

Moderni satovi II*

KVARC SATOVI

Već je ranije spomenuto, da se za satove mogu smatrati oni uređaji, pomoću kojih se mogu izmjeriti ili odbrojiti jednaka vremenska razdoblja. Prema tom shvaćanju naša je Zemlja osnovni sat, kojemu brojimo obrte kao dane. Za kraće razmake upotrebljavali su se ranije razni satovi s pijeskom ili vodom na taj način, da se proteklo vrijeme mjerilo količinom istekle vode ili pijeska. U srednjem vijeku došlo je do upotrebe mehaničkih satova s utezima, gdje je usporeni pad služio za mjeru vremena. Znamenito Galilejevo otkriće o jednolikosti njihaja njihala utrlo je put današnjim najpreciznijim satovima njihalicama. No njihalice nisu jedini precizni satovi. Oni prema prirodi svog uređaja zahtijevaju nepomični položaj, da bi nesmetano njihali, pa je za prenašanje trebalo pronaći druge vrste jednolikih titraja. Najraširenija je primjena titraja elastičnog pera, koja se koristi u svim vrstama ručnih i džepnih satova i kronometara. Točnost svih tih satova na pero bila je uvijek manja od točnosti satova njihalica.

Pri daljem razvoju satova upotrebilo se je umjesto razmjerno polaganih titraja elastičnog pera u običnim satovima, elastične titraje glazbenih viljušaka, koje titraju znatno brže. Glazbene viljuške, koje su u stvari čelične šipke, podržavale su se u titranju pomoću elektromagneta na sličan način, koji je primijenjen kod običnog električnog zvonca. Takvi su satovi bili također osjetljivi na promjene temperature, jer elastičnost šipke ovisi o temperaturi, pa se nije niti s njima postigla veća točnost nego sa njihalicama. Daleko je uspješniji bio postupak, kojim se je čelična šipka zamijenila pločicom kristala kvarca i iskoristilo njegove titraje. No kvarc ne pokazuje magnetskih svojstava kao čelik i trebalo je održavati njegove vanredno brze titraje posve drugim postupkom nego kod glazbenih viljušaka.

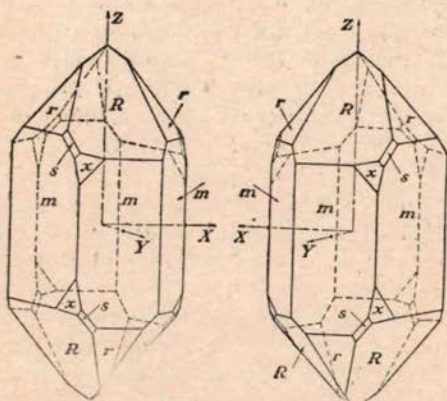
U stvari se do kvarc satova i nije došlo nastojeći da se usavrše satovi s glazbenim viljuškama kao regulatorima, već na temelju napretka u sasvim drugom području: u radiotehnici. Usavršavanje radio službe tražilo je, da se proizvedu vrlo brzi elektromagnetski titraji, koji će imati nepromjenljivu valnu dužinu, odnosno, da im frekvencija bude stalna. Postoji jednostavna veza između frekvencije i valne dužine elektromagnetskih valova: umnožak frekvencije, t. j. broja titraja u sekundi, i valne dužine jednak je brzini svjetlosti. Budući da se radi o vrlo brzim titrajima zgodnije je za jedinicu frekvencije odabrati ne jedan titraj u sekundi ili kako se ta jedinica još zove 1 Hz (jedan herc) nego milion titraja u sekundi ili jedan megaherc (1 mHz), tada veza glasi: frekvencija u megahercima puta valna dužina u metrima iznosi 300. Prema tome ako znademo valnu dužinu u metrima dobijemo frekvenciju u megahercima, ako broj 300 podijelimo s valnom dužinom i obrat-

* Prvi dio v. Geod. list VII. br. 1—4 st. 10 1953.

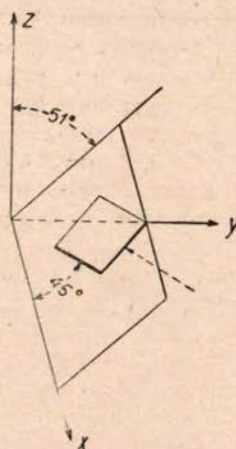
no, ako broj 300 podijelimo s frekvencijom u megahercima dobit ćemo valnu dužinu u metrima.

U potrazi za sredstvom, pomoću kojega bi mogli proizvoditi elektromagnetske valove nepromjenljive valne dužine, odnosno frekvencije, došli su fizičari i radiotehničari na sretnu zamisao, da se u tu svrhu iskoristi pojav *piezoelektriciteta*. Piezoelektricitet su još 1880 otkrili braća *Jean* i *Piere Curie* i utvrdili zakonitosti, koje se javljaju kod tog pojava. Osnovno je svojstvo piezoelektričnih tvari, da se pri tlaku na njihovoj površini javljaju električni naboji, koji pri vlaku promijene predznak. Umjesto te pojave, koja se naziva primarni ili direktni piezoelektricitet, javlja se i obratna pojava: recipročni piezoelektricitet, t. j. ako piezoelektričnu tvar obložimo raznoimenim elektricitetom onda se u tvari pojave mehaničke pojave stezanja ili rastezanja.

Braća Curie su piezoelektricitet otkrili najprije na kristalu turmalina, a zatim na kristalima vinske kiseline (Rochelleskoj soli) i kristalu kvarca (kremena). Za nas je najvažnija ta pojava kod kristala kvarca. Po svom kemijskom sastavu kvarc je silicijev dioksid SiO_2 i vrlo je proširen na Zemlji, pa neki smatraju da sačinjava jednu desetinu zemaljske kore. U kristalnom obliku kvarc se pojavljuje kao čisti kvarc »prozirac« ili kao smeđi »čadžavac« ili kao ružičasti »ružičnjak« ili kao bijeli »mlječnjak« ili ljubičasti »ametist« ili crveni »karneol« ili zeleni »hrizopras« ili u još mnogim drugim obojenim varijantama. Često je pojava, da kristali nisu pravilno razvijeni, već po dva kristale međusobno tako srastu u »sraslace«, da ih se ne može tehnički upotrebiti. Usprkos obilju kvarca u zemaljskoj kori nisu brojna mjesta na kojima se nalazi kristale kvarca dovoljno velike i pravično razvijene. Danas je glavno nalazište u Braziliji, odakle se uglavnom i snabdjeva svjetsko tržište. Kristale kvarca uspjelo je dobiti i vještačkim putem, ali su to vrlo mali kristali, dok se je u prirodi našlo primjeraka dugih preko dva metra, a teških više od pet tona.



Slika 1. Kristal kvarca, kristalne osi u desnom i lijevom obliku.



