

Stabilnost frekvencije kvarcnih oscilatora

Miodrag Malović, Ljiljana Brajović, Tomislav Šekara

Apstrakt—Oscilatorna kola su neizbežni deo praktično svih elektronskih uređaja. Najčešće se koriste kola na bazi kvarcnih kristala. Prikazan je proces proizvodnje i princip rada kvarcnih oscilatora, kao i podele kristala i oscilatornih kola. Analizirane su metode kvantitativnog opisivanja greške odnosno nestabilnosti frekvencije. Efekti koji utiču na promene frekvencije su klasifikovani po fizičkom poreklu i vremenskom periodu u kom se dešavaju.

Cljučne reči—Kvarcni kristal, oscilator, frekvencija, vreme, stabilnost, preciznost

I. UVOD

Piezoelektricitet je pojava međuzavisnosti između normalnog napona, koji izaziva mehaničku deformaciju, i naelektrisanja na krajevima materijala. Pritisak na materijal izaziva električnu polarizaciju, i obrnuto, primena električnog napona izaziva deformaciju materijala. Piezoelektrični oscilatori su električna kola koja koriste piezoelektrične karakteristike kvarcnih kristala ili drugih materijala da stvore električni signal približno konstantne frekvencije. U današnje vreme piezoelektrični, uglavnom kvarcni, oscilatori su glavni izvor takta u elektronskim napravama, a praktično ne postoji elektronski uređaj bez oscilatora. Alternative kvarcu su drugi kristali (npr. turmalin, topaz ili kalijum-natrijum tartarat) ili neke vrste keramike. Keramički materijali, dobijeni sinterovanjem, i pored nekih prednosti, imaju mnogo nestabilniju frekvenciju oscilovanja [1].

U novije vreme javljaju se i MEMS oscilatori koji ne moraju raditi na piezoelektričnom principu. I pored značajnog poboljšanja nekih karakteristika, prvenstveno stabilnosti frekvencije [2], MEMS oscilatori su još uvek daleko od preuzimanja primata kvarcnim oscilatorima, jer imaju i veću cenu i veću potrošnju energije (bitno kod baterijski napajanih sistema). S obzirom na tendencije razvoja u pravcu smanjenja potrošnje i cene, izgleda da će se kvarcni oscilatori koristiti još dugo godina.

II. KVARCNI KRISTALI

Kvarc, koji predstavlja kristalni oblik silicijum dioksida, se najčešće dobija iz površinskih kopova u raznim delovima sveta. Kristali su uglavnom providni i bezbojni, a mogu biti i

Miodrag Malović – Univerzitet u Beogradu, Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Karnegijeva 4, 11120 Beograd (e-mail: ofiss@malovic.in.rs) (<https://orcid.org/0000-0002-0691-4626>).

Ljiljana Brajović – Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd (e-mail: brajovic@grf.rs) (<https://orcid.org/0000-0002-2265-7308>).

Tomislav Šekara – Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: tomi@etf.rs) (<https://orcid.org/0000-0001-8031-3135>).

u različitim nijansama u zavisnosti od primesa. Prirodni kristali kvarca (Sl. 1a) se mrve, rastvaraju, i ponovo kristališu pod kontrolisanim uslovima. Veštački uzgojeni kristali (veličine u santimetrima) zahtevaju par meseci rasta pod strogo kontrolisanim uslovima (na visokoj temperaturi i pritisku). Komadići kristala pravilnog oblika, veličine tipično nekoliko milimetara, isečeni iz njih na različite, strogo definisane načine koji se nazivaju rezovi (*cuts*), koriste se kao osnove elektronskih oscilatornih kola. U odnosu na RLC kola, kvarcni oscilatori imaju manji koeficijent prigušenja, odnosno manje gubitke, te zahtevaju vrlo malo snage za održavanje oscilacija.



Sl. 1. a) Prirodni kristali kvarca; b) AT rez; električna osa (x) spaja naspramne uglove heksagonalnog preseka, a mehanička (y) je normalna na naspramne površine; svaki kristal ima tri x i tri y ose.

Rezonantne frekvencije kvarcnih kristala su u praksi u većini slučajeva u opsegu od kHz do više stotina MHz. Rezonantna učestanost primarno zavisi od vrste, oblika i veličine kristala (reza), i primenjenih statičkih sila.

Izborom pogodnih oblika kristala dobijaju se oscilatori relativno stabilni u odnosu na temperaturske promene (koje su glavni izvor kratkoročnih fluktuacija frekvencije). Najčešće korišćeni oblik kristala je tzv. AT rez. AT pločice se seku kao isečci pod uglom od $35^{\circ} 15'$ u odnosu na optičku osu, kao na Sl. 1b (x ose se poklapaju).

