

POSTUPCI PODEŠAVANJA OCXO ADJUSTMENT PROCEDURES FOR AN OCXO

Dragi Dujković, Irini Reljin, Branimir Reljin, *Elektrotehnički fakultet, Beograd*
Snežana Dedić-Nešić, Lenkica Grubišić, *Institut Mihajlo Pupin Beograd*

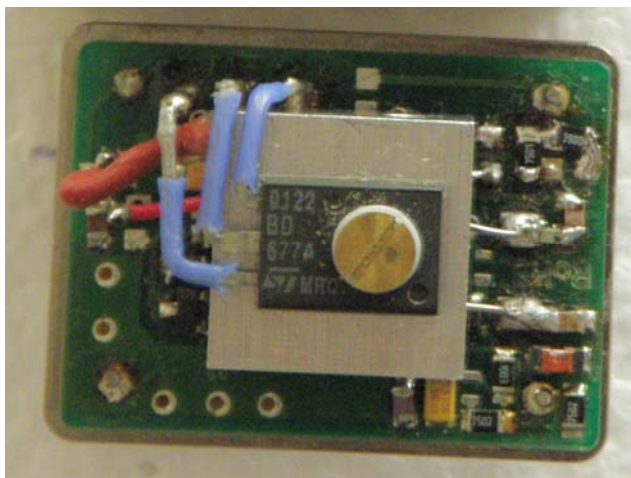
Sadržaj – U radu su opisani visokokvalitetni kristalni oscilatori sa pećnicom (OCXO), koji su realizovani u Laboratoriji za piezotehnologije, Instituta Mihajlo Pupin u Beogradu i postupci za njihovo podešavanje i ispitivanje.

Abstract – The paper describes high-quality oven controlled crystal oscillators (OCXO), realized in the Laboratory for Piezotechnologies, Institute Mihajlo Pupin in Belgrade, and the procedures for their adjusting and measuring.

1. UVOD

U modernim telekomunikacijama sinhronizacija rada različitih uređaja je jedna od bitnih funkcija sistema. U tu svrhu se koriste visokokvalitetni oscilatori i standardi vremena. Sinhronizacija uređaja je značajna u digitalnim telekomunikacijama, gde se često koristi GPS (*global positioning system*) sistem sinhronizacije, kao što je to u slučaju uređaja digitalne televizije. Da bi se obezbedila kvalitetna sinhronizacija preko GPS sistema, neophodno je obezbediti visokokvalitetni oscilator na 10 MHz, koji radi u PLL (*phase locked loop*) petlji sa sinhronizacionim signalom sa GPS satelita [1,2].

Ovakav oscilator se karakteriše visokom stabilnošću rada i kvalitetnim karakteristikama faznog šuma. Da bi se to ostvarilo potrebno je koristiti visokokvalitetne kristalne oscilatore (XO), koji su realizovani kao OCXO (*oven controlled crystal oscillator*), slika 1. To su oscilatori kod kojih je kristalna jedinica postavljena u pogodno kućište (pećnicu), sa temperaturno stabilisanim grejačem, čime se održava stabilna temperatura na vrednosti koja odgovara minimumu temperaturne zavisnosti sopstvene frekvencije kristala (oko 70-90 °C, zavisno od kristalne jedinice) [1,2,3].



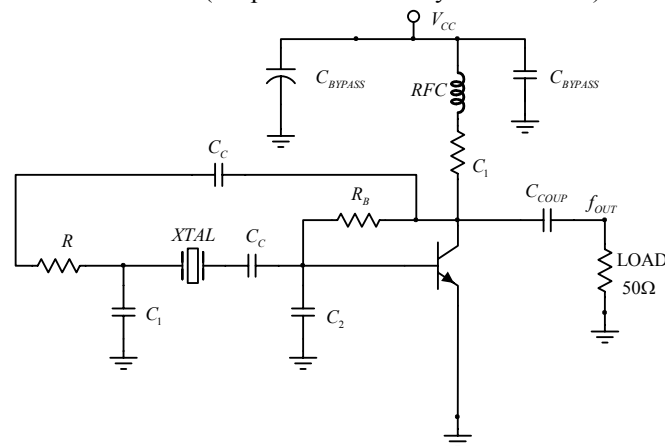
Slika 1 OCXO 10MHz proizveden u Laboratoriji za piezotehnologije, Instituta Mihajlo Pupin u Beogradu [3]