Slika 2. G T — rez kristala kvarca

Kristal kvarca spada u takozvane trigonalne kristale, a pojavljuje se u dva oblika: desnom i lijevom, obzirom na raspored ploha (vidi sl. 1). Razlikuje se u kristalu više osi: *optička* os ili glavna os, koju označujemo kao Z-os,

zatim tri *polarne* ili električne osi, koje leže u ravnini okomitoj na Z-os, a prolaze kroz bočne bridove, te jednu od njih označujemo kao X-os i, konačno, tri *neutralne* osi okomite na optičku i električne osi, od kojih opet jednu, t. j. onu okomitu na X-os označujemo kao Y-os. Valja napomenuti, da obični kristal kvarca, takozvani *alfa* kvarc, nastaje kristaliziranjem pri temperaturi nižoj od 573°C , dok se pri kristaliziranju kod temperature između 573°C i 870°C javlja *beta* kvarc, koji kristalizira u heksagonalnom sistemu, ali taj oblik nije od važnosti u našem razmatranju.

Kristal kvarca ne upotrebljava se u svom prirodnom obliku, već se iz kristala izrezuju komadi u obliku pločica, štapića i prstenova. Pri tome je od vrlo velike važnosti položaj tih izrezanih komada prema kristalnim osima. U početku se je najčešće upotrebljavalo kristale u takozvanom X-rezu i Y-rezu. U tim rezovima izrežu se pločice, koje leže u ravnini okomitoj prema X-osi. Kasnije se je otkrilo, da su mnogo povoljniji rezovi, koji zaklapaju izvjestan kut s osi Z. Danas se najviše cijeni takozvani GT rez, koji ima vrlo povoljne temperaturne karakteristike, te je utjecaj temperaturnih promjena iščezavajući. Kod GT reza pločica se nalazi u ravnini, koja s osi Z zaklapa kut od 51° , a stranica paralelograma zaklapa kut od 45° s osi X (vidi sl. 2.). Potrebno je stoga najprije točno odrediti položaj kristalnih osi u komadu kristala, što se obično određuje pomoću rendgenskih zraka Braggovom metodom refleksije. Izrezivanje orijentiranog komada iz samog kristala vrši se pomoću diska s dijamantima, a zatim se komad uglača u točno predviđeni oblik određenih dimenzija.

Da bi se postigao piezoelektrički efekt potrebno je izrezani komadić kristala obložiti električnim nabojem. To se postiže stavljanjem kristala među elektrode, kojima se može mijenjati električni naboj. Ima mnogo načina, kako se izvodi to namještanje. Potrebno je s jedne strane, da kristal bude slobodan pri svome titranju, a s druge strane mora ostati u nepromjenljivom položaju prema elektrodama. Ponekad se kristal neposredno obloži metalnim elektrodama, a drugi put se samo objesi na svilene niti, da lebdi među elektrodama.

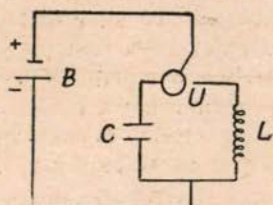
Svaki komadić kristala, kao i svako drugo tijelo može izvoditi mehaničke titraje, čija frekvencija ovisi o mehaničkim značajkama, t. j. o elastičnosti tvari i o dimenzijama kristala. Što su manje dimenzije i veća elastičnost, to će i frekvencija biti viša. Prema tome će svaki pojedinačni kristal imati određenu frekvenciju, t. j. titrati će određenim brojem titraja u sekundi, koja će odgovarati značajkama upravo tog određenog komadića kristala i to se naziva njegova »*vlastita frekvencija*«.

Držimo li takav izbrušeni komadić kristala kvarca među naelektriziranim elektrodama, kojima naizmjenice mijenjamo električni naboj, onda će se u kristalu uslijed piezoelektričnog svojstva naizmjenice javljati tlak i vlak u istom ritmu kako se izmjenjuje električni naboj na elektrodama. Drugim riječima, izmjenjivanjem električnog naboja pobudit ćemo kristal da počne titrati u jednom ritmu. Uslijed primarnog piezoelektričnog efekta to će titranje izazvati male električne naboje na kristalu. Međutim, ako se izmjena električnih naboja vrši tako brzo, da se broj titraja približi broju titraja vlastite frekvencije kristala, intenzitet titraja znatno poraste, a s njim zajedno i jakost naboja. Pojavljuje se rezonancija i kristal počinje da nameće titraje svoje vlastite frekvencije. Budući je poznato, da kvarc ima vrlo mali tempe-

raturni koeficijent rastezanja, a i elastičnost mu se malo mijenja s promjenama temperature (isključivši okolinu kritične temperature oko 573° C), to će vlastita frekvencija nekog komadića kristala kvarca biti prilično stalna obzirom na promjene temperature. Kako je već spomenuto, to je osobito slučaj kod kristala izrezanog u GT rezu, jer tada pri promjeni temperature od +10° C do +90° C promjena u frekvenciji ne iznosi više od 1 dijela prema 1,000.000.

Upravo to svojstvo kristala kvarca, da mu je vlastita frekvencija titranja vrlo stalna, iskorišteno je za izradu kvarc satova. Kristal kvarca koji titra vlastitom frekvencijom služi nam za regulator, kao što nam njihalo služi kao regulator kod satova njihovica. Međutim, dok je kod njihala titranje bilo izvanjsko, jer se je njihalo kao cjelina pokretalo, kod kristala kvarca titranje je unutarnje, jer se pokreću međusobno njegovi sastavni dijelovi, koji čine strukturu kristala, a postoji osim toga i razlika u frekvenciji titraja. Dok satno njihalo izvrši jedan titraj u jednoj sekundi, t. j. niže frekvencijom jednog herca, dotle kristal kvarca izvrši na stotine tisuća titraja u sekundi. Sav se problem sastoji u tome, da se kristal podržava u titranju vlastite frekvencije, a ujedno da se odbrojava njegove titraje. Velik broj titraja znači teškoću, da ih se broji, ali istovremeno pruža mogućnost, da se točno odredi sasvim mali interval vremena.

