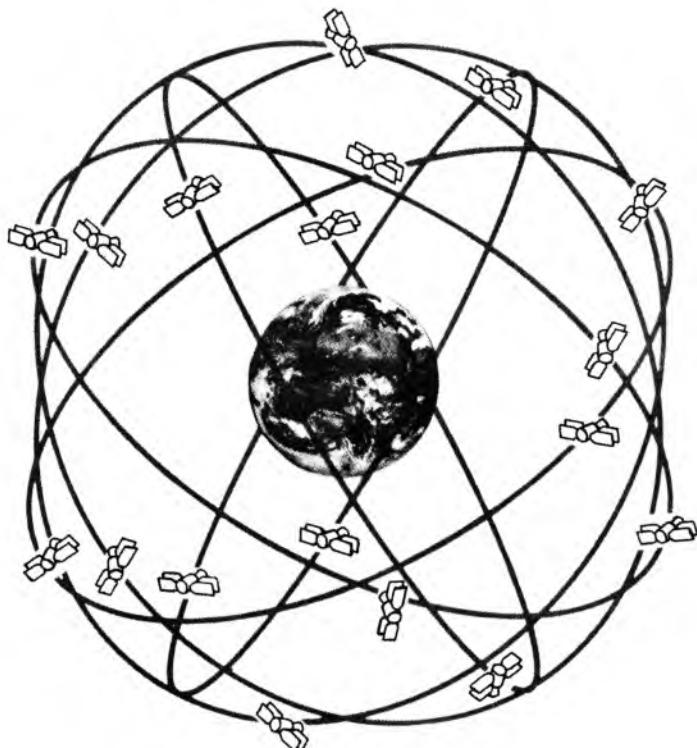


nosiocima vlastitih položajnih koordinata u trenutku opažanja i to u geocentričkom koordinatnom sustavu. Te poruke (broadcast efemeride) satelit šalje iz svoje memorije, u koju ih upisuje radijskom vezom radna grupa koja izračunava putanje satelita na temelju neprekidnih motreñja sa četiri stанице u SAD. Položaj je satelita određen, dakako, unaprijed na temelju Zemljinog gravitacijskog potencijala razvijenog prema sfernim funkcijama do 20. reda. Pomoću toga sustava moguće je odrediti koordinate stajališta na Zemlji, u odnosu na težište Zemlje, s točnošću od ± 3 do ± 5 m pri 30–50 prolaza satelita. Istodobnim mjerjenjem na dvije ili više stаница može se odrediti razlika njihovih koordinata s točnošću od nekoliko decimetara na udaljenosti od 1000 km.

Sustav Global Position System (GPS). Planiran i djelomično je ostvaren sustav GPS (sl. 20), koji će imati 18 satelita na visini 20200 km u 6 ravniina pod nagibom od 55° i s ophodnim vremenom od 12 sati zvjezdanih vremena.

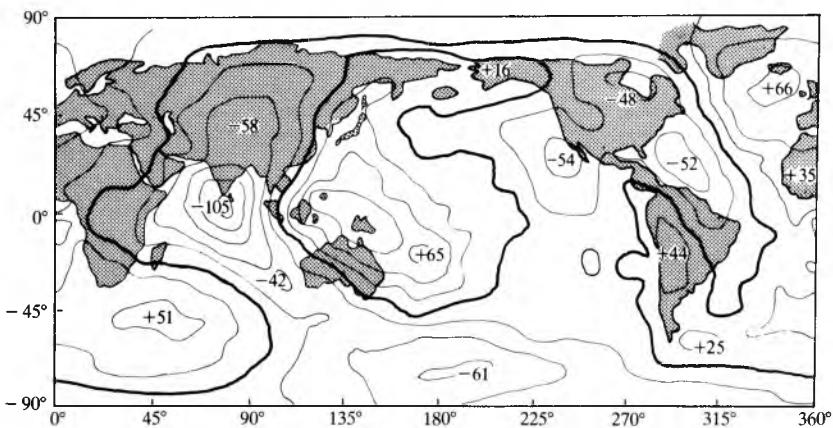
Iznad horizonta moći će se uvijek vidjeti najmanje četiri satelita. Oni šalju svoje poruke na vrlo stabilnim frekvencijama od 1227,6 i 1575,42 MHz. Poruke sadrže podatke o položaju satelita koji se upisuju u njegovu memoriju na temelju izjednačenih mjerjenja u stalnim promatračkim stanicama.



Sl. 20. Globalni pozicijski sustav GPS

Mjerena na bilo kojoj točki mogu se izvoditi pomoću tzv. pseudoudaljenosti. Pseudoudaljenost satelita određuje se tako da se od vremena prijema signala (registrirano na satu u promatračkoj stаници) odbije vrijeme odašiljanja signala sa satelita (registrirano prema vrlo točnim satovima na satelitu) i pomnoži s brzinom svjetlosti. To, međutim, neće biti točna udaljenost, ali će se moći istodobnim mjerjenjem pseudoudaljenosti do najmanje četiri satelita odrediti osim nepoznatih koordinata promatračke stанице i korekcije sata prijemnika.

Upotreboom signala preciznog koda mogu se pomoći toga sustava odrediti razlike koordinata dviju točaka udaljenih



Sl. 21. Geoidne undulacije (GEM8) u odnosu na elipsoid sa sploštenosti $f = 1/298255$ (1977)

10 km s pogreškom $\pm 0,01$ m, a udaljenih 100 km s pogreškom od $\pm 0,03$ m.

Određivanje gravitacijskog polja Zemlje. Rezultati se terestričke gravimetrije i satelitske geodezije najčešće kombiniraju za određivanje gravitacijskog polja Zemlje. Podaci prikupljeni satelitskim mjerjenjima daju osnovne karakteristike, a terestrički podaci finije detalje.

Podaci nekoliko stotina tisuća mjerjenja dobivenih promatrancem 20–30 satelita obrađeni su u centru Goddard i dobiven je model nazvan *Goddard Earth Model* (sl. 21), koji prikazuje odstupanja od elipsoidsa. Izrađeno je više takvih modela.

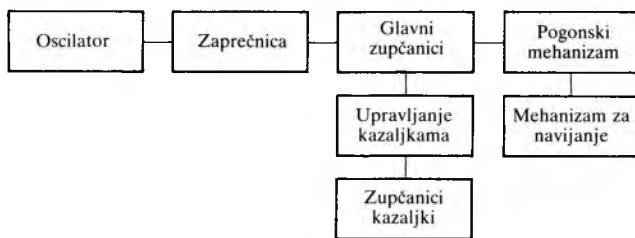
LIT.: K. Arnold, Methoden der Satellitengeodäsie. Akademie Verlag, Berlin 1970. – E. G. Bojko, B. M. Klenic'kiy, I. M. Landis, G. A. Ustinov, Построение, уравнивание и оценка точности космических геодезических сетей. Недра, Москва 1972. – A. A. Izotov, B. I. Zubinskiy, N. L. Makarenko, A. M. Mikišin, Основы спутниковой геодезии. Недра, Москва 1974. – J. Lazović, Основи теорије кретања Земљиних већаčких сателита. Народна књига, Београд 1976. – T. A. Stansell, The TRANSIT Navigation Satellite System. Magnavox 1978. – B. F. Жданок, Основы статистической обработки траекторных измерений. Советское радио, Москва 1978. – A. Živković, Теорија потенцијала и њена примена код решавања неких задатака из теорије облика Земље. Геокарта, Београд 1978. – W. Torge, Geodesy. Walter de Gruyter, Berlin-New York 1980. – G. J. Hoar, Satellite Surveying. Magnavox 1982. – Ю. В. Плахов, Применение теории возмущений в космической геодезии. Недра, Москва 1983. – В. Н. Баранов, Е. Г. Бойко, И. И. Краснорулов, Космическая геодезия. Недра, Москва 1986.

M. Solarić

SATNI MEHANIZMI, uređaji mehaničkih satova (ura) koji se sastoje od strojnih elemenata. Mehanički satovi rade na principu različitom od sunčanih, vodenih i električnih satova (v. Električni satovi, TE 4, str. 105). Mehanički satovi mogu biti stabilni i prijenosni.

Koliko je poznato, prvi sunčani sat načinjen je u Babilonu (\leftarrow 640. godine), a prvi voden sat u Aleksandriji (\leftarrow 150. godine). Gerbert od Aurillac (papa Silvestar II) (~950–1003) smatra se izumiteljem mehaničkog sata, a 1430. pronađen je sat s pogonom na oprugu. Ch. Huygens izraduje 1656. prvi sat njihalicu s njihalom koje slobodno visi, a 1674. sat s nemirnicom povezanom sa spiralnim perom. Godine 1676. R. Hook pronađe kukastu zaprečnicu, kojom se znatno povećala točnost satova. G. Graham (1715) konstruirala kotvenu zaprečnicu za satove njihalice koja se i danas upotrebljava u velikim satovima, a J. Harison (1735) kompenzaciju nemirnicu za džepne satove. Nakon pronađaska tzv. engleske kotvene zaprečnice (Th. Mudge, 1750) grade se satovi i sa sekundnom kazaljkom. J. Arnold (1782) patentira kronometarsku zaprečnicu s perom i kompenzacijском nemirnicom. Prve štopericu i kronografi s odvojenim sekundnim mehanizmom izrađene su u Švicarskoj 1820. A. Philippe (1842) konstruirala prvi sat koji ima *remontoir*, (prema franc. *remontoir* navijajući), tj. današnju krunu za navijanje.

Satni mehanizam mehaničkog sata sastoji se od oscilatora, zaprečnice, glavnih zupčanika, pogonskog mehanizma, zupčanika kazaljki, mehanizma za navijanje i mehanizma za namještanje kazaljki (sl. 1). Kućište s ležajima osigurava



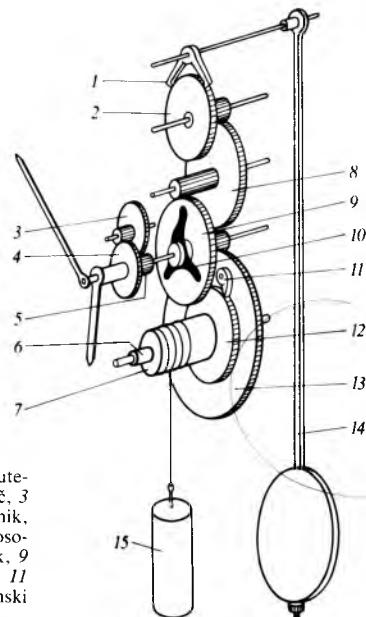
Sl. 1. Blok-sHEMA mehaničkih satova

medusobni položaj navedenih dijelova. Osim toga, ponekad ima i dodatnih mehanizama (za budenje, registraciju datuma i dr.).

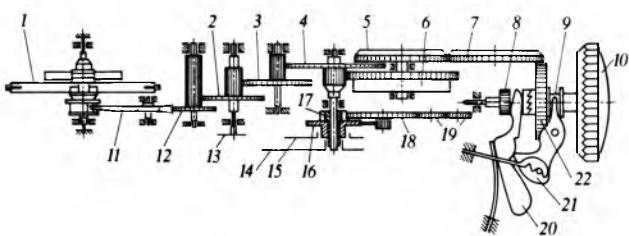
OSCILATOR

Osnova je mjerena vremena mehaničkim satovima pravilno njihanje oscilatora. U mehaničkim satovima upotrebljavaju se samo mehanički oscilatori na koje djeluje sila koja masu oscilatora stalno vraća u srednji položaj. Kut otklona od srednjega do krajnjeg položaja (mrtva točka) naziva se amplitudom. Povratna sila raste s otklonom oscilatora i najveća je u mrtvim točkama, a jednaka je nuli u srednjem položaju.

U mehaničkim satovima upotrebljavaju se dvije vrste oscilatora: njihalo (sl. 2) za stabilne i nemirnica (sl. 3) za stabilne i prijenosne satove.



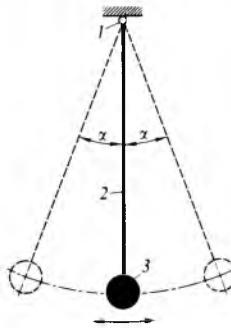
Sl. 2. Sat s njihalom pogonjen utegom. 1 kotva, 2 zaprečnički kotač, 3 prijenosni zupčanik, 4 satni zupčanik, 5 vretenka kazaljke, 6 pogonska osovina, 7 bubenjak, 8 spojni zupčanik, 9 minutni zupčanik, 10 tarno pero, 11 zapor, 12 zaporni kotač, 13 pogonski zupčanik, 14 njihalo, 15 uteg



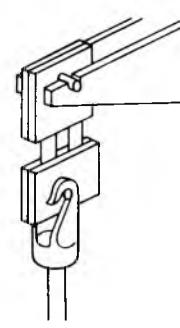
Sl. 3. Shema satnog mehanizma s nemirnicom. 1 nemirnica, 2 sekundni zupčanik, 3 spojni zupčanik, 4 minutni zupčanik, 5 zaporni kotač, 6 bubenjak s pogonskom oprugom, 7 zupčanik za navijanje, 8 spojka za navijanje, 9 osovina za navijanje, 10 kruna, 11 kotva, 12 zaprečnički kotač, 13 sekundna kazaljka, 14 minutna kazaljka, 15 satna kazaljka, 16 satni zupčanik, 17 vretenka kazaljke, 18 prijenosni zupčanik, 19 zupčanici za namještanje kazaljki, 20 spojna poluga, 21 postavna poluga, 22 vretenka za navijanje

Njihalo

Njihalo (sl. 4) može titrati samo u vertikalnom položaju. Sastoje se od tijela njihala (leće), štapa i ovjesa. Tijelo može imati različite oblike, ali uvjek takve da otpor zraka bude što manji. Za točne se satove najčešće tijelo izrađuje u obliku valjka. Na donjem dijelu štapa nalazi se regulacijska matica pomoću koje se može mijenjati položaj tijela, pa tako i hod sata. Precizni satovi s njihalom (satovi njihalice) mogu se fino regulirati dodavanjem limenih utega na regulacijski tanjurići koji se nalazi približno na polovici štapa. O ovjesu njihala ovisi točnost satnog hoda. Ima različitih ovjesa, a većina kvalitetnih satova ima ovjes s jednostrukim ili dvostrukim perom (sl. 5) debljine 0,05–0,1 mm.



Sl. 4. Njihalo. 1 ovjes, 2 štap, 3 tijelo njihala



Sl. 5. Ovjes njihala s dvostrukim perom

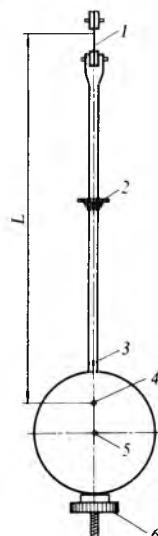
Trajanje njihaja njihala, vrijeme potrebno da tijelo njihala dođe od jedne do druge mrtve točke, određuje se iz izraza

$$T = \pi \sqrt{\frac{L}{g}}, \quad (1)$$

gdje je L reducirana duljina njihala, a g težno ubrzanje. Reducirana je duljina njihala udaljenost središta njihaja od okretne točke njihala (sl. 6). Središte je njihaja točka koja leži između težišta cijelog njihala i težišta tijela njihala. Okretna točka točno je određena ovjesištem štapa njihala. Uz ubrzanje od $9,81 \text{ ms}^{-2}$, koje odgovara našim prilikama, dobiva se da je

$$T = 1,003 \sqrt{L}. \quad (2)$$

Prema tome, trajanje njihaja ovisi samo o reduciranoj duljini njihala, a ne o njegovoj masi, pa sekundno njihalo mora imati reduciranu duljinu od 99,4 cm, a polusekundno njihalo 24,9 cm.



Sl. 6. Reducirana duljina njihala (L). 1 ovjesno pero, 2 regulacijski tanjurići, 3 težište njihala, 4 središte njihala, 5 težište tijela njihala, 6 regulacijska matica

Promjenljivost trajanja njihaja uvjetuju utjecaji kojima je učinak trajno jednak i utjecaji koji imaju promjenljiv učinak. Prvi se od tih utjecaja obično lako odstranjuju (npr.

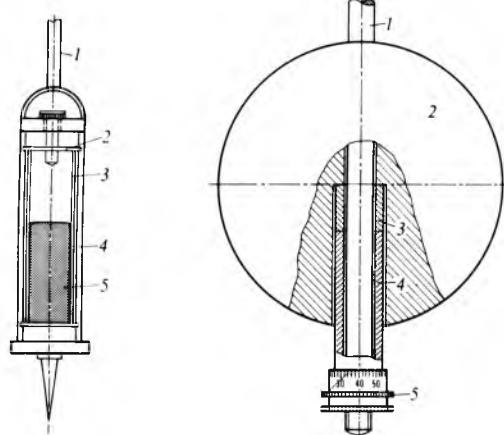
promjenom duljine njihala), dok se drugi moraju na neki način međusobno kompenzirati. Štetni utjecaji promjenljiva učinka nastaju zbog promjenljivosti temperature, atmosferskog tlaka i amplitudne njihala. Uzrok nestalnosti temperature i atmosferskog tlaka jesu klimatski uvjeti, a nestalnosti amplitude uzrok su promjenljivosti povratne sile, djelovanje zaprećnice i ovjesnog pera, te promjenljivost pogonske sile i svojstava ulja za podmazivanje.