Osim AT reza, evo kratkog opisa nekih od mnogobrojnih drugih tipova:

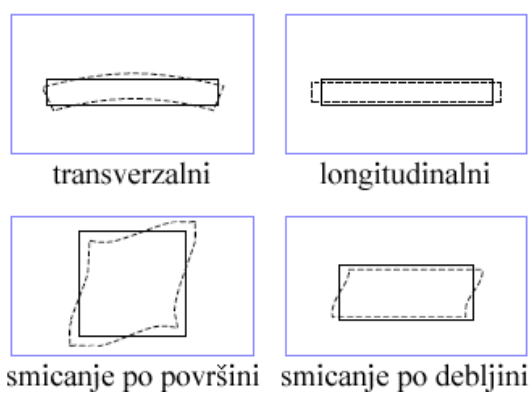
- BT rez: manje temperaturno stabilan ali se za visoke frekvencije lakše proizvodi (jeftiniji je); seče se pod uglom od 49° u odnosu na optičku osu

- SC rez: izvedeno od „stres kompenzacije“; kompleksnijeg procesa proizvodnje, koristi se u temperaturski kompenzovanim oscilatorima, sa većom stabilnošću frekvencije u odnosu na temperaturu i mehaničke uticaje; seče se pod strogo definisanim uglom ne samo u odnosu na optičku ($35^{\circ} 15'$, kao AT), već i na električnu osu ($21^{\circ} 54'$); slični

rezovi se nazivaju dvostruko rotirani rezovi

- XY rez: koristi se za manje frekvencije, tipično za 32768 Hz (popularna kao 2^{15} , tako da se 1 sekunda registruje prenosom 15-bitnog brojača); često korišćeni *tuning fork* kristali (u obliku zvučne viljuške) koriste ovaj tip reza; seče se poprečno ili skoro poprečno u odnosu na optičku osu (u xy ravni)

Geometrija oscilovanja kvarcnog kristala varira. Najčešće imamo pojavu tzv. *thickness-shear* (smicanje po debljini) oscilovanja, što znači da gornja i donja površina pločice osciluju longitudinalno u različitim smerovima, kao što je grafički prikazano na Sl. 2, dole desno. Ovo je uobičajeni režim rada za AT rezove. Sledeći najčešći modovi oscilovanja su: longitudinalni (*length* ili *extensional*) i transverzalni (*flexure*), ekvivalentno poznatim režimima oscilovanja žica i štapova, kao i režim smicanja po površini (*face-shear*). Transverzalne oscilacije su tipične za XY rez.



Sl. 2. Najčešći modovi oscilovanja kvarcnih kristala.

Smicanje po površini je na Sl. 2 prikazano odozgo (za kvadratnu pločicu manje debljine) a ostali modovi sa strane. Ovo su najčešće geometrije, ali postoje varijacije i na ovaj raspored dimenzija. Takođe, postoje i drugi modovi oscilovanja (npr. torzioni), kao i drugi oblici pločica (npr. disk), koji se ređe koriste.

III. MATEMATIČKO OPISIVANJE FLUKTUACIJA FREKVENCIJE

Preciznost i tačnost frekvencije su dva pojma koja treba razlikovati. Greška je razlika između stvarne frekvencije, koju je nemoguće savršeno odrediti, i nominalne (deklarisane) frekvencije. Tačnost je obrnuto proporcionalna greški. Preciznost ili stabilnost oscilatora je inverzna mera varijacije frekvencije. Uređaj može biti tačan ali neprecizan ako mu je srednja frekvencija blizu nominalne ali pokazivanje više varira, ili netačan a precizan ako frekvencija nije dobro podešena ali manje varira u vremenu.

Stabilnost se obično deli na kratkoročnu i dugoročnu, mada je ponekad u upotrebi i izraz srednjoročna stabilnost. Ne postoji striktna vremenska podela na kratkoročne i dugoročne promene frekvencije u smislu apsolutne vrednosti vremena. Kratkoročna stabilnost označava promene u toku vremena reda veličine sekundi ili minuta (u toku jedne sesije rada sa

uređajem, recimo), dok se dugoročna stabilnost odnosi na periode reda veličine meseci ili godina. Često se reč stabilnost koristi isključivo da opiše kratkoročnu preciznost, dok se dugoročne promene opisuju pojmom „starenje“.

Kod starenja, za kvantitativnu meru stabilnosti uzimamo jednostavno relativni odnos apsolutne promene frekvencije i njene početne, krajnje ili nominalne vrednosti (koje su približno jednake, a stabilnost ne zahteva toliko preciznu deklaraciju, pa možemo upotrebiti bilo koju od njih).