Održavanje kristala kvarca, da titra trajno vlastitom frekvencijom bilo je moguće iskoristivši piezoelektrične pojave kod kvarca i povezujući ih s oscilatornim (titrajnim) krugom radiotehnike, pa je na taj način ostvaren kvarc sat. Oscilatorni krug (vidi sl. 3.) sastoji se od strujnog kruga u koji je



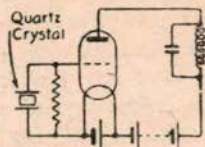
Slika 3. Električni titrajni krug. C kondenzator, L zavojnica, U prekidač, B baterija

uklopljen kondenzator C izvjesnog kapaciteta i zavojnica L određene samoindukcije. U slučaju da imamo posla s idealnim vodičem, kod kojeg ne bi bilo nikakvih gubitaka struje, imali bi trajno prelaženje naboja s jedne strane kondenzatora preko zavojnice na drugu stranu, kad bi samo jednom nabili kondenzator elektricitetom. Električni bi naboj, naime, tekao po zavojnici L s jednog obloga na drugi kondenzatora C, ali ne bi prestao teći u trenutku, kad bi se naboji na oba obloga izjednačili, već bi se tok nastavio uslijed samoindukcije zavojnice L, sve dok se kondenzator ne bi suprotno nabio, a tada bi naboj krenuo natrag. Tako u strujnom krugu nastaje titranje, t. j. neprestano se mijenja električni napon obloga kondenzatora. Trajanje titraja ovisi o kapacitetu kondenzatora C i samoindukcije zavojnice L, pa se iz neophodnog uvjeta, da je otpor kondenzatora jednak otporu zavojnice dobije jednostavna formula, da je vlastita frekvencija titrajnog kruga obrnuto razmjerna drugom korijenu umnoška kapaciteta C i samoindukcije L, t. j. napisano u obliku formule:

$$f = 1 / 2 \pi \sqrt{LC}.$$

Usljed neizbježivih gubitaka energije, to se električno titranje ne može trajno ponavljati, baš kao što ni njihalo ne može trajno njihati zbog neizbježivog trenja. Međutim ako takvom titrajnom krugu dodamo bateriju i elektronku (elektronsku cijev s mrežicom), onda se potrošena energija može nadoknaditi i električno titranje moći će se trajno održavati. Uzimajući zgodne vrijednosti kapaciteta C i samoindukcije L, možemo postići, da nam vlastita frekvencija titrajnog kruga odgovara vlastitoj frekvenciji kristala kvarca. Uklopimo li na zgodan način izbrušeni komadić kristala kvarca, koji se nalazi među metalnim oblozima i pretstavljaja nam na neki način kondenzator, u električni titrajni krug, kako to vidimo na primjer na slici 4, dobit ćemo titrajni krug, koji će trajno titrati u vlastitoj frekvenciji uklopljenog kristala.

Slika 4. Kristalni oscilator.



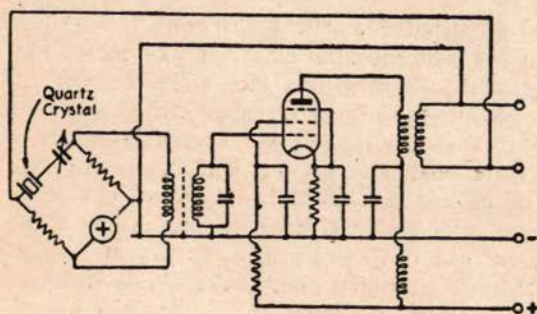
Djelovanje elektronke odvija se na slijedeći način: elektronka je staklena cijev iz koje je isisan zrak, a u nju je utaljena metalna elektroda, zvana katoda, koja se daje užariti pomoću baterije. Druga zataljena elektroda, koja je na slici prikazana ravnom crtom, zove se anoda, dok je treća elektroda metalna mrežica prikazana crtkano. Iz užarene katode koja je negativno nabijena izleću elektroni i kroz mrežicu prelaze na pozitivnu anodu. Ukoliko je mrežica jače ili slabije negativno nabijena, to će ona jače ili slabije odbijati elektrone od sebe i oni će u manjoj ili većoj množini prolaziti kroz nju na anodu. Kako je jakost struje razmjerna broju elektrona, koji prolaze, to će jakost anodne struje ovisiti o naponu mrežice. Velika je prednost elektronke, da se na mrežicu ne treba dovoditi znatne energije, već je glavno, da se mijenja napon. Pri tome se obično mrežica isprva nabije toliko negativno, da ni uz sve promjene naboja nikad ne bude pozitivno nabijena, pa elektroni ne padaju na nju zbog odbojnosti istoimenog elektriciteta. Zbog toga kroz mrežicu ne teče struja, koju bi trebalo nadoknađivati iz nekog izvora energije.

Mijenjamo li neprekidno napon mrežice, to će se u istom ritmu mijenjati i anodna struja, koja je mnogo jačeg intenziteta. Kako se na sl. 4. vidi, spojena je mrežica elektronke s oblozima kristala kvarca, što znači da će se napon na mrežici mijenjati istom frekvencijom kojom titra kvarc. Usljed piezoelektričnosti javljaju se na stranama kristala slabi naboji, koji se preko obloga prenose na mrežicu. Djelovanjem mrežice prenijeti će se električni titraji na njoj na anodnu struju, koja će se mijenjati u istom ritmu. Budući da je u anodni krug struje uklopljen titrajni krug s kapacitetom i samoindukcijom, koji su tako odabrani, da bi njegova frekvencija titranja odgovarala vlastitoj frekvenciji kristala, dakle frekvenciji anodne struje, to će se u njemu pojaviti jako titranje, koje će rezonirati titranju kristala kvarca.

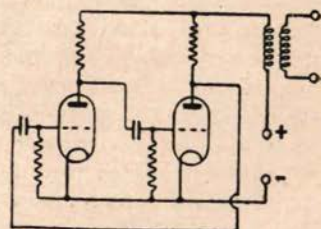
S druge strane titranje struje titrajnog kruga prenosi se i na obloge kristala i tu izaziva uslijed piezoelektričnosti mehaničke titraje kristala, koji se uslijed toga trajno nastavljaju. Ukoliko se i mijenja malo frekvencija električnog titrajnog kruga ipak se ovakvim spojem prisiljava strujni krug da titra upravo vlastitom frekvencijom kristala. Prema tome cijeli je uređaj u stvari generator izmjenične struje, koja se mijenja u frekvenciji kristala, koji

je u nj uklopljen. Ipak treba napomenuti, da i frekvencija titrajnog kruga utječe donekle na vlastitu frekvenciju titranja kristala, pa se upravo to koristi, da se mijenjanjem frekvencije titrajnog kruga ispravljaju male promjene u frekvenciji skupnog sistema kvarca i titrajnog kruga.

U novije se doba mnogo više upotrebljava spajanje pomoću »mosta«, jer se pomoću njega postiže mnogo veća točnost titranja. U tom spoju kristal nije jednostavno povezan s elektronkom i titrajnim krugom, već je sastavni dio poznatog Wheatstone-ova mosta. Na sl. 5 vidimo, da je na jednoj strani mosta kristal kvarca zajedno s kondenzatorom promjenljiva kapaciteta, dok je na suprotnoj strani obična žarulja s jednom petljom volframove niti, koja služi kao čisti otpor pri svim frekvencijama. Na druge dvije strane uklopljena su dva otpora: stalni i promjenljivi. Svrha je takvog spajanja u tome što kristal kvarca djeluje za izmjeničnu struju kao običan otpornik samo pri titrajima vlastite frekvencije, a već pri sasvim maloj promjeni frekvencije električni titraji prestaju. Na taj način kristal mnogo bolje određuje konačnu frekvenciju titraja, pa se zato takav spoj više upotrebljava.