Štetni utjecaji zbog promjene temperature pojavljuju se zbog promjene duljine štapa i ovjesa njihala, te zbog promjene elastičnosti ovjesnog pera.

Za jeftinije satove štap se njihala izrađuje od mjedi ili čelične žice, pa temperaturna pogreška iznosi nešto manje od 1 sekunde na dan pri promjeni temperature za 1°C . U satovima s njihalom srednje kvalitete štap je od suha i impregnirana smrekova drva, a temperaturna pogreška iznosi $\sim 0,2\text{s}$ na dan pri promjeni temperature za 1°C . Za satove takve kvalitete te su pogreške dopustive, a štetni se utjecaji zbog promjene temperature mogu zanemariti.

Za točne i vrlo točne satove s njihalom spomenute štetne utjecaje treba ukloniti pomoću *temperaturne kompenzacije*. Ona se osniva na upotrebi materijala različite toplinske rastezljivosti za štapove njihala, tako da se pri promjeni temperature reducirana duljina njihala održava što stalnijom, odnosno što stalnijom udaljenost između težišta i ovjesne točke njihala. Važnost temperaturne kompenzacije pokazuje činjenica da promjena duljine štapa od 1% uzrokuje promjenu dnevnog hoda sata od $\sim 432\text{s}$.

Održavanje udaljenosti između težišta i ovjesne točke njihala ostvaruje se pomoću žive (G. Graham, 1721) koja djelomično ispunjava tijelo njihala (sl. 7). Temperaturna pogreška takva njihala iznosi $0,001\text{s}$ na dan pri promjeni temperature za 1°C . Valjkasta posuda od mjedi napunjena je životom do $\sim 3/4$ obujma. Budući da živa ima veću toplinsku rastezljivost od mjedi, pri povišenoj temperaturi povišuje se stupac žive u valjku toliko da se kompenzira smanjenje težišta zbog produljenja štapa njihala. Mana je takve kompenzacije u tome što je toplinska vodljivost žive relativno malena, pa je potrebno nekoliko sati da bi živa promjenom obujma reagirala na promjenu temperature. Nasuprot tome čelični štap reagira mnogo brže.



Sl. 7. Kompenzacijsko njihalo sa živom.
1 čelik, 2 mjeđ, 3 živa,
4 mjeđena cjevčica, 5 regulacijska matica

Sl. 8. Rieflerovo invarno njihalo.
1 invarni štap, 2 tijelo njihala, 3 čelična cjevčica, 4 mjeđena cjevčica, 5 regulacijska matica

Napredak se na području temperaturne kompenzacije postigao pronalaskom feroniklene slitine *invar* ($64,3\%$ željeza i $35,7\%$ nikla), koja ima toplinsku rastezljivost od $0,88 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$. Njihalo sa štapom od invara (S. Riefler, 1900) ima lećasto ili valjkasto tijelo od teškog materijala (bronze). Tijelo je njihala poduprto dvjema cjevčicama za izjednačavanje, i to gornjom od čelika i donjom od mjeđi (sl. 8). Rastezljivost kompenzacijskih cjevčica mora biti u točnom omjeru s rastezanjem štapa njihala. To se postiže ispravnim omjerom duljine čelične i mjeđene cjevčice. Cjevčice su

smještene na štapu njihala tako da sredina tijela njihala leži na njima, a pridržava ih regulacijska matica. Kad se povisi temperatura, cjevčice se rastegnu i podignu tijelo njihala, pa tako kompenziraju povećanu duljinu štapa. Obrnuto je pri smanjenju temperature. Regulacijska matica služi za regulaciju trajanja njihaja, pa puni okret matice mijenja trajanje njihaja za 40s. Takvi se satovi upotrebljavaju u laboratorijima, zvjezdarnicama, geofizičkim zavodima i sl. Da bi se povećala preciznost, takva se njihala postavljaju u kućišta u kojima se održava konstantna temperatura, jer ni najbolja kompenzacija ne djeluje potpuno točno pri velikim promjenama temperaturi.

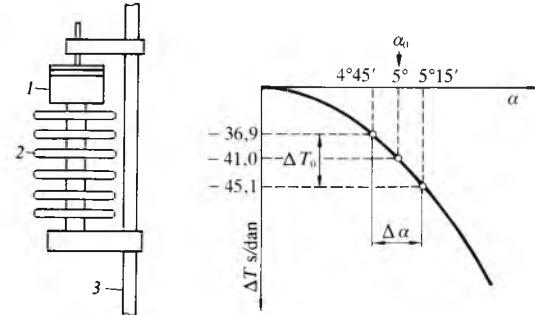
Dalje je usavršenje njihala štap od *lijevanog kremena* (K. Satori, 1910), koji ima toplinsku rastezljivost $0,4 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, pa je neovisan o temperaturi. Zbog velike krhkosti materijala takvi se satovi upotrebljavaju samo u laboratorijima gdje služe kao najprecizniji instrumenti.

Štetni utjecaji zbog promjene atmosferskog tlaka. S porastom atmosferskog tlaka njihalo postaje laganije (Arhimedov zakon!) uz istodobno povećanje kočenja zbog povećane gustoće zraka. Oba učinka usporavaju hod njihala, što iznosi $\sim 1/7$ s na dan za porast tlaka od 1333 Pa.

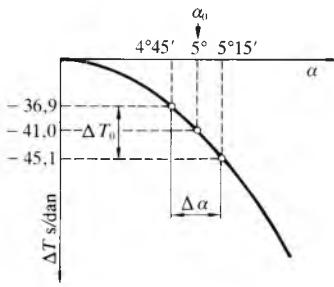
Ta se barometarska pogreška može zanemariti, osim kad se radi o veoma preciznim satovima, kad se ona ili potpuno eliminira ili kompenzira.

Barometarska pogreška može se potpuno eliminirati ako se cijeli mehanizam zatvori u nepropusnu posudu iz koje se isiše zrak da bi u njoj vladao što niži tlak. Tada je potrebno predvidjeti električno navijanje sata.

Za smanjenje barometarske pogreške upotrebljava se aneroidna kompenzacija, koja se ostvaruje pomoću valovite limene kutije iz koje je isisan zrak i na kojoj se nalazi uteg (sl. 9). Povišeni tlak zraka tlači zrakoprazu kutiju, pa se uteg srušta, što ubrzava njihalo, kompenzirajući barometarsku pogrešku.



Sl. 9. Aneroidna kompenzacija barometarske pogreške.
1 uteg, 2 limena kutija, 3 štap njihala



Sl. 10. Primjer cirkularne pogreške.
α amplituda, ΔT pogreška satnog hoda, $\Delta \alpha$ nejednolikost amplitude, ΔT_0 neregulirana pogreška hoda

Štetni utjecaji zbog promjenljivosti amplitude. Razlike se amplituda pojavljuju zbog promjenljivosti povratne sile, promjenljivog utjecaja zaprećnice i ovjesnog pera. Djelovanja se tih promjenljivosti ne mogu ukloniti, ali se mogu međusobno djelomično kompenzirati.

Utjecaj povratne sile. Vrijednost se povratne sile mijenja zbog toga što se njihalo giba po kružnoj putanji, a sila teže djeluje stalno vertikalno. Zbog toga povratna sila ne raste proporcionalno s otklonom njihala, što je pretpostavljeno pri izvođenju izraza (1), pa taj izraz vrijedi samo približno. Zapravo, trajanje se njihaja sve više povećava što je veća amplituda. Ta se *cirkularna pogreška njihala* može smanjiti, uz određenu osnovnu amplitudu (sl. 10), promjenom položaja tijela njihala (pomoću regulacijske matice). Zbog nejednolikosti osnovne amplitude nastaje teturanje satnog hoda koje je određeno izrazom

$$T = \pi \left[1 + \frac{1}{16} \left(\frac{\alpha}{57,3} \right)^2 \right] \sqrt{\frac{L}{g}}, \quad (3)$$

gdje je α amplituda njihala. Kolebanje je to veće što je veća osnovna amplituda njihala (tabl. 1).

Zbog toga točni satovi s njihalom imaju malu osnovnu amplitudu ($1\cdots1,5^\circ$), dobri zidni satovi do 7° , jednostavniji zidni satovi i do 15° .

Tablica 1
ODSTUPANJE HODA UZROKOVANO VELIČINOM POKRETNJE SILE

Osnovna amplituda njihala	Odstupanje hoda (s/dan) zbog nejednolike amplitude u području		
	$\pm 1\%$	$\pm 2\%$	$\pm 5\%$
$0,5^\circ$	0,01	0,02	0,04
1°	0,03	0,07	0,16
2°	0,13	0,26	0,66
5°	0,82	1,6	4,1
10°	3,3	6,6	16,5
20°	13,2	26,4	66,0

Satovi s njihalom veće amplitude manje su osjetljivi na vanjske utjecaje i sigurniji su u pogonu.

Utjecaj zaprečnice. Njihalo preko zaprečnice dobiva male impulse da bi moglo svaldati otpore tokom njihanja i otpore gibanju zaprečnice. Pritom se pojavljuju tri mogućnosti: a) ako impuls i otpor djeluju točno u srednjem položaju njihala, nema promjene trajanja njihaja; b) ako impuls, odnosno otpor, djeluje prije nego što njihalo dođe u srednji položaj, impuls uzrokuje skraćenje trajanja njihaja, a otpor njegovo produženje; c) ako impuls, odnosno otpor, djeluje nakon srednjeg položaja njihala, impuls uzrokuje produženje trajanja njihaja, a otpor njegovo skraćenje.

Ako je npr. impuls podijeljen na obje strane srednjeg položaja, uz uvjet da je njegovo djelovanje duže nakon prolaza njihala kroz srednji položaj, takva će raspodjela impulsa produžiti trajanje njihaja. Otpor je zaprečnice veći prije nego što njihalo stigne u srednji položaj, pa i to produžuje trajanje njihaja. Oba se ta učinka zbrajam, pa uzrokuju zaostajanje sata u hodu.

Utjecaj se zaprečnice ne može smanjiti pomoću regulacijske matice, jer amplituda nije konstantna, a njeno štetno djelovanje raste ako se amplituda smanjuje.

Utjecaj ovjesnog pera nastaje zbog pregiba pera pri gibanju njihala, pa pero svojom elastičnošću djeluje na njihalo dodatnom povratnom silom, koja je to veća što je veći otklon njihala. Ta se dodatna povratna sila pridružuje glavnoj povratnoj sili (od sile teže), pa utječe na trajanje njihaja. Osim toga, pregibanjem se ovjesnog pera njihalo malo skraćuje. Oba djelovanja ubrzavaju hod sata, ali je ono promjenljivo zbog promjene amplitude.

Medusobna kompenzacija smetnja. Za razliku od štetnih utjecaja zbog promjene temperature i promjene atmosferskog tlaka koji se mogu i djelomično eliminirati, štetni se utjecaji zbog promjenljivosti amplitute ne mogu, odnosno ne znaju eliminirati.

Za vrlo točne satove s njihalom optimalna vrijednost amplitute utvrđuje se pokusima, kojima se određuje točnost hoda sata uz različite vrijednosti amplitute.

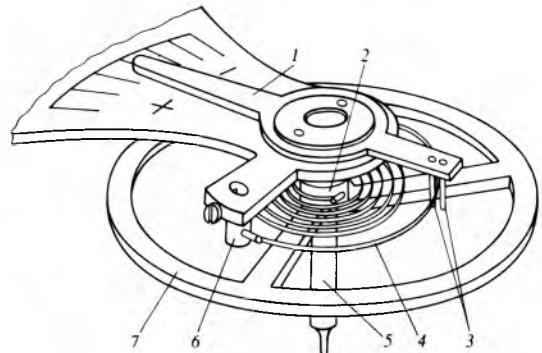
Utjecaj pogonske sile. Kad se pogonska sila ostvaruje utezima, njezina se promjenljivost može zanemariti, ali ona znatno utječe kad za satni pogon služi opruga. Pogonska se sila, naime, smanjuje s odvijanjem opruge, što se kompenzira različitim izvedbama pogonskih mehanizama i pravodobnim navijanjem sata. Promjenljivost se pogonske sile pojavljuje i zbog netočne izvedbe glavnih zupčanika (npr. udarci zubi). To se djelovanje može smanjiti točnom izvedbom zupčanika i primjenom specijalnog oblika zubi (tzv. zubna korekcija).

Utjecaj svojstava ulja za podmazivanje. Zgušnjavanjem ulja za podmazivanje na nižim temperaturama, njegovim starenjem i onečišćivanjem smanjuje se amplituda njihala. Te se smetnje mogu smanjiti upotrebom kvalitetnih ulja za

podmazivanje, ugradnjom potpuno čistih dijelova i dobrim brtvljenjem kućišta sata.

Nemirnica

Nemirnica je manje točan oscilator od njihala, ali pouzdano radi u svim položajima sata. Zbog toga se upotrebljava za prijenosne satove i za većinu ostalih satova (stolni, zidni i sl.).



Sl. 11. Nemirnica. 1 kazaljka regulatora točnosti, 2 spiralni valjak, 3 vilica, 4 spirala, 5 osovina, 6 trupac spirale, 7 vijenac

Vijenac nemirnice (sl. 11) nasaden je na osovinu na koju je pomoću spiralnog valjka učvršćena fina spirala, obično s više od 10 navoja. Vanjski završetak spirale prolazi s malom zračnošću kroz vilicu kazaljke regulatora točnosti i učvršćen je u trupcu spirale pomoću zatika. Duljina spirale od spiralnog valjka do vilice naziva se djelatnom duljinom spirale. Ta se duljina može produljiti (kad sat brza) ili skratiti (kad sat kasni) zakretanjem kazaljke regulatora točnosti.

Trajanje njihaja nemirnice ovisi o dimenzijama i materijalu vijenca i spirale. Proračun je trajanja njihaja komplikiran, a nije ni potpuno točan. Spirala se odabire prema iskustvu. U tabl. 2 nalaze se podaci o broju njihaja nemirnica za najčešće vrste mehaničkih satova.

Tablica 2
BROJ NJIHAJA SATOVA S NEMIRNICOM

Vrsta satnog mehanizma	Broj njihaja u minuti
Velike budilice	200
Brodske kronometri,	
srednje budilice	240
Džepni satovi tipa Roskopf	288
Džepni i ručni satovi,	
štopericice, male budilice	300
Ručni satovi s više njihaja	330...360
Štopericice s više njihaja	600
Specijalne štopericice	6000

Uzroci promjenljivosti trajanja njihaja nemirnica slični su onima koji utječu na trajanje njihaja u satovima s njihalom, ali su učinci na nemirnicu mnogo izrazitiji. Nemirnice su, naime, u usporedbi s njihalom lagani oscilatori i njihova je masa malo udaljena od točke okretanja, pa na njih lakše djeluju sile koje uzrokuju smetnje.

Smetnje se u radu nemirnica pojavljuju zbog promjene temperature i promjene amplitute. Utjecaj se promjene tlaka na satove s nemirnicama zanemaruje, jer pogreška iznosi $0,2\text{ s}$ na dan uz promjenu tlaka od 1333 Pa . Najveće se smetnje pojavljuju zbog promjene amplitute, i to zbog promjene pogonske sile i promjene svojstava ulja za podmazivanje, te zbog ostalih promjena o kojima će biti riječi.

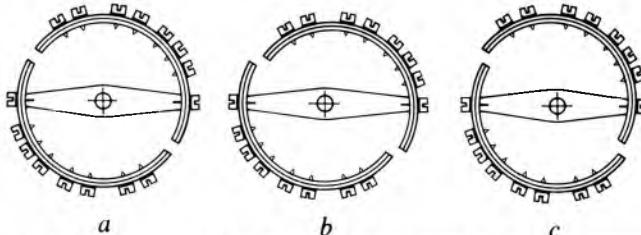
Utjecaj promjenljivosti pogonske sile i svojstava ulja za podmazivanje u satovima s nemirnicom jednak je onome u satovima s njihalom, pa se njihovo djelovanje može smanjiti na već opisani način.

Štetni utjecaji zbog promjene temperature nastaju zbog promjenljivosti dimenzija vijenca i spirale, te zbog promjenljivosti modula elastičnosti spirale.

Temperaturna pogreška jeftinijih satova, koji imaju mjeđeni vijenac i brončanu spiralu, iznosi 10 s na dan pri promjeni temperature za 1 °C. Ta pogreška nastaje praktički samo zbog promjene elastičnosti spirale, jer se utjecaji promjene dimenzija vijenca i spirale međusobno skoro potpuno poništavaju.

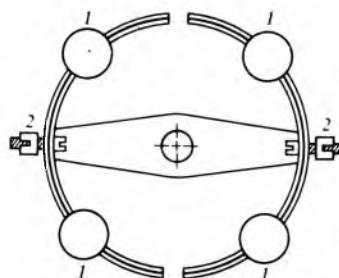
Temperaturna je pogreška sata s nemirnicom, dakle, mnogo veća nego sata s njihalom. Zbog toga je za sve kvalitetnije satove potrebno predvidjeti kompenzaciju takve pogreške. To je moguće postići ugradnjom kompenzacijске nemirnice i kompenzacijске spirale.