Za opisivanje kratkoročne stabilnosti koriste se različite metričke funkcije. Peak-to-peak devijacija predstavlja razliku između maksimalne i minimalne izmerene frekvencije u nekom vremenskom intervalu, i može se izražavati u apsolutnim ili relativnim jedinicama:

$$\Delta f_{p-p} = f_{\max} - f_{\min}$$

$$\delta f_{p-p} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{\bar{f}} \quad (1)$$

Standardna devijacija predstavlja koren iz srednjeg kvadrata razlike u odnosu na srednju vrednost (varijanse):

$$\sigma f = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})^2}{N}} \quad (2)$$

i takođe se često deli sa srednjom vrednošću frekvencije da bi se izrazila u relativnim jedinicama. Ipak, ako se drugačije ne naglasi, u metrologiji se najčešće podrazumeva da se koristi Alanova devijacija:

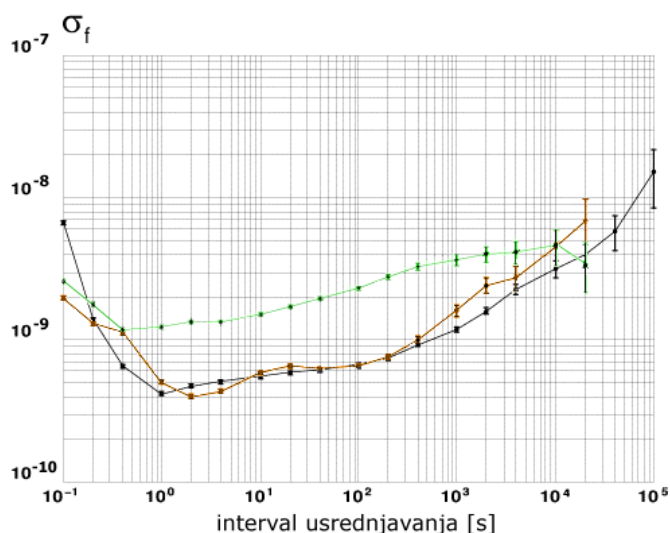
$$\sigma_f(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N-1} (\bar{f}(t_{i+1}) - \bar{f}(t_i))^2}{2(N-1)}} \quad (3)$$

Alanova devijacija je funkcija vremenskog intervala (koji se najčešće naziva interval usrednjavanja) t , i uzima u obzir usrednjene frekvencije u isključivo susednim intervalima tog trajanja. Da bismo, na primer, odredili Alanovu devijaciju frekvencije za interval usrednjavanja od 1 s, izbrojaćemo impulse u N susednih sekundi (najmanje dve) i podeliti broj impulsa sa vremenom (tj. 1 s; za određivanje protoka vremena koristi se tačniji, etalonski sat) da bismo dobili f_{sr} za svaki period. Zatim određujemo Alanovu devijaciju kao koren iz srednjeg kvadrata razlika isključivo susednih članova, podeljenog sa dva. Bitno je zapaziti da na ovaj način driftovi frekvencije izvan intervala za koji se stabilnost deklariše ne utiču na rezultat, što nije slučaj sa standardnom devijacijom ili peak-to-peak vrednošću. Alanova devijacija se, kao i standardna, često izražava u relativnim jedinicama (podeljena sa srednjom vrednošću).

Renomirani proizvođači određuju stabilnost frekvencije laboratorijski i predstavljaju tipične rezultate kao Alanovu devijaciju u zavisnosti od perioda posmatranja. Radi se o

šumu frekvencije, bez merljive promene spoljašnjih faktora, dakle pod konstantnim laboratorijskim uslovima. Stabilnost se predstavlja na logaritamskom grafiku, najčešće za periode od dela sekunde do 10^4 ili 10^5 sekundi. Stabilnost je slabija za manje intervale, i poboljšava se sa povećanjem perioda posmatranja kao posledica usrednjavanja, do optimalne vrednosti za periode reda veličine 1 s. Sa povećavanjem kvaliteta oscilatora, raste i vreme za koje se javlja maksimum stabilnosti (ide i preko 10^4 s kod najkvalitetnijih kontrolisanih oscilatora) [3]. Pri daljem povećanju perioda usrednjavanja, nestabilnosti temperature, napajanja, i dr, preuzimaju dominantni uticaj, pa opet dolazi do (nešto sporijeg) pogoršanja. Za najkvalitetnije kvarcne oscilatore, stabilnost može imati vrednost ekstremuma (numerički minimum, odnosno kvalitativno maksimum) reda veličine i boljeg od 10^{-13} (dok je uobičajeno nekoliko redova veličine lošija), u relativnim jedinicama [4].

Na Sl. 3 je prikazan primer dijagrama vremenske stabilnosti za tri eksperimentalno testirana komada TCXO oscilatora modela HTV2 proizvođača Connor-Winfield [5].



Sl. 3. Eksperimentalno određena stabilnost frekvencije tri komada temperaturski kompenzovanih oscilatora Connor-Winfield HTV2 [5].

