

Moderni satovi

Geodetska služba u našoj zemlji stoji pred značajnim astronomsko-geodetskim radovima, u cilju pravilne orijentacije i izjednačenja trigonometrijske mreže I. reda. U nekoliko članaka želimo informirati naše čitaoce o pojedinim radovima i instrumentima, kojima se služi geodetska astronomija. (Ur.)

Mjerenje točnog vremena znatno je napredovalo posljednjih trideset godina. Dok se je ranije točnost kretala oko par stotinki sekunde, novi satovi dozvoljavaju, da se govori o točnosti tisućinke sekunde. Ta visoka točnost postignuta je pomoću dva sata posve različite vrste. Jedno je sat poznat pod imenom Shortt-ovo slobodno njihalo, a drugo je kvarc sat. Dok se za Shortt-ov sat može reći, da predstavlja najviše dostignuće u izradi satova s njihalom i upravo završetak razvoja satova, koji se temelje na gravitaciji, dotle je kvarc sat prvi znatni uspjeh satova neovisnih o sili teže, koji znači tek početak razvoja u novom smjeru, ali istovremeno i prekretnicu u točnosti.

Iako u našoj zemlji još nemamo ni jedan primjerak ni Shortt sata, ni kvarc sata, ipak će biti od koristi svakom geodetskom stručnjaku, da se bar u kratkim crtama upozna s osnovnim činjenicama ustrojstva i djelovanja modernih satova, naročito zbog toga što je održavanje točnog vremena neophodni uslov za ona astronomska mjerenja, koja su, sa svoje strane, temelj daljem geodetskom radu. U ovom članku prikazuju se, uglavnom, te dvije vrste satova, i dalji razvoj u tom području.

Shortt-ovo slobodno njihalo

Stoljećima već služi njihalo za točno mjerenje vremena i ono je neprestano usavršavano. Njihaji njihala bit će to jednoličniji, što je njihalo slobodnije od svih ostalih utjecaja izuzevši gravitaciju, uslijed koje zapravo i njihalo. S druge strane, da bi njihalo vršilo svoju ulogu mjerenja vremena, t. j. ulogu sata, moramo mu na neki način odbrojavati njihaje. Potrebno je stoga osloboditi njihalo svih stranih utjecaja, koji mu smetaju u slobodnom njihanju, a istovremeno omogućiti njegovo trajno djelovanje i odbrojavanje njihaja.

Trajanje jednog njihaja može se izraziti prema poznatoj formuli mehanike:

$$T = \pi \sqrt{\frac{a^2 + k^2}{ag}} \left[1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 \sin^4 \frac{\alpha}{2} \dots \dots \right]$$

gdje je a razmak između težišta i objesišta njihala, g ubrzanje sile teže, α kut za koji se u toku njihanja njihalo maksimalno otkloni od vertikalnog položaja, t. j. amplituda, k je veličina određena momentom inercije J obzirom na os kroz težište i masom njihala M po formuli: $J = k^2 M$, dok je π Ludlofov broj. Usporedi li se ova formula s formulom za matematsko njihalo, vidimo, da dužini matematskog njihala l odgovara izraz $(a^2 + k^2)/a$, dakle će trajanje njihaja ostati konstantno dok se taj izraz ne promijeni. Budući da se s promjenom temperature mijenja veličina a , jer se njihalo steže odnosno rasteže,

utjecat će promjena temperature i na trajanje njihaja. Da se izbjegne tu promjenljivost upotrebljavaju se, s jedne strane, za izradu njihala onakve tvari, koje se vrlo malo rastežu pri porastu temperature, a, s druge strane, nastoji se izbjeći u što većoj mjeri, da njihalo bude izloženo temperaturnim promjenama.

Malu promjenu dužine izbjegava se izradom njihala od invara, koji ima vrlo mali temperaturni koeficijent rastezanja od 0,000001 za svaki 1° C., ili od taljenog kvarca s još manjim koeficijentom od samo 0,0000042. Temperaturne promjene izbjegavaju se na taj način, da se satovi drže u prostorijama u kojima su promjene temperature vrlo male. Ranije su se stoga satovi držali u izoliranim podrumima, gdje su i godišnje promjene temperature prilično neznatne. Sada se većinom grade posebna spremišta — termostati — u kojima se vještačkim putem, najčešće električnim, održava konstantna temperatura s promjenama koje dosežu ponekad tek $\pm 0,0002^{\circ}$ C.

Budući da se satovi nalaze u atmosferi, razumljivo je, da će i promjene barometrijskog pritiska također izazivati promjene u trajanju njihaja. Već je Bessel pokazao, da tome nije uzrok veći otpor zraka kretanju njihala pri većem pritisku, kako se u prvi mah pričinja najvjerojatnijim, jer je promjena u hodu, koja iz toga proizlazi suviše malena, da bi se mogla primijetiti. Promjena nastaje uslijed toga, jer je pri većem pritisku gustoća zraka veća, pa se prema tome, po Arhimedovu principu povećava uzgon njihala, dakle kao da je gravitacija oslabila, pa se produžuje trajanje njihaja. Pri snižavanju barometrijskog pritiska uzgon zraka smanjuje za manji iznos silu teže i stoga je njihanje brže. Mjerenjem je ustanovljeno, da porastu pritiska od 1 mm, odgovara usporenje njihanja od $0^{\text{s}},016$ na dan.