Kompenzacijска nemirница ima bimetalni vijenac (unutrašnji dio od čelika, a vanjski od mjeđi), koji je presječen na dva nasuprotna mjesta. Tada spirala ne mora imati kompenzacijskih svojstava. Na povišenoj temperaturi (kad bi sat kasnio) slobodni se krajevi bimetallnog vijenca saviju prema središtu (sl. 12), pa se tako smanji promjer nemirnice, što ubrzava satni hod. Na nižoj temperaturi krajevi se vijenca savijaju od središta, što usporuje satni hod.



Sl. 12. Kompenzacijска nemirница. a položaj vijenca na normalnoj temperaturi, b na povišenoj temperaturi, c na sniženoj temperaturi

Kompenzacijsko djelovanje nemirnice može se pojačati ako se dva nasuprotna vijka na vijencu premjestete tako da se postave dalje od prečke. Slabljenje se toga djelovanja postiže pomakom dvaju vijaka bliže prečki. Ako se premještanjem vijaka postigne da brzina satnog hoda za dvije krajnje temperature (npr. 5 i 35 °C) bude jednaka, sat će na srednjoj temperaturi (20 °C) imati hod brži za 2–5 s na dan. To je *sekundarna pogreška* koja nastaje jer se elastičnost spirale ne mijenja proporcionalno s temperaturom. Ta se pogreška eliminira samo u najpreciznijim satovima (npr. brodski kronometar) ugradnjom skupe Guillamove nemirnice (sl. 13), koja ima bimetallni vijenac (unutrašnji dio od mjeđi, a vanjski od slitine nikal-željezo), kompenzacijске utege i regulacijske matice.



Sl. 13. Guillamova kompenzacijска nemirница. 1 kompenzacijski uteg, 2 kompenzacijска matica

Kompenzacijска spirala izrađuje se od specijalne slitine (Elinvar, Isoval, Nivarox) kojoj se skoro ne mijenja elastičnost s promjenom temperature. Takva spirala istodobno kompenzira mali utjecaj rastezanja vijenca i spirale. Uz takvu spiralu upotrebljava se nemirnica od jedne kovine. Vijci na takvu vijencu služe samo za lakšu regulaciju sata. Za kvalitetnije satove danas se upotrebljava vijenac bez vijaka, da bi se smanjio gubitak energije. Bimetallna nemirnica ugrađuje se danas samo u najpreciznije kronometre.

Stetni utjecaji zbog promjenljivosti amplitudne. Pri upotrebi nemirnice kao oscilatora ne pojavljuje se cirkularna pogreška, pa nije potrebno težiti što manjoj vrijednosti amplitudne. Naprotiv, poželjno je da nemirnica ima što veću amplitudu

(npr. 300°). Nemirnice većih amplituda su brže i bolje odolijevaju smetnjama.

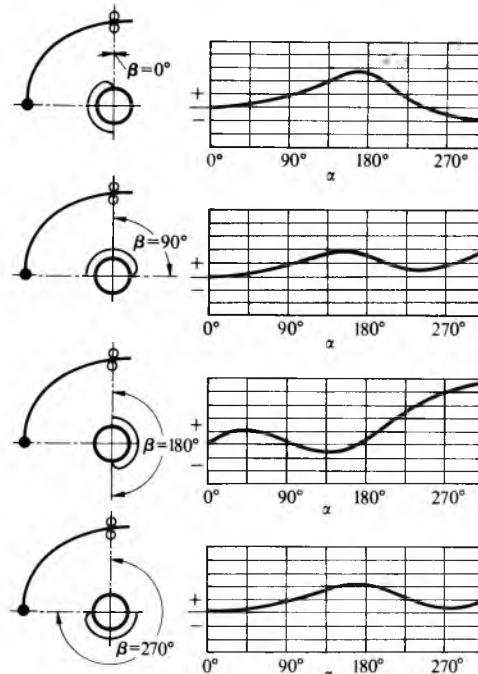
Promjenljivost amplitudne ovisi, osim o već navedenom, o promjenama utjecaja zaprečnice i zračnosti u vilici, o promjeni elastičnosti i učvršćenja spirale, te o promjenama utjecaja izvanosnog težišta nemirnice i težišta spirale.

Utjecaj zaprečnice. U satovima s nemirnicom najčešće se upotrebljava slobodna zaprečnica, koja štetno utječe samo na kratkom putu kad je zaprečnica spojena s nemirnicom. Zbog toga sat kasni, a kašnjenje se povećava sa smanjivanjem vrijednosti amplitudne. Ta se smetnja ne može ukloniti, već samo smanjiti (npr. smanjenjem dubine zahvata zaprečnice).

Utjecaj zračnosti u vilici. Kad je nemirnica u srednjem položaju, mora spirala biti točno u sredini vilice, ali s malom zračnošću. U tom položaju spirala djeluje cijelom duljinom. Ako je zračnost između zatikâ vilice velika, tada spirala pri malim amplitudama ne dotiče zatike, pa sat kasni, i obrnuto. To se može regulirati približavanjem zatika, pa se kazaljkom regulatora točnosti može utjecati na amplitudu nemirnice produljenjem ili skraćenjem djelatne duljine spirale.

Utjecaj elastičnosti spirale. Elastičnost spirale ovisi o temperaturi, ali i o naprezanju spirale. Naprezanje se mora povećavati s povećanjem zakretnog kuta nemirnice. Ako ne postoji proporcionalnost između zakretnog kuta i naprezanja, pojavljuju se razlike u trajanju njihaja, pa pri malim amplitudama sat kasni. Te razlike ovise o kemijskom sastavu i termičkoj obradbi materijala spirale.

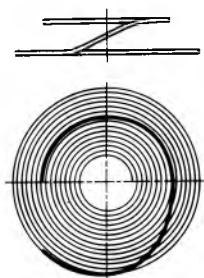
Utjecaj učvršćenja spirale. Kad se njiše nemirnica, spirala se izmjenično skuplja i širi, pa se u njoj pojavljuje naprezanje koje stvara povratnu silu. Zbog toga što je unutrašnji kraj spirale učvršćen u spiralni valjak, a vanjski u trupac spirale, nastaje dodatno naprezanje koje potiskuje zavoje spirale iz osi. To dodatno naprezanje remeti njihanje nemirnice, a smetnja se mijenja s promjenom amplitudne i kuta β (sl. 14) što ga zatvaraju točke učvršćenja spirale uz srednji položaj nemirnice. To uzrokuje i promjenljivi hod sata. U kvalitetnim satovima s plošnim spiralama, koji se najčešće upotrebljavaju, ta se pogreška iskorištava za kompenzaciju ostalih smetnji, što se postiže izborom pogodnog kuta β .



Sl. 14. Utjecaj mesta učvršćenja unutrašnjeg kraja spirale na amplitudu njihaja nemirnice. α amplituda, β kut među točkama učvršćenja spirale u srednjem položaju nemirnice

Ta se smetnja uklanja završnim krivuljama spirala. Tako se npr. za brodске kronometre upotrebljava valjkasta spirala s pogodnim završnim krivuljama na gornjem i donjem zavodu, što eliminira smetnje zbog učvršćenja spirale.

Kompromisno je rješenje upotreba Breguetove spirale (sl. 15) za točne džepne satove, koja ima samo vanjsku završnu krivulju.



Sl. 15. Breguetova spirala

Utjecaj izvanosnog težišta nemirnice pojavljuje se onda kad se težište nemirnice ne nalazi u njezinoj osi zbog suviška mase na nekom njezinu mjestu. Takvo težište uzrokuje promjenu satnog hoda, koji ovisi o položaju težišta i o vrijednosti amplitude (sl. 16). Ako se težište nemirnice pri njezinu srednjem položaju nalazi lijevo ili desno od osi, nema promjene satnog hoda uz bilo koju vrijednost amplitude. Promjene satnog hoda nastaju kad je višak mase iznad ili ispod osi nemirnice, ali nema promjene satnog hoda bez obzira na položaj viška mase kad je amplituda 220° . Dakako, te se smetnje pojavljuju kad je os nemirnice vodoravna, a nema ih kad je ona okomita.

Tablica 3
ODSTUPANJE HODA UZROKOVANO IZVANOSNIM TEŽIŠTEM SPIRALE

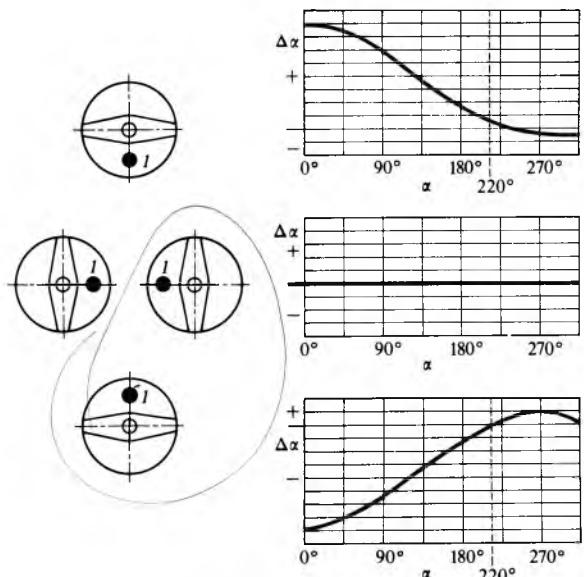
Smisao motanja spirale (pogled sa strane mosta)	Položaj unutrašnje točke učvršćenja (pri srednjem položaju nemirnice)	Odstupanje satnog hoda
ljevokretno	gore	0
	desno	brzanje
	dolje	0
	lijevo	kašnjenje
desnokretno	gore	0
	desno	kašnjenje
	dolje	0
	lijevo	brzanje

Napomena: 0 ne znači da nema odstupanja, već da je ono zanemarivo maleno.

Utjecaj izvanosnog težišta nemirnice može se potpuno eliminirati njezinim preciznim balansiranjem.

Utjecaj izvanosnog težišta spirale. Težište plošne spirale nije u osi nemirnice ni onda kad je spirala točno koncentrična. Ako spirala ima puni broj zavoja, njezino se težište nalazi na suprotnoj strani od prvog unutrašnjeg poluzavoja, i to na udaljenosti od osi nemirnice, koja je jednaka $\sim 1/4$ udaljenosti prvog zavoja spirale od osi nemirnice.

Tokom njihanja nemirnice plošna se spirala skuplja i rasteže, pa se težište spirale udaljuje i približava osi nemirnice.

Sl. 16. Utjecaj položaja težišta neuravnovežene nemirnice. I višak mase, α amplituda, $\Delta\alpha$ promjena amplitude

Smetnja zbog pomaka težišta spirale ima jednak utjecaj kao promjena težišta nemirnice. Utjecaj se pomaka težišta spirale može eliminirati pomoću završne krivulje spirale, što znatno poskupljuje izvedbu. Praktički je moguće taj utjecaj zнатно smanjiti ako se odabere takav unutrašnji položaj učvršćenja spirale da odstupanje satnog hoda bude praktički jednako nuli (tabl. 3).

Međusobna kompenzacija utjecaja smetnji koje djeluju na amplitudu jedini je način da se postigne što bolji hod satova, pogotovo hod ručnih satova s plošnom spiralom, gdje su takve smetnje najizrazitije. Od šest navedenih smetnji jedino se može eliminirati utjecaj promjene težišta nemirnice, dok se ostalih pet utjecaja mogu samo kompenzirati.

Prva tri od tih utjecaja uzrokuju kašnjenje u hodu u svim položajima sata, koje se povećava sa smanjenjem amplitude. Posljednja dva utjecaja imaju promjenljivo djelovanje. Ta se dva utjecaja iskorištavaju za kompenzaciju prvih triju utjecaja, i to tako da se njihovim učincima ubrza hod sata pri malim amplitudama, kako bi se kompenziralo kašnjenje uzrokovano utjecajem zaprečnice, zračnosti u vilici i promjenama elastičnosti pera.

Učvršćenjem spirale može se kompenzirati kašnjenje sata u svim njegovim položajima. Za kompenzaciju je potrebno da spirala ima pun broj zavoja, pa je tada kut $\beta = 0$ (sl. 14). Tada se sa smanjenjem amplitude do $\sim 180^\circ$ ubrzava hod, pa to izjednačuje navedeno kašnjenje.

ZAPREČNICA

Zaprečnica prenosi finim impulsima pogonsku silu od glavnih zupčanika na oscilator. Trenutak impulsa određuje oscilator ili tokom svakog njihaja ili jednom za vrijeme dvaju njihaja. Osim toga, zaprečnica zaustavlja i oslobađa zupčanike sata da bi se zakrenuli uvijek u ritmu njihanja oscilatora.

Zaprečnica može biti trajno spojena s oscilatorom ili samo u određenom dijelu njihaja. Što je zaprečnica kraće vrijeme spojena s oscilatorom, to se manje narušava točnost trajanja njihaja.

Zaprečnica se sastoji od zaprečničkog kotača, koji je trajno spojen sa zupčanicima sata, i kočnice ili kotve. Neke zaprečnice imaju i druge dijelove (vilice, impulsne kamene i dr.).

Prema ponašanju zaprečničkog kotača tokom nadnjihaja njihala (sl. 19), zaprečnice mogu biti povratne, mirne i slobodne.

Povratna zaprečnica nakon pada zupca zaprečničkog kotača na luk kotve zakrene taj kotač tokom nadnjihaja malo

unatrag. Ta se pogreška eliminira upotrebom mirne zaprečnica, jer se tada zaprečnički kotač ne zakreće unatrag. Slobodna zaprečnica spaja oscilator sa zaprečničkim kotačem samo u trenutku impulsa, dok se ostalo vrijeme oscilator nije slobodno.

Izvedba zaprečnica, dakako, ovisi o tome da li se upotrebljavaju u satovima s njihalom ili s nemirnicom.

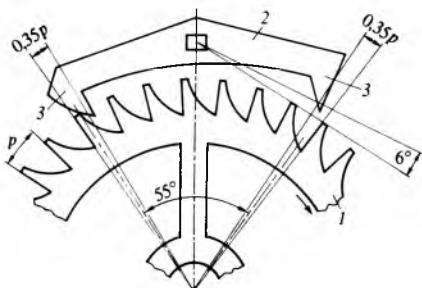
Zaprečnice satova s njihalom

Za satove s njihalom upotrebljavaju se vretenasta, kukačka, švarcvaldska i Grahamova zaprečnica.

Vretenasta zaprečnica najstarija je zaprečnica koja se već skoro 200 godina ne upotrebljava, iako je punih 500 godina uspješno obavljala svoju funkciju. Vretenasta zaprečnica tipična je povratna zaprečnica.

Kukasta zaprečnica uvedena je u urarstvo 1680. godine (W. Clement) već u takvoj izvedbi kakva se i danas upotrebljava. Primjenom kukaste zaprečnice postiže se mnogo veća točnost nego vretenastom zaprečnicom. Kukasta se zaprečnica do danas održala u gradnji jeftinih velikih satova.

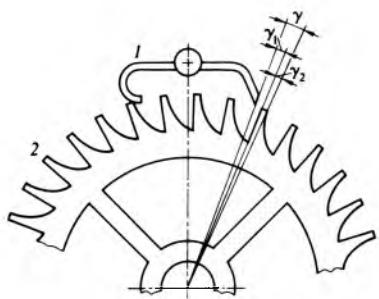
S vremenom se ustalio oblik kukaste zaprečnice prema sl. 17. Kotva je zaprečnica od kaljenog čelika i ima dvije kuke, tzv. palete, a zaprečnički je kotač od mjeridi. Zubi zaprečničkog kotača ulaze po lijevoj paleti (ulazna paleta) u kotvu, giblju se između paleta, a po desnoj (izlazna paleta) izlaze iz kotve. Oblik paleta omogućuje zubu zaprečničkog kotača da preda impuls kraku kotve, pa se skošene plohe paleta po kojima kližu zubi zaprečničkog kotača nazivaju impulsnim plohama ili plohama dizanja. Zakretni kut kotve unutar kojega zub zaprečničkog kotača djeluje na impulsnu plohu naziva se impulsnim kutom ili kutom dizanja, a veličina mu ovisi o broju zubi što ih kotva obuhvaća (npr. 6° na sl. 17). Za vrijeme tog djelovanja njihalo dobiva energiju preko kotve od zaprečničkog kotača. Kutna je širina kotve $55^\circ \dots 78^\circ$, a zub je u dodiru s paletom na dijelu koji iznosi $\sim 0,35$ koraka zaprečničkog kotača.



Sl. 17. Kukasta zaprečnica. 1 zaprečnički kotač, 2 kotva, 3 palete

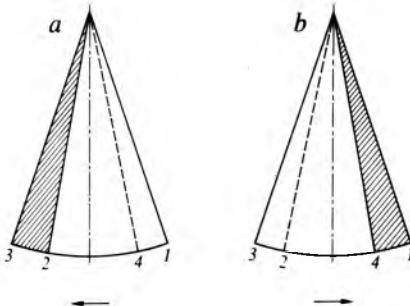
Mehanizmi koji se navijaju svaki dan imaju kotvu koja obuhvaća četiri i pol zuba, a oni koji se navijaju svakih osam dana šest i pol i više zubi zaprečničkog kotača. Kotač obično ima 36 zubi.

