rezultati meritev. Rezultati so povprečne vrednosti vseh petih testnih naprav »RF & clock generator« in so popolnoma znotraj zahtev. Na sliki 20 vidimo, da je na začetku pri odmiku 100 Hz od nosilne frekvence gostota faznega šuma največja in se z odmikanjem od nosilne frekvence manjša. Tako imamo najnižjo gostoto faznega šuma v glavnem pri odmiku 10 MHz od nosilne frekvence. Barvne črte na sliki 20 prikazujejo meritve za različne nosilne frekvence. Meritve so pokazale, da so rezultati praviloma precej pod dovoljenimi mejami pri vseh odmikih od nosilne frekvence.



Slika 20: Fazni šum naprave »RF & clock generator« v odvisnosti od frekvence za pet nosilnih frekvenc (temno modra - 352 MHz, rožnata – 499 MHz, rumena 704 MHz, turkizna 1299 MHz, vijolična 1499 MHz). Skala na osi x je logaritemska.

Praktična primerjava naprave »RF & clock generator« z generatorjem podjetja Hewlett-Packard

Da bi lažje razumeli vse meritve, smo naredili praktičen test, ki nam je pokazal dejansko uporabnost RF izhoda na napravi »RF & clock generator«. Namen izdelave tega instrumenta ni bil vrhunski izvor RF signala, ampak signal, ki bo ustrezal in zadovoljil potrebe testiranja in razvoja ostalih naprav podjetja Instrumentation Technologies d.d. Izvedli smo performančni test naprave Libera Brilliance (merilnik pozicije žarka pri sinhrotronskih pospeševalnikih), na katero je bil enkrat priključen signal z RF generatorja, drugič pa referenčni generator HP 8657A. Ta HP generator je bil še do nedavnega uporabljan za simulacijo sinhrotronskega žarka in uradne performančne meritve Libera Brilliance naprave, katera meri pozicijo žarka reda nekaj 10 nm natančno in skrbi za čim boljšo resolucijo meritev. Rezultati meritev med obema generatorjema so bili primerljivi, kar je bilo nad našimi pričakovanji. Na primer: resolucija meritve pozicije s HP-jevim generatorjem je bila pod 1 μm , pri HP generatorju do vhodne moči -56 dBm , pri našem generatorju pa -54 dBm .

Nekalibriran RF izhod (»RF uncal. out«) je še drugi RF izhod, na napravi »RF & clock generator«. Temu izhodu ni mogoče nastavljati amplitude signala, spreminjati

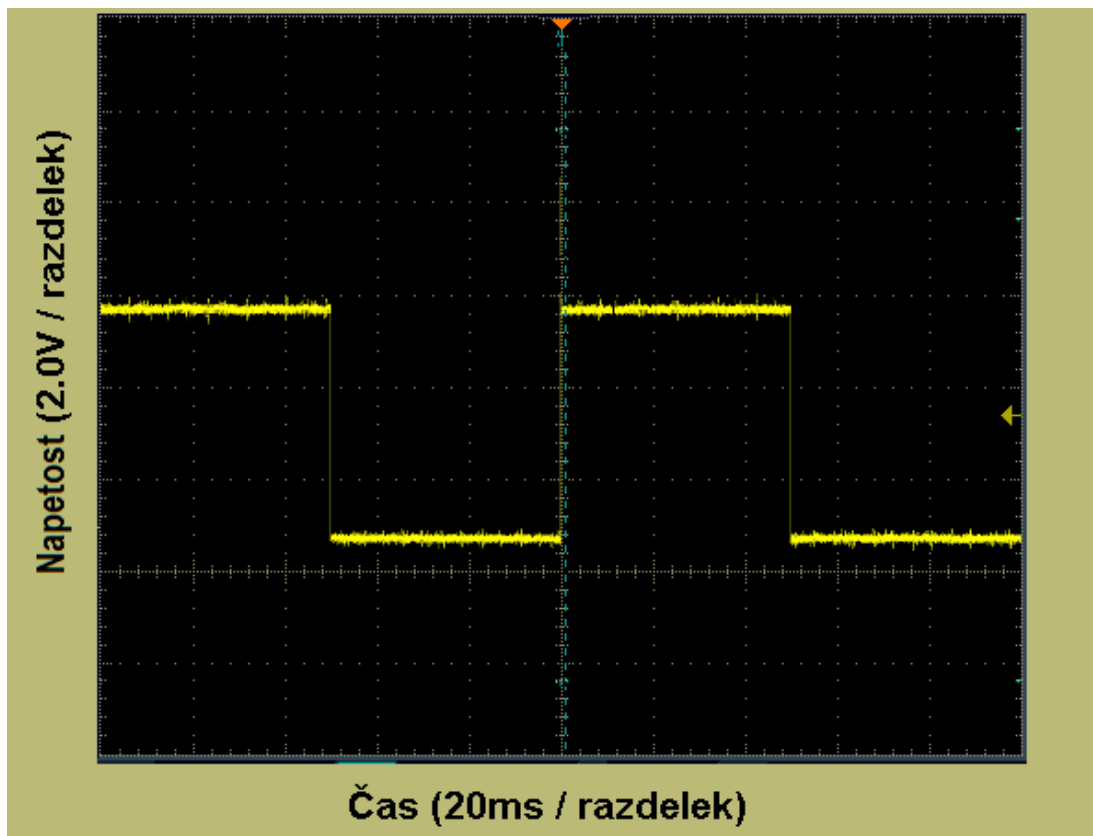
mu je mogoče samo frekvenco in to istočasno kot RF izhodu. Relativna amplituda signala je pri vseh frekvencah okoli ničle z dovoljenim odstopanjem ± 5 dB. Na testu smo merili samo, če je amplituda v omenjenem frekvenčnem razponu znotraj dovoljenih odstopanj (tabela 5).