Utjecaj promjene barometarskog pritiska kušalo se smanjiti raznim kompenzacijama, ali se pokazalo, da je najbolje rješenje tog problema, ako se sat zatvori u stakleno zvono, hermetски zatvoreno, tako, da unutra vlada stalno jednaki pritisak. Pri tome se uzima u obzir još jedan utjecaj promjene pritiska. Smanji li se, naime, pritisak, tada se zbog slabijeg otpora poveća amplituda njihala. Po prirodi same stvari, njihalo mora biti jednake dužine i prema tome centar oscilacije njihala opisuje luk kružnice. Imamo prema tome posla s cirkularnim njihalom, kod kojeg se javlja *cirkularna pogriješka*. Ta se pogriješka očituje u tome, što je trajanje njihala ovisno o veličini amplitude; ono bi bilo neovisno kad bi se centar oscilacije kretao po epicikloidi.

Zbog cirkularne pogriješke uspori se dnevni hod za 0,004 sekunde, ako se amplituda njihaja poveća samo za 6". Prema tome, ako se smanjuje pritisak, povećava se amplituda, a povećanje amplitude zbog cirkularne pogriješke dovodi do usporenja njihala, dakle se smanjenje pritiska očituje kao usporavanje, dok smo ranije vidjeli da se smanjenje pritiska, zbog manjeg uzgona, očituje kao ubrzanje. Pri normalnom pritisku prevladuje ubrzanje, ali se ti suprotni efekti sve više izjednačuju po veličini, ako smanjujemo pritisak. Ispitivanja su pokazala, da su pri pritisku od 18 mm stupca žive ti efekti upravo jednaki, i da se tada kompenziraju, tako da u blizini tog pritiska, ni poveća-

nje, ni smanjenje pritiska ne izaziva znatnu promjenu hoda njihala. Zbog toga se najtočniji satovi drže baš pod pritiskom od oko 18 mm stupca žive, jer su tada vrlo malo osjetljivi na promjene pritiska.

Dok se kod običnih satova njihov rad regulira dodavanjem ili oduzimanjem sitnih utega njihalu, dotle bi takav postupak bio suviše grub za vrlo precizne satove, pa se kod njih najfinije dotjerivanje vrši promjenom pritiska u području od 18 mm, kad njihalo vrlo polako reagira na takvu promjenu.

Na satove s njihalom djeluju također i razni potresi, bilo to mikroseizmičke ili seizmičke prirode. Zbog toga se satovi namještaju na mjesta, koja se što bolje zaštićuju od potresa, a u Berlinu su kušali, da se takav precizni sat smjesti u jedno veliko njihalo (dugo 8 metara) vrlo velike mase, pa je to dalo izvjesne povoljne rezultate. Čini se, ipak, da će uspješni razvoj satova neovisnih o sili teže učiniti izlišnim takve uređaje.

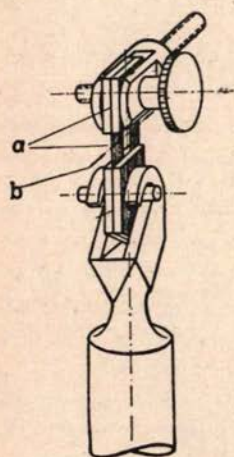
Mnogo je više uloženo truda, da se nađe takva konstrukcija, kod koje bi njihalo bilo što slobodnije, a ujedno bi se vršilo odbrojavanje njihaja i pružala energija potrebna, da se svlada otpor kretanju njihala. Može se smatrati, da danas Shortt-ov sat predstavlja rezultat tih napora i traženja.

Shortt-ov se sat sastoji u stvari od dva vrlo fina astronomska sata, koji su električnim putem povezani u jednu cjelinu. Na taj je način riješen problem, da sat bude što slobodniji u svom njihanju, kako bi njihaji bili što jednoličniji, a, s druge strane, da se izvedu sve potrebne radnje, kako bi se očitao broj njihaja, t. j. proteklo vrijeme, i kako bi se njihalo održalo u trajnom njihanju.

Ta dva zadatka protivurječne prirode: slobodno njihanje i pokretanje mehanizma za očitavanje i navijanje, raspodijeljena su na dva posebna sata: *slobodno njihalo* nazvano još »sat-gospodar« i *zavisno njihalo* zvano »sat-rob«, koji obavlja sve poslove.

Svaki od ta dva sata uređen je prema svojoj funkciji i rezultat njihova zajedničkog rada točnost, koja deseterostruko premašuje točnost dotadanih satova. Osim te ideje odvajanja funkcija, postoji niz pojedinosti u konstrukciji slobodnog sata i zavisnog sata, koje su omogućile tu veliku točnost, pa ih treba nešto podrobnije upoznati.

Slobodni sat se sastoji od invarnog njihala u obliku štapa, koje je obješeno na 2 čelična pera a (sl. 1), kako je to uvedeno i kod drugih preciznih satova, jer se je pokazalo, da je njihanje pravilnije, ako se ta pera elastično savijaju, nego, ako se njihalo objesi na oštrice, koje počivaju na pločici od



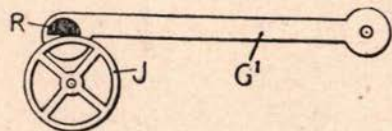
Sl. 1. Objesište njihala

ahata. Crtkana linija b predočuje liniju objesišta, oko koje se vrši njihanje. Na šipci njihala nalazi se na donjem kraju masivni uteg, koji predstavlja glavnu masu koja njiše.