Proizvodnja ovakvih oscilatora podrazumeva, pre svega, proizvodnju visokokvalitetnih kristalnih jedinica na 10MHz, korišćenje najkvalitetnijih elektronskih komponenti, kao i

specijalan dizajn i kvalitet izrade pločice i samih kućišta oscilatora. Da bi se ovo postiglo potrebno je obaviti niz merenja i podešavanja koja se vrše na samim kristalnim jedinkama, tako i na konačnim verzijama oscilatora. Za kvalitetne kristalne oscilatore je, praktično, nemoguća masovna (serijska) produkcija, već se realizacija obavlja ručno, kroz niz tehnoloških postupaka u interaktivnom modu uz primenu rezultata merenja na kristalnim jedinkama i samom oscilatoru.

2. DIZAJN KRISTALNIH OSCILATORA

Oscilatori na bazi kristalne jedinice koriste piezoelektrično svojstvo nekih kristala (najčešće se koriste kristali kvarca): nastajanje mehaničkih deformacija ukoliko se na njegove krajeve dovede napon, i obratno. Sopstvena rezonantna frekvencija kristala je veoma stabilna, pa se ovaj efekt koristi za izradu visoko kvalitetnih oscilatora. U realizaciji se, najčešće, koristi kolo oscilatora Pierce-ovog tipa, slika 2, mada se mogu koristiti i drugi oscilatori, prvobitno razvijeni kao LC oscilatori (Colpitts-ov ili Hartley-ev oscilatora)



Slika 2. Pierce-ov oscilator [4]

Ovaj tip oscilatora koristi kristal kao serijsko oscilatorno kolo, tako da je, zavisno od redne kapacitivnosti C_c , radna frekvencija oscilatora za oko 20 do 50 ppm više od sopstvene rezonantne frekvencije kristalne jedinice. Stoga se kristal naručuje od proizvođača kao paralelno rezonujućii kristal sa sopstvenom rezonantnom frekvencijom koja je 90 do 100 ppm niža od frekvencije pri kojoj treba da radi oscilator [4].

Pomoću kondenzatora C_c (ili pomoću varikap diode, ako je to jednostavan naponski kontrolisan oscilator (VCXO) vrši se podešavanje radne frekvencije oscilatora. Ovaj podesivi kondenzator, koji je vezan na red sa kristalom, može se, takođe, upotrebiti čak i ako je korišćena serijska kristalna jedinka, ali u ovom slučaju će frekvencija biti pomerena i moći će da se podešava samo od 5 do 50ppm oko markirane frekvencije kristala.

Pierce-ov oscilator je namenjen za rad kristala u osnovnom modu, tj. pri serijskoj rezonantnoj frekvenciji kristala, ali može raditi i sa overtonovima ako se kondenzator C_1 zameni paralelnim oscilatornim kolom koje je podešeno na frekvenciju između željenog overtona i najbližeg sledećeg overtona. U tom slučaju proizvođač kristala mora navesti da li dati kristal može raditi na overtonovima [4].

Pored ovoga treba izabrati tranzistor koji može da radi na mnogo većoj (barem 5 puta) frekvenciji od željene, i sa velikim pojačanjem u zoni frekvencije od interesa. Visoka frekvencija je potrebna zbog toga što treba obezbediti da fazni pomeraj u kolu povratne sprege tranzistora bude što bliže 180° , a veliko pojačanje je potrebno zbog gubitaka u povratnoj sprezi oscilatora [4].