Švarcvaldska zaprečnica (sl. 18) ima zaprečnički kotač od mjeridi s oštrijim zubima nego kukasta zaprečnica. Kotva je od kaljene čelične trake debole $0,4 \dots 0,8$ mm. Plohe su kotve



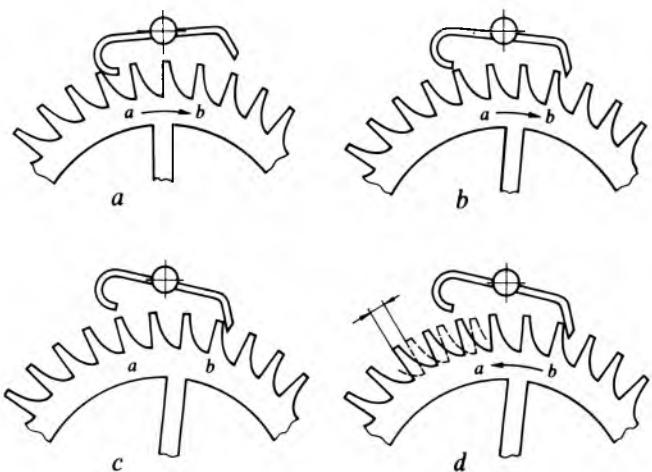
Sl. 18. Švarcvaldska zaprečnica. 1 kotva, 2 zaprečnički kotač, γ pad, γ_1 zračnost pada, γ_2 širina zubnog šiljka

koje se dodiruju sa zubima kotača polirane. Kotva obuhvaća 2,5...5,5 zubi, ovisno o amplitudi njihala, a propušta zaprečnički kotač za pola koraka tokom svakog njihaja. Obično se upotrebljava lagano i kratko njihalo.



Sl. 19. Gibanje njihala spojenog sa švarcvaldskom zaprečnicom. a njihaj od desne do lijeve mrtve točke, 1-2 trajanje impulsa, 2-3 nadnjihaj; b njihaj od lijeve do desne mrtve točke, 3-4 trajanje impulsa, 4-1 nadnjihaj

Djelovanje švarcvaldske zaprečnice može se pratiti na sl. 19 i 20. Na sl. 19 vidi se pomak njihala koji je istodobno i pomak kotve koja je spojena s njihalom. Kad njihalo stigne u desnu mrtvu točku (točka 1 na sl. 19a), njihalo mijenja smjer gibanja pritiskom kotve na zub a (sl. 20a). Od tog trenutka dobiva njihalo impuls. Za vrijeme impulsa zub a pritiska na kotvu, pa se i kotač i kotva zakreću. U točki 2 (sl. 19a) djelovanje impulsa završava, zub a sklizne s lijevog kraka kotve i kotač na trenutak nema dodira s kotvom. Tada se kotač zakrene za mali kut, koji se naziva padom, dok se zub b (sl. 20b) ne dodirne s desnim krakom kotve. U tom trenutku zaprečnica završava svoj osnovni zadatak (preuzimanje impulsa), pa bi njihalo moglo započeti drugi njihaj. To se, međutim, ne dopušta, jer bi se smanjila vrijednost amplitudne. Zbog toga se dopušta da njihalo nastavi gibanje tzv. nadnjihajem, kako bi se osiguralo da pri svakom njihaju padne sljedeći zub zaprečničkog kotača (sl. 20c). Tokom nadnjihajem pritiskuje njihalo preko kotve na zub b kotača (sl. 20d), što uzrokuje za trenutak povratno gibanje zaprečničkog kotača, koje je suprotno smjeru pogonske sile.



Sl. 20. Djelovanje švarcvaldske zaprečnice (njihaj od desne do lijeve mrtve točke). a desna mrtva točka i početak impulsa, b svršetak impulsa i početak pada, c svršetak pada i početak povratnog gibanja zaprečničkog kotača, d lijeva mrtva točka i svršetak povratnog gibanja kotača

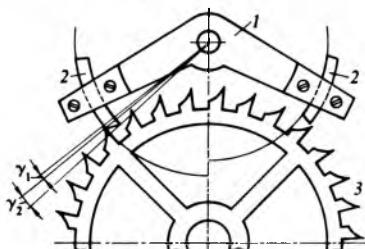
Tokom povratnog njihaja (sl. 19b) impuls započinje u točki 3, a završava u točki 4, nakon koje se njihalo nadnjihajem vraća u ishodišnu mrvu točku 1.

Svrha je pada (tzv. zračnosti pada) da se zaprečničkim kotačem zahvati samo jedan krak kotve. Ako bi, naime, drugi krak zapeo za vrh zuba kotača, zaustavio bi se satni mehanizam. Pri tom nepovoljno djeluje širina zubnog šiljka, pa je potrebno odabratи veći pad (sl. 18).

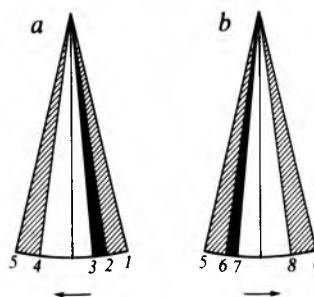
SATNI MEHANIZMI

Švarcvaldska zaprečnica nalazi se danas u mnogim satovima, a pogotovo u satovima s kukavicom.

Grahamova zaprečnica ima mjedeni kotač s oštrim zubima i mjedenu kotvu s usađenim čeličnim ili rubinskim paletama (sl. 21). Kotva obuhvaća 6,5–12,5 zubi zaprečničkog kotača. U satovima s Grahamovom zaprečnicom obično se ugrađuje dulje i teže njihalo s utezima kao pogonskim mehanizmom.

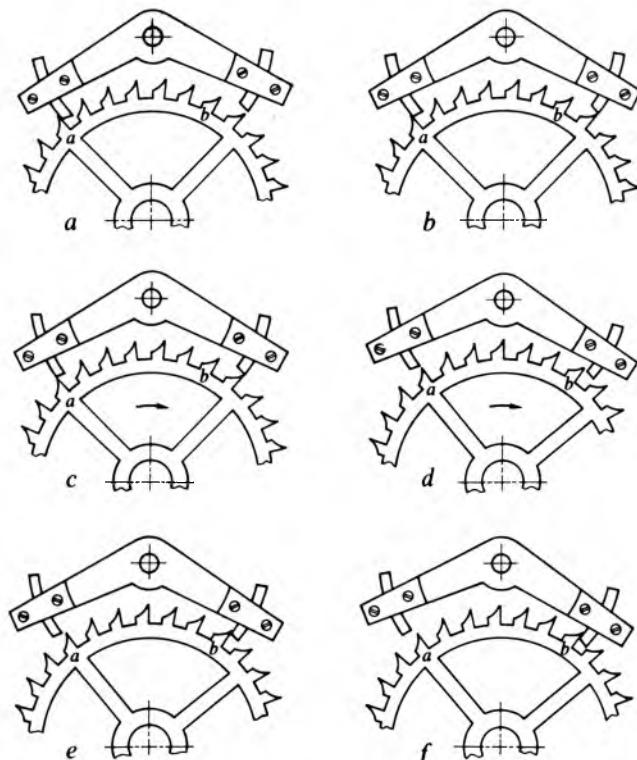


Sl. 21. Grahamova zaprečnica. 1 kotva, 2 pale; 3 zaprečnički kotač, γ_1 zahvatni kut, γ_2 impulsni kut



Od desne mrtve točke (točka 1 sa sl. 22a), kojoj odgovara položaj kotve i kotača prikazan na sl. 23a, njihalo se zajedno s kotvom giba prema srednjem položaju. Zub *a* kotača u dodiru je sa zahvatnom stranicom palete. Kad njihalo dostigne točku 2 (sl. 22a) i kad se kotva nađe u položaju prikazanom na sl. 23b, završava se nadnjihaj i njihalo

Sl. 22. Gibanje njihala spojenog s Grahamovom zaprečnicom. *a* njihaj od desne do lijeve mrtve točke, *b* njihaj od lijeve do desne mrtve točke; 1-2 i 5-6 djelovanje otpora zaprečnice tokom nadnjihaja, 2-3 i 6-7 otpor zaprečnice tokom otpuštanja, 3-4 i 7-8 trajanje impulsa, 4-5 i 8-1 otpor zaprečnice tokom nadnjihaja

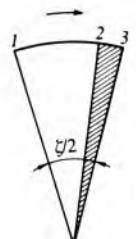


Sl. 23. Djelovanje Grahamove zaprečnice (njihaj od desne do lijeve mrtve točke). *a* desna mrtva točka, početak nadnjihaja, *b* svršetak nadnjihaja, početak otpuštanja zaprečnice, *c* svršetak otpuštanja zaprečnice, početak impuls-a, *d* svršetak impuls-a, početak pada, *e* početak prednjihaja, *f* lijeva mrtva točka

nastavlja gibanje prema točki 3. Kut za koji se zakrene kotva kad njihalo prijede put od točke 2 do točke 3 naziva se *zahvatnim kutom*. Za vrijeme toga puta zaprečnički kotač miruje. Nakon prolaza njihala kroz točku 3 kotač se počinje zakretati (sl. 23c), a zub *a* kliže po kosoj plohi palete (impulsna ploha) sve dok njihalo ne dode u točku 4 koja odgovara položaju kotve na sl. 23d. Za to vrijeme kotač predaje impuls njihalu. U točki 4 kotač se oslobada lijeve palete, prelazi preko pada sve dok zub *b* (sl. 23e) ne udari na zahvatnu plohu desne palete. Od točke 4 do 5 njihalo izvodi nadnjihaj sve dok ne stigne u lijevi mrtvi položaj (sl. 23f). Ne pojavljuje se povratno gibanje kotača, jer plohe paleta imaju kružni oblik sa središtem kruga u središtu kotve.

Kad njihalo stigne u lijevu mrtvu točku, mijenja smjer gibanja, pa se cijeli proces ponavlja (sl. 22b).

Gibanje je kotača jednostavnije nego gibanje njihala. Kotač se tokom svakog njihaja zakrene za polovicu zubnog razmaka, a to se gibanje sastoji od impulsa i pada (sl. 24).



Sl. 24. Gibanje zaprečničkog kotača tokom njihaja. 1-2 trajanje impulsa, 2-3 pad, $\frac{1}{2}$ pola zubnog koraka

Grahamova zaprečnica može se izraditi veoma točno (posebno kotva), pa se može upotrijebiti i za njihala s veoma malom amplitudom (i do 1%).

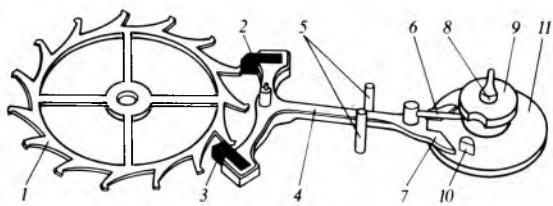
Danas se Grahamova zaprečnica upotrebljava za sve kvalitetne zidne satove s dugim njihalom.

Vilice njihala služe za spajanje njihala sa zaprečnicom. U satovima s laganim i veoma kratkim njihalom ono je ovješeno neposredno o osovini kotve (sl. 2). Tada trenje čepova povećava smetnje za vrijeme njihanja. Zbog toga se u većini satova upotrebljava vilica koja omogućuje da se njihalo objesi o samostalni ovjes, pa osovina kotve nije opterećena njegovom težinom.

Zaprečnica satova s nemirnicom

Za satove s nemirnicom danas se upotrebljavaju slobodne zaprečnice, i to švicarska zaprečnica, zaprečnica sa zaticima i kronometarska zaprečnica. U starijim satovima može se naći mirna (cilindarska) zaprečnica, koja se upotrebljavala za jeftinije vrste satova. Danas se ne upotrebljava jer ju je istisnula zaprečnica sa zaticima.

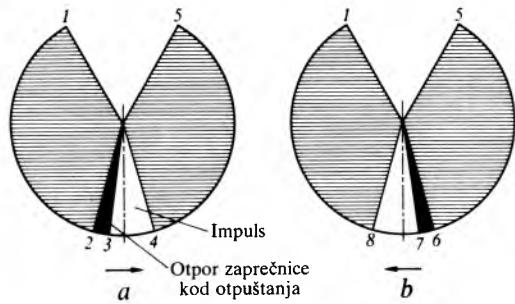
Švicarska zaprečnica (sl. 25) ima zaprečnički kotač od kaljena čelika, obično sa 15 zubi posebna oblika kojima su radne plohe polirane. Kotva je također od kaljena čelika (rjeđe mjedena ili od alpake). U krakove kotve usađena su po dva rubina da bi se smanjilo trenje. Rubini se mogu pomicati da bi se mogli prilagoditi potrebnom zahvatu. Impulsna je ploha podijeljena, pa je veći dio na rubinu, a manji na zaprečničkom kotaču. Na drugoj je strani kotve vilice na kojoj je urez, rogovi i jezičac. Urez osigurava spoj vilice s impulsnim kamenom, a time i s nemirnicom. Taj spoj nije stalan, već se uspostavlja povremeno. Nakon što se otpusti zaprečnica i ostvari impuls, nemirnica se slobodno



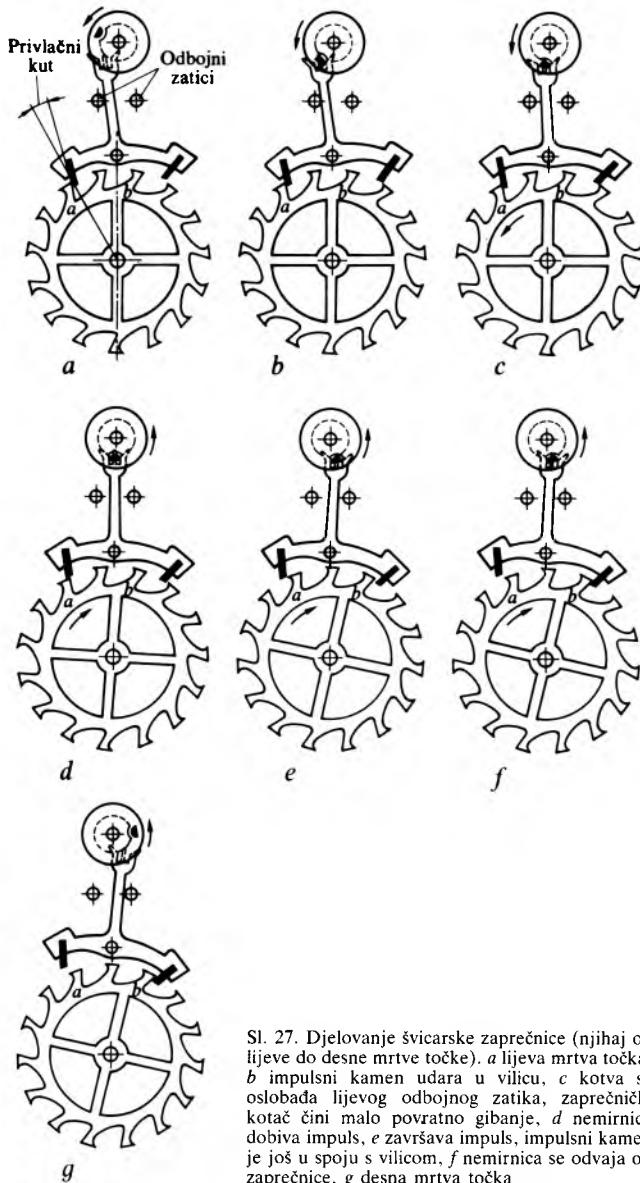
Sl. 25. Švicarska zaprečnica. 1 zaprečnički kotač, 2 ulazni kamen, 3 izlazni kamen, 4 kotva, 5 odbojni zatci, 6 jezičac kotve, 7 rogovit vilice, 8 osovina nemirnice, 9 osigurač, 10 impulsni kamen, 11 impulsna ploča

zanjiše (*gibanje po inerciji*), pa tako dođe u položaj koji je izvan utjecaja zaprečnice. Gibanje je kotve ograničeno odbojnim zaticima (uprešanim u nepomičnu ploču), na koje se kotva naslanja uvijek kad se nemirnica giba po inerciji. Taj se položaj kotve održava djelovanjem zubi zaprečničkog kotača na rubin kotve, jer su rubini skošeni za privlačni kut.

Za opis djelovanja švicarske zaprečnice poslužit će shema gibanja nemirnice (sl. 26) i prikaz položaja dijelova uređaja tokom jednog nijihaja (sl. 27), i to polazeći od položaja nemirnice u lijevoj mrtvoj točki.