Tabela 5: Izmerjena amplituda signala na nekalibriranem RF izhodu

Frekvenca [MHz]	Odstopanje amplitude nekal. RF izhoda [dBm]	Dovoljeno odstopanje [dBm]
250	$3,8 \pm 0,8$	$\pm 5,0$
500	$1,7 \pm 0,8$	
1000	$0,1 \pm 0,8$	
1500	$1,0 \pm 0,8$	
2000	$-2,5 \pm 0,8$	

4.2 Testiranje izhodnih in vhodnih urinih signalov

Testirali smo signale iz NN in VN izhoda strojne ure, prožilca in reference/vrat. Edini vhod na zadnji stranici je VN referenčni 10 MHz. Poljubna vhodna priključka NN in VN (custom in) nismo testirali, ker v trenutni programski različici njuna funkcionalnost ni bila podprta. Meritve vsakega signala so bile opravljene z osciloskopom Tektronix TDS 3034, od tod so tudi zaslonske slike v nadaljevanju (21 - 25). Kriteriji ustreznosti bodo v nadaljevanju opisani v tabelah z rezultati. Oblike signalov iz VN in NN priključkov so vedno kvadratne oblike. Slika 21 prikazuje primer kvadratnega signala prožilca na VN izhodu.



Slika 21: Signal prožilca na VN izhodu je kvadratne oblike, njegova frekvenca je 10 Hz.

Skupne meritve lastnosti signalov na obeh vrstah priključkov so zajemale naslednje lastnosti signalov:

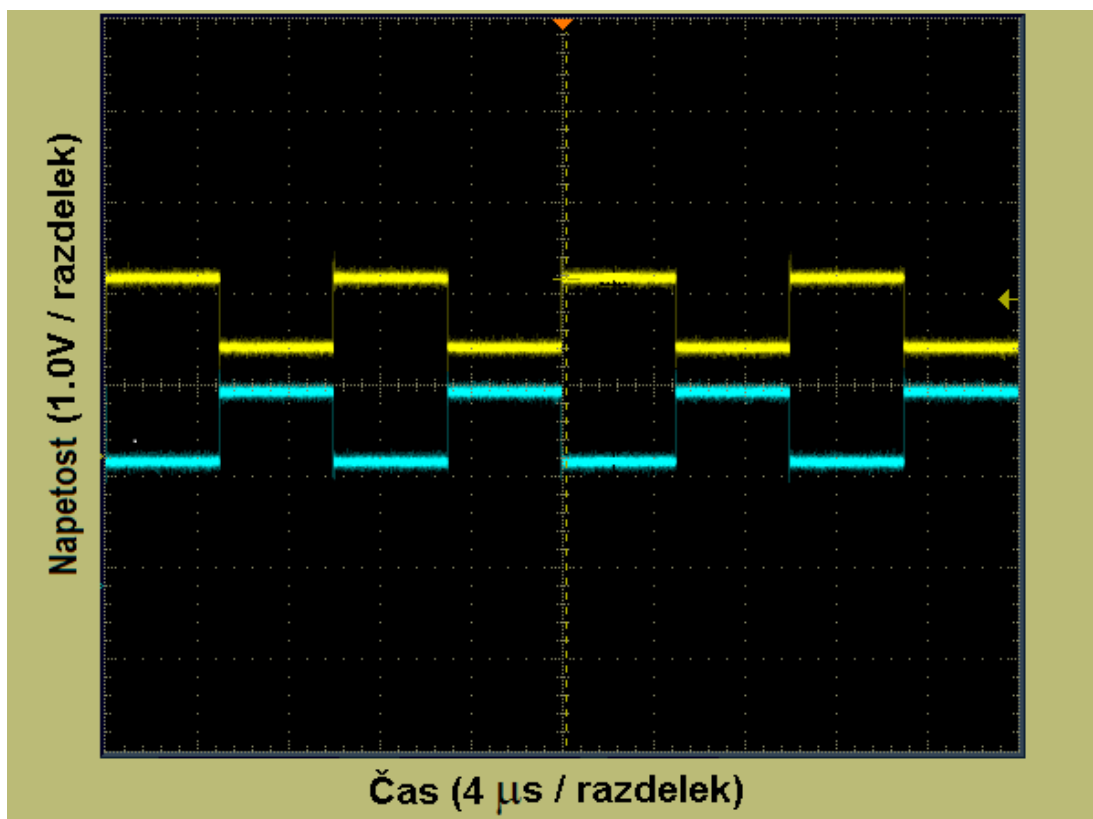
- Frekvenca signala. Sprejemljiv rezultat je 0,01 % odstopanja od nominalne frekvence v pozitivno ali negativno smer. Frekvenco smo odčitali iz zaslona osciloskopa.
- Amplituda signala. Nominalna izhodna napetost signala na VN priključku je 5 V. Sprejemljiva odstopanja so 15 % od nominalne napetosti v pozitivno ali negativno smer. Nominalna izhodna napetost signala na NN priključku je 800 mV s prav tako 15 % dovoljenim odstopanjem. Odstopanja so lahko višja od navedenih v primeru visokih prenehajev, kar pa ne vpliva bistveno na uporabnost signala.
- Čas vzpenjanja in padanja signala. Signalu se spreminjata ti dve lastnosti glede na frekvenco. Mejne vrednosti so zabeležene v tabelah v nadaljevanju.