IV. IZVORI KRATKOROČNE I DUGOROČNE NESTABILNOSTI FREKVENCije

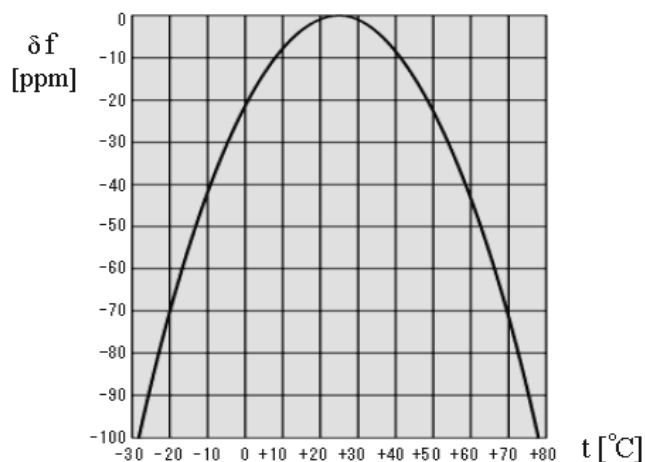
Od kratkoročnih varijacija najčešće su one izazvane promenama temperature, mada i mnogobrojni drugi fizički efekti doprinose stalnim kako skokovitim tako i laganim promenama (driftovima) rezonantne frekvencije [6]. U njih spadaju šokovi (fizički udarci), promena položaja, vibracije, promena napona napajanja, elektromagnetske smetnje, radioaktivnost, itd.

Mnoge od ovih pojava imaju izražen histerzis, a prvenstveno temperatura i napajanje. Pojava skokovite promene frekvencije prilikom gašenja i ponovnog paljenja uređaja se naziva *retrace* efekat. Regularne vibracije, promene položaja, i napona napajanja uglavnom ne proizvode intenzitet relativne promene frekvencije veći od 10^{-9} . Ritrejs ili jači

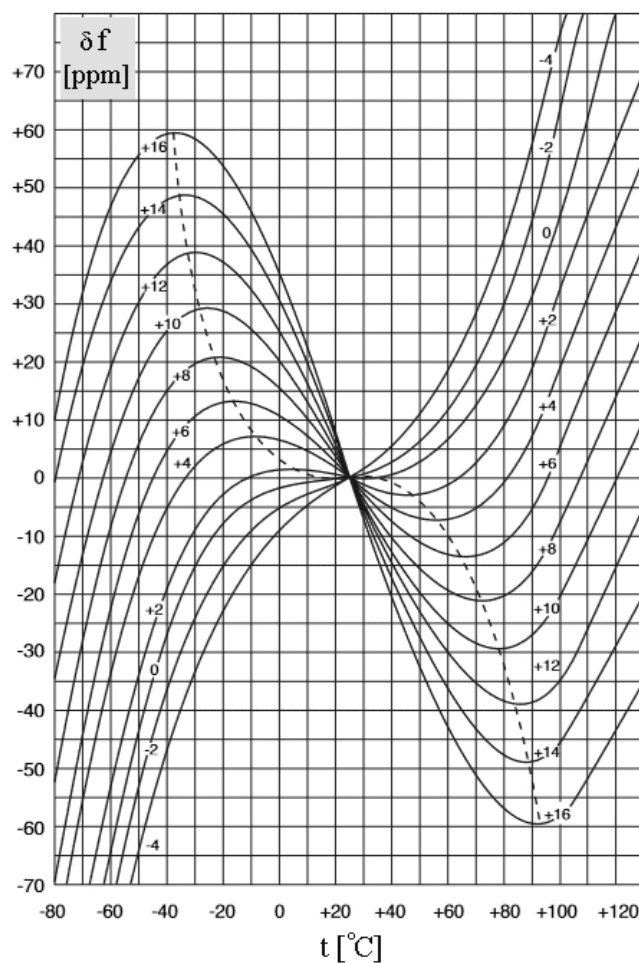
šokovi mogu imati nešto veći efekat, obično oko 10^{-8} [7].

Zavisnost frekvencije od temperature je parabolična sa negativnim koeficijentom (kao na Sl. 4), tj. ima maksimum na željenoj radnoj temperaturi kod većine rezova:

$$f(t) = f_0(1 - k(t - t_0)^2) \quad (4)$$



Sl. 4. Parabolična zavisnost $f(t)$ za BT, XY, i mnoge druge tipove rezova kvarcnog kristala.