Sl. 26. Gibanje nemirnice djelovanjem švicarske zaprečnice. a nijihaj od lijeve do desne mrtve točke, b nijihaj od desne do lijeve mrtve točke; 1-2, 4-5, 5-6 i 8-1 gibanje po inerciji, 2-3 i 6-7 otpor tokom otpuštanja, 3-4 i 7-8 trajanje impulsa

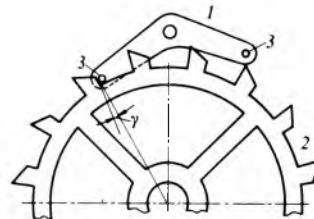


Sl. 27. Djelovanje švicarske zaprečnice (nijihaj od lijeve do desne mrtve točke). a lijeva mrtva točka, b impulsni kamen udara u vilicu, c kotva se oslobada lijevog odbojnog zatika, zaprečnički kotač čini malo povratno gibanje, d nemirnica dobiva impuls, e završava impuls, impulsni kamen je još u spoju s vilicom, f nemirnica se odvaja od zaprečnice, g desna mrtva točka

Od lijeve mrtve točke (točka 1 na sl. 26a) nemirnica se njiše prema srednjem položaju. Zaprečnički kotač i kotva miruju, jer je kotva uprta u odbojni zatik (sl. 27a). Kad impulsni kamen udari u urez vilice (točka 2 na sl. 26a i sl. 27b), zaprečnica počinje popuštati. Kotva se pomiče za kut nadnjihaja i odmah zatim za kut zahvata (točka 3 na sl. 26a i 27c). Tada se zaprečnički kotač mora neznatno zakrenuti unatrag zbog djelovanja privlačnog kuta. Zub a dolazi na brid rubina i spreman je skliznuti po njegovoj impulsnoj plohi. Zub a zatim kliže po impulsnoj plohi rubina (od točke 3 do 4 na sl. 26a i sl. 27d), zakreće kotvu, a nemirnica dobiva impuls od zaprečničkog kotača preko kotve. U točki 4 prijenos impulsa završava, impulsni kamen još je spojen s vilicom, zaprečnički se kotač osloboda i nastavlja pad, a drugi krak kotve ulazi u utor kotača (sl. 27e). Kad kotač prijede put pada, kotva zahvaća Zub b i nemirnica se oslobađa od zaprečnice (sl. 27f), pa nastavlja gibanje prema desnoj mrtvoj točki (točka 5 na sl. 26a i sl. 27g), a Zub b pritiska na rubin i djelovanjem privlačnog kuta pritiska kotvu uz odbojni zatik. Time se jedan nijihaj nemirnice završava. Tokom povratnog nijihaja cijeli se proces ponavlja.

Švicarska zaprečnica najviše je upotrebljavana zaprečnica za satove s nemirnicom. Nalazi se u svim srednje točnim i veoma točnim satovima.

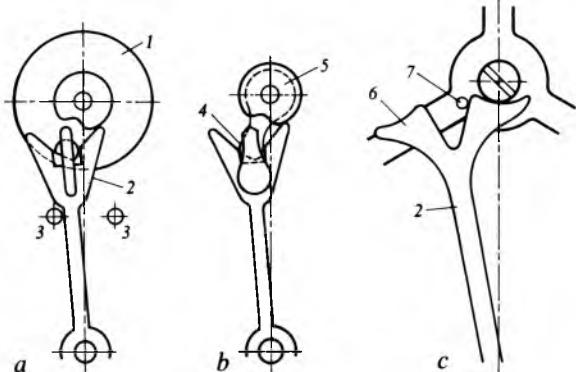
Zaprečnica sa zaticima (kotvena zaprečnica) najjednostavnija je slobodna zaprečnica satova s nemirnicom (sl. 28). Zaprečnički je kotač od mjedi i ima 15 zubi (kotač tipa Rosskopf ima 18 zubi). I kotva s vilicom je od mjedi. Palete imaju oblik zatika, a načinjene su od kaljena čelika. Impulsna je ploha podijeljena. Njen veći dio leži na zubu zaprečničkog kotača, a manji dio na prednjoj strani palete. Zahvatna ploha i privlačni kut nalaze se na zubu kotača.



Sl. 28. Zaprečnica sa zaticima. 1 kotva, 2 zaprečnički kotač, 3 palete, γ privlačni kut

Postoje tri tipa zaprečnica sa zaticima: osnovni (sl. 29a), rosskopfski (sl. 29b) i budilični (sl. 29c). Oni se razlikuju u načinu ograničavanja gibanja kotve i načinu zahvata vilice s nemirnicom.

Gibanje kotve osnovnog tipa zaprečnice sa zaticima ograničeno je odbojnim zaticima. Zahvat vilice s nemirnicom omogućuju rogovi, jezičac i impulsna ploča kao i u švicarskoj zaprečnici.



Sl. 29. Tipovi vilice za zaprečnice sa zaticima: a osnovni, b rosskopfski, c budilični. 1 impulsna ploča, 2 vilica, 3 odbojni zatici, 4 impulsni greben, 5 osigurač, 6 unutrašnji rog, 7 impulsni zatik

Zaprečnica sa zaticima tipa Rosskopf nema odbojnih zatika, a gibanje se palete ograničava njenim naslanjanjem na puni dio zaprečničkog kotača. Zahvat vilice s nemirnicom ostvaruje se rogovima i jezičcem, a impulsna je ploča

nadomještena mjedenim impulsnim grebenom. Osigurač je istokaren neposredno u materijalu osovine nemirnice.

Zaprećnica sa zaticima budiličkog tipa ima jednako ograničenje gibanja kotve kao tip Rosskopf. Zahvat je vilice s nemirnicom pojednostavljen, jer je vilica bez ježića. Njegovu funkciju preuzimaju rogov i udubljenje u osovinu nemirnice. Impulsni je kamen nadomješten čeličnim zatikom uprešanim u nemirnicu.

Zaprećnice sa zaticima upotrebljavaju se za sve vrste jeftinih satova s nemirnicom.

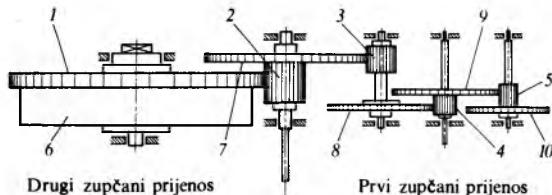
Kronometarska zaprećnica. U satovima s kronometarskom zaprećnicom nemirnica dobiva impuls tokom svakog drugog njihaja posredovanjem zaprećničkog kotača, a ne posredovanjem kotve. Isključivanjem kotve smanjuju se gubici energije u zaprećničkom mehanizmu.

Satovi s kronometarskom zaprećnicom rade vrlo točno, ali je zaprećnica veoma osjetljiva na trešnju. Danas se takva zaprećnica upotrebljava samo još za brodske kronometre.

GLAVNI ZUPČANICI

Pomoću glavnih zupčanika prenosi se pogonska energija na zaprećnicu, a preko nje na oscilator, te se broje njihaji oscilatora. Glavnim se zupčanicima smatraju svi parovi zupčanika. Zupčanik koji ima manje od 15 zubi obično se naziva vretenkom. Zupčanik je pogonski, a vretenka pogonjeni dio para zupčanika. Zupčanik je obično mjeden, a vretenka čelična (obično od kaljena polirana čelika), jer se tako postiže malo trenje među zupčanicima.

Izvedba s minutnim zupčanicom. Kad postoji minutni zupčanik, os toga zupčanika dijeli glavne zupčanike u dva dijela (sl. 30).



Sl. 30. Raspored glavnih zupčanika s minutnim zupčanicom. 1 pogonski zupčanik (broj zubi Z_1), 2 minutna vretenka (Z_2), 3 meduvretenka (Z_3), 4 sekundna vretenka (Z_4), 5 zaprećnička vretenka (Z_1), 6 bubnjić s pogonskom oprugom, 7 minutni zupčanik (Z_4), 8 meduzupčanik (Z_1), 9 sekundni zupčanik (Z_2), 10 zaprećnički kotač (Z_1)

Prvi dio, koji određuje brzinu vrtnje minutnog zupčanika (1 okr./h), počinje zaprećničkom vretenkom, a završava minutnim zupčanicom. Prijenosni omjer prvog dijela glavnih zupčanika, između zaprećničke vretenke i minutnog zupčanika, određen je izrazom

$$i_1 = \frac{n_{osc}}{k Z_1}, \quad (4)$$

gdje je n_{osc} broj njihaja oscilatora u satu, k broj njihaja koji je potreban da se zaprećnički kotač pomakne za jedan zub (obično $k = 2$), a Z_1 broj zubi zaprećničkog kotača. Prema sl. 30 prvi dio glavnih zupčanika ima tri zahvatna para, pa je prijenosni omjer

$$i_1 = i_1 i_2 i_3 = \frac{Z_2}{Z_1} \cdot \frac{Z_3}{Z_2} \cdot \frac{Z_4}{Z_3}, \quad (5)$$

gdje su i_1, i_2, i_3 prijenosni omjeri zahvatnih parova, Z_2, Z_3, Z_4 brojevi zubi zupčanika, a z_1, z_2, z_3 brojevi zubi vretenki.

U nekim satovima s njihalom izostavlja se sekundni zupčanik i sekundna vretenka, pa je tada prijenosni omjer

$$i'_1 = i_1 i_2 = \frac{Z_2}{z_1} \cdot \frac{Z_3}{z_2}. \quad (6)$$

Izrazi (4) i (5), odnosno (4) i (6), upotrebljavaju se za izračunavanje broja zubi zupčanika i vretenki.

Drugi dio glavnih zupčanika određuje ukupno trajanje hoda sata. Započinje pogonskim zupčanicom, a završava

minutnom vretenkom. Ukupni je prijenosni omjer

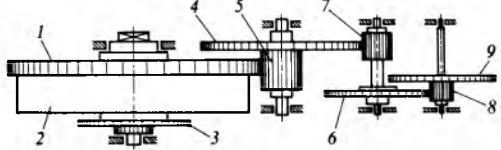
$$i_{11} = \frac{n_m}{n_k}, \quad (7)$$

gdje je n_m brzina vrtnje minutne vretenke, a n_k brzina vrtnje pogonskog zupčanika.

U satovima koji se navijaju svakog dana pogonski zupčanik neposredno pogoni minutnu vretenku (sl. 30), pa se drugi dio glavnih zupčanika sastoji samo od jednog zahvatnog para. U satovima s dužim vremenom hoda umeće se između pogonskog zupčanika i minutne vretenke jedan ili dva zupčanika s vretenkama, da bi se povećao prijenosni omjer i tako produžilo vrijeme satnog hoda.

Izvedba bez minutnog zupčanika. Tada se glavni zupčanici ne mogu podijeliti u dva dijela. Na sl. 31 vidi se takva izvedba bez sekundne kazaljke, što se upotrebljava za jeftine satove s njihalom i jeftine džepne satove (sustav Rosskopf). Tako se štedi jedan zahvatni par, pa se čitav zupčani pogon od zaprećnice do pogonskog mehanizma sastoji od tri para zupčanika. Zbog toga što nema minutnog zupčanika, prijenos se na kazaljke izvodi od pogonskog zupčanika na poklopac bubenja u kojem se nalazi pogonska opruga. Tada je prijenosni omjer

$$i = \frac{n_{osc} n_m}{k Z_1 n_k} = i_1 i_2 i_3 = \frac{Z_2}{z_1} \cdot \frac{Z_3}{z_2} \cdot \frac{Z_4}{z_3}. \quad (8)$$

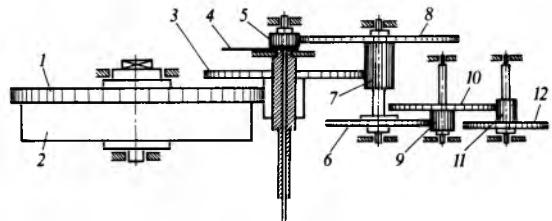


Sl. 31. Raspored glavnih zupčanika bez minutnog zupčanika. 1 pogonski zupčanik, 2 bubnjić s pogonskom oprugom, 3 prijenosni zupčanik, 4 drugi meduzupčanik (broj zubi Z_1), 5 druga meduvretenka (Z_3), 6 prvi meduzupčanik (Z_2), 7 prva meduvretenka (Z_2), 8 zaprećnička vretenka (Z_1), 9 zaprećnički kotač (Z_1)

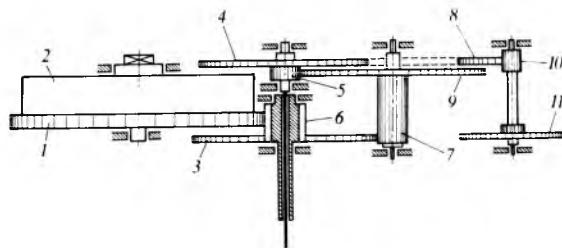
Izvedba sa središnjom sekundnom kazaljkom. Takva je izvedba moguća s posrednim i s neposrednim pogonom sekundne kazaljke.

Mehanizam s posrednim pogonom sekundne kazaljke ima dvije vretenke, od kojih jednu zahvaćaju glavni zupčanici, a druga je tzv. *središnja vretenka*, smještena u provrtanoj minutnoj vretenki, tj. u sredini satnog mehanizma. Središnja je sekundna vretenka smještena izvan prijenosa pogonske sile glavnih zupčanika, pa bi se ta vretenka nepravilno gibala zbog zračnosti između zubi vretenke i dodatnog zupčanika. Da bi se to smanjilo, postavlja se pero za kočenje koje pritiskom koči središnju sekundnu kazaljku. Tako se eliminira spomenuto nepravilno gibanje sekundne kazaljke. Da bi se sveladalio to kočenje, potrebno je povećati pogonsku silu satnog mehanizma. Na sl. 32 vidi se izvedba s neposrednim pogonom središnje sekundne kazaljke.

Ako središnja sekundna kazaljka ima neposredan pogon, sekundna je vretenka dio glavnih zupčanika, pa neposredno prenosi silu između pogonskog mehanizma i oscilatora. Najčešća takva izvedba prikazana je na sl. 33.



Sl. 32. Glavni zupčanici s posrednim pogonom središnje sekundne kazaljke. 1 pogonski zupčanik, 2 bubnjić s pogonskom oprugom, 3 minutni zupčanik, 4 pero za kočenje, 5 središnja sekundna vretenka, 6 meduzupčanik, 7 meduvretenka, 8 dodatni zupčanik, 9 sekundna vretenka, 10 sekundni zupčanik, 11 zaprećnička vretenka, 12 zaprećnički kotač



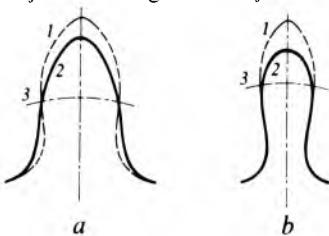
Sl. 33. Glavni zupčanici s neposrednim pogonom središnje sekundne kazaljke. 1 pogonski zupčanik, 2 bubnjić s pogonskom oprugom, 3 minutni zupčanik, 4 sekundni zupčanik, 5 sekundna vretenka, 6 minutna vretenka, 7 međuvretenka, 8 sekundni zupčanik, 9 međuzupčanik, 10 zaprečnička vretenka, 11 zaprečnički kotač

Ozubljenje zupčanika. Okretanje zupčanika nije kontinuirano, jer se njihov pomak sastoji od malih skokova koji se zamjećuju u gibanju zaprečničkog kotača, dok se to ne zapaža u gibanju pogonskog zupčanika. Tokom vrlo kratkog vremenskog intervala između tih skokova zupčanici miruju. Oblik bi zubi zupčanika u svakoj dodirnoj točki trebao osigurati da se tokom svakog pomaka zupčanika prenosi jednaka pogonska sila, radi očuvanja konstantne vrijednosti amplitude.

Za ozubljenje zupčanika može se odabrat evolventno ili cikloidno ozubljenje.

Evolventno ozubljenje manje je pogodno za glavne zupčanike, jer zupčanik s mnogo zubi mora zahvaćati vretenku s malo zubi, pa se znatno mijenja vrijednost pogonske sile koja se prenosi. Najviše se prenošena sila smanjuje u početku zahvata dvaju zubi.

Cikloidno ozubljenje osigurava i uz mali broj zubi bolje uvjete za prijenos sile nego evolventno ozubljenje, ali samo uz točno održavanje osnih udaljenosti. Ako se, naime, poveća osna udaljenost između zupčanika (*plitki zahvat*), pogonska će se sila znatno smanjiti na početku zahvata svakog para zubi, a ako se smanji osna udaljenost (*duboki zahvat*), pogonska će se sila znatno povećati na kraju svakog zahvata. I jedno i drugo uzrokuje velike promjene pogonske sile.



Sl. 34. Korekcija zubi cikloidnog ozubljenja. a Zub zupčanika, b Zub vretenke; 1 izvorni oblik zuba, 2 korigirani oblik zuba, 3 diobena kružnica

Zbog toga ni jedno od tih dvaju ozubljenja ne zadovoljava potpuno, iako je cikloidno ozubljenje pogodnije, jer se njegovi nedostaci mogu ublažiti. To se postiže korekcijom oblika zubi (sl. 34) prema švicarskim normama NHS 56702 i NHS 56703 koje se primjenjuju u urarskoj industriji. Takođe se korekcijom izjednačuje prijenosna sila i kad nije ostvarena potpuno točna osna udaljenost.

POGONSKI MEHANIZAM

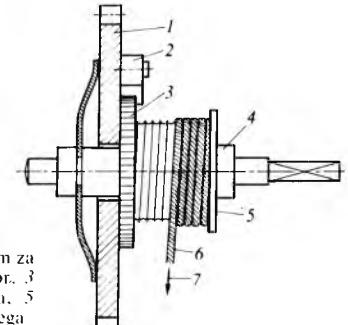
Pogonski mehanizam spremnik je energije koja se iskoristiće za pogon satnog mehanizma. Izvor je te energije rad čovjeka koji navija sat u pravilnim vremenskim razmacima.