Slika 5. Kristal u spoju »mosta«.

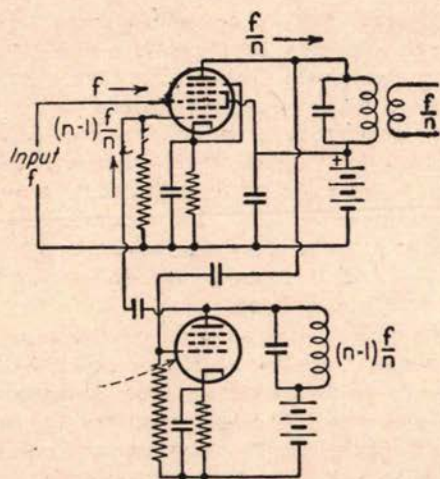


Slika 6. Multivibrator sistem djeljennja frekvencije.

Pomoću kristala kvarca mogu se, kako smo vidjeli, postići vrlo stalni titraji, samo se ne mogu neposredno upotrebiti, jer su frekvencije njihove vrlo visoke i obično dostižu kod kristala koji se upotrebljavaju za satove frekvencije od par desetaka *kiloherca* (desetaka hiljada herca) do sto *kiloherca* i više. Da bi snizili frekvenciju možemo se poslužiti raznim elektronskim uređajima. Među ostalim jednostavan je takozvani *multivibrator* sistem, koji vidimo na slici 6. On se sastoji od dvije elektronke, spojene na taj način, da se anodna struja prve cijevi dovodi na mrežicu druge, a anodna struja druge na mrežicu prve elektronke. Na taj se način svaka promjena napona prve mrežice pojačava i dovodi na mrežicu druge, gdje se opet pojača i dovede na prvu mrežicu, tako da imamo trajno oscilacije sve dok se dovodi energija. No takvim spajanjem ne samo, da se proizvodi neka određena frekvencija, već se stvaraju i dvostruke, trostruke, odnosno, višestruke frekvencije. Pojava je posve analogna onome, što se zbiva kod zvuka, gdje uz osnovni ton imamo i prvi gornji ton, drugi gornji ton i tako dalje redom tonove 2, 3, 4... n puta više frekvencije od osnovne. Mješavina svih tih gornjih tonova različite jakosti kod nekog instrumenta karakterizira značajku tog instrumenta, koju nazivamo bojom zvuka. Posve sličnim načinom i titrajni krugovi ne titraju samo u osnovnoj frekvenciji već i u gornjim »tonovima«.

Imamo li multivibrator udešen za titranje vlastite frekvencije od deset kiloherca bit će njegov deseti gornji ton oko sto kiloherca i ako ga dovedemo u vezu s električnim titrajima kristala kvarca, on će ga prisiliti da titra točno po njegovoj vlastitoj frekvenciji. Na taj način bit će i osnovno titranje multivibratora regulirano titrajima kristala kvarca, a frekvencija će mu biti upravo deseti dio vlastite frekvencije kvarca. Uzmemo li još jedan multivibrator, kome je deseti gornji ton približno jednake frekvencije kao i osnovni ton prvog multivibratora, onda će osnovna frekvencija drugog multivibratora biti točno jednaka desetinki osnovne frekvencije prvog multivibratora ili stotini vlastite frekvencije kristala kvarca. Uklapanjem nekoliko multivibratora možemo postići sniženje frekvencije za točno određeni faktor, koji ostaje nepromjenljiv.

Umjesto multivibratora može se upotrebiti i takozvani *regenerativni »djelitelj frekvencija«*. Kod multivibratora, naime, može doći do promjene faktora sniženja frekvencije, ako dođe do promjene u konstantama strujnog kruga, napetosti elektroda i karakteristikama elektronke. Prema tome ne možemo biti uvijek sigurni, da će dobivena frekvencija biti upravo traženi dio početne frekvencije. Zbog toga se primjenjuju djelitelji frekvencija, kakav je prikazan na slici 7. Odmah vidimo da su elektronke zamršenije nego što smo ih dosada upoznali.



Slika 7. Regenerativni djelitelj frekvencije.

Struja frekvencije f , koju želimo sniziti, dovede se na srednju mrežicu elektronke mješača s pet mrežica, dakle *heptode* (elektronke sa sedam elektroda), a na drugu mrežicu iste cijevi dovede se $(n-1)$ -vi gornji ton od n -tog dijela frekvencije f , t. j. $(n-1)f/n$. Ta se frekvencija postigne pomoću titrajnog kruga i *pentode* (elektronke s tri mrežice, dakle s pet elektroda), koja proizvodi gornje tonove, a prikazana je na donjem dijelu crteža. U modulatoru u kojem se miješaju obje frekvencije dobijemo kao rezultat razliku obaju frekvencija, t. j. upravo frekvenciju podijeljenu sa cijelim brojem n , dakle traženu frekvenciju f/n . Spojivši opet više djelitelja frekvencija zajedno možemo doći do potrebne niske frekvencije.

Za razliku od multivibratora i njemu sličnih sistema, djelitelj frekvencija prestane radom čim opadne napon dovedene struje ili čim bilo i jedan sastavni dio ne radi kako treba. Prema tome djelitelj frekvencija ili daje upravo točno podijeljenu frekvenciju, ili nikakvu, a ne može sam izmijeniti faktor dijeljenja. Osim toga izlazno titranje je kod djelitelja frekvencija razmjerno čisto sinusne prirode, dok je kod multivibratora iskrivljenog oblika.

Osim djelitelja frekvencije može se za točno sniženje frekvencije iskoristiti i strujne krugove elektronskih brojila. Kod te vrste imamo više elektronskih, a uz to i plinsku triodu (tiratron). Djelovanje brojila sastoji se u tome, da iz plinske elektronke izlazi impuls tek nakon što ona primi određeni cijeli broj električnih impulsa. Prema tome svaki električni titraj proizveden plinskom elektronkom predstavlja točno cijeli broj n prvobitnih električnih titraja. Dakle je frekvencija izlazne struje iz brojila jednaka f/n , gdje je f frekvencija ulazne struje u elektronsko brojilo.

Pomoću jednog od ova tri načina može se preći od visoke frekvencije na razmjerno nisku frekvenciju od jednog kiloherca. Strujom te frekvencije može se pokretati bilo kakav sinhronmotor, koji sa svoje strane pokreće zubčanike i kazaljke sata, odnosno prenosi električne impulse na neki uređaj za registraciju vremena, koji se općenito naziva *kronograf*, a pretstavlja poseban aparat čiji opis prelazi okvir ovog članka.