Sl. 5. Skup funkcija $f(t)$ za AT tipove kristala sa različitim uglom rezanja.

dok AT i SC tipovi kristala imaju približno kubnu zavisnost rezonantne frekvencije od temperature:

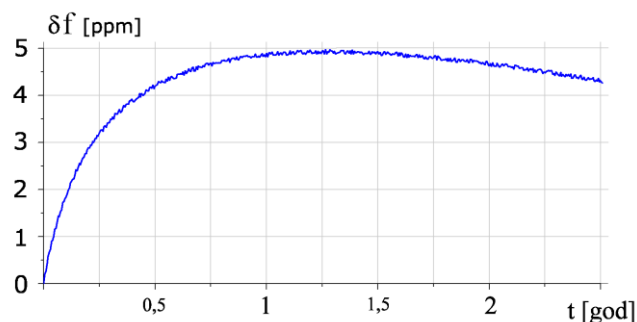
$$f(t) = f_0(1 + k_1(t - t_0) + k_2(t - t_0)^2 + k_3(t - t_0)^3) \quad (5)$$

Središnji deo obe krive obično se nalazi na sobnoj temperaturi ($t_0 \approx 25^\circ\text{C}$), pošto je to ciljna temperatura rada većine kristala, dok je nešto više kod SC rezova ($65\text{--}95^\circ\text{C}$), koji se koriste u kontrolisanim, zagrejanim komorama. Kod uobičajenog AT reza pod optimalnim uglom od oko $35^\circ 15'$, imamo slabu zavisnost od temperature (relativne promene reda veličine ppm, tj. 10^{-6} , za ceo opseg temperatura $0\text{--}50^\circ\text{C}$).

Pri promeni ugla rezanja, vidimo da dolazi do krivljenja funkcije (na Sl. 5 imamo po jednu nacrtanu krivu na svaka 2 minuta promene ugla reza). Tačke lokalnih ekstremuma kubne zavisnosti, koji se javljaju u ovom slučaju, nazivaju se LTTP i UTTP (*lower temperature turning point* odnosno *upper temperature turning point*), i spojene su isprekidanim linijama na slici. Kristali se nekada koriste i u ovom režimu (oko ovih temperatura).

Kod kristala ekonomske klase, varijacije rezonantne frekvencije posmatrane između različitih komada kristala, istog modela, iznose tipično oko 10^{-5} , a retko preko 10^{-4} .

Dugoročne promene frekvencije se odnose na duže periode koji su reda veličine meseci ili godina. Uzrok dugoročnih promena su kretanja molekula primesa unutar kristala, i fizičkih promena oblika samog kristala kao i delova sa kojima je doveden u dodir (postolja). Naravno, kvalitet izrade kristala i oscilatora određuje ove parametre - čistoća kako materijala tako i punjenja kutije oscilatora od inertnog gasa, i kvalitet zaptivanja povećavaju stabilnost frekvencije. Tipična kriva promene frekvencije kvarcnog kristala usled starenja data je na Sl. 6. Eksponencijalna komponenta, dominantna na početku života kristala, uglavnom potiče od promena oblika (tzv. *stress relief* odnosno ublažavanje naprezanja, ili sleganje), dok sporo opadajuća komponenta koja preuzima primat u kasnijim godinama predstavlja efekte kontaminacije (kretanje molekula primesa) [8].



Sl. 6. Tipična promena rezonantne frekvencije kvarcnog kristala usled starenja.

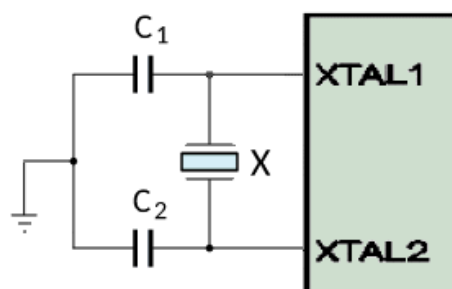
Starenja većine komercijalnih oscilatora su reda veličine 10^{-6} do 10^{-5} na nivou više godina. U literaturi se može sresti i podela starenja na aktivno i pasivno. Pod aktivnim starenjem

se podrazumeva starenje u toku rada, dok je pasivno starenje „na polici“ tj. kada se kristal ne koristi. Moguće je i eksperimentalno ubrzano starenje kristala. Ovo se izvodi aktivno, na većoj temperaturi. Smatra se da rad na 85°C od mesec dana do 1000 sati, ili rad na 105°C nedelju dana, proizvodi efekte starenja kao i regularna operacija na sobnoj temperaturi tokom jedne godine. Ubrzano starenje na temperaturama od $125\text{--}150^\circ\text{C}$ često ispoljava izmene nagiba opadajuće dugoročne komponente, dakle postoje promene u fizici procesa kontaminacije, te se ne može smatrati za tačnu repliku originalnog procesa i ovakva testiranja nemaju veliku vrednost [9].

V. TIPOVI OSCILATORA

Kao što je već rečeno, kvarcni kristali se koriste kao osnovni elementi u oscilatornim kolima (oscilatorima). Oscilatori mogu imati komponente koje služe za stabilizaciju frekvencije, kao i kola za multiplikaciju frekvencije, kojima se osnovna frekvencija kristala povećava ceo broj puta (najčešće 2^n).