3. MERE ZA POBOLJŠANJE KARAKTERISTIKA KRISTALNIH OSCILATORA

Zavisno od frekvencije na kojoj radi, prosečan kristal na disipaciju ne troši više od 10mW. Snaga disipacije kristala u serijskoj rezonanciji iznosi $P = V^2/R_m$. U tom slučaju maksimum efektivne vrednosti napona kristala je u opsegu od 2V, za frekvenciju 1MHz, do minimuma od 0,3V na 30MHz. Ovo podrazumeva da neki oscilatori rade sa relativno velikim RF amplitudama serijske rezonancije kristala, što može izazvati da je signal kontrole kristala suviše veliki. Osiguranje od ove pojave je da se smanji povratna sprega preko:

1. Korišćenja kola u emiteru tranzistora za povratnu spregu.
2. Korišćenjem dve paralelne diode da odsecaju višak povratnog napona,
3. Korišćenjem otpornika za ograničenje struje u povratnoj sprezi kristala.

U slučaju kada oscilator treba da generiše signal veće snage ne samo da se kristal izlaže velikom mehaničkom naprezanju, već je i aktivan element oscilatora tada opterećen. Tranzistor ne sme biti opterećen velikom snagom na ulazu, jer to može uništiti i tranzistor i kristal. Da bi se ovo izbeglo treba da bude ispunjeno $P_{MAX(IN)} > P_{MAX(OUT)} - P_{LOOP}$, gde je $P_{MAX(IN)}$ maksimalna snaga oscilatora na ulazu (u dBm), $P_{MAX(OUT)}$ maksimalna moguća snaga generisana na izlazu oscilatora (u dBm), a P_{LOOP} su gubici u kolu povratne sprege aktivnog elementa (tranzistora u ovom slučaju) u dB.

Pošto, u osnovi, kristalni oscilator nema sposobnost da generiše velike snage na svom izlazu a da ne bude oštećen, treba obezbediti dodatni RF pojačavač snage na njegovom izlazu.

Za različite frekvencije oscilatora dolazi do promene serijske impedanse kristalne jedinice, pa je potrebno imati odgovarajuća različita kola oscilatora. Na primer unutrašnja serijska otpornost kristala se kreće od 20Ω na 25MHz sve do $0.25M\Omega$ na 500MHz. Stoga je potreban poseban dizajn kola za napajanje i kontrolu kristala pri raznim vrednostima unutrašnje otpornosti.

Vreme započinjanja oscilacija je direktno povezano sa Q faktorom kristalne jedinice: većem Q faktoru odgovara duže vreme potrebno za uspostavljanje oscilacija. Kristalni oscilatori se odlikuju veoma velikim vrednostima Q faktora tako da je vreme uspostavljanja oscilacija često i preko 100ms. Ovo vreme će značajno biti uvećano kolom povratne sprege, i zbog same aktivne komponente, jer kolo mora uspostaviti vrednosti ustaljenog režima pre uspostavljanja oscilacija. Na primer, RC konstanta pojačavačke mreže može stalno usporavati i ometati uspostavljanje stabilnih oscilacija.

Sve pasivne i aktivne komponente, koje se koriste u kolu oscilatora, moraju biti namenjene za rad na frekvencijama koje ovaj oscilator treba da ostvari na svom izlazu, kao i da zadovolje ostale uslove, kao što su maksimalna dozvoljena snaga, maksimalno dozvoljeni napon i struja, itd. Korišćeni kondenzatori i kalemovi ne smeju imati nijedne druge paralelne i serijske rezonantne frekvencije koje mogu da interferišu sa oscilatorom, a parametri aktivnog elementa (pojačanje i fazni pomeraj) treba da zadovoljavaju uslove oscilovanja na željenoj frekvenciji rada.

Mnoge aktivne i pasivne komponente, koje se koriste u oscilatorima, čine oscilatore više ili manje temperaturno osetljivim. Značajan je uticaj kristalne jedinice i keramičkih kondenzatora, koji se koriste u kolu rezonatora. Stoga i najbolji kristalni oscilator može imati veoma loše karakteristike ako je realizovan neadekvatnim komponentama, koje mogu izazvati šetanje frekvencije i veliki fazni šum. Korišćenje temperaturno nekompenzovanih keramičkih kondenzatora, ili kondenzatora sa veoma lošom temperaturnom karakteristikom, može izazvati veliko kolebanje frekvencije oscilovanja i kod kvalitetnih oscilatora. U dobro dizajniranim oscilatorima većina kratkoročnih i dugoročnih frekvencijskih nestabilnosti su posledica samog kvaliteta kristalne jedinice, i svaki oscilator koji unosi više od 50% nestabilnosti u odnosu na samu kristalnu jedinku, smatra se veoma lošim oscilatorom.