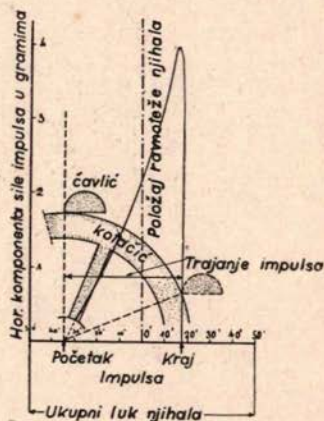
Njihalo ima na svojem gornjem kraju, malo ispod objesišta, mali kotačić I (sl. 2.), koji prima impulse, potrebne da se njihalo održi u trajnom njihanju. Pokazalo se, da je potrebno 7 do 14 puta više energije ako se impuls daje njihalu ispod utega, nego ako mu se daje blizu objesišta.

Impulsi se njihalu daju s vremena na vrijeme, na taj način, da mala poluga G_1 s čavličem od dragog kamena R padne na kotačić I i po njemu otklizi dolje, pritiskujući pri tome kotačić I njihala u lijevo upravo u trenutku, kad ono prolazi kroz položaj ravnoteže i giba se najvećom brzinom (sl. 3.). U tom trenutku će dani impuls najmanje smetati njihalo u njegovu njihanju. Smetanje traje samo toliko, koliko čavao otklizne po kotačiću, dok se njihalo ne izmakne, a zbiva se to svega jednom u 30 sekundi.

Cijeli iznos impulsa dobiva se padom poluge s čavličem težine 0,415 grama na putu od 2 mm. Od toga se potroši na klizanje i kotrljanje čavlića po kotačiću 0,0004 gram centim² žara, na trenje u osi kotačića 0,0015 g cm, na energiju kotačića, koji se i dalje još vrti nakon impulsa 0,0002 g cm, a za njihanje njihala kroz pola minute, da se svlada otpor u čeličnim perima 0,081 g cm.



Sl. 2. Davanje impulsa slobodnom njihalu



Sl. 3. Analiza impulsa

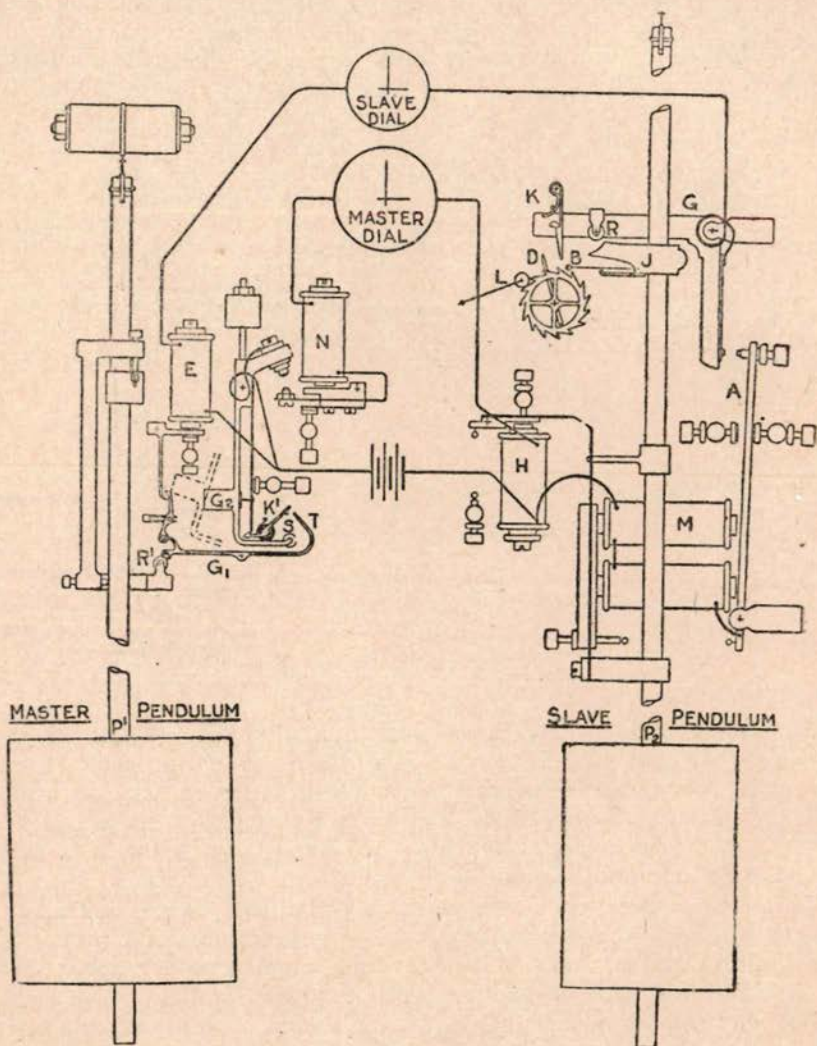
Usljed tog impulsa povećava se amplituda njihaja za 4", da bi na kraju vremenskog razmaka od pola minute pala opet na prvobitni iznos. Prema tome ovo njihalo doista zaslužuje naziv »slobodno«, pogotovo, kad se uoči, da se impuls daje isprva sasvim polako, kad čavlič počne kliziti, najjači je u sredini i završi opet sasvim laganim pritiskom pri napuštanju kotačića, a sve skupa traje tek koju desetinu sekunde u razmaku od pola minute.