Najprostiji tip oscilatora se dobija vezivanjem dva kondenzatora između krajeva kristala i mase, i koristi se za davanje takta mikroprocesorima, kao što je ilustrovano na Sl. 7. Malo kompleksniji modeli poznati su iz analogne i digitalne elektronike, kao što su Kolpicov i Piersov oscilator [10].



Sl. 7. Uobičajeni način vezivanja kvarcnog kristala (X) na CPU - mikroprocesorski oscilator.

Osnovna podela oscilatora je na tri kategorije: RTXO, TCXO i OCXO (gde kovanica XO označava kristalni oscilator), a postoje i druge skraćenice od kojih ćemo neke spomenuti.

Jednostavna kola koja ne vrše nikakvu kompenzaciju temperaturnih promena spadaju u kategoriju RTXO (*room temperature crystal oscillators*). Većina ekonomskih uređaja koriste RTXO kola, ne samo zbog manje cene, već i zbog znatno niže potrošnje energije, što je važan faktor u projektovanju baterijski napajanih uređaja.

TCXO (*temperature compensated crystal oscillators*) sadrže termometre, mere temperaturu, i uvode korekcije da bi se rezonantna frekvencija učinila stabilnijom. Uobičajeni princip rada TCXO je VCXO: *voltage controlled crystal oscillator*. VCXO je nešto širi pojam, koji obuhvata sve kristalne oscilatore čija se frekvencija kontroliše naponom (ne samo one kod kojih je cilj postizanje stabilne frekvencije). Kod TCXO sa VCXO (takođe zvanih i VC-TCXO),

kontroliraju se napon napajanja kristala tako da se kompenzuju promene frekvencije koje potiču od promene temperature (koja se monitoriše). Digitalni TCXO se referenciraju i imenima DCXO - *digitally controlled crystal oscillators* ili MCXO - *microprocessor controlled crystal oscillators*.

Kod OCXO (*oven controlled crystal oscillators*) se kolo grejanjem održava na konstantnoj temperaturi, u kućištu koje predstavlja zatvorenu temperatursku komoru (*oven*), tako da su temperaturski uticaji zanemarljivi. Ovo je još skuplji i energetski zahtevniji tip oscilatora. U ekstremnim slučajevima, koriste se još skuplji, krupniji i snažniji DOCXO (dupli OCXO), koji rade istu stvar u dva koraka - imaju spoljnu i unutrašnju komoru, i umesto standardne stabilnosti frekvencije za OCXO reda veličine 10^{-8} relativno na dnevnom nivou, postižu uobičajenu standardnu stabilnost reda veličine 10^{-11} i bolje [11].

VI. GPS DISCIPLINOVANI OSCILATORI

Kombinovanjem OCXO, a ređe i TCXO, koji ne moraju biti striktno bazirani na kvarcu (mada kvarc jeste jedan od osnovnih tipova kristala koji se koriste), sa GPS prijemnikom, dobijamo u novije vreme popularnu kategoriju GPS disciplinovanih oscilatora (GPSDO) [12].



Sl. 8. GPSDO modul, bez prijemnika, proizvođača Acquisys [14].

GPS (*global positioning system*) servis pruža uslugu takozvanog PPS-a, odnosno *pulse per second*. Iako PPS ne pruža informaciju o fizičkom vremenu (vreme-datumu), on daje pouzdanu informaciju o protoku jedne sekunde, koja se konstantno usklađuje sa referentnim laboratorijama najvišeg nivoa tačnosti na zemlji. Istina je da u prijemu PPS signala postoji značajna neodređenost, uslovljena procesom prenosa signala sa satelita do prijemnika u uređaju (nesavršenosti elektronike transmitera i prijemnika, kao i neodređenost putanje prenosa kroz sredinu promenljivih karakteristika), što čini da je kratkoročna stabilnost PPS frekvencije mala (čak i do 10^{-6}). Međutim, dugoročna stabilnost ovog signala je superiorna u odnosu na sve samostalne oscilatore, i GPS disciplinovani oscilatori (koji predstavljaju kompleksne elektronske uređaje sa sofisticiranim softverom) kombinuju ovu stabilnost sa superiornom kratkoročnom stabilnošću OCXO oscilatora. Procesor monitoriše frekvenciju PPS i OCXO signala, i izvodi neophodne korekcije da bi izlaz oscilatora uskladio sa dugoročno analiziranim PPS signalima. Budući da se radi o softverskoj kontroli, GPSDO lako izlazi

na kraj sa propuštenim PPS signalima. Promene rezonantne frekvencije kristala nastale kao posledica starenja se pamte pa možemo reći da se izvodi kontinualna kalibracija frekvencije.