Iz svega dosada rečenog, vidi se, da točnost rada kvarca sata ovisi o stalnosti titraja samog kristala kvarca, koji upravlja električnim titrajinama aparature. Kako je već ranije istaknuto frekvencija titraja kristala kvarca ovisi o njegovim dimenzijama i o njegovoj elastičnosti, a te veličine ovise o temperaturi. Može se dakle slobodno reći, da će nepromjenljivost titraja ovisiti u prvom redu o nepromjenljivosti temperature kvarca. Pri običnim X i Y rezovima kristala, promjene frekvencije su razmjerne temperaturnom koeficijentu, koji iznosi nekoliko milijuntina. Da se uz takav koeficijent postigne nepromjenljivost dnevnog hoda od tisućinke sekunde potrebno je da promjena temperature ne premaši $0,002^{\circ} C$. Takvu stalnost temperature može se postići samo u posebno konstruiranim *termostatima*.

Termostati se obično prave kao sanduci od loših provodiča topline, koji imaju uređaje, da im se unutrašnjost zagrijava električnim putem. Obično se održava viša temperatura nego u okolini, tako da uvijek treba samo nadoknaditi izgubljenu toplinu, a to je mnogo jednostavnije postići nego hlađenje. Uslijed gubitka topline u okolni prostor temperatura opada i pomoću osjetljivih termoelektričnih uređaja, koji se također osnivaju na elektronskim sistemima, ukapčaju se grijači, koji nadoknađuju izgubljenu toplinu. Danas su već konstruirani termostati u kojima se temperatura mijenja manje od $0,001^{\circ} C$. Pokazalo se također korisnim, da se u termostat ne meće samo kristal kvarca, već i prvi titrajni krug zajedno s pojačalom, da ih se na taj način zaštiti od temperaturnih promjena.

Upotreba kvarca za oscilatore pokazala je, da se nakon početka rada vlastita frekvencija polako, ali stalno mijenja u istom smjeru. To mijenjanje može potrajati više tjedana, a ponekad i nekoliko mjeseci, te se zove »*starenje*«. Predmjeva se da je tome uzrok u površinskim dijelovima dogotovljene pločice i pronašlo se je, da se »*starenje*« može ubrzati, a vlastita frekvencija kristala ustaliti, ako se kristal nekoliko puta uzastopce ugrije do $+115^{\circ} C$ i opet ohladi na $+25^{\circ} C$. Zanimljivo je da kristali kvarca rezani u *GT* rezu

pokazuju jače »starenje«, odnosno trajno mijenjanje vlastite frekvencije od kristala rezanih u Z rezu u obliku prstena i obješenih na svilene niti. Budući da se u modernim termostatima postiže dovoljna stalnost temperature, to je za kvarc satove zgodnije upotrebljavati prstene u X rezu nego pločice GT reza, iako su one manje osjetljive na promjene temperature.

Povijest kvarc satova otpočinje W. A. Marrison (vidi sl. 8.), koji je ostvario prvi »kristalni sat« godine 1929. dakle samo 12 godina nakon otkrića P. Langevina, da se kristal kvarca može upotrebiti kao električni rezonator, kojim je otkrićem otpočela praktična primjena piezoelektriciteta kvarca. On je upotrebio kristal kvarca izrezan u obliku prstena, (a takav je rez prvi uveo Giebe), u takozvanom Y-rezu, koji je titrao frekvencijom od sto kiloherca. Na slici 9. vidi se Marrisonov sat u termostatu, pomoću kojeg su vršene prve usporedbe kvarc sata s dotada najtočnijim mehaničkim satom Shortta.



Slika 8. W. A. Marrison.



Slika 9. Prvi kvarc sat.

Nakon Marrisona ostvarili su Scheibe i Adelsberger nekoliko vrlo točnih kvarc satova. Oni su upotrebili kristalne štapiće duge 91 mm, a široke i visoke 11,4 mm u cijevi iz koje je bio isisan zrak. Kristal je rezonirao na frekvenciju od 60 kiloherca i nalazio se u termostatu, koji je opet bio smješten u drugi vanjski termostat. Točnost njihova sata premašila je točnost Marrisonova sata i dnevna promjena frekvencije iznosila je manje od 2×10^{-10} , dok je mjesečna iznosila oko 3×10^{-9} . U National Bureau of Standards u Washingtonu imaju nekoliko kristalnih oscilatora rezanih u GT rezu kojima je promjena pod normalnim uvjetima za kraće vremenske intervale manja od 2×10^{-9} .

Spomenuto je, da se je već prvi kvarc sat uspoređivao sa Shortt-ovim satom, koji je tada predstavljao najsavršeniji sat njihalicu. Usporedba je pokazala, da je Marrisonov sat u kraćim vremenskim razmacima točniji od

Shorttova, ali se u duljem roku nije mogao s njim takmičiti. To je bilo, međutim, uspoređivanje u samom početku, sata konstruiranog na posve novim principima, sa satom stare osnovne konstrukcije dotjerane do savršenstva. Ishod takvog takmičenja u daljoj budućnosti mogao se predvidjeti.

Uspjesi Scheibe-a i Adelsberger-a potakli su, da se prvi kvarc sat uvede godine 1939 i u Greenwichu, a već nekoliko godina kasnije potisnuli su kvarc satovi iz osnovne službe vremena satove njihalice. Upotrebljavali su u Greenwichu većinom kristale u obliku prstena, postavljene isprva na metalne šiljke, a kasnije su ih vješali na svilene niti. Posvećena je naročita pažnja kontroli temperature i osigurano neprekidno djelovanje, jer su posebne signalne lampe upozoravale na pretstojeći prekid tiratron cijevi, koje se upotrebljavaju u konstrukciji termostata, pa su se one mogle na vrijeme izmijeniti, a da se ne poremeti kontrola temperature. Primijenjene su i nove elektronke mnogo duljeg trajanja, što je znatno pojačalo sigurnost u radu.