Valja napomenuti, da se impuls daje padanjem poluge, dakle iznos njegove veličine ovisi o njenoj težini, a ta je nepromjenljiva i prema tome je jačina impulsa stalna. Drugi način davanja impulsa putem nekog elastičnog pera ili elektromagneta ne bi mogao biti tako konstantan.

Slobodno njihalo nema nikakva drugog dodira s okolinom, niti mora izvršiti još neku drugu radnju. Sve ostale poslove posvršava zavisni sat, a slobodno njihalo treba samo da kontrolira, da su sve operacije izvršene na vri-

jeme. Nameće se pitanje, kako je to moguće, kad slobodno njihalo nema više veze s okolinom, i u rješenju toga sastoji se glavna ideja izvedbe Shortta, da bi sinhronizirao zavisni sat sa slobodnim njihalom.

Osnovna je ovdje Shorttova misao bila, da razdvoji funkciju davanja impulsa njihalu od funkcije davanja čvrstog električnog kontakta. Impuls ne smije biti prejak, već upravo tolik, da dađe onoliko energije njihalu, koliko ono traži i potroši. Kod davanja impulsa pri svakom punom njihaju teškoća je bila upravo u tome, što je bilo nemoguće dati tako mali impuls, dok je pri intervalu davanja od pola minute impuls 15 puta veći i ta se količina može



Sl. 4. Shematski pregled Shorttova sata

ostvariti. Preduvjet tome jest, da je poluga s čavličem lagana. Upotrebi li se ta ista poluga za davanje električnog spoja kontaktom, onda je ona prelaka, da bi taj spoj bio pouzdan.

Shortt je riješio problem razdvajajući te dvije funkcije upotreбивši dvije poluge: jednu laganu za davanje impulsa, i drugu težu, za sigurno davanje kontakta. Poluga s čavličem G_1 (sl. 4.), nakon što je kotačić izmaknuo u lijevu stranu nastavlja padom i tada, kad već nema nikakvog dodira s njihalom, svojim drugim krajem otpušta drugu težu polugu G_2 , koja počinje padati i svojim početnim padom lagano opet podigne polugu za impuls G_1 na njeno mjesto. Kraj poluge G_2 nalazi se na polugi G_1 i pritiskujući je, uzdigne njen lijevi dio, koji se zakvači u svoj normalni položaj. Daljim padom G_2 stvori se čvrst i siguran kontakt struje, koja odlazi u zavisni sat.

Bitno je to, da je trenutak tog električnog signala određen kretanjem slobodnog njihala, t. j. zbiva se točno onda, kad slobodno njihalo izmakne kotačić ispod čavlića. Može se desiti, da čavličić dođe na kotačić nešto ranije ili kasnije, ali je trenutak napuštanja određen upravo položajem kotačića, dakle slobodnog njihala, a ne položajem čavlića. Pad čavlića na kotačić regulira se zavisnim satom i može biti prerano ili prekasno, koliko već zavisni sat varira u svom hodu. U slučaju preranog pada ili zakašnjenja, pomakne se kotačić ispod donje ravne strane čavlića za nešto manje od 0,01 mm, ali je usprkos tome kraj dodira u onom trenutku, kad lijevi rub čavlića napusti kotačić.

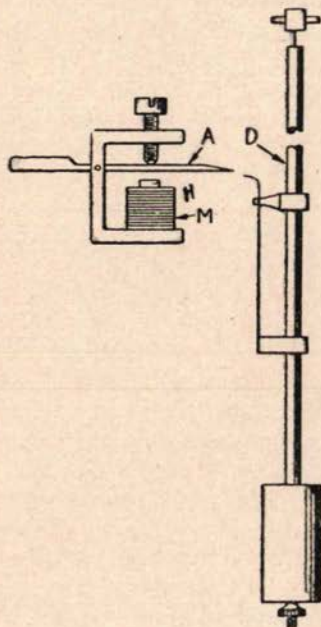
Sada treba pogledati kako se vrši sinhronizacija zavisnog sata i kako on vrši svoje poslove. Krug struje, koji se zatvori padom poluge kod slobodnog njihala izazove djelatnost elektromagneta N , da podigne težu polugu, G_2 koja je izvela električni kontakt. Istodobno zatvoreni krug struje pobuđuje i elektromagnet H u zavisnom satu, koji je sastavni dio sinhronizatora.

Sinhronizator (sl. 5.) se sastoji od elektromagneta H , koji privlači kotvu sa šiljkom A . Na šipki njihala zavisnog sata nalazi se svinuto elastično pero B . Sinhronizacija se izvodi na slijedeći način. Njihalo ide neprekidno malo sporije, tako da uslijed njegova zakašnjenja vrh elastičnog pera zakasni pri dolasku do vrha kotve A , koja ga zahvati i izvije. Uslijed toga se ubrza njihanje, jer elastična sila pera pojačava djelovanje gravitacije, a pero je tako udešeno, da bi to ubrzanje bilo jednako iznosu usporenja njihala za vrijeme od jedne minute. Prema tome će se pero hvatati tek pri svakom drugom djelovanju impulsa slobodnog njihala, koji dolaze svake tridesete sekunde. Takav sinhronizator ima točnost ispod 1/200 sekunde i tolikom točnošću sluša zavisni sat slobodno njihalo. Ovaj je sinhronizator poznat pod imenom »hit-and-miss« sinhronizator, što znači »pogodi-promaši«, jer djeluje svaki drugi put.