4.2.1 Rezultati meritev izhoda strojne ure

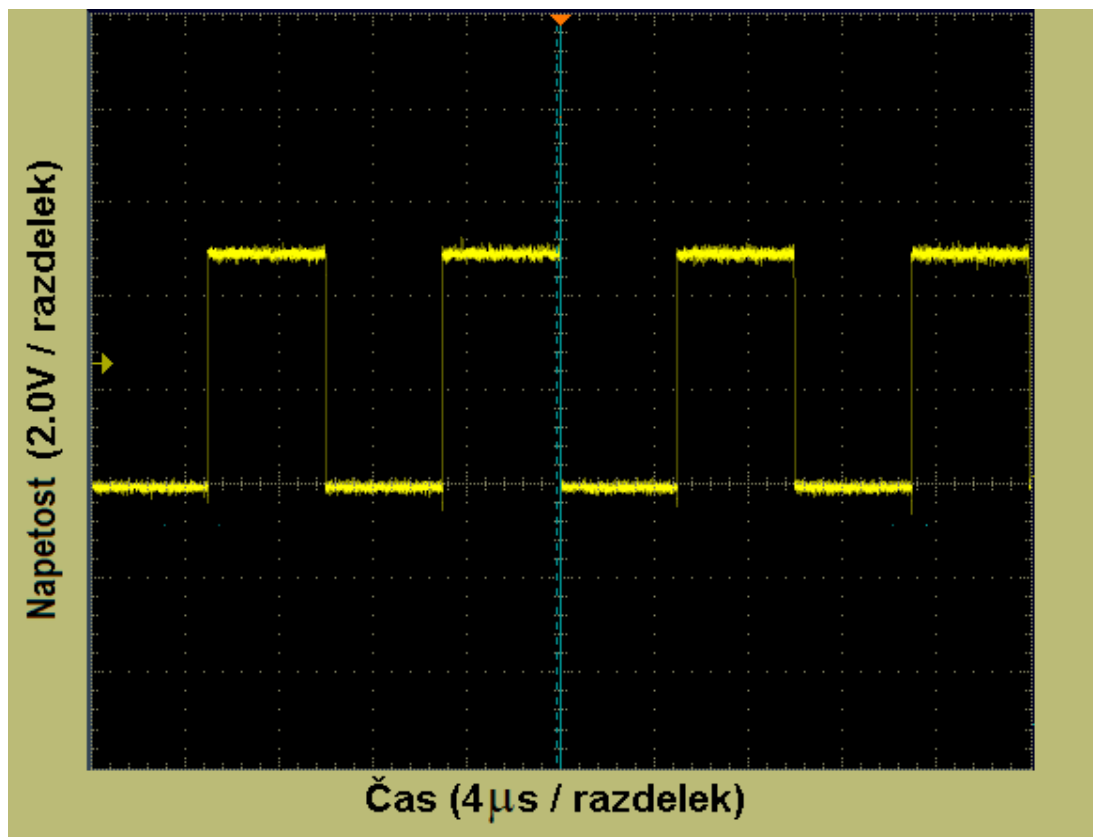
V tabelah 6 in 7 najdemo rezultate točnosti frekvenc in amplitud signalov na NN ter VN izhodih za izhod strojne ure (MC – machine clock) pri različnih frekvencah. Rezultati meritev se med RF in DDS načinoma niso razlikovali, zato meritve v nadaljevanju veljajo za oba načina, dejansko pa so bili merjeni v RF načinu. Rezultati so pri vseh meritvah povprečni glede na rezultate meritev petih testnih naprav »RF & clock generator«.

Na slikah 22 in 23 vidimo 100 kHz signal iz NN in VN izhodov strojne ure. Razliko je videti v velikosti signala, torej v amplitudi. Razlika med VN in NN signalom je tudi v tem, da je signal iz NN izhoda diferencialni, kar pomeni, da imamo dva identična signala, zrcaljena preko osi x oz. fazno zamaknjena za 180° .

Slika 22 prikazuje primer 100 kHz signala iz NN izhoda strojne ure.



Slika 22: Signal na NN izhodu strojne ure s frekvenco 100 kHz.



Slika 23: Signal iz VN izhoda strojne ure s frekvenco 100 kHz.

V tabelah 6 in 7 so prikazani rezultati meritev točnosti frekvence in amplitude na NN ter VN izhodih strojne ure. Izbrali smo 3 frekvenčna območja za meritve – najnižjo (100 kHz), najvišjo (20,833 MHz) možno frekvenco generatorja in eno vmesno (5,029 MHz). Obe merjeni količini sta bili znotraj dovoljenega območja odstopanja.