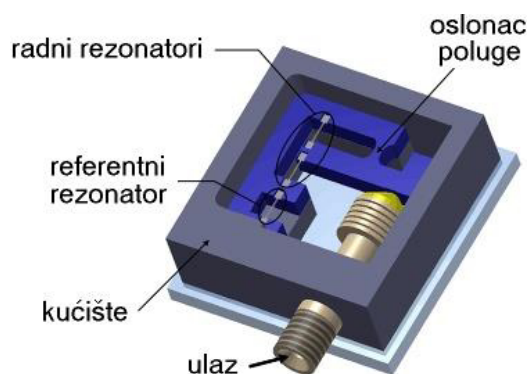
Jedna od mana ove vrste oscilatora (osim očiglednih: veličine, potrošnje i cene, koja je za bolje modele preko hiljadu dolara) je nemogućnost da se radi na mestima gde ne postoji dostupnost GPS signala (bez dodatnog antenskog sistema), a ovaj je poznat po svojoj slaboj prodornosti u zatvorene prostore [13].

Primer GPSDO modula (bez prijemnika), proizvođača Acquisys [14], prikazan je na Sl. 8. Dimenzije modula iznose $10,4 \times 7,0 \times 2,6$ cm.

VII. SENZORI NA BAZI VARIJABILNOSTI FREKVENCije

Promenljivost frekvencije oscilovanja kristala je pojava koju možemo i iskoristiti. Neki senzori rade tako što prate promene rezonantne frekvencije u funkciji posmatrane fizičke veličine. Naravno, kvalitet ovih senzora je limitiran zavisnošću iste frekvencije od drugih faktora. Jedan od metoda koji se koriste za eliminaciju zavisnosti od neželjenih parametara jeste upotreba još jednog, referentnog kvarcnog kristala, koji se izlaže koliko je moguće identičnim uslovima, osim pobude. U ovom slučaju izlaz senzora predstavlja razliku između frekvencija oscilovanja pobuđenog i referentnog kristala.

Jedan od takvih sistema, za merenje pritiska, realizovan je na univerzitetu u Ksi Anu, u Kini [15]. Šema je prikazana na Sl. 9. Ideja je slična Vitstonovom mostu sa poluprovodničkim mernim trakama: dva rezonatora koji se istežu u suprotnim smerovima povećavaju osetljivost, dok treći služi za kompenzaciju temperaturnih i drugih efekata.



Sl. 9. Šema senzora pritiska razvijenog na Univerzitetu u Ksi Anu, Kina [15].

Integrirani senzori ubrzanja na principu promenljive frekvencije kvarcnog rezonatora su u upotrebi od osamdesetih godina prošlog veka, ali su u početku bili višekomponentni, tj. probna masa se sastavljala sa kućištem i kristalom (koji je obično bio tipa DETF - *double ended tuning fork*, odnosno zvučna viljuška spojena na oba kraja). Ovakvi sistemi su termalno nehomogeni, tj. unose grešku po osnovu različitih koeficijenata termalnog širenja različitih materijala od kojih se sastoje. Zato se u novije vreme proizvode tzv. monolitni MEMS senzori koji su u potpunosti izgrađeni od kvarca [16].

QCM - *quartz crystal microbalance*, predstavlja kategoriju merenja koja se zasnivaju na promeni mase kvarcnog kristala, koja uzrokuje promenu rezonantne frekvencije [17]. Dodavanjem slojeva materijala na kvarc, frekvencija oscilovanja se smanjuje. QCM kvarcni kristali, po pravilu oblika okrugle pločice (diska), imaju tanak film kojim su obloženi, a koji menja masu putem interakcije sa sredinom u kojoj se nalazi. Najčešće se vrši detekcija gasova, koji stupaju u hemijsku ili fizičku interakciju sa slojem, koja uzrokuje promenu njegove mase. Naravno, neophodno je da ova interakcija bude reverzibilna. Jedna od čestih primena QCM je merenje vlažnosti (upijanjem molekula vode od strane sloja materijala kao što je grafen).

Merenja viskoznosti tečnosti uranjanjem celog kristala ili, češće, njegovog dela u tečnost poznate gustine takođe se svrstavaju u kategoriju QCM. Teškoća u primeni ovih tehnika je činjenica da dolazi do velike promene u faktoru prigušenja što izaziva dodatnu nestabilnost frekvencije, pa čak i mogućnost prestanka oscilovanja. U novije vreme koriste se senzorski sistemi u kojima se određuju dimenzije kapljica tečnosti koje se zatim spuštaju na površinu kristala čija se frekvencija meri [18]. Istina je da je automatizacija ovakvog procesa teško izvodljiva, ali kontinualna terenska merenja viskoznosti su retko potrebna.

VIII. ZAKLJUČAK

Opisani su kvarcni kristali i oscilatori koji ih koriste kao svoje komponente. Analizirani su faktori koji utiču na promene rezonantne frekvencije, odnosno njene kratkoročne i dugoročne nestabilnosti. Dat je i kratak pregled savremenih senzora koji koriste promene rezonantne frekvencije za merenje različitih fizičkih veličina.