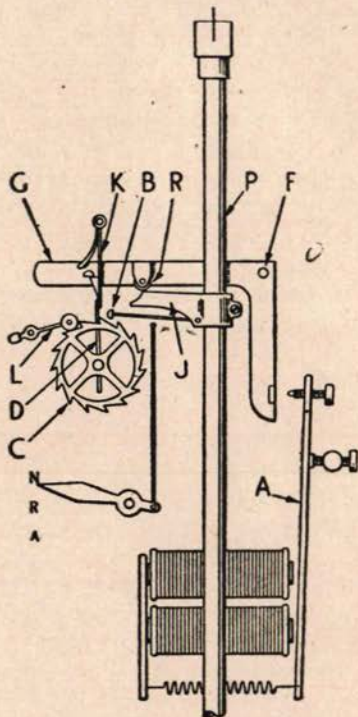
Zavisni sat, na taj način sinhroniziran sa slobodnim njihalom, sam po sebi također je vrlo precizni sat. To je poznati Synchronome električni sat, koji je obično upravljao hodom niza satova povezanih s njim električnim putem. Na priloženoj slici 6. prikazan je način kako se vrši pogon njihala i kako se daje električni signal za impuls slobodnom njihalu. Polugu G , koja se okreće oko osi F i svojom težinom pri padu daje impuls njihalu, pridržava zaporka K . Tu zaporku svako pola minute odmakne šipka D , pričvršćena na zupčaniku C . Zupčanik C se pokreće šipkom B , koja je učvršćena za samo njihalo, a pri njihaju svaki put zahvati po jedan zubac. Šipka L služi za pridržavanje zupča-

nika C, da se ne bi okrenuo natraške. U trenutku, kad se oslobodi zaporka K, poluga G se spušta i kotačićem R kotrlja se po podlozi J čvrsto vezanoj za njihalo.

Podloga J ima takav oblik, da bi impuls bio jednak nuli na početku i kraju kotrljanja, a najveći u sredini. Kao krivulju impulsa najzgodnije je uzeti dio krivulje $y = 1 - \cos x$, gdje se x mijenja od $x = 0$ do $x = 2\pi$ (vidi sl. 7. krivulja *lmk*). Budući da je horizontalna komponenta sile, koja djeluje, proporcionalna derivaciji dy/dx , gdje $y = f(x)$ predočuje krivulju, po kojoj se



Sl. 5. Shorttov sinhronizator



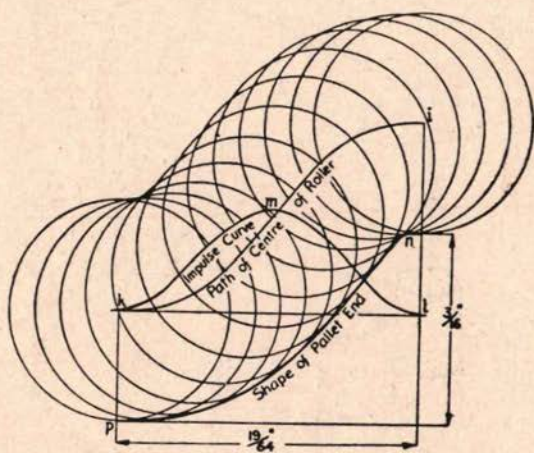
Sl. 6. Davanje impulsa zavisnom njihalu

kreće središte kotačića R, mora, da bi se dobila gornja krivulja impulsa, krivulja puta centra biti jednaka $y = x - \sin x$, koja je prikazana kao krivulja *imk*. Crtajući odgovarajuće krugove sa središtem na toj krivulji, njihova ovojnica daje krivulju oblika podloge *np*. Na slici su dimenzije povećane, jer stvarni promjer kotačića iznosi tek 6 mm.

U trenutku kad se kotačić dokotrljao do dna podloge i dao najjači impuls njihalu, kad je ono najvećom svojom brzinom prolazilo kroz točku ravnoteže, drugi kraj poluge G (sl. 6.) dodirne kontakt A i zatvori krug struje, koja protječe elektromagnetom, a taj snažno privuče kotvu A. Kotva A naglo privučena odbaci ujedno polugu G natrag u prijašnji položaj, gdje se zakvači o zaporku K. Njihalo sada slobodno niže povlačeći kotačić C, dok se cijela igra ne ponovi nakon jednog punog okreta kotačića C sa 15 zubaca, dakle svakih 30 sekundi.

Krug struje, koji poluga G zatvori svojim padom ne obuhvaća samo već spomenuti elektromagnet, već i elektromagnet u slobodnom njihalu, koji oslobodi polužicu za davanje impulsa slobodnom njihalu.