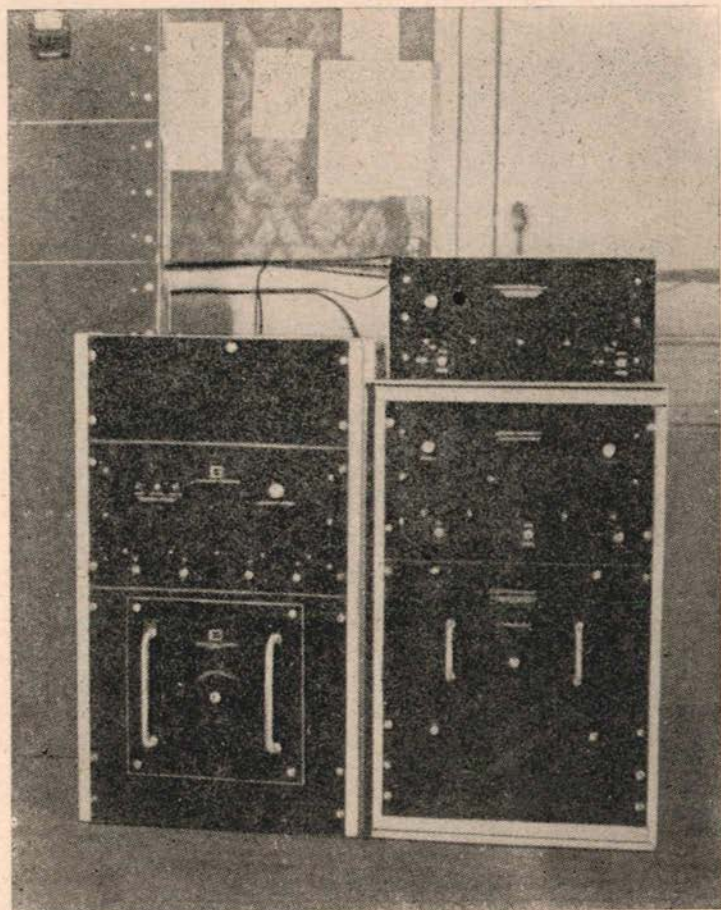
Uspjesi kristala GT reza u spoju »mosta« potakli su pronalaženje sličnog spoja za prstenaste kristale, a naročito je važan uspjeh u smanjenju početnog mijenjanja vlastite frekvencije kristala, t. j. skraćivanje »starenja« kristala. Tako je na primjer oscilator E5 već tjedan dana nakon početka rada mogao služiti kao dugoročni standard. Pokazalo se da mu se vlastita frekvencija promijenila za jednu stomilijuntinu u godini dana. Uspješan je također bio prelaz na rad s elektronkama niske anodne struje, što je uz uštedu na energiji dovelo i do smanjenja osjetljivosti prema karakteristikama elektronke.

Uza sve uspjehe našlo se, da kristali kvarca još ne rade pod najboljim uvjetima, već se mogu postići i dalja poboljšanja. U spoju »mosta« prešlo se na upotrebu posredno grijanog *termistora* umjesto žarulje s volframovom niti, a to je opet potaklo, da se spoj »mosta« zamijeni s njemu električki, ekvivalentom, u kojem je struja kristala smanjena na manje od 30 mikroampera. U kontrolnom pojačalu upotrebljavaju se dvostruke *tvrde* elektronke umjesto tiratrona u takvom spoju, da se cijevi mogu izmijeniti, a da se temperatura ne izmijeni za više od $0,0005^{\circ}$ C.

Rezultati, koje su kvarc satovi postizali pokazivali su nedvojbeno na veću točnost od satova njihalice, ali se uvijek podvlačilo da to vrijedi samo za kratke vremenske intervale, a u duljim razdobljima, da su standardni satovi njihalice pouzdaniji, jer mogu da rade neprekidno kroz vanredno dugo vrijeme. U pogledu točnosti smatralo se, da su obje vrste satova podjednake u duljem razdoblju. Iskustvo je, međutim, pokazalo drugo stanje stvari. Moderni kvarc satovi (vidi sl. 10.) postigli su već znatan stupanj pouzdanosti, pa mogu neprekidno raditi niz godina. Tako je u Greenwichu kvarc sat F1 neprekidno u radu već preko pet i pol godina, 9C preko pet godina, a sat 9A više od četiri i pol godine. U pogledu točnosti za dugoročni rad može se kao ocjena uzeti veličina srednje apsolutne mjesečne druge razlike dnevnog hoda. Dok kod najboljih satova njihalice iznosi ta veličina par milisekunda (0,001 sek.), dotle se kod kvarc satova ta veličina spušta ispod 0,1 milisekunde. Kao dalji dokaz o velikoj točnosti, koja je postignuta modernim kvarc satovima, može poslužiti činjenica, da je upravo pomoću njih otkrivena sezonska promjena u rotaciji Zemlje oko njene osi, a to se sve dosada drugim satovima nije moglo ustanoviti.

Uspoređujući, nadalje, kvarc satove sa satovima s njihalom upada u oči razmjerna jednostavnost konstrukcije sata njihalice prema zamršenom elek-

tričnom uređaju kvarc sata, što bi značilo izvjesnu prednost njihalica. Međutim, usprkos zamršenosti konstrukcije, koja je potrebna da se postigne veća točnost kvarc sata, postoji kod kvarc satova daleko veća jednostavnost vrlo točnog uspoređivanja međusobnih hodova i određivanja stanja kod kvarc satova. Dok se kod satova njihalica mora pribjegavati zamršenim elektromehaničkim uređajima za očitavanje dijelova sekunde, odnosno potreban je znatan



Slika 10. Moderni kvarc satovi: lijevo sat izrađen u »Laboratoires Radio-électriques«, desno firme »Belin«, u zvjezdarnici Uccle.

razmak vremena, da se ustanovi međusobna razlika u hodu između dva sata, dotle je to kod kvarc satova mnogo jednostavnije uz postizanje daleko veće točnosti. Razlog tome leži u činjenici, da je kod sata s njihalom osnovni njegov vremenski interval sekunda (koliko mu traje jedan njihaj), a koju treba dalje dijeliti u desetinke, stotinke i tisućinke, što je razmjerno teško. Kod kvarc satova je nasuprot tome, osnovni interval vremena titraj koji traje

obično jednu stotisućinku ili još kraće, a električki titraji dadu se razmjerno jednostavno pretvoriti u još brža titranja »gornjih tonova«, koja se elektronskim brojilima mogu vrlo točno i po volji brzo prebrojiti.

Da se ustanovi razlika u stanju dva kvarc sata potrebno je samo toliko vremena, da se uključi brojilo udara odnosno katodni oscilograf. Kod modernih kvarc satova brojila udara daju nam razliku u hodu dva sata izraženu u mikrosekundama (0,000001 sek.), a može se i naprosto dekadno elektronsko brojilo uključiti impulsom jednog sata, a prekinuti impulsom drugog, pa se dobije razlika stanja oba sata.

Ta lakoća u međusobnom uspoređivanju, u svrhu određivanja razlike u hodu i razlike u stanju omogućila je povezivanje tri kvarc sata u jednu grupu. Na taj se način može uvijek utvrditi, koji sat od ta tri ne ide kako treba, odnosno ako je jedan od njih stao uslijed nekog nedostatka, može se nakon prekida dovesti u potreban sklad s ostalima. Tako se znatno povećava sigurnost rada, jer se može gotovo posve isključiti mogućnost, da će se neki nedostatak pojaviti istodobno kod svih satova. Budući da je uspoređivanje vrlo lako i brzo, to se u grupi satova određi, koji od njih pokazuje u nekom trenutku najbolje kvalitete, pa se njega uzme kao standardni sat za određeni zadatak.