Iako su u novije vreme razvijeni MEMS oscilatori sa boljom stabilnošću frekvencije, mala potrošnja i cena će definitivno uticati na to da kvarcni kristali ostanu osnova većine oscilatornih kola u doglednoj budućnosti.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju za podršku Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (ugovori 451-03-68/2022-14/200287, 451-03-68/2022-14/200092 i projekat TR-33020).

REFERENCE

- [1] K. Uchino, "The development of piezoelectric materials and the new perspective," in *Advanced Piezoelectric Materials*, Cambridge, UK, Woodhead Publishing, 2017, ch. 1, pp. 1-92.
- [2] G. Wu, J. Xu, E. J. Ng, W. Chen, "MEMS resonators for frequency reference and timing applications," *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 29, no. 5, pp. 1137-1166, Sep. 2020.
- [3] W. J. Riley, "Techniques for frequency stability analysis," in Proc. of IEEE international frequency control symposium, Tampa, FL, USA, vol. 4, pp. 10-33, May 2003.
- [4] C. Calosso C, B. Francois, R. Boudot, P. Yun, M. Gozzelino, E. Bertacco E, S. Micalizio, "Local oscillators and digital electronics for compact atomic clocks," in *Microwave Technology and Technique Workshop*, Noordwijk, Netherlands, hal-02472712, Apr. 2017.
- [5] LeapSecond.com :: Museum of Time & Frequency (2003). *Connor-Winfield HTV-series TCXO*, [Online]. <http://www.leapsecond.com/museum/htv2>
- [6] W. J. Riley, "NIST special publication 1065: Handbook of frequency stability analysis," US Dept. Commer., Nat. Inst. Stand. Technol., Gaithersburg, MD, USA, 2008.
- [7] H. Zhou, C. Nicholls, T. Kunz, H. Schwartz, "Frequency accuracy & stability dependencies of crystal oscillators," Carleton Univ., Ottawa, Canada, Rep. SCE-08-12, 2008.
- [8] J. Cartright, "Aging performance in crystals," Connor-Winfield Corp., Tech. rep., 2008.
- [9] J. R. Vig, T. R. Meeker, "The aging of bulk acoustic wave resonators, filters and oscillators," Proc. of the 45th Annual Symposium on Frequency Control, Los Angeles, CA, USA, pp. 77-101, May 1991.
- [10] H. H. Currie, "The Pierce Oscillator," in *Mixed-Signal Embedded Systems Design*, Cham, Switzerland, Springer, 2021, ch. 13, pp. 599-616.
- [11] A. G. Nikonov, A. V. Kotyukov, A. S. Kamochkin, N. I. Dyakonova, "Recent achievements in performance of low profile ultra precision single oven quartz oscillators," in *IFCS-EFTF 2012: European Frequency and Time Forum*, Gothenburg, Sweden, pp. 279-285, Apr. 2012.
- [12] M. A. Lombardi, "The use of GPS disciplined oscillators as primary frequency standards for calibration and metrology laboratories," *NCSLI Meas.*, vol. 3, no. 3, pp. 56-65, Sep. 2008.
- [13] G. Dedes, A. G. Dempster, "Indoor GPS positioning - challenges and opportunities," in Proc. of IEEE 62nd Vehicular Technology Conference, Dallas, TX, USA, vol. 1, pp. 412-415, Sep. 2005.
- [14] Acquisys, *GPS Disciplined Oscillator Module*, [Online]. <https://www.acquisys.fr/en/product/gpsdo-2>
- [15] Q. Zhang, C. Li, Y. Zhao, B. Li, C. Han, "A high sensitivity quartz resonant pressure sensor with differential output and self-correction," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 90, no. 6, 065003, Jun. 2019.
- [16] C. Han, C. Li, Y. Zhao, B. Li "High-Stability Quartz Resonant Accelerometer with Micro-Leverages," *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 30, no. 2, pp. 184-192, Jan. 2021.
- [17] X. Qiao, X. Zhang, Y. Tian, Y. Meng, "Progresses on the theory and application of quartz crystal microbalance," *Appl. Phys. Rev.*, vol. 3, no. 3, 031106, Sep. 2016.
- [18] Q. Bai Q, X. Huang, "Using quartz crystal microbalance for field measurement of liquid viscosities," *J. Sensors*, vol. 2016, 7580483, Jan. 2016.

ABSTRACT

This paper presents a short review of quartz oscillators frequency stability issues. Quartz crystals are a base building block of majority of oscillator circuits, which are unavoidable part of practically any modern electronic device. The principle of operation, process of production, and classification of crystals were described briefly. Metrics for mathematical description of frequency error and stability were analysed. Phenomena affecting frequency fluctuations were classified by their physical origin and the time scale on which they occur. Several types of sensors employing the effect of frequency variability were also described.

Quartz Oscillators Frequency Stability

Miodrag Malović, Ljiljana Brajović, Tomislav Šekara