Energija spremljena u pogonskom mehanizmu mora biti dovoljna za pogon sata ne samo za osnovno vrijeme hoda (razdoblje između dva redovita navijanja), koje npr. za džepne i ručne satove iznosi 24 sata, nego i za rezervno vrijeme hoda (za džepne i ručne satove 12...24 sata). Zbroj osnovnog i rezervnog vremena hoda naziva se ukupnim vremenom hoda.

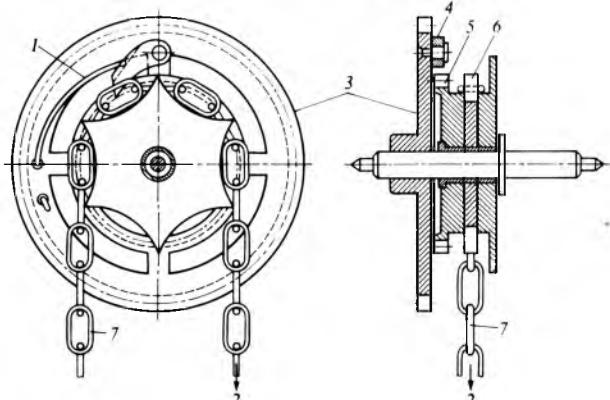
Postoje dvije vrste pogonskog mehanizma: pogonski mehanizam s utezima i pogonski mehanizam s oprugom.

Pogonski mehanizam s utezima. Osnovna je prednost toga pogona što je pogonska sila konstantna, a njegov je nedostatak što se može upotrijebiti samo za nepomične satove i što je za gibanje utega potrebno predvidjeti dovoljnu visinu.

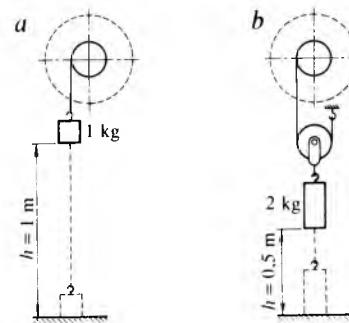
Pogonski mehanizam s utezima sastoji se od utega koji vise na struni koja se namata na valjak ili odmata s njega (sl. 35), ili visi na lancu (sl. 36). Ako uteg nije neposredno obješen o strunu ili lancu, nego na koturu (sl. 37), put se utega skraćuje na polovicu, ali uteg mora imati dvostruku masu.



Sl. 35. Pogon pomoću utega s valjkom za strunu. 1 pogonski zupčanik, 2 zapor, 3 zaporni kotač, 4 pogonska osovina, 5 valjak za strunu, 6 struna, 7 sila utega



Sl. 36. Pogon pomoću utega s lancem. 1 opruga zapora, 2 sila utega, 3 pogonski zupčanik, 4 zapor, 5 zaporni kotač, 6 kotač za lanac, 7 lanac



Sl. 37. Ovlaštenje utega. a neposredno ovlaštenje, b ovlaštenje preko kotura

Da bi se odredilo ukupno vrijeme satnog hoda, potrebno je izračunati mogući broj okretaja pogonske osovine tokom spuštanja utega pomoću izraza za neposredno obješeni uteg (sl. 37a)

$$n_k = \frac{h_u}{\pi(d + \delta)}, \quad (9)$$

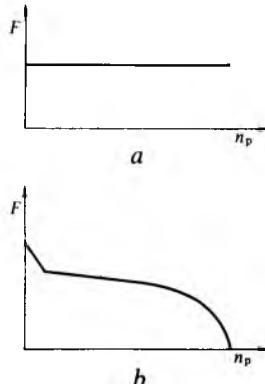
a za uteg obješen na koturu (sl. 37b)

$$n'_k = \frac{2h_u}{\pi(d + \delta)}, \quad (10)$$

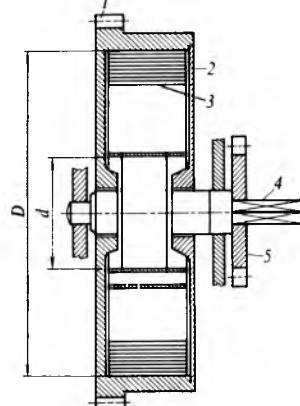
gdje je h_u ukupni put utega, d promjer valjka, a δ promjer strune.

Lanac ovija samo polovicu oboda kotača, pa je kotač uži nego valjak za strunu. Lanac se upotrebljava samo za manje točne satove, jer pogonska sila nije konstantna. Lanac se, naime, ne odvija ravnomjerno zbog promjenljivog trenja karika o zube kotača.

Pogonski mehanizam s oprugom u usporedbi s pogonom pomoću utega ima nedostatak da ima promjenljivu pogonsku силу која se postepeno smanjuje (sl. 38). Такав је pogonski mehanizam zapravo opruga savijena u spiralu која se navijanjem namota oko osovine i koja se za vrijeme hoda postepeno odvija zbog svoje elastičnosti. Opruga je obično zatvorena u pogonski bubanj (sl. 39). Završetak opruge je učvršćen na kuku koja se nalazi na unutrašnjem obodu bubenja, a početak opruge na kuku osovine bubenja. Odvijanjem opruge okreće se bubenj na kojem je pogonski zupčanik, dok osovinu bubenja ostaje nepomična. Osovinu se bubenja okreće samo kad se navija opruga, tj. kad se navija sat.



Sl. 38. Ovisnost pogonske sile F o broju okretaja pogonskog zupčanika. a) pogon s utegom, b) pogon s oprugom



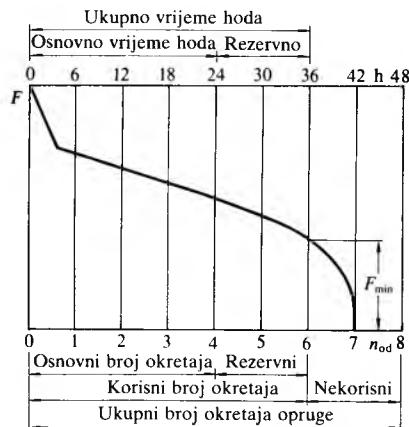
Sl. 39. Bubanj s oprugom. 1 pogonski zupčanik, 2 poklopac bubenja, 3 pogonska opruga, 4 osovina bubenja, 5 zaporni kotač

U jeftinijim satovima pogonska opruga nije smještena u bubenj (*slobodna opruga*). Tada je njezin završetak učvršćen za neki nepomični dio sata, a početak na osovinu oko koje se namata opruga. Ta se osovinu za vrijeme satnog hoda okreće u jednom, a za vrijeme navijanja u drugom smjeru. Nedostatak je takve izvedbe što sat za vrijeme navijanja ne radi.

Vrijeme satnog hoda ovisi o broju okretaja opruge tokom odvijanja (n_{od}), koji se određuje iz izraza

$$n_{od} = z_n - z_o, \quad (11)$$

gdje je z_n broj zavoja potpuno navijene opruge, z_o broj zavoja potpuno odvijene opruge. Promjena pogonske sile tokom odvijanja opruge vidi se na slici 40.



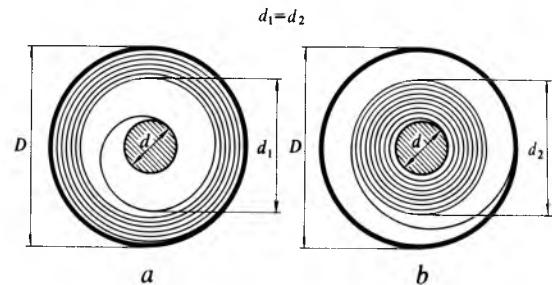
Sl. 40. Ovisnost sile pogonske opruge o broju okretaja opruge i o vremenu satnog hoda

Uz određene promjere bubenja (D i d na sl. 39) i uz zadatu debljinu opruge najviše se okretaja opruge postiže kad je potpuno navijenom oprugom ispunjena polovica obujma bubenja (sl. 41). Iz tog uvjeta određuje se i potrebna duljina opruge, koja se može nazvati optimalnom duljinom opruge.

Svako odstupanje od te optimalne duljine opruge skraćuje vrijeme satnog hoda.

Uporni broj okretaja opruge tokom odvijanja ne može se potpuno iskoristiti, jer će se sat zaustaviti kad se pogonska sila smanji na neku malu vrijednost (F_{min} na sl. 40). Tada, naime, pogonska sila opruge neće moći svladavati trenje u satnom mehanizmu. Broj okretaja opruge do te vrijednosti pogonske sile naziva se korisnim brojem okretaja.

Na pogonsku silu opruge najviše utječe njezina debljina, a mnogo manje njezina širina. Utjecaj je duljine opruge vrlo malen.

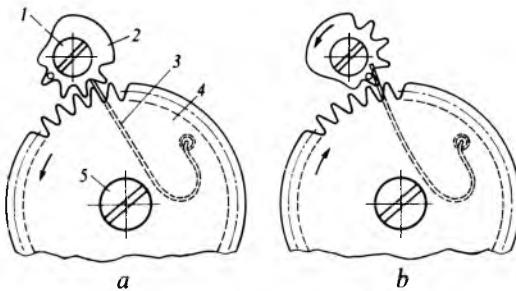


Sl. 41. Položaj opruge u bubenju. a) potpuno odvijena opruga, b) potpuno navijena opruga

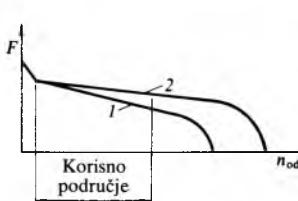
Svojstva opruge. Glavni su zahtjevi koje mora zadovoljiti opruga za pogonski mehanizam: što manja promjenljivost pogonske sile, sposobnost akumuliranja energije u što manjem prostoru, mali gubici zbog trenja i dug životni vijek (malo habanje i rijetko kidanje), te osiguranje koncentričnosti odvijanja u bubenju. Postoji mnogo mogućnosti za zadovoljenje tih zahtjeva.

Promjenljivost pogonske sile može se smanjiti upotrebom povratnog zapora, povećanjem rezervnog hoda sata i povećanjem napunjenoosti bubenja.

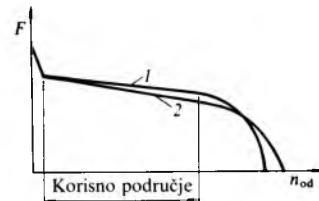
Da bi se smanjila promjenljivost pogonske sile, treba izbjegći rad na oba strma kraja karakteristike pogonske sile (sl. 40). Rad na strmini u početku odvijanja opruge izbjegava se pomoću *povratnog zapora* (sl. 42) koji se obično ugrađuje u male satove. On omogućuje zakretanje osovine bubenja neposredno nakon navijanja, što djelomično oslobada oprugu, pa se tako izbjegava rad na početnom strmom dijelu dijela karakteristike. Strmo se područje na krajnjem dijelu izbjegava ako se redovno u isto doba sat navija (npr. ručni sat svaka 24 sata).



Sl. 42. Povratni zapor. a) položaj nakon navijanja, b) položaj tokom navijanja; 1 vijača zapora, 2 zapor, 3 pero zapora, 4 zaporni kotač, 5 vijača zapornog kotača za spoj kotača s osovinom bubenja



Sl. 43. Utjecaj duljine opruge na promjenljivost pogonske sile. 1 kratka, 2 duga opruga



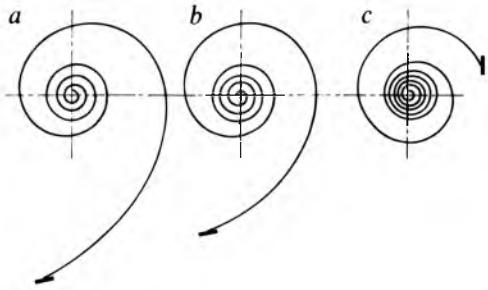
Sl. 44. Utjecaj napunjenoosti bubenja na promjenljivost pogonske sile. 1 napunjenoost bubenja 57%, 2 napunjenoost bubenja 50%

Promjenljivost se pogonske sile smanjuje *produljenjem opruge*, jer se tada pogonska sila polaganije smanjuje (sl. 43), pa se tako povećava rezervno vrijeme satnog hoda. To se može ostvariti, a da se ne prekorači ispunjenost bubenja od 50%, ako se upotrijebi kvalitetnija opruga, koja može biti tanja, ali bez smanjenja pogonske sile.

Sličan se efekt postiže ako se navijenom oprugom napuni više od 50% obujma bubenja. Tada se malo smanjuje broj okretaja opruge tokom odvijanja, ali je nešto polaganije smanjivanje pogonske sile (sl. 44).

Akumuliranje energije. Da bi se moglo akumulirati što više energije u navijenoj opruzi, potrebno ju je opteretiti do granice elastičnosti.

Mekane čelične opruge, koje se ugrađuju u jeftine budilice, imaju nisku granicu elastičnosti, pa brzo postaju sve više zavinute (sl. 45), što znači da se sve više smanjuje pogonska sila. Tvrde čelične kaljene opruge imaju visoku granicu elastičnosti i ne mijenjaju brzo svoj prvobitni spiralni oblik, ali se lakše lome.



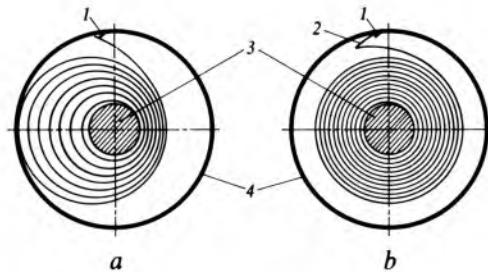
Sl. 45. Postepena trajna deformacija opruge (izgled opruge nakon vadenja iz bubnja). a nakon hoda od jednog dana, b nakon tri dana hoda, c nakon 10 dana hoda

Danas se upotrebljavaju četiri vrste opruga za satove: a) konvencionalne opruge koje se proizvode od švedskog čelika visoke čistoće s udjelom ugljika od ~1,1%, a kale se i napuštaju tek nakon valjanja na konačnu debljinu; b) teksturne opruge koje se proizvode valjanjem kaljene čelične trake (udio ugljika ~0,9%), pa se tako postiže uzdužna tekstura; one su otpornije na habanje i teže pucaju nego konvencionalne opruge; c) opruge od nerđajućeg čelika sličnih svojstava kao teksturne opruge; d) opruge od specijalnih slitina (komercijalni nazivi Elgiloy, Phynox, Nivaflex i dr.) imaju veću granicu elastičnosti, otpornije su na habanje i teže pucaju nego ostale vrste opruga, a osim toga ne rđaju i ne postaju magnetične.

Nove vrste opruga imaju dulji vijek i pogonsku silu veću za 10…15% (uz jednake dimenzije) nego konvencionalne satne opruge.

Trenje opruge. Visok se učinak opruge postiže sniženjem gubitaka zbog trenja. Trenje se medu zavojima opruge smanjuje poliranjem površina i upotrebom pogodnog maziva, a trenje bokova opruge o stijenke bubenja dovoljnom bočnom zračnosti, koja iznosi za ručne satove 0,05 mm, za džepne satove 0,10 mm, a za velike satove 0,5…1,0 mm.

Koncentričnost opruge tokom odvijanja važno je svojstvo za povećanje učinka opruge. To se postiže pomoću uzde (sl.

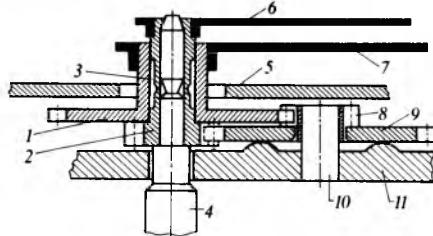


Sl. 46. Položaj opruge u bubnju tokom odvijanja. a spoj opruge s bubnjem bez uzde, b spoj opruge s bubnjem pomoću uzde; 1 kukica bubnja, 2 uzda, 3 osovina bubnja, 4 bubanj

46b). To je kratka traka, obično od istog materijala kao opruga, spojena zakovicama i zavarena na vanjski kraj opruge te spojena s bubnjem pomoću kukice.

ZUPČANICI KAZALJKI

Zupčanici kazaljki sastoje se od vretenke kazaljke, prijenosnog zupčanika, prijenosne vretenke i satnog zupčanika. Minutna se kazaljka učvršćuje na vretenku kazaljki (sl. 47) ili neposredno na produljenu minutnu osovinu, a satna je kazaljka nasadena na cjevčiću satnog zupčanika.



Sl. 47. Zupčanici kazaljki. 1 satni zupčanik (broj zubi Z_3), 2 vretenka kazaljki (z_1), 3 tarni spoj, 4 minutna vretenka, 5 ploča brojčanika, 6 minutna kazaljka, 7 satna kazaljka, 8 prijenosni zupčanik (Z_2), 9 prijenosna vretenka (z_2), 10 čep prijenosnog zupčanika, 11 satna ploča

Zupčanici kazaljki preračunavaju minute u sate i osiguravaju vezu između vretenke kazaljki i satnog zupčanika. Za jedan okretaj vretenke kazaljki mora satni zupčanik načiniti samo 1/12 okretaja ako brojčanik sata ima 12-satnu podjelu. Prijenosni omjer mora, dakle, iznosi

$$i = i_1 i_2 = \frac{z_1}{Z_2} \cdot \frac{z_2}{Z_3} = \frac{1}{12}, \quad (12)$$

gdje je z_1 broj zubi vretenke kazaljki, Z_2 broj zubi prijenosnog zupčanika, z_2 broj zubi prijenosne vretenke, a Z_3 broj zubi satnog zupčanika.