Nakon opisa detalja oba sata dobro je dati još jednom kratak opis njihova uzajamnog djelovanja. Njihalo zavisnog sata pri svakom potpunom titraju, koji traje 2 sekunde okrene mali zupčanik za jedan zubac. Pri svakom obrtu zupčanika oslobodi se poluga G (sl. 4.), koja svojim padom daje impuls njihalu zavisnog sata održavajući ga u njihanju, a ujedno izvede električni kontakt, kojim se zatvori krug električne struje. Djelovanjem te struje na elektromagnet M vrati se poluga G u normalni položaj, a ujedno se elektromagnetom E u slobodnom satu oslobodi poluga G_1 za davanje impulsa slobodnom njihalu. Padom te poluge u trenutku napuštanja dodira s njihalom oslobađa se teža poluga G_2 , koja daje potrebni električni kontakt za zatvaranje drugog kruga struje. Taj drugi krug struje pobuđuje elektromagnet N , koji vraća

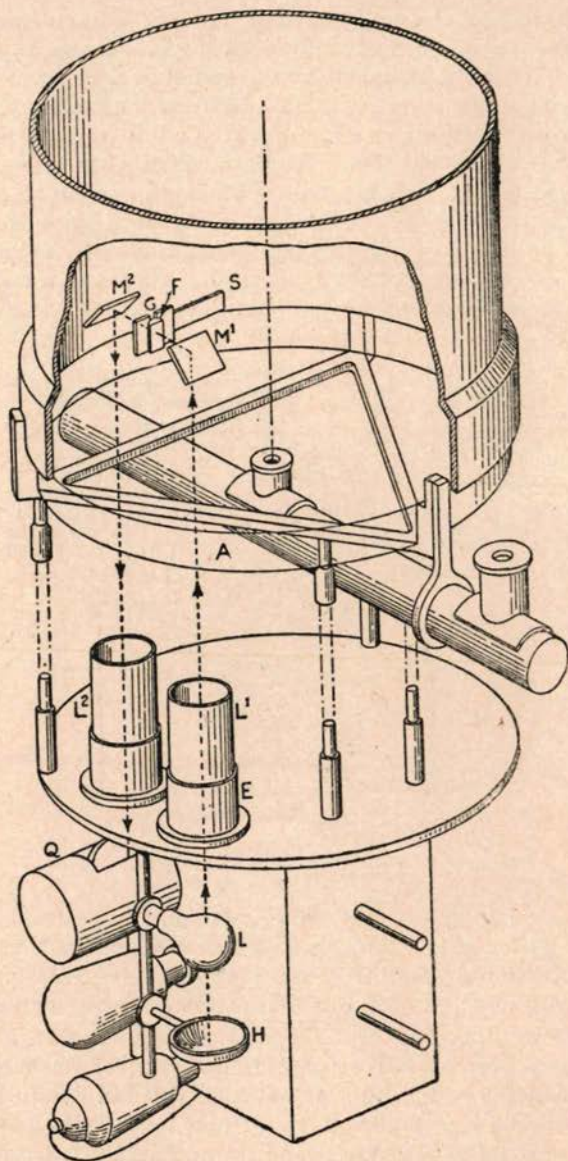


Sl. 7. Krivulja impulsa kml , staza središta kotačića kml , oblik polužnice njihala pa .

tešku polugu na njeno mjesto, a ujedno se pobudi i elektromagnet H , koji sinhronizira hod zavisnog sata i drži ga u skladu s hodom slobodnog njihala. Isto tako je u krug struje uključen još jedan elektromagnet (nije prikazan na slici), koji pokreće kazaljke na brojačniku, da se može očitati vrijeme.

Normalno se sa slobodnog njihala dobiva signal svakih 30 sekundi, pa se za očitavanje kraćih vremenskih signala treba pribjeći drugom načinu. To je realizirano pomoću fotočelije, koja se nalazi ispod dna čvrste kutije u kojoj se njiše slobodno njihalo u vakuumu, a pored nje je i žarulja kao izvor svjetlosti. Na slici 8. vidi se kako zraka svjetla polazi od žarulje L i prolazi kroz prozor E u dnu kutije i pada na zrcalo M^1 , pa se od njega odbije na zrcalo M^2 i odbivši se od njega prolazi kroz cijev L^2 i padne na osjetljivi sloj fotočelije Q , gdje pobuđuje električni impuls, koji se prenosi, bilo na brojačnik, bilo na kronograf. Između oba zrcala M^1 i M^2 nalazi se pukotina pred kojom je cilin-

drična leća, koja daje oštru i jasnu sliku svjetlosnog izvora. Na dnu njihala nalazi se pričvršćen zastor, koji prekine zraku svjetlosti baš u trenutku, kad



Sl. 8. Odbrojanje njihala pomoću fotočelije

njihalo prolazi kroz položaj ravnoteže, da je opet propusti točno 1 sekundu kasnije, kad se njihalo nalazi u istom položaju njišući se u suprotnom smjeru.

Na taj način slobodno njihalo daje signal svake sekunde, a da pri tome ne bude ometano u slobodnom njihanju, jer se doista može smatrati, da njihalo ne gubi nikakve energije prekidajući zraku svjetlosti.