Tabela 6: Rezultati meritev signalov NN izhoda strojne ure

NN – zahtevana frekvenca	100 kHz	5029 kHz	20833 kHz
Odstopanje od pričakovane vrednosti [kHz]	$0,0 \pm 0,1$	$0,1 \pm 0,4$	$2,0 \pm 2,0$
Dovoljeno odstopanje [kHz]	1,0	5,0	20,0
Zahtevana napetost [V] pri frekvenci	0,80	0,80	0,80
Odstopanje od pričakovane napetosti [V]	$0,03 \pm 0,01$	$0,05 \pm 0,01$	$0,09 \pm 0,01$
Dovoljeno odstopanje [V]	0,12	0,12	0,12

Tabela 7: Rezultati meritev signalov VN izhoda strojne ure

VN – zahtevana frekvenca	100 kHz	5029 kHz	20833 kHz
Odstopanje od pričakovane vrednosti [kHz]	$0,0 \pm 0,1$	$0,2 \pm 0,4$	$2,0 \pm 2,2$
Dovoljeno odstopanje [kHz]	1,0	5,0	20,0
Zahtevana napetost [V] pri frekvenci	5,0	5,0	5,0
Odstopanje od pričakovane napetosti [V]	$0,2 \pm 0,1$	$0,6 \pm 0,1$	$0,5 \pm 0,1$
Dovoljeno odstopanje [V]	0,75	0,75	0,75

Tabela 8 prikazuje, tako kot pri prejšnji meritvi, rezultate meritev časa vzpenjanja in padanja signalov na NN ter VN izhodih strojne ure pri enakih frekvencah. Na obeh izhodih so vsi časi globoko znotraj zahtev.

Tabela 8: Čas vzpenjanja in padanja signalov na NN in VN izhodih strojne ure

NN izhd	100 kHz	5029 kHz	20833 kHz
Dovoljeni čas vzp./pad. [ns]	<10,0	<10,0	<10,0
Čas vzpenjanja [ns]	$2,4 \pm 1,1$	$3,6 \pm 1,4$	$3,5 \pm 1,0$
Čas padanja [ns]	$2,6 \pm 1,1$	$3,6 \pm 1,1$	$3,6 \pm 1,1$
VN izhod			
Dovoljeni čas vzp./pad. [ns]	<10,0	<10,0	<10,0
Čas vzpenjanja [ns]	$5,4 \pm 1,7$	$5,0 \pm 1,6$	$4,8 \pm 1,9$
Čas padanja [ns]	$3,2 \pm 1,0$	$2,6 \pm 1,2$	$2,6 \pm 1,3$

4.2.2 Rezultati meritev izhoda prožilca

V tabelah 9 in 10 najdemo rezultate točnosti izmerjenih frekvenc in amplitud na NN ter VN izhodih prožilca pri različnih frekvencah. Rezultati meritev se tudi tu med RF in DDS načinoma niso razlikovali. Merilno območje je bilo od 10 Hz do 1003,2 Hz.

Tabela 9: Rezultati meritev signalov NN izhoda prožilca

NN – zahtevana frekvenca	10 Hz	300,4 Hz	1003,2 Hz
Odstopanje od pričakovane vrednosti [Hz]	$-0,1 \pm 0,1$	$0,1 \pm 0,1$	$0,2 \pm 0,1$
Dovoljeno odstopanje [Hz]	0,5	0,5	0,5
Zahtevana napetost [V] pri frekvenci	0,80	0,80	0,80
Odstopanje od pričakovane napetosti [V]	$0,03 \pm 0,01$	$0,02 \pm 0,01$	$0,01 \pm 0,01$
Dovoljeno odstopanje [V]	0,12	0,12	0,12

Tabela 10: Rezultati meritev signalov VN izhoda prožilca

VN – zahtevana frekvenca	10 Hz	300,4 Hz	1003,2 Hz
Odstopanje od pričakovane vrednosti [Hz]	$0,1 \pm 0,1$	$0,1 \pm 0,1$	$-0,2 \pm 0,1$
Dovoljeno odstopanje [Hz]	0,5	0,5	0,5
Zahtevana napetost [V] pri frekvenci	5,0	5,0	5,0
Odstopanje od pričakovane napetosti [V]	$0,2 \pm 0,1$	$0,2 \pm 0,1$	$0,2 \pm 0,2$
Dovoljeno odstopanje [V]	0,75	0,75	0,75

Tabela 11 prikazuje rezultate meritev časa vzpenjanja in padanja signalov na NN ter VN izhodih pri različnih frekvencah. Opaziti je bistveno večje čase vzpenjanja in

padanja pri nižjih frekvencah (nekaj Hz) kot pri visokih (nekaj MHz). Relativna odstopanja pa so v vseh primerih podobna in se gibljejo v razponu od tisoči do deset tisoči del ene periode signala.

Tabela 11: Čas vzpenjanja signalov pri NN in VN izhodu prožilca

NN izhod	10 Hz	300,4 Hz	1003,2 Hz
Dovoljeni čas vzp./pad.	<100,0 μ s	<1000,0 ns	<500,0 ns
Čas vzpenjanja	14,6 \pm 3,1 μ s	665,7 \pm 4,5 ns	323,4 \pm 3,3 ns
Čas padanja	15,4 \pm 4,1 μ s	646,2 \pm 4,8 ns	338,7 \pm 5,0 ns
VN izhod			
Dovoljeni čas vzp./pad.	<100,0 μ s	<1000,0 ns	<500,0 ns
Čas vzpenjanja	15,9 \pm 3,5 μ s	544,3 \pm 6,8 ns	161,2 \pm 4,8 ns
Čas padanja	16,1 \pm 5,1 μ s	536,2 \pm 4,4 ns	158,9 \pm 5,6 ns

Časi vzpenjanj in padanj so tudi na izhodih prožilca globoko znotraj specifikacij. To pomeni, da je oblika signala lepa – kvadratna, nad pričakovanji. Tudi točnost amplitud in frekvenc se ne približuje dovoljenim mejnim vrednostim, kar potrjuje kvalitetno delovanje VN in NN izhodov signalov.