Pogonska se sila od glavnih zupčanika na zupčanike kazaljki prenosi uvijek preko tarne spojke koja pripada mehanizmu za namještanje kazaljki. Kad je tarna spojka smještena na minutnoj vretenici (obični sastav glavnih zupčanika), vretenka je kazaljki pogonski element (sl. 47). Čim se počnu pokretati kazaljke, prijenosni zupčanik postaje pogonski element koji zakreće vretenku kazaljki. Zbog toga je potrebno posebno oblikovati zube tog para zupčanika.

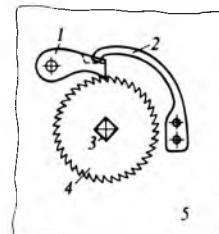
Nešto je jednostavnije oblikovanje zubi zupčanika kazaljki kad ne postoji minutni zupčanik (sl. 31). Tada se tarna spojka nalazi na poklopcu bubenja, a prijenosni je zupčanik stalno pogonski element.

MEHANIZMI ZA NAVIJANJE I ZA NAMJEŠTANJE KAZALJKI

To su pomoći mehanizmi u mehaničkim satovima. Svaki od njih radi nezavisno od drugoga. Njima se upravlja s dva različita mjesta (satovi s njihalom) ili s jednog mjesta (džepni i ručni satovi).

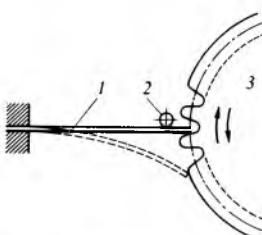
Mehanizam za navijanje služi za prijenos energije pogonskom mehanizmu. Njegov je glavni dio ozubljena ustavljača sa zaporom (sl. 48), preko kojeg se predaje energija pogonskom mehanizmu i koja istodobno sprečava povratno gibanje.

U satovima s utezima zapor se nalazi na pogonskom zupčaniku (sl. 35 i 36), a ozubljena je ustavljača spojena s

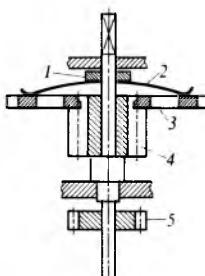


Sl. 48. Zapor i zaporni kotač. 1 zapor, 2 opruga zapora, 3 osovina zapornog kotača, 4 ozubljena ustavljača, 5 satna ploča

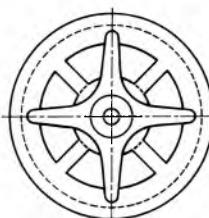
valjkom za strunu ili s kotačem za lanac. Slično je u satovima sa slobodnom oprugom (bez bubnja), ali je tada ozubljena ustavljača spojena neposredno s pogonskom osovinom. Ako je opruga u bubnju, zapor mora biti na satnoj ploči (sl. 48), a to je uvijek u manjim satovima. Tada ozubljena ustavljača ima normalno ozubljenje (nije pilasto) i naziva se zapornim kotačem. Zapor manjih satova ima samo nekoliko zubi (*povratni zapor*, sl. 42), koji omogućuje oslobanje opruge nakon završenog navijanja. U jeftinijim satovima zapor je spojen s oprugom (sl. 49). Ozubljenje je zupčanika za navijanje veoma opterećeno, pa je zupčanik izrađen od kaljenog čelika.



Sl. 49. Zaporno pero. 1 zaporno pero, 2 graničnik, 3 zaporni kotač



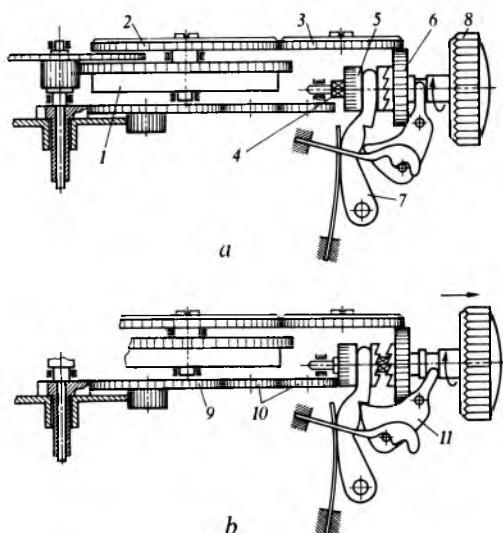
Sl. 50. Tarna spojka sata budilice. 1 prsten, 2 tarno pero, 3 minutni zupčanik, 4 minutna vretenka, 5 vretenka kazaljki



Mehanizam za namještanje kazaljki služi za namještanje kazaljki u željeni položaj. Njegov je glavni dio *tarna spojka* koja stalno spaša zupčanike kazaljki s glavnim zupčanicima, ali koja omogućuje prekid tog spoja kad se namještaju kazaljke.

U jeftinim satovima tarna se spojka (sl. 50) sastoji od pera (obično s nekoliko krakova) koje proizvodi trenje u dodiru s prstenom naprešanim na minutnu osovinu.

U preciznim satovima tarna je spojka vretenka kazaljki koja je u srednjem dijelu stlačena. Tako nastaje trenje na stožastom dijelu minutne vretenke. Zadatak je toga stožastog dijela da trajno pritiska vretenku kazaljki na minutnu osovinu kako se ne bi aksijalno pomakla kad se namještaju kazaljke.



Sl. 51. Uredaj za navijanje i namještanje kazaljki sa spojkom. a položaj za navijanje, b položaj za namještanje kazaljki; 1 bubanj s pogonskom oprugom, 2 zaporni kotač, 3 navojni kotač, 4 navojna osovinica, 5 spojna vretenka, 6 navojna vretenka, 7 poluga spojke, 8 kruna, 9 prijenosni zupčanik, 10 zupčanik za namještanje kazaljki, 11 postavna poluga

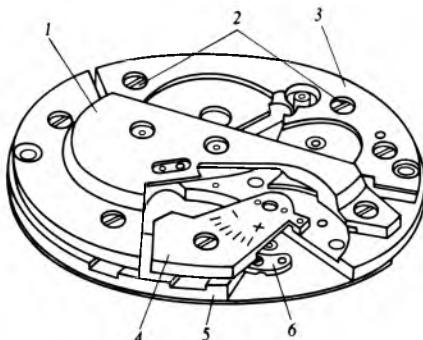
Kruna za navijanje i za namještanje kazaljki. Krunom se s jednog mesta upravlja i mehanizmom za navijanje i mehanizmom za namještanje kazaljki. Kruna je s osovinom pomična i može se postaviti u dva položaja. U osnovnom (zatvorenom) položaju uključen je mehanizam za navijanje, a u otvorenom položaju mehanizam za namještanje kazaljki.

Za sve vrste kvalitetnijih satova upotrebljava se uređaj sa spojkom (sl. 51). Spojna vretenka, glavni dio tog uređaja, pomična je na četverobridnoj osovinici. Vretenka na jednoj čelnoj strani ima pilasto, a na drugoj normalno ozubljenje. Pilasto ozubljenje služi za spoj s mehanizmom za navijanje, a normalno ozubljenje za spoj s mehanizmom za namještanje kazaljki. Pilasti oblik zubi omogućuje da se kruna pri navijanju okreće i naprijed i natrag. Okretanjem unatrag pilasti zubi, naime, ne zahvaćaju mehanizam za navijanje.

Za jeftinije satove upotrebljava se uređaj s polugom u kojem funkciju spojke preuzima dvokraka poluga koja se svojim zupčanicima spaja ili s mehanizmom za navijanje ili s mehanizmom za namještanje kazaljki.

NOSIVA KONSTRUKCIJA, LEŽAJI I ČEPOVI

Nosiva konstrukcija satova osigurava međusobni položaj dijelova sata. Njena su osnova mjedene ploče i mostovi (sl. 52). Da bi se osigurao razmak između ploča i mostova, upotrebljavaju se stupići koji barem na jednoj strani moraju biti rastavljeni. Za kvalitetnije male satove ne upotrebljavaju se stupići jer je teško postići da ležaji leže točno jedan nasuprot drugome. Tada se međusobni položaj ploča i mostova osigurava zaticima i vijcima.

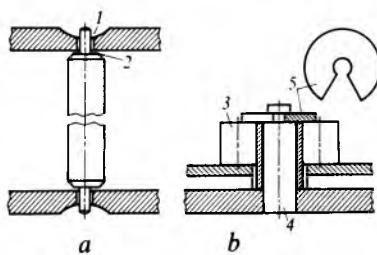


Sl. 52. Nosiva konstrukcija malih satova. 1 most zupčanika, 2 vijci, 3 most bubnja, 4 most nemirnice, 5 ploča, 6 most kotve

Ležaji i čepovi osovine moraju biti tako izvedeni da se osovine i vretenke gibaju uz što manje gubitke energije. Čepovi su od kaljenog i poliranog čelika, a za ležaje se upotrebljava tvrda mjest, odnosno za najkvalitetnije ležaje sintetski rubin ili safir.

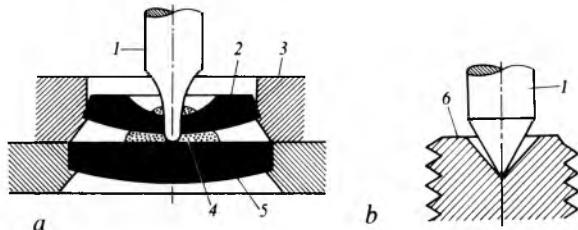
Ležaji se rade kao obostrani (sl. 53 a) ili kao leteći ležaji (sl. 53 b). Obostrani ležaji smješteni su u satne ploče i čepovi se vrte u njima, dok su leteći ležaji u dijelu koji se vrti, a čepovi su učvršćeni u ploču. Kvalitetniji su obostrani ležaji.

Posebna se pažnja posvećuje smještaju osovine nemirnice. U kvalitetnijim satovima nemirnica leži na čepu (sl. 54 a),



Sl. 53. Izvedba ležaja za zupčanike i vretenke. a obostrani ležaj, b leteći ležaj; 1 udubljenje za ulje, 2 udarni brid, 3 vretenka, 4 čep vretenke, 5 rascjepka

kojemu promjer mora biti što manji da bi se što više smanjili gubici i da bi se osiguralo što pravilnije njihanje oscilatora. Vrh je čepa ravan, sa zaobljenim rubovima, da bi se postiglo približno jednako trenje u vodoravnom i okomitom položaju nemirnice. Klinasti prostor između poklopog i zaobljene plohe provrtanog kamena zapravo je spremnik ulja za podmazivanje. Samo se za satove najviše kvalitete upotrebljava osovina nemirnice sa šiljkom (sl. 54 b).



Sl. 54. Ležaj osovine nemirnice. a ležaj s čepom, b ležaj sa šiljkom; 1 osovina nemirnice, 2 provrtni kamen, 3 satna ploča, 4 ulje za podmazivanje, 5 poklopni kamen, 6 ležajni vijak

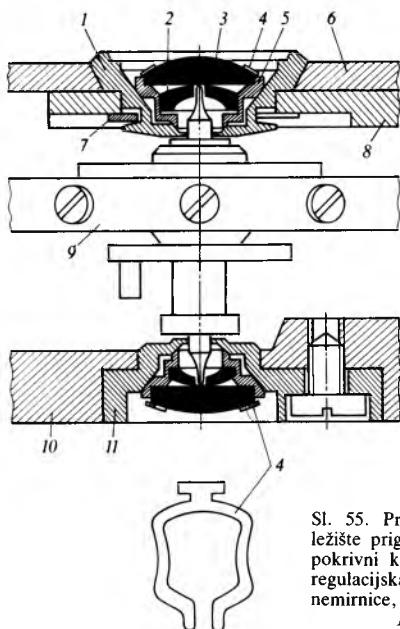
Podmazivanje satnog mehanizma. Za podmazivanje satnog mehanizma nije dovoljna samo jedna vrsta ulja. U urarstvu se upotrebljava pet vrsta ulja koja nose brojčane oznake od 1 do 5. Ona se upotrebljavaju kako slijedi: 1 za zaprećnice ručnih i džepnih satova, te za ležaje malih satova; 2 za ležaje zupčanika ručnih satova; 3 za ležaje zupčanika džepnih satova; 4 za tarne plohe satova s njihalom, 5 za ležaje zupčanika velikih zidnih satova i za uljenje opruga ručnih i džepnih satova.

Danas se najviše upotrebljavaju sintetska ulja kojima se dodaje ~10% životinjske masti.

SPECIJALNI UREĐAJI I MEHANIZMI

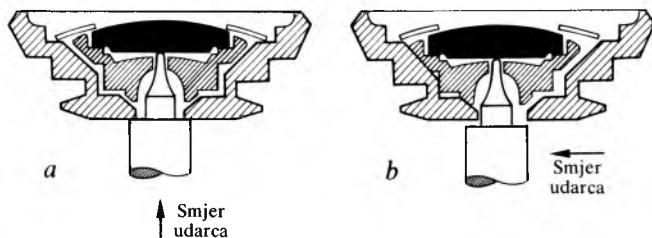
Među specijalne uređaje i mehanizme mogu se ubrojiti prigušivači udaraca, mehanizmi zapornih satova, mehanizmi satova s datumom i kalendrom, te mehanizmi za automatsko navijanje ručnih satova.

Prigušivač udaraca. Džepni, a pogotovo ručni satovi izloženi su često nehotičnim udarcima, od kojih su najviše napregnuti čepovi nemirnica koji moraju imati što manji promjer. Da bi se učinak tih udaraca ublažio, upotrebljavaju se posebni ležaji nazvani prigušivačima udaraca. Takvi prigušivači moraju omogućiti pomak nemirnice u smjeru udarca dok pojačani dio njezine osovine ne prisjedne na graničnu plohu prigušivača, te nakon preuzimanja udarca na toj plohi moraju vratiti nemirnicu u prvobitni položaj.



Sl. 55. Prigušivač udaraca Incabloc. 1 ležiste prigušnika, 2 provrtni kamen, 3 pokriveni kamen, 4 opruga, 5 prsten, 6 regulacijska kazaljka, 7 rascjepka, 8 most nemirnice, 9 nemirnica, 10 satna ploča, 11 ležiste prigušnika

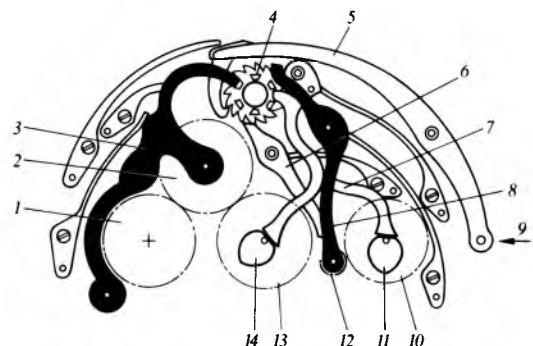
Postoji više tipova prigušivača udaraca, a prigušivač Incabloc (sl. 55) jedan je od najčešće upotrebljavanih. U tom prigušivaču pomak nemirnice u smjeru udarca omogućuje pomični prsten, a opruga povratak u normalni položaj. Koncentričnost prstena osiguravaju njegove konične dosjedne plohe. Djelovanje prigušivača Incabloc za dva smjera udarca vidi se na sl. 56.



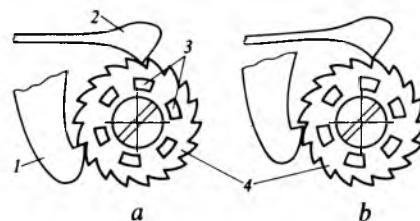
Sl. 56. Djelovanje prigušivača Incabloc. a udarac u smjeru osovine, b udarac okomito na osovinu

Mehanizam zapornog sata (štopericice) zapravo je dodatni uređaj koji omogućuje mjerjenje vremenskih razmaka s većom točnošću od jedne sekunde. Zbog toga zaporni sat ima specijalnu sekundnu kazaljku koja mora izvršavati tri funkcije: točan hod, zaustavljanje i povratak na početni položaj.

Postoji mnogo tipova zapornih satova, a konstrukcija jednog od njih vidi se na sl. 57.



Sl. 57. Mehanizam zapornog sata. 1 zahvatni zupčanik, 2 zupčanik sekundne spojke, 3 sekundna spojka, 4 sklopni zupčanik, 5 sklopna poluga, 6 zaustavna poluga, 7 poluga za vracanje u pocetni položaj, 8 minutna poluga, 9 tiskaljka, 10 minutni zupčanik zapornog sata, 11 minutno srce, 12 pomična vretenka, 13 središnji zupčanik, 14 sekundno srce



Sl. 58. Sklopni zupčanik u osnovnom položaju (a) i u trenutku skoka (b). 1 potezni zapor, 2 opružni zapor, 3 štapići, 4 sklopni zupčanik

Glavni je dio zapornog sata sklopni zupčanik (sl. 58), koji ima zube kao ustavljača i šest stupića. Sklopni zupčanik stavlja se u funkciju pomoću tiskaljke. Pritisak na tiskaljku prenosi se pomoću sklopne poluge i na njoj smještenog zapora na ozubljenje sklopog zupčanika, koji se zakrene za jedan zub, dok se njegov položaj nakon svakog pomaka osigurava opružnim zazorom. Tokom prve polovice puta zakret se sklopog zupčanika ostvaruje po skošenoj plohi opružnog zazora sve dok njegov brid ne dođe na šiljak zuba sklopog zupčanika. U drugoj polovici puta nastaje nagli skok sklopog zupčanika u novi položaj, i to zbog pritiska strmog dijela opružnog zapora. Taj je trenutak skoka veoma važan za ispravno djelovanje zapornog sata. Pomak poluge upravljenih

SATNI MEHANIZMI

pomoću stupića treba tako namjestiti da se osiguraju tri navedene funkcije zapornog sata. Potrebna su tri pritiska na tiskaljku da sljedeći stupić zauzme mjesto prethodnoga, što odgovara zakretu sklopogrupnog zupčanika za tri zuba.