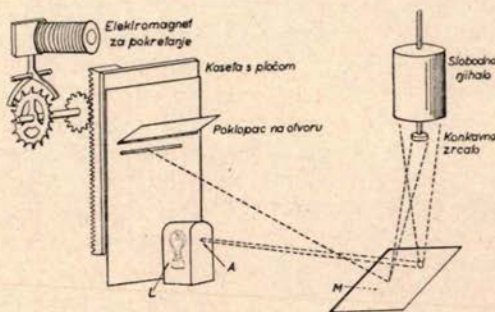
Kad se radi o ovako preciznom satu onda se treba osvrnuti na jednu činjenicu o kojoj se inače ne treba voditi računa, budući da netočnosti u vezi njihala i satnog mehanizma prekrivaju sve ostale sitnije griješke. Radi se o takozvanoj cirkularnoj pogriješci. Galileo Galilej je došao na misao da njihalo upotrebi za reguliranje sata, gledajući njihanje svjetiljke u crkvi, a koje je, mjereno udarcima bila njegove ruke, bilo uvijek jednako, bez obzira njiše li se svjetiljka jače ili slabije, t. j. neovisno o amplitudi. Huygens je proveo točnije ispitivanje njihala u svojem djelu »Horologium oscillatorium« i pokazao, da njihanje običnog njihala nije izohrono, t. j. da vrijeme njihaja ovisi o otklonu — amplitudi. Kako je već ranije spomenuto izohrone njihaje ima njihalo koje njiše po ep cikloidi, a ne po krugu, kao obično cirkularno njihalo. Pri povećanju amplitude njihaja obično njihalo zakašnjava u usporedbi s izohronim. Tako se na primjer kod njihanja s otklonom njihala od položaja ravnoteže od 50' dobiva zakašnjenje od 1,142 sekunde na dan, a kod otklona od 55' zakašnjenje već iznosi 1,382 sekunde dnevno. Iz toga se vidi, da će već povećanje otklona od 2" izazvati cirkularnu pogriješku promjene dnevnog hoda za 0,00145 sekunde dnevno, a želimo li postići točnost od tisućinke sekunde, moramo povesti računa o toj promjeni hoda, budući da bi takva pogriješka, ako bi neprestano trajala izazvala pogrešku od pola sekunde za godinu dana. To povećanje od svega 2" u otklonu znači kod sekundnog njihala, da se je donji kraj njihala odmaknuo za 0,01 mm više od položaja ravnoteže, pa zato treba voditi točnu kontrolu o veličini amplitude njihala. Može se dapače postupiti obrnuto, pa iz poznate amplitude odrediti cirkularna pogriješka i na taj način korigirati hod sata.

Loomis je našao način, da mu sam sat automatski regulira amplitudu. U slučaju, da se amplituda poveća malo iznad dozvoljene vrijednosti, onda njihalo fotoelektričnim putem izvede kratki spoj, te elektromagnet koji oslobađa polugu za davanje impulsa ne stupa u djelovanje sve dotle, dok je amplituda prevelika. Čim se amplituda zbog pomanjkanja impulsa smanji ispod kritične veličine, nema više kratkog spoja i elektromagnet obavi svoj redovni posao.

Na Lick zvjezdarnici su uveli zgodan način, da se automatski registrira veličina amplitude svakih 6 sati s mogućnošću očitavanja od 0,1. Zavisni sat ima mehanički uređaj, da svakih 6 sati zatvori krug struje kroz pola minute. Ta struja pomoću elektromagneta (v. sl. 9.) spusti fotografsku ploču za 1 mm, otvori na kaseti mali poklopac i upali žarulju *L*. Kroz malu pukotinu *A* zraka svjetlosti padne na zrcalo *M*, koje ju odrazi na malo konkavno zrcalo učvršćeno na dnu slobodnog njihala. Konkavno zrcalo ima žarišnu daljinu upravo toliku, da svijetla slika pukotine *A* odbivši se ponovno od zrcala *M* padne na pukotinu *B*. Kako god slobodno njihalo njiše tako putuje slika pukotine *A* po fotografskoj ploči duž proreza. Nakon pola minute zavisni sat prekine krug struje, pa se žarulja ugasi i zatvori poklopac. Šest sati kasnije stvar se ponovi i tako se može otlikati na jednoj ploči 120 tragova kretanja njihala kroz mjesec dana. Na taj način dobije se automatski zabilježeno mnijenjanje veličine amplitude, koje se preračuna u promjene hoda i eliminira.

Preostaju još samo pogreške zbog varijacije temperature, ukoliko termostat nije dovoljno točan, i pogriješka uslijed takozvanog sekularnog istežanja invarnog štapa njihala. Proučivši dugim nizom te pogriješke, preostanu još pogriješke uslijed mikroseizmičkih pomaka zemaljske površine i zbog neprestanog mijenjanja nivoa uslijed nagibanja prouzročeno osunčavanjem i nejednakim zagrijavanjem zgrade. To nagibanje kao i svaka druga nestabilnost njihala izvodi promjene u hodu. Ukoliko je zbog svega toga potrebno izmijeniti malo hod slobodnog njihala, postiže se to, kako je već prije spomenuto, malom promjenom pritiska u kutiji, gdje se slobodno njihalo nalazi, pa se već malim smanjenjem ili povećanjem pritiska ubrza ili uspori njihanje.