4.2.3 Rezultati meritev vrat / referenčnega izhoda

V tem primeru se funkcionalnosti med NN in VN priključkoma razlikujeta. Oba priključka ustvarjata referenčni signal s frekvenco 1 ali 10 MHz. VN izhodu lahko nastavimo še funkcijo vrat, kjer izbiramo med različnimi prevajalnimi razmerji (PR) za različne frekvence. Rezultati so vidni v tabelah 12, 13 in 14. Funkcionalnost izhoda smo testirali pri treh različnih prevajalnih razmerjih in merili natančnost amplitude in frekvence.

Izhod vrat

Tabela 12: Rezultati meritev odstopanja frekvenc signalov VN izhoda vrat od pričakovane vrednosti pri prevajalnem razmerju 10 %

Nastavljeno PR (10%)	100 kHz	1000 kHz	15000kHz
Izmerjena frekvenca - odstopanje od pričakovane vrednosti [kHz]	$0,0 \pm 0,1$	$0,1 \pm 0,2$	$4,5 \pm 0,8$
Dovoljeno odstopanje [kHz]	0,5	1	10
Odstopanje od pričakovanega PR [%]	$0,2 \pm 0,3$	$0,2 \pm 0,6$	$0,3 \pm 0,4$
Dovoljeno odstopanje PR [%]	3,0	3,0	3,0
Zahtevana napetost [V] pri frekvenci	5,0	5,0	5,0
Odstopanje od pričakovane napetosti [V]	$0,2 \pm 0,1$	$0,4 \pm 0,1$	$0,6 \pm 0,1$
Dovoljeno odstopanje [V]	0,75	0,75	0,75

Tabela 13: Rezultati meritev odstopanja frekvenc signalov VN izhoda vrat od pričakovane vrednosti pri prevajalnem razmerju 50 %

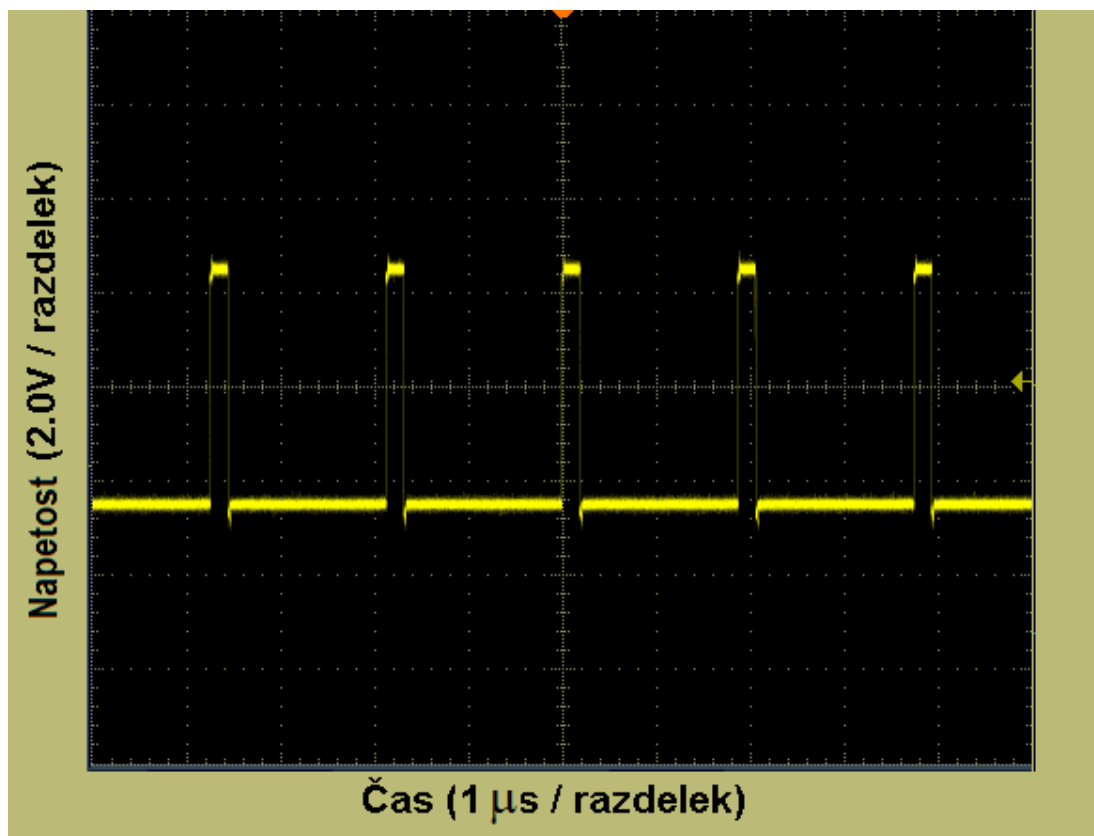
Nastavljeno PR (50%)	100 kHz	1000 kHz	15000kHz
Izmerjena frekvenca - odstopanje od pričakovane vrednosti [kHz]	$0,1 \pm 0,1$	$-0,1 \pm 0,2$	$4,1 \pm 0,6$
Dovoljeno odstopanje [kHz]	0,5	1	10
Odstopanje od pričakovanega PR [%]	$0,1 \pm 0,1$	$2,2 \pm 0,3$	$2,1 \pm 0,7$
Dovoljeno odstopanje PR [%]	3,0	3,0	3,0
Zahtevana napetost [V] pri frekvenci	5,0	5,0	5,0
Odstopanje od pričakovane napetosti [V]	$0,1 \pm 0,1$	$0,4 \pm 0,1$	$0,6 \pm 0,1$
Dovoljeno odstopanje [V]	0,75	0,75	0,75