Budući da je kvarc sat u svojoj biti generator struje vrlo stalne frekvencije, možemo ga upotrebiti ne samo kao osnovni sat, već nam on može pokretati mnogo satova istovremeno i sinhronizirati ih, da pokazuju točno vrijeme. Osim toga struju standardne frekvencije, koju dobivamo iz kvarc sata možemo upotrebiti za pogon sinhron motora, koji će pokretati teleskop, da posve točno prati zvijezde i održava ih trajno u vidnom polju.

Danas već ima znatan broj zvjezdarnica, koje su uvele kvarc satove kao osnovne satove za službu vremena. Pored Greenwicha to su još Pomorska zvjezdarnica u Washingtonu, Dominijska zvjezdarnica u Ottavi, zatim zvjezdarnice u Johannesburgu, Canberri, Parizu, Bruxellesu, Neuchatelu i Tokiju, a posve je sigurno da će se njihov broj stalno povećavati.

Vidimo iz svega, dosad napisanog, da su kvarc satovi već u kratkom vremenskom razdoblju, koje još nije ispunilo niti četvrt stoljeća donijeli veliki napredak u određivanju vremena. To je ipak samo početak, a već se otkrivaju i posve nove mogućnosti o kojima treba također reći par riječi.

ATOMSKI SAŤOVI

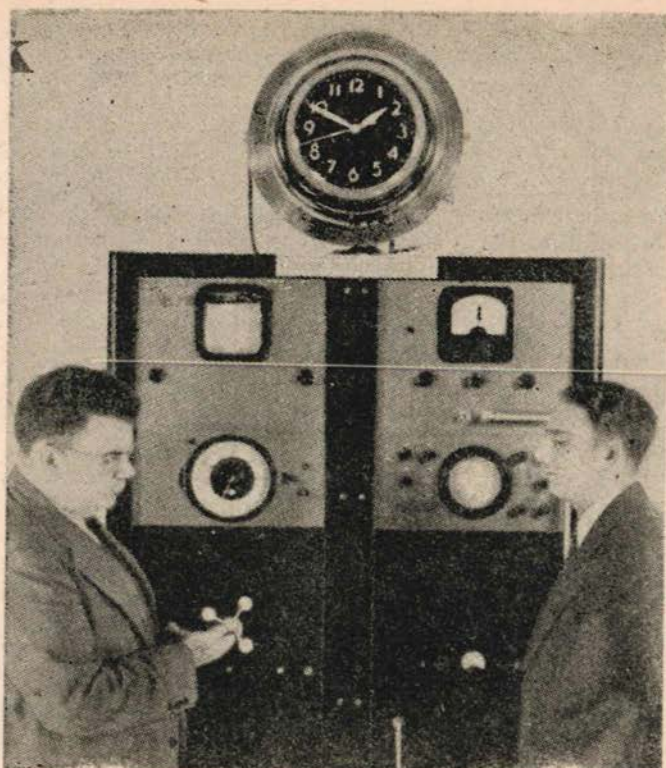
Gledajući na razvoj kvarc satova i povećanje točnosti njihova hoda, lako se može doći do zaključka, da je granica točnosti tih satova označena nesavršenošću svojstava samih kristala kvarca, a ne nesavršenošću ostalog električnog uređaja. Prema tome moći će se preći tu graničnu točnost, samo ako se za regulator titraja upotrebi neki drugi izvor titranja, a ne vlastito titranje kristala kvarca. Uočivši činjenicu, da smo polazeći od titraja cijelog makroskopskog tijela — njihala — postigli znatno veću stalnost trajanja samih titraja koje uzimamo za standard vremena, kad smo prešli na titraje unutar tijela, u našem slučaju na titraje grupa molekula unutar kristala kvarca, možemo analogno tome zaključiti, da bi nam prelaz od titranja grupe mole-

kula u kristalu na titranje samih molekula, odnosno njihovih atoma, mogao ostvariti još veću točnost. Ostvarenje toga zaključka dovelo je do stvaranja nove vrste satova, koje zovemo *atomskim satovima*.

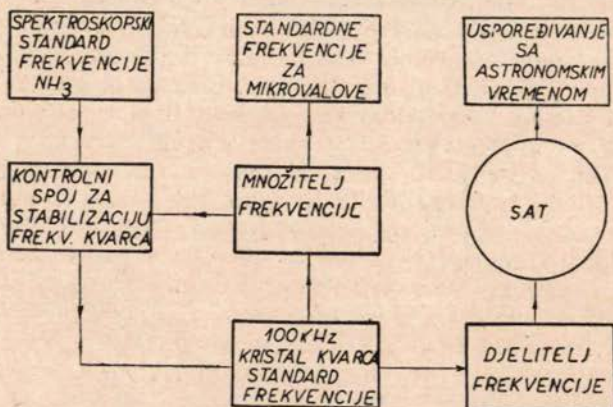
Razumljivo je, da je to ostvarenje mnogo kasnijeg datuma od kvarc sata i da se danas nalazimo još uvijek na samom početku ispitivanja, ali već postoje sigurni izgledi, da uspjeh ne će izostati. Dok je prvobitni atomski sat radio pomoću plina amonijaka, dotle se sada razrađuje više raznih sistema koristeći druge atome. Prva konstrukcija atomskog sata temeljila se je na konstrukciji kvarc sata i uključivala je u sebi kristal kvarca. Kako smo vidjeli kvarc sat se osniva na vlastitoj frekvenciji kristala, koja se vremenom može ipak mijenjati. Premda mehaničko titranje kvarca upravlja električnim titra-
jima titrajnog kruga u koji je uključen, to se ipak u izvjesnim granicama može električnim putem mijenjati frekvencija titranja kristala kvarca. Da postignemo veću stalnost frekvencije potrebno je naći titraje, koji će biti stalnije frekvencije od kvarca.

Tvorci prvog atomskog sata upotrebili su u tu svrhu titraje molekule amonijaka. Ta je molekula sastavljena od jednog atoma dušika i tri atoma vodika. Razmještaj atoma u molekuli nije stalan, nego atomi neprekidno titraju oko nekog srednjeg položaja. Atomi mogu titrati na različne načine, a to sa svoje strane uzrokuje prema iznosu energije različite apsorpcije svjetlosti, kad ona prolazi kroz atmosferu amonijaka. Među mnogim apsorpcionim linijama u spektru amonijaka najjača je linija u infracrvenom dijelu spektra s frekvencijom od 23.870 megaherca. Ta linija potječe od titranja što ga izvodi atom dušika. Srednji razmještaj atoma u molekuli amonijaka možemo pretstaviti kao da su atomi vodika na vrhovima istostraničnog trokuta, dok atom dušika titra po osi simetrije okomito na ravninu atoma vodika, tako da skupa s atomima vodika pretstavlja vrh trostrane piramide, koji je čas iznad, čas ispod spomenute ravnine. Na slici 11. vidimo u ruci stručnjaka s lijeve strane model molekule amonijaka, gdje je prstima prihvatilo upravo atom dušika.