U zavisnosti od primene, za kristalni oscilator može biti postavljen uslov veoma precizne i stabilne frekvencije oscilovanja, u temperaturnom opsegu koji je veći od uobičajenog, što klasičan nekompenzovan kristalni oscilator (XO), često, ne može da ispuni. Zbog toga se koriste kola oscilatora sa raznim kompenzacijama, kao što su TCXO (temperaturno kontrolisan kristalni oscilator), oscilator kontrolisan pećnicom, OCXO (oven controlled crystal oscillator), i razne njihove varijante. Potreba za smanjivanjem veličine, cene, potrošnje i složenosti samog uređaja su sadašnji trendovi razvoja svih uređaja, pa to važi i za kvalitetne kristalne oscilatore. U zavisnosti od ugla sečenja kristala za AT rez, temperaturna stabilnost u okviru željenog opsega temperatura može biti optimizovana i sa vrlo jednostavnim oscilatorom, u kom slučaju je kompenzovan oscilator. Na primer, frekvencijska stabilnost od $\pm 5\text{ppm}$ sa promenom temperature od 25°C do 70°C je moguća sa

odgovarajućim AT rezom. Međutim, kada varijacije temperature mogu dramatično narušiti stabilnost, na primer do ± 20 ppm sa opsegom od -40 do $+80^{\circ}\text{C}$, onda je neophodno koristiti TCXO ili OCXO.

TCXO je temperaturno stabilan oscilator sa stabilnošću od nekoliko ppm. Ovaj oscilator koristi temperaturni senzor (termistor), varikap diodu i elektronsko kontrolno kolo, za kompenzaciju uticaja promene temperature na rad oscilatora. Promena temperature izaziva promenu frekvencije oscilovanja kristala, što se kompenzuje promenom napona varikap diode. Ovaj oscilator je malih dimenzija i potrošnje, i jednostavne konstrukcije, te je jeftin, a vreme dostizanja radnog režima je gotovo trenutno.



Slika 3. Analizator spektra koji se koristi za merenje na oscilatoru.

Ako se traži stabilnost frekvencije oscilovanja bolja od nekoliko ppm, onda se kristal stavlja u pećnicu sa stabilnom temperaturom, a ponekad i celo kolo oscilatora – to je OCXO oscilator. Treba napraviti pećnicu na stabilnoj temperaturi koja greje ne samo kristal na željenu temperaturu već i ostale temperaturno osetljive komponente kola. On ima najveću stabilnost od svih uobičajeno korišćenih i dostupnih kompenzovanih oscilatora, sa frekvencijskom stabilnošću od 0.001 ppm sa kristalom SC ili AT reza, u širokom temperaturnom opsegu. Kristalni oscilator i kolo se drže na temperaturi višoj za oko 10° od željene maksimalne temperature ambijenta. OCXO može biti podešavan veoma fino (sa par ppm) pomoću malog trimera u kolu oscilatora.

Nedostatak OCXO je da su oni većih dimenzija i sa znatno većom potrošnjom od ostalih tipova oscilatora, a imaju i znatno veće vreme (potrebno za zagrevanje peći i dostizanje stabilne radne temperature) da bi se dosegla odgovarajuća frekvencijska stabilnost. Ujedno, rad kristala pri višoj temperaturi pogoršava karakteristiku starenja.

4. TESTIRANJE I OPTIMIZACIJA KRISTALNIH OSCILATORA

Posle konstrukcije i dizajna neophodno je testirati kristalni oscilator na propisno otpočinjanje oscilovanja, propisanu frekvenciju, i parazitne efekte u realnim uslovima rada. Ovo se radi na sledeći način.