Tabela 14: Rezultati meritev odstopanja frekvenc signalov VN izhoda vrat od pričakovane vrednosti pri prevajalnem razmerju 90 %

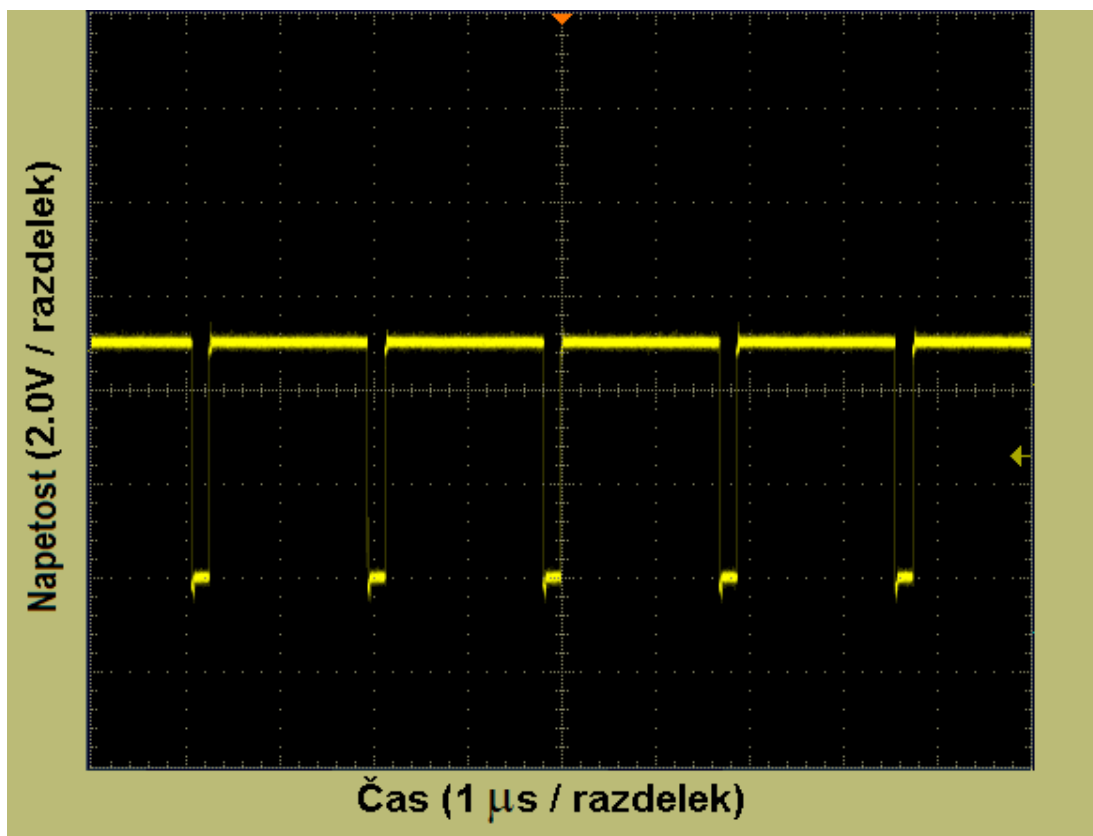
Nastavljeno PR (90%)	100 kHz	1000 kHz	15000kHz
Izmerjena frekvenca - odstopanje od pričakovane vrednosti [kHz]	$0,0 \pm 0,1$	$0,1 \pm 0,2$	$5,5 \pm 1,2$
Dovoljeno odstopanje [kHz]	0,5	1	10
Odstopanje od pričakovanega PR [%]	$0,1 \pm 0,1$	$0,3 \pm 0,3$	$-0,2 \pm 0,7$
Dovoljeno odstopanje PR [%]	3,0	3,0	3,0
Zahtevana napetost [V] pri frekvenci	5,0	5,0	5,0
Odstopanje od pričakovane napetosti [V]	$0,2 \pm 0,1$	$0,4 \pm 0,1$	$0,3 \pm 0,1$
Dovoljeno odstopanje [V]	0,75	0,75	0,75

Testiranje signala na izhodu vrat je poleg frekvence in amplitude zajemalo še prevajalno razmerje in sicer 10 %, 50 % in 90 %. Signal s 50 % prevajalnim razmerjem je skupen vsem do sedaj opisanim izhodom, saj to razmerje pri ostalih izhodih ni nastavljivo. Primer takega signala je bil prikazan na sliki 21. Če ima signal prevajalno razmerje npr. 10 %, pomeni, da je večji del periode v nižjem amplitudnem območju (slika 24). Prevajalno razmerje 90 % ima večji del periode v višjem

amplitudnem območju (slika 25). Rezultati meritev točnosti frekvenc, prevajalnih razmerij in napetosti, nam zopet pričajo o sprejemljivih odstopanjih. Meritev pri 50 % prevajalnem razmerju nam kaže, da smo se približali meji dopustnega odstopanja odstotka prevajalnega razmerja pri 15000 kHz.



Slika 24: VN signal vrat z 10 % prevajalnim razmerjem.



Slika 25: VN signal vrat z 90 % prevajalnim razmerjem.