Djelovanje samog atomskog sata najlakše ćemo shvatiti, ako se poslu-
žimo takozvanom blok shemom na slici 12. Lijevi donji četverokut na crtežu prikazuje nam uređaj s kristalom kvarca, koji titra s frekvencijom od 100 kiloherca; iz njega se električni titraji vode u drugi blok, gdje se frekvencija povisi množenjem od 100 kiloherca na 270 megaherca (miliona herca) pomoću naročitog množitelja frekvencije, da se zatim još povisi 11 puta frekvenciju pomoću klystrona a onda se pomoću kristala silicija, koji djeluje kao harmonijski množitelj frekvencija, povisi još osam puta, tako da nakon toga frekvencija titraja odgovara upravo frekvenciji apsorpcione linije amonijaka. Ti vrlo brzi električni impulsi prolaze kroz apsorpcionu ćeliju ispunjenu amonijakom pod pritiskom od 10 do 15 mikrona stupca žive. Ukoliko frekvencija impulsa ne odgovara frekvenciji linije amonijaka signal je na izlasku oslabljen i kad stigne u diskriminator izazove odašiljanje kontrolnog signala, koji se vraća u uređaj s kristalom kvarca da bi tamo izazvao dotjerivanje vlastite frekvencije kristala, kako bi ona nakon množenja bila upravo jednaka frekvenciji apsorpcione linije. Prema tome mnogo pravilnije titranje atoma u molekuli amonijaka kontrolira nepravilnosti u titranju kvarca iz čijeg se titrajnog kruga na prije opisani način dobiva standardna frekvencija, koja se dijeli i upotrebljava na kraju u sinhron motoru.



Slika 11. Atomski sat u Washingtonu.



Slika 12. Blok dijagram uređaja atomskog sata.

Iskustvo je pokazalo da je atomski sat prilično neosjetljiv prema promjenama u širini apsorpcione linije, do koje dolazi uslijed promjena u pritisku u ćeliji apsorpcije, no ipak se pomišlja da se kao regulator upotrebi linija kisika od 60.000 megaherca, budući da je ta linija znatno oštrija. Ispi-

tuje se također i druga vrsta sata pomoću apsorpcione linije amonijaka, no tu se ne kontrolira titraje kristala kvarca, već se umjesto njega upotrebljava električni ekvivalent, t. j. titrajni krug, koji sam sebe pobuđuje. Praktično razradi takvog sata moglo se je pristupiti tek nakon što su bila proizvedena podesna mikrovalna pojačala, ali se još ne zna za rezultate.

Umjesto molekularne apsorpcione linije pokušalo se je upotrebiti i snop atoma cezija, pri čemu se eliminira efekte proistekle iz sudaranja i Dopplerova proširenja spektralne linije. Budući da je spektralna linija cezija 300 puta uža od linije amonijaka, očekuje se točnost frekvencije u omjeru jedan prema jednoj milijardi do jedan prema deset milijardi ili čak i bolje, što bi značilo točnost dnevnog hoda od $\pm 0,0001$ sek. do $\pm 0,00001$ sek., koja bi znatno premašivala točnost svih ostalih satova. Pomoću takvog sata moglo bi se konačno pomišljati na mogućnost uspoređivanja vremena određenog atomskim titrajima s vremenom određenim pomoću obilaženja Zemlje oko Sunca, t. j. sa srednjom zvjezdanom godinom, na temelju koje se određuje takozvano efemeridsko vrijeme. Danas se efemeridsko vrijeme može odrediti tek nakon duljeg vremenskog razdoblja iza trenutka koga želimo odrediti, jer se najprije iz astronomskih opažanja moraju ustanoviti kroz dulji vremenski period nepravilnosti u obrtanju Zemlje oko njene osi, da bi se izračunala srednja vrijednost i odstupanja od nje.

Koliko se dosada znade, istraživanja na polju atomskih satova vrše se samo u laboratorijima Bureau of Standards-a u Washingtonu. Rezultati, koji su dosad postignuti opravdavaju mišljenje, da živimo u doba, kad će se ostvariti velika prekretnica u mjerenju vremena. Dosada se još uvijek uspoređivao nejednolik hod satova s obrtanjem Zemlje oko osi, dok je sada nastupilo vrijeme, da se počne uspoređivati nejednoliko obrtanje Zemlje s vanredno jednolikim promjenama atomnih stanja, koja proizvode uske i nepromjenljive atomne spektralne linije. U natjecanju za većom točnosti postiglo se je to, da je točnost satova daleko nadmašila točnost astronomskih opažanja, što je još prije nekoliko decenija izgledalo prilično neostvarivo. Bilo je to gledište temeljeno na upotrebi mehaničkih satova njihalice, koji su bili gotovo na granici moguće točnosti. Vodstvo u točnosti prešlo je, međutim, u vrlo kratkom razmaku na kvarc satove, da bi kroz najkraće vrijeme u bliskoj budućnosti prešlo na atomske satove, koji će odgovarati sadanjem atomskom dobu.

LITERATURA

- F. Hope-Jones: ELECTRICAL TIME KEEPING. 2nd Ed. London 1949.
G. Lehmann: ÜBER EINIGE NEUE PRÄZISIONSUHREN. Zeitschrift für Vermessungswesen, Bd. LXV Heft 10. u. 11. 1936.
W. Grotrian u. A. Kopff: ZUR ERFORSCHUNG DES WELTALLS. Springer Berlin 1934.
W. Uhink: ZEIT UND ZEITMESSEN. VDI Verlag Berlin 1939.
S. N. Blažko: KURS PRAKTIČESKOJ ASTRONOMII. III izd. Moskva 1951.
A. Scheibe: PIEZOELEKTRIZITÄT DES QUARZES. Th. Steinkopff, Dresden 1938.
W. G. Cady: PIEZOELECTRICITY. McGraw-Hill. New York 1946.
F. E. Terman: RADIO ENGINEERING. 3rd Ed. McGraw-Hill. New-York 1947.
H. M. SMITH: QUARTZ CLOCKS OF THE GREENWICH TIME SERVICE. Monthly Notices of the R. A. S. Vol. 113, No 1. 1953.
J. Verbaandert: L'HORLOGE A QUARTZ DES LABORATOIRES RADIOÉLECTRIQUES. Communications de l'Observatoire Royal de Belgique No 42. 1952.
Sir H. Spencer Jones: REPORT OF THE TIME COMMISSION. Draft Reports II of I. A. U. Rome Meeting. Cambridge 1952.
H. Lyons: ATOMIC CLOCKS AND APPLICATIONS TO ASTRONOMY. The Astronomical Journal Vol. 56, No 5.
THE ATOMIC CLOCKS. Discovery, March 1949. Vol. X. No 3.