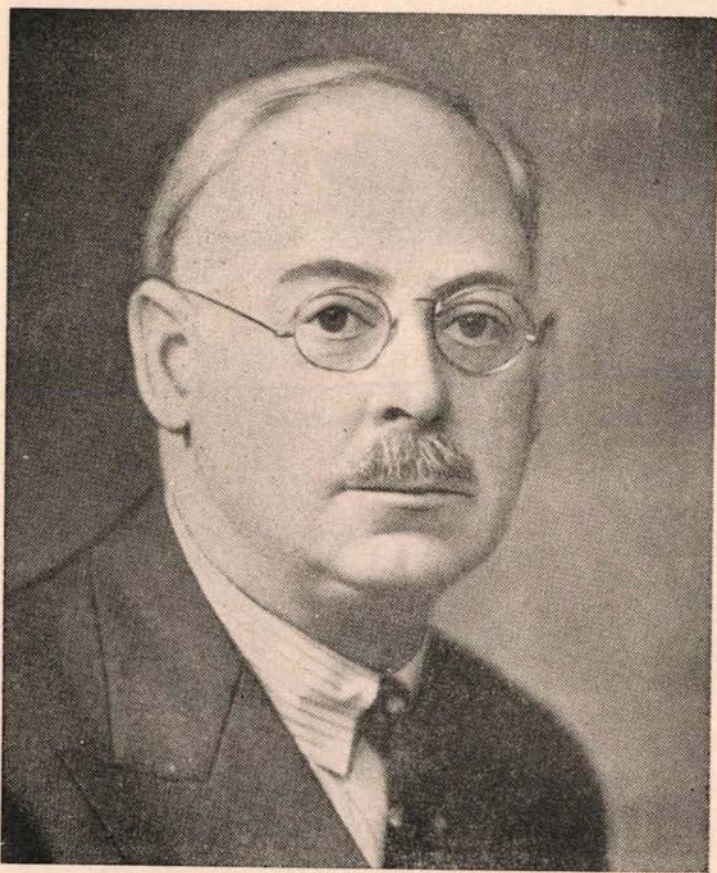
Preostaje još samo, da se utvrdi, da li su svi ti postupci zaista doprinijeli željenoj točnosti sata. Rezultati Shortt satova pokazuju, da nisu bili uzaludni uloženi naponi. Prvi je Shortt sat bio postavljen krajem 1921. godine na zvjezdarnici u Edinburghu. Tada je impuls bio davan na dnu njihala, ali su prvi rezultati, koje je objavio prof. Sampson, direktor zvjezdarnice, izazvali



Sl. 9. Registracija amplitude luka

živo interesiranje zbog velike točnosti, koju je sat pokazivao. Bio je odmah naručen takav sat za Greenwich i on je postavljen u novembru 1924. da bi od 1. januara 1925. služio kao osnovni sat zvjezdarnice. Godine 1926. postavljen je i drugi Shortt sat (Shortt broj 11), da njiše u ravnini okomitoj na ravninu prvog sata i nastavljeno je pažljivo ispitivanje njihova hoda. Već iste godine pokazalo se je, da je kod oba sata nastupilo istodobno izvjesno odstupanje prema astronomskim opažanjima. Isprva se mislilo, da je to uslijed neispravnosti satova, pa su pozvani odgovorni urarski stručnjaci, da ustanove uzroke, jer se sumnjalo u točnost temperaturne kompenzacije. Budući da su i neki drugi satovi pokazivali istodobno slična odstupanja, pokazalo je točno ispitivanje da je to uslijed kratkoperiodičnih članova nutacije i da maksimalna promjena hoda iznosi 0,003 sekunde na dan. Zbog toga je odlučeno, da se u buduću pri određivanju vremena u Greenwichu dodaju popravci za nutaciju. Shortt 11 išao je neprekidno od 20. maja 1926. do 19. januara 1935, kad je zaustavljen, da se posrebrni tablica u kutiji sata, koja služi za očitavanje duljine njihaja. Sam sat je išao točno, kao i u početku svog rada, a budući da se pogonska snaga dobiva padanjem poluge, koju je na njeno mjesto vraćao elektromagnet nakon električnog kontakta, to se kroz taj vremenski razmak zbilo 284 milijuna puta, a da ni jedan put nije uređaj zatajio.

Još je bolje rezultate postigao Shortt 44, koji je postavljen 1931. godine u Parizu. Ukupna griješka, koju je nakupio tokom cijele godine nije premašila 1/10 sekunde. Uzme li se u račun da godina ima 31,536.000 sekundi, to znači, da je točnost Shortt sata 1:300,000.000. Ranije još ispoređivao je *Loomis* u Americi svoja tri Shortt sata s kvarc satom i pronašao, da malo neslaganje među njima dolazi uslijed toga, što su Shortt satovi podložni promjeni gravitacije uslijed Mjesečeva utjecaja, dok je kvarc sat neovisan o gravitacionim promjenama. To je zapravo pokazalo, da su vlastite netočnosti Shortt meha-



W. H. Shortt

nizma toliko neznatne, da se mogu ispoljiti netočnosti uslijed Mjesečeve gravitacije u iznosu od samo 0,0002 sekunde.

Postižući ovakve uspjehe nije čudo, da se Shortt satove postavlja po mnogobrojnim zvjezdarnicama u cijelom svijetu, pa ih je do 1948. bilo ukupno 77. Na osnovu svih iskustava, može se reći, da je Shortt sat najsavršeniji sat s njihalom i da je pomoću njega postignut najviši domet u satovima te vrsti. No tek nekoliko godina iza ostvarenja Shortt sata uspjelo je ostvariti sat jednakih kvaliteta, ali koji radi na posve drugim principima: kvarc sat.