Referenčni izhod

Test referenčnih izhodov je potekal ločeno za NN in VN pri dveh različnih frekvencah (1 MHz in 10 MHz). Referenčni priključki skrbijo, da generator sklone z drugo napravo fazno zanko. Tako se izognemo lezenju faze med povezanimi inštrumenti. 1 MHz referenca je bila v napravi »RF & clock generator« implementirana zavoljo specifične želje stranke, sicer se uporablja pri takih in podobnih napravah povsod standardno referenco s frekvenco 10 MHz. V tabeli 15 so prikazani rezultati meritev VN in NN signalov pri dveh frekvencah.

Tabela 15: Rezultati meritev odstopanja frekvenc signalov za referenčna izhoda NN
in VN

Zahtevana frekvenca	NN izhod		VN izhod	
	1 MHz	10 MHz	1 MHz	10 MHz
Izmerjena frekvenca - odstopanje od pričakovane vrednosti [kHz]	$0,0 \pm 0,1$	$-0,1 \pm 0,1$	$0,0 \pm 0,1$	$-0,1 \pm 0,1$
Dovoljeno odstopanje [MHz]	0,05	10,05	1,05	10,05
Zahtevana napetost [V] pri frekvenci	0,80	0,80	5,0	5,0
Odstopanje od pričakovane napetosti [V]	$0,00 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,02$	$0,6 \pm 0,1$	$0,5 \pm 0,1$
Dovoljeno odstopanje [V]	0,12	0,12	0,75	0,75

Vse izmerjene vrednosti frekvenc in amplitud na NN in VN signalih so znotraj mej. Meritve napetosti na VN izhodu so se približale zgornji meji dovoljenega območja, vendar je niso v nobenem primeru presegle.

4.2.4 Rezultati meritev referenčnega vhoda

VN referenčni vhod s frekvenco 10 MHz služi priklopu generatorja na zunanjo referenco iste frekvence. Kadar naprava »RF & clock generator« zazna na vhodu zunanji referenčni signal, se na zaslonu prikaže znak »EXT«. To pomeni, da je generator sklenil fazno zanko z drugo napravo.

Zaradi dolgih kablov, s katerim sta med seboj povezani napravi, pride do slabljenja signala. Najmanjša izmerjena napetost, s katerim je bil generator sposoben skleniti fazno zanko, je bila 1 V. Oblika kvadratnega signala zaradi nizke napetosti, kljub popačenosti, ni bila ključnega pomena za delovanje.

4.3 Ostala testiranja

Nad testnimi napravami »*RF & clock generator*« smo izvedli tudi neke vrste stresni test. Vsako napravo smo 1000-krat vklopili in izklopili v razmaku deset sekund ter jim nato preverili delovanje. Vse naprave so brez posledic prestale tovrstno testiranje. Za ta test smo uporabili namenski električni razdelilnik z možnostjo daljinskega krmiljenja napajanja.

Eden pomembnih dejavnikov, da naš generator deluje pravilno, je preverjanje napetosti. Naprava »*RF & clock generator*« ima na tiskanem vezju devet kontrolnih točk, kjer se merijo napetosti (1.2 V, 1.8 V, 3.3 V, 5 V, -5 V, 10 V, 10 V, 20 V in 12 V). Napetosti je moč odčitati iz zaslona, preko priključka USB ali mrežne povezave, največje dovoljeno odstopanje pa je ± 0.3 V. Vsa napajanja na naših testnih enotah niso presegla $\pm 0,2$ V odstopanja glede na referenčne vrednosti.

Na koncu so za testiranje ostali še priključki RS232, USB in mrežni (ethernet) priključek. Priključek RS232 se uporablja za nalaganje programske opreme na napravo. Ker je bila ta naložena uspešno, to pomeni, da tudi RS232 deluje pravilno. Test USB ter mrežnega priključka pa sta izgledala tako, da smo se povezali z napravo »*RF & clock generator*« na oba načina in pošiljali generatorju ukaze za nastavljanje parametrov ter odčitke vrednosti. Oba načina komunikacije z napravo sta delovala brez problemov.

4.4 Mehansko testiranje opreme na prednji stranici

Testiranje na sprednji stranici je zajemalo mehansko testiranje treh gumbov (sredinski je rotacijski), fizični pregled namestitve, uporabo teh gumbov in prikazovanje zaslona. Gumbi so morali biti pravilno umeščeni, med pritiskanjem in vrtenjem se niso smeli dotikati stranice. Vsaka aktivnost z gumbi se je morala pravilno odražati na zaslonu. Zaslona je moral prikazovati brezhibno vsa polja

menijev, ustrezati sta morala svetlost in kontrast. Po določenem času zaslon preide v varčevalni način, svetilnost se zniža na minimum. Tipke in zaslon so po mesecu dni uporabe in testiranja še vedno delovali v skladu s specifikacijami. V menijih je bila preverjena zgornja in spodnja meja vseh nastavljivih parametrov. Tako je bilo potrjeno delovanje strojne opreme na prednji stranici naprave »*RF & clock generator*«.