1. Prikluči se testirani oscilator na analizator spektra (slika 3) ili na osciloskop (slika 4). Kada se potvrdi da je oscilator započeo oscilacije na sobnoj temperaturi, onda se paljenjem i gašenjem napajanja nekoliko puta, i to pri celom opsegu varijacije napona napajanja, proveri kvalitet sinusoide na izlazu oscilatora.



Slika 4. Merna oprema za kontrolu rada oscilatora.

2. Ohladi se kolo oscilatora na temperaturu manju od nule i opet se testira nekoliko puta za razne napone napajanja (u granicama predviđenim za radni opseg). Postupak se ponavlja sa grejanjem oscilatora na neku temperaturu veću od sobne.

3. Proverava se frekvencijska stabilnost oscilatora i neželjena stanja pri svim radnim temperaturama. Ispituje se da li se vrednosti nalaze u projektovanim granicama rada i da li ima parazitnih frekvencijskih odziva u izlaznom spektru signala, ili nekih neželjenih harmonika.

4. Meri se RF amplituda signala i njena stabilnost u vremenu i pri promeni parametara kola. Za početak je neophodno da se primene podešavanja za stabilnost amplitude, stabilnost frekvencije, započinjanje oscilacija i spektralnu čistoću kristalnog oscilatora pomoću elemenata oscilatornog kola.

5. Meri se fazni šum oscilatora pri raznim uslovima rada.

6. Pored toga, treba podesiti LC i RC odnose, mirnu radnu tačku radnog tranzistora i trimer kondenzatora. Ove parametre podešavamo sve dok se ne dobiju najbolje performanse koje zadovoljavaju potrebne specifikacije.

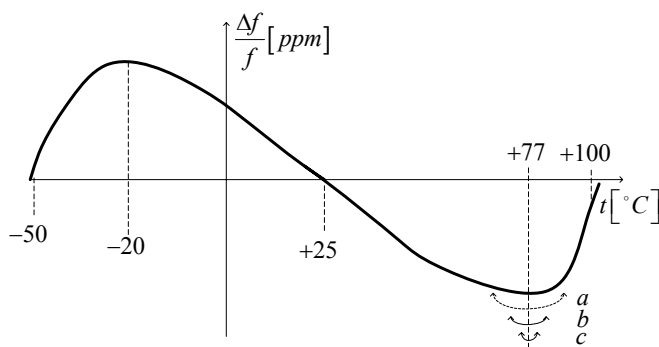
5. PODEŠAVANJE I OPTIMIZACIJA OCXO

U slučaju OCXO oscilatora, postupak podešavanja i optimizacije rada je sličan, ali složeniji.

1. Najpre se podesi sam oscilator, slično kao u prethodnom slučaju, ali bez uključivanja kola grejača pećnice. Posle utvrđivanja da oscilator radi, pristupa se podešavanju rada grejača. Prvo se grubo podesi potencijometar u mostu grejača na željenu temperaturu minimuma oscilovanja korišćene kristalne jedinke. To se radi pomoću brojača *Universal Counter* HP5335A (slika 5), koji u ovom slučaju meri frekvenciju. Potencijometrom koji je u mostu sa termistorom [2], podešava se temperatura grejača, a na brojaču se prati frekvencija, tako da se u nekoliko prolaza podesi temperatura minimuma. Prvo se potencijometar pomera za veće uglove (grubo) i prati se frekvencija, kad frekvencija ponovo poraste, pomera se potencijometar u suprotnu stranu ali za malo manji ugao (sve finije podešavanje) i opet se prati da li frekvencija raste, te se u više iteracija postiže da, na kraju podešavanja, temperatura bude u zoni minimuma frekvencije oscilovanja, videti sliku 6. Posle toga se meri otpornost potencijometra i on se zameni fiksnim otpornikom ili kombinacijom otpornika iste otpornosti.