Mehanizam zapornog sata i ostali mehanizam povezani su trima zupčanicima zapornog sata: zahvatnim zupčanicom, (smještenim na produljenom čepu sekundne vretenke glavnih zupčanika), zupčanicom sekundne spojke (smještenim na sekundnoj spojci) i središnjim zupčanicom (kojemu se na osovinu nalazi sekundna kazaljka). Na središnjem je zupčaniku učvršćen izdanak u obliku srca koji vraća sekundnu kazaljku na početni položaj.

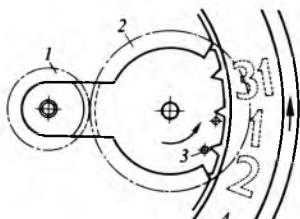
Broj okretaja sekundne kazaljke zapornog sata zbraja minutni zupčanik koji pokreće izvansredišnju malu minutnu kazaljku. Minutni zupčanik zapornog sata pokreće pomična vretenka koju trajno pogoni minutni zupčanik glavnih zupčanika. Djelovanjem sklopogrupnog zupčanika pomična vretenka zahvaća minutni zupčanik zapornog sata i zahvat se prekida djelovanjem minutne poluge. Na minutnom zupčaniku također se nalazi izdanak u obliku srca pomoću kojeg se minutna kazaljka vraća u početni položaj.

Takva se konstrukcija upotrebljava kad je satni mehanizam odvojen od mehanizma zapornog sata. Satni mehanizam stalno je u radu bez obzira na mjerjenje vremena zapornim satom.

Jednostavnija je konstrukcija tzv. jednostavnih zapornih satova kojima se mijere samo vremenski razmaci.

Mehanizam sata s datumom i kalendarom. Satovi s datumom i satovi s kalendarom imaju zupčanike kazaljki dopunjene datumskim, odnosno kalendarskim mehanizmom. Takvi su mehanizmi spojeni preko zupčanika kazaljki sa satnim mehanizmom.

Mehanizam sata s datumom ima ili posebnu kazaljku smještenu u središtu brojčanika ispod satne kazaljke, koja svojim vrhom pokazuje datume označene na obodu brojčanika, ili ima prozorčić na brojčaniku u kojemu se pokazuje datum ucrtan na posebnom datumskom prstenu (sl. 59).



Sl. 59. Datumski mehanizam sa zahvatnim zatikom. 1 satna vretenka, 2 dnevni zupčanik, 3 zahvatni zatik, 4 datumski prsten

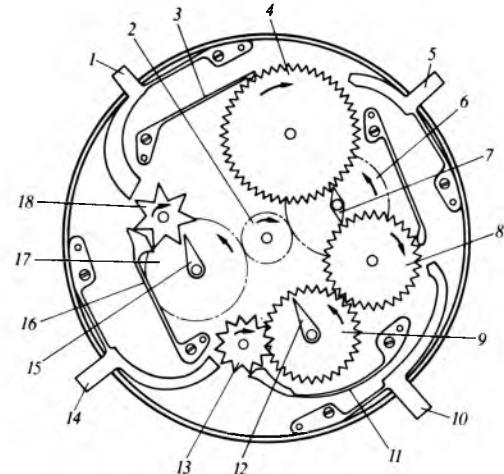
Mehanizam koji povezuje satni mehanizam s datumskim sastoji se od satne vretenke, nasadene na cjevčicu satnog zupčanika, koja se okreće jednom u 12 sati, i dnevnog zupčanika koji ima dvostruki broj zubi s obzirom na satnu vretenku, pa se okreće jednom u 24 sata. Postoje dvije vrste takvih mehanizama. Prvim se datum mijenja sporo; promjena traje 3–4 sata i počinje približno u 20 sati, a završava u 24 sata. Drugim se mehanizmom datum mijenja tokom 30 minuta ili trenutno; taj je mehanizam komplikiraniji.

U mjesecima s brojem dana manjim od 31 pogreška se mora ručno ispraviti.

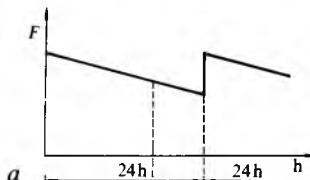
Kalendarski sat pokazuje, osim datuma, dane u tjednu, mjesec i mjesecu mijene.

Cijeli se kalendarski mehanizam obično pokreće satnom vretenkom koja je nasadena na cjevčicu satnog zupčanika i koja se okreće jednom u 12 sati. Ona zahvaća dnevne zupčanike (međuzupčanik I i II, sl. 60), koji imaju dvostruki broj zubi i okreću se jednom u 24 sata. Na dnevnim su zupčanicima učvršćeni palci kojima se pokreću zvijezde za jedan Zub dnevno. Zvijezda sa 7 zubi služi za pokazivanje dana u tjednu, zvijezda sa 31 zubom za pokazivanje datuma,

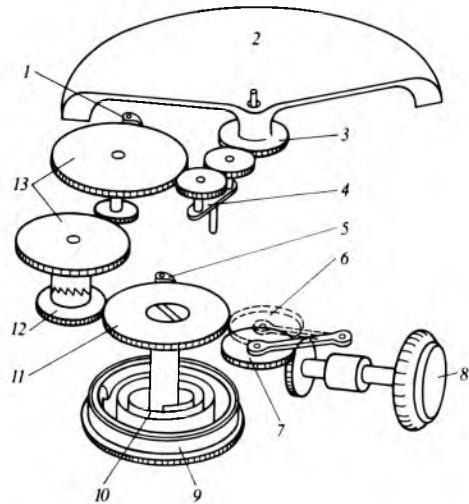
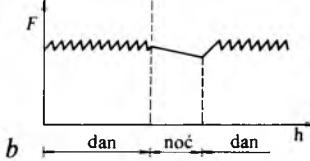
a ona sa 59 zubi za pokazivanje Mjesecnih mijena. Zvijezdu sa 12 zubi za pokazivanje mjeseci pokreće palac učvršćen na pomoćnoj zvijezdi sa 31 zubom. Na osovinama sa 7, 12 i 31 zubom nasadene su kazaljke koje pokazuju podatke na brojčaniku ili se sa tih osovinu prenose podaci na prstene s podacima koji se pokazuju u prozoričicima na brojčaniku.



Sl. 60. Mehanizam kalendarskog sata. 1 korektor dana u tjednu, 2 satna vretenka, 3 zaporno pero, 4 zvijezda sa 59 zubi, 5 korektor Mjesecnih mijena, 6 dnevni zupčanik (međuzupčanik I), 7 palac, 8 zvijezda sa 31 zubom, 9 pomoćna zvijezda sa 31 zubom, 10 korektor datuma, 11 zaporno pero, 12 palac, 13 zvijezda sa 12 zubi, 14 korektor mjeseci, 15 palac, 16 zaporno pero, 17 međuzupčanik II, 18 zvijezda sa 7 zubi



Sl. 61. Promjena pogonske sile. a) ručno navijanje, b) automatsko navijanje



Sl. 62. Mehanizam za automatsko navijanje. 1 zapor, 2 rotor, 3 vreteno rotora, 4 prekretaljka, 5 zapor, 6 odspojnik navijanja krunom (polozaj za navijanje krunom), 7 odspojnik kao 6 (polozaj za automatsko navijanje), 8 kruna, 9 bubanj za pogonsku oprugu, 10 klizna opruga, 11 zaporni zupčanik, 12 odspojnik automatskog navijanja, 13 reducirski zupčanici

Na zvijezdi sa 59 zubi nasaden je prsten s dva puta ucrtanim Mjesecевim mijenama koje se pojavljuju u prozoričiću na brojčaniku. Svaka od mijena pojavljuje se nakon 29 dana i 12 sati. Zbog toga što Mjesec obide Zemlju za 29 dana, 12 sati, 44 minute i 2,8 sekunda nastaje mala pogreška koja se popravlja korektorom, kao i datum na početku onog mjeseca koji slijedi iza mjeseca koji nema 31 dan.

Automatsko navijanje ručnih satova osigurava se posebnim mehanizmom koji omogućuje navijanje opruge normalnim pokretima ruke. Pri tome je opruga uvek bolje navijena nego uz redovno navijanje svaka 24 sata, pa je pogonska sila manje promjenljiva (sl. 61).

Rotor (sl. 62) uređaja za automatsko navijanje zakreće se pomakom ruke, pa preko svoje vretenke okreće zupčanik prekrelaljke koja gibanje prenosi preko reduksijskih zupčanika na oprugu, koja se zbog toga navija. Zaporni kotač ne dopušta povratno okretanje opruge. Odsponjnik automatskog navijanja omogućuje ručno navijanje, a da se ne pomiču dijelovi mehanizma za automatsko navijanje. Odsponjnik ručnog navijanja omogućuje bolje djelovanje uređaja za automatsko navijanje. Da bi se spriječilo prekomjerno naprezanje i eventualni lom pogonske opruge, ona je spojena s bubnjem preko klizne veze.

LIT.: L. C. Balyay, *Évolution de l'horlogerie*, Gauthier-Villars, Paris 1968.
– E. Bassermann, *Jordan, Uhren*. Klinghardt & Biermann, Braunschweig 1969.
– S. Guye, H. Michel, *Mesures du temps et de l'espace*. Bibliothèque des Arts, Paris 1970. – R. Mühe, H. M. Vogel, *Alte Uhren*. Verlag Georg D. W. Callwey, München 1976. – Heureka, Kako su i kada nastali najvažniji izumi. Mladost, Zagreb 1978. – J. Ivanković, Urarski priručnik. Tehnička knjiga, Zagreb 1979.

Z. Vistrička

SEDIMENTACIJA, razdvajanje rjede kapljevine suspenzije neke čvrste tvari (mulja ili rijetkog mulja) na kapljevinu i gušću smjesu (gusti mulj ili sediment) s većim udjelom čvrste tvari zbog razlike gustoće u polju neke sile. Obično se takvo razdvajanje provodi u gravitacijskom polju.

Korisni proizvodi sedimentacije mogu biti izbistrena kapljevinu, sediment ili oboje. Kad je proizvod kapljevinu, govori se o *bistrenju* (klarifikaciji), a kad je sediment, o *uguščivanju*.

Sedimentacija je zapravo razdvajanje faza taloženjem, što se odvija u skladu sa zakonima mehanike fluida, i to praktički bez utjecaja faznih prijelaza (isparivanja, kondenzacije). S toga stajališta sedimentacija je srodnina filtraciji (v. *Filtracija*, TE 5, str. 398), gravitacijskoj koncentraciji (v. *Gravitacijska koncentracija*, TE 6, str. 265) i pogotovo centrifugiranju (v. *Centrifugiranje*, TE 2, str. 591).

Sedimentacija je vjerojatno bila poznata već u pretpovijesno doba, jer se već tada bistrila voda za piće. U antičko doba sedimentacijom su se ispirali minerali iz ruda u različitim metalurškim procesima. Neke je preteće današnjih aparatura opisao G. Bauer (Agricola) u djelu *De re metallica* (1556). Krajem XIX. st. upotrebljavali su se šaržni sedimentacijski postupci separacije u rezervoarima i stožastim posudama. Kontinuirani postupci sedimentacije pojavili su se početkom XX. st.

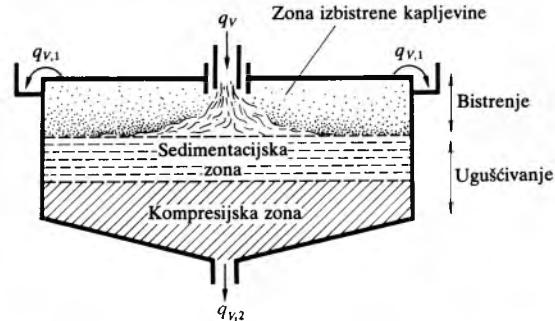
Primjena sedimentacije. Taloženje djelovanjem gravitacije jeftinije je od razdvajanja centrifugiranjem, ali su učinci slabiji. Zbog toga je sedimentacija prikladna kad je centrifugiranje ili filtriranje preskupo jer se preraduju velike količine mulja male vrijednosti ili se mora razdvojiti bezvrijedni mulj od izbistrene kapljevine.

Tipočne su industrijske primjene sedimentacije: uklanjanje mulja iz otopina prije koncentriranja isparivanjem i prije kristalizacije u proizvodnji šećera (v. *Šećer*), odvajanje mulja iz vode za piće i za tehnološke svrhe (v. *Voda*) te iz otpadnih voda (v. *Otpadne vode*, TE 10, str. 64), uguščivanje odvodnjavanjem flotacijskih koncentratora minerala prije filtriranja i sirovinskih muljeva prije pečenja kojim se dobiva klinker u proizvodnji cementa mokrim postupcima (v. *Cement*, TE 2, str. 586). U proizvodnji natrij-hidroksida (v. *Natrij*, TE 9, str.

273) pri kaustifikaciji sode vapnom primjenjuje se sedimentacija, u kojoj su korisni proizvodi i izbistrena kapljevina i sediment. Sedimentacija se također upotrebljava u ispiranju korisnih proizvoda iz netopljivih čvrstih tvari procesima kontinuirane protustrujne dekantacije. Takav je, npr., Dorrov dekantacijski postupak proizvodnje fosfatne kiseline (v. *Fosfor*, TE 5, str. 514). Ispiranje finih čestica u cijanidnom postupku proizvodnje zlata (v. *Zlato*) jedna je od najpoznatijih operacija te vrste.

Mehanizam sedimentacije. U toku sedimentacije iz suspenzije se odjeljuju čestice čvrste tvari djelovanjem gravitacije (ili centrifugalne sile), stvarajući sloj mulja koji se, kao i izbistrena kapljevina, kontinuirano ili diskontinuirano odvodi.

U cilindričnom uređaju za sedimentaciju (sl. 1) uvodi se suspenzija. Budući da je gustoća suspenzije veća od izbistrene kapljevine, suspenzija pada do razine gornje granice sedimentacijske zone iznad koje se nalazi izbistrena kapljevina. Tu se suspenzija radikalno širi po presjeku posude. U zoni izbistrene kapljevine koncentracija je čestica čvrste tvari vrlo malena kad je uređaj dobro konstruiran i kad se proces dobro vodi. Gornju granicu sedimentacijske zone karakterizira nagla promjena koncentracije čestica čvrste tvari, pa ona čini granicu između bistre kapljevine i suspenzije. U sedimentacijskoj se zoni čestice čvrste tvari, neovisno o svojim dimenzijama, gibaju brzinom koja ovisi samo o lokalnoj koncentraciji tih čestica. To se postiže samo od sebe kad je koncentracija čestica velika ili međusobnim djelovanjem pahuljičastih čestica (flokula) kad je koncentracija malena.



Sl. 1. Proces u cilindričnom uređaju za sedimentaciju. q_V volumni protok suspenzije, $q_{V,1}$ volumni protok izbistrene kapljevine, $q_{V,2}$ volumni protok gustog mulja

U najdonjoj, kompresijskoj zoni čestice se zgušnjavaju svladavanjem sile koje djeluju među pahuljcicama, odnosno česticama. To se događa tlačnim djelovanjem gornjih slojeva istaloženih čestica.

Između sedimentacijske i kompresijske zone nalazi se pahuljičasta, prijelazna zona. Prijelazne zone nema, a ni znatnije zgušnjavanja u kompresijskoj zoni, kad ne postoji pahuljičasto djelovanje među česticama čvrste tvari. Tada čestice koje se talože dospijevaju neposredno u gusti mulj koji se ne može znatnije zbiti.

Najčešće se sedimentacija odvija u pahuljičastim uvjetima, pa se često suspenziji dodaju sredstva za pahuljičanje (flokuliranje) da bi se povećala brzina taloženja i kapljevina bolje izbistrla. Dodavanjem polimera kao sredstva za pahuljičanje bitno se intenzivira proces sedimentacije. Upotrebom tih sredstava, međutim, dobiva se mulj s manjom koncentracijom čvrstih čestica.

Eksperimentalno određivanje procesnih parametara. Teorijsko određivanje brzine taloženja skopčano je s velikim teškoćama, pa zbog toga preostaje da se brzina taloženja odredi eksperimentalno. To se provodi u cilindričnoj posudi koja, da bi se eliminirao utjecaj stijenki, mora imati promjer veći od 50 mm.

Eksperimentalna se suspenzija naliže u cilindričnu posudu uz dodatak, ako je potrebno, sredstva za pahuljičanje, pa se nekoliko puta obrne da bi se dobro izmiješala. Eksperiment se nastavlja promatranjem faza taloženja (sl. 2). Vrlo se brzo