5 ZAKLJUČEK

V sklopu magistrskega dela smo opravili sistemski test naprave »*RF & clock generator*«, ki ga je izdelalo podjetje Instrumentation technologies d.d. iz Solkana. Zasnova sistema testa je vključevala izbiro merilnih inštrumentov, določitev načinov testiranja in kreiranje ustreznih postopkov za izvedbo testiranja. Meritve so bile opravljene na petih vzorcih naprav »*RF & clock generator*«. Primerjave z zahtevanimi specifikacijami so pokazale, da odstopanja izmerjenih vrednosti vseh ključnih parametrov radiofrekvenčnega signala in signalov ure so znotraj dovoljenih mejnih vrednosti. Le pri testiranju odstopanja sinusnega radiofrekvenčnega signala so se izmerjena odstopanja v nekaj primerih približala mejnim vrednostim. Za doseganje bolj natančnih rezultatov meritev bi morali poskrbeti za stabilnejše temperaturno okolje in natančnejše kalibracijske postopke. Na izboljšanje kvalitete meritev bi vplivala tudi uporaba boljše kvalitete kablov za povezavo merjenca in spektralnega analizatorja ter osciloskopa. S tem bi zmanjšali vpliv okolja na natančnost meritve in odpravili morebitne sistematične napake pri meritvah.

Rezultati sistema testa naprave »*RF & clock generator*« so pokazali, da naprava ustreza merilom, katere je bil namen doseči ob izdelavi. Predstavljeni testi so bili skrbno pripravljene glede na obseg testiranja in vrste testov, da bi čim bolj preverili funkcionalnost naprave v čim krajšem času. Če bi imeli na razpolago več virov (denarnih in časovnih), bi lahko naš generator temeljiteje testirali, tu pa se že pojavi vprašanje ekonomske upravičenosti.

Naprava »*RF & clock generator*« se je izkazala za zelo zanesljiv in pogosto uporabljen produkt razvijalcev in testnih inženirjev v podjetju Instrumentation technologies d.d. ter tudi pri njihovih strankah. Naprava »*RF & clock generator*« je še v precejšnji meri izdelana in testirana ročno, ker je bila izdelana v manjšem številu. Če se bo pojavila potreba po večji proizvodnji tega instrumenta in industrializacije proizvodnih postopkov, bo potrebno čim bolj avtomatizirati tudi postopke testiranja, s čimer bi se skrajšal tudi čas testiranja.

LITERATURA

Agilent AWG generator. Pridobljeno 14.3.2011 s svetovnega spleta:
http://www.irct.co.th/resource/products/33250A_800.jpg

Arbitrary Waveform Generator. Pridobljeno 10.3.2011 s svetovnega spleta:
http://www.radio-electronics.com/info/t_and_m/generators/awg-arbitrary-waveform-generator.php

Bergelj, F. (2004). Meritve. Osnovni parametri časovno spremenljivih veličin, poglavje 1.3, str. 29-35.

Brockman B. Jay (2009). Introduction to engineering modeling and problem solving. Poglavje 10 – Vector operations in Matlab. John Wiley and sons, Inc.

Davis, R., What is system testing? Pridobljeno 27.5.2011 s svetovnega spleta:
<http://www.robdavispe.com/free2/software-qa-testing-test-tester-2047.html>

Find the Right Signal Generator. Pridobljeno 27.7.2011 s svetovnega spleta:
<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3348>

Function generator and arbitrary waveform generator (2010), guidebook, BK precision corporation

Hajimiri A., Lee T.H., "A general theory of phase noise in electrical oscillators", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 33, No 2, Feb. 1998 Pages:179 - 194, DOI 10.1109/4.658619

Kaner, C., Bach, J., Pettichord, B., (2002). Lessons learned in software testing. New York: John Wiley & Sons.

Kester W. Converting Oscillator Phase Noise to Time Jitter. Pridobljeno 5.11.2011 s svetovnega spleta: <http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-008.pdf>

Kozjek, N., Oštrek, B. (2007) Spektralni analizator. Pridobljeno 6.9.2011 s svetovnega spleta:
<http://www.google.si/url?sa=t&source=web&cd=12&ved=0CBsQFjABOAO&url=http%3A%2F%2F84-255-203-101.static.t->

2.net%2Ffaks%2Fspektral%2FSeminar_Spektralni_analizator2.doc&rct=j&q=delov
anje%20spektralnega&ei=b6RmTvzQKbPc4QSa1tHQCg&usg=AFQjCNFvRrh_-
kWI0JjKgXwsJJEOYrHPIw&cad=rja

Križnik K. (2002). Sistematično testiranje programske opreme v računalniških podjetjih. Magistrsko delo. Univerza v Ljubljani.

Matlab - The Language Of Technical Computing. Pridobljeno 30.11.2011 s svetovnega spleta: <http://www.mathworks.com/products/matlab/index.html>

Performance testing. Pridobljeno 12.9.2011 s svetovnega spleta: http://en.wikipedia.org/wiki/Performance_testing

Phase noise. Pridobljeno 6.7.2011 s svetovnega spleta: <http://www.qsl.net/kb8vao/MICROACTIVITY.htm>

Ponikvar D. (2007). Za boljšo rabo digitalnega osciloskopa. Pridobljeno 5.9.2011 s svetovnega spleta: <http://www.fmf.uni-lj.si/~ponikvar/PDFji/digitalni%20osciloskop.pdf>

Press W. H., Flannery B. P., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Numerical recipes, Cambridge university press, 1986

RF radio frequency signal generator. Pridobljeno 1.3.2011 s svetovnega spleta: http://www.radio-electronics.com/info/t_and_m/generators/radio-frequency-rf-signal-generator.php

RF signal generator block diagram. Pridobljeno 5.7.2011 s svetovnega spleta: http://www.tpub.com/content/neets/14188/img/14188_148_1.jpg

Signals, poglavje Other signals, square waves. Pridobljeno 9.9.2011 s svetovnega spleta: <http://www.doctronics.co.uk/signals.htm>

Žnidarčič M. (2009). RF & clock generator user manual and specifications.