Slika 5. Brojači



Slika 6. Ilustracija podešavanja grejača, a – prva iteracija, početno, grubo podešavanje temperature grejača, b – druga iteracija, finije podešavanje grejača, c – treća iteracija najfinije podešavanje grejača (najmanji ugao pomeranja)

2. Posle prvog koraka frekvencija oscilatora ja pomerena za -10 do $+20$ Hz od željene frekvencije oscilovanja. Ona se podešava trimmer kondenzatorom C_1 u kolu kristalne jedinke. Ako je frekvencija manja, treba smanjiti kapacitivnost, a ako je frekvencija veća, treba povećati kapacitivnost ovog kondenzatora.

3. U ovom koraku se pristupa merenjima u temperaturnoj komori *Test Chamber* Saunders 4250A (slika 7). Meri se na nekoliko temperatura u željenom radnom opsegu temperatura od $-20^{\circ}C$ do $+55^{\circ}C$, recimo na temperaturama od $-20^{\circ}C$, $-10^{\circ}C$, $0^{\circ}C$, $10^{\circ}C$, $25^{\circ}C$ i $+55^{\circ}C$. Posle svake temperature

ambijenta u ovom merenju često je potrebno dodatno podesiti temperaturu rada pećnice i frekvenciju rada (ponove se prethodne dve tačke) i to po 2 do 3 puta, dok se ne dobije trenutna stabilnost oscilovanja od najmanje 2×10^{-9} .

4. Poslednji korak podešavanja i optimizacije je merenje osetljivosti oscilatora na starenje. Oprema za starenje se sastoji od nekoliko elektronskih besprekidnih izvora napajanja sa akumulatorima, kontrolnim brojačem i računarem, slika 8. Podešeni oscilatori se ostave najmanje mesec dana, a najviše tri meseca da neprekidno rade na akumulatorskom besprekidnom napajanju i proceni se da li posle starenja frekvencija raste ili se smanjuje, kao i stepen starenja oscilatora. Posle starenja neophodno je dodatno podesiti temperaturu rada pećnice i frekvenciju oscilovanja.

Posle ovih podešavanja pristupa se merenju faznog šuma i Alanove varijanse kod ovih oscilatora. Ovo je finalni korak kojim se potvrđuje kvalitet ovih visokostabilnih oscilatora.



Slika 7. Temperaturni stabilna komora



Slika 8. Stalac sa opremom za starenje

6. ZAKLJUČAK

U najkraćim crtama su opisani postupci prilikom dizajniranja, izrade i podešavanja kristalnih oscilatora realizovanih u okviru projekta. Predložene su i mere poboljšanja nekih koraka ovog procesa.

Oscilatori, generalno, spadaju u najkompleksnije i, u tehnološkom pogledu, proizvodno najzahtevnije RF komponente u modernim telekomunikacijama. Ovo važi ne samo prilikom dizajniranja oscilatora već i kod samog postupka izrade i podešavanja parametara oscilatora.

U slučaju OCXO, postupak dizajniranja, podešavanja i optimizacije je prilično složen i obavlja se u precizno definisanim koracima, jer ovaj oscilator ima kompleksniji sklop elemenata u odnosu na ostale tipove kristalnih oscilatora.

ZAHVALNICA

Istraživanja opisana u ovom radu su delimično finansirana od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike

Srbije, kroz projekat „Razvoj elektronskih sklopova za posebne namene na bazi kristalnih jedinki“, ev. broj 11039.

LITERATURA

- [1] D. Jevtic, D. Dujkovic, S. Dedic-Nesic, M. Paskas, I. Reljin, “Application of crystal units in digital TV”, (in Serbian) *Conf. YUINFO 2009*, Proceedings CD, Kopaonik, 2009.
- [2] D. Dujković, D. Jevtić, S. Dedić-Nešić, L. Grubišić, I. Reljin, B. Reljin, “High-quality OCXO for Digital TV” in *Proc. Conf. TELSIS 2009*, Vol. 1, pp. 281-284, Niš, Oct. 7-9, 2009.
- [3] D. Dujkovic, S. Dedic-Nesic, I. Reljin, “Improving stability and phase noise in OCXO”, (in Serbian) *Conf. ETRAN 2009*, Proceedings CD, Vrnjacka Banja, 2009
- [4] S. Cotter, *Complete Wireless Design*, Second Edition, McGraw-Hill Inc., 2008.