

AUTOMATSKI NIVELIRI

RAZVOJ, PRINCIPI KONSTRUKCIJE I ANALIZA UTJECAJA NA TAČNOST MJERENJA S POSEBNIM OSVRTOM NA NIVELIR WILD NA2

Doc. BENČIĆ Dušan, dipl. inž. — Zagreb

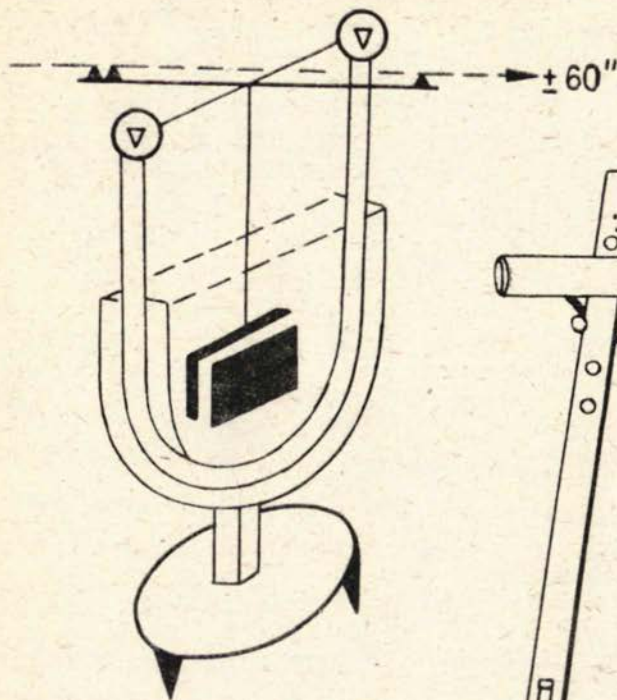
Automatsko horizontiranje vizure kod nivelira nije izum novijeg vremena. Još pred više od 2000 godina, kada se za libelu nije znalo, građeni su instrumenti za niveliranje. Početak razvoja automatskih nivelira treba stoga promatrati već od tog prvog razdoblja, kako bi se u potpunosti uočila sva inventivnost ljudskog duha i na ovom području stvaralaštva.

Iz tog vremena prvih poznatih mjernih instrumenata sačuvano je djelo Herona Aleksandrinca »O dioptri«, u kojem je dat opis i konstrukcija tzv. dioptre, instrumenta s kojim je moguće mjerenje visinskih razlika uz upotrebu posebnog vizurnog lineala, građenog na principu spojenih posuda. Glavni sastavni dio je brončana cijev sa nastavcima staklenih cijevi u okomitom smjeru, tako da formira oblik slova U. Cijev je ispunjena vodom koja svojom površinom stvara nivo-plohu. Posebni vijak ispred svake staklene cijevi služi za pomicanje male vizurne pločice u visinu tekućine. Tačnost horizontiranja iznosila je $\pm 1'$ do $2'$. Za očitavanje upotrebljavala se letva sa podjelom na kojoj se pomicala u posebnom žlijebu vizurna marka u visinu horizontalne vizure. Ne ulazeći u detaljniji opis i prikaz kojeg nalazimo u našoj stručnoj literaturi [6], možemo samo konstatirati iznenađujuću tehničku izvedbu ovog instrumenta.

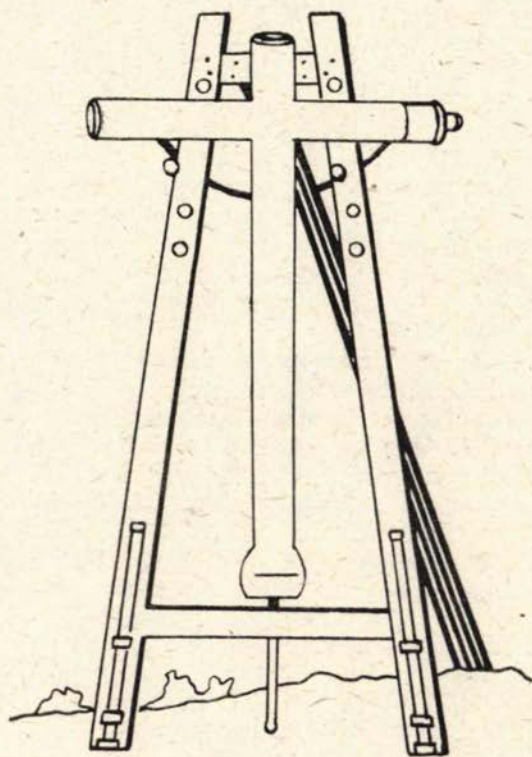
U kasnijem razdoblju izrađen je još jedan tip instrumenta sa automatskim horizontiranjem vizure, kojem je funkcija također bazirana na djelovanju sile teže. To je bilo njihalo sa vizerom (sl. 1) sa tačnošću horizontiranja ± 1 , do $2'$.

Novo razdoblje u razvoju mjernih instrumenata započinje otkrićem durbina početkom XVII stoljeća. Prva mjerenja sa durbinom vrše se stavljanjem niti u žarišnu daljinu objektiva (Gascoigne 1640. god.). Pariski mehaničari Thevenot i Chapotat izrađuju i prve cijevne libele (1661. i 1666. god.). Prva geodetska mjerenja sa durbinom vrši francuz J. Picard (gradusna mjerenja 1670. god. sa kvadrantom, niveliranje 1674. god.). Za današnje pojmove to je relativno spora primjena novih otkrića. To je i razlog, da pri ovim mjerenjima nema primjene libele. Za niveliranje i mjerenje vertikalnih kuteva Picard upotrebljava durbin

sa njihalom dužine oko 1,3 m (sl. 2) [1]). Funkcija ovog insrtumenta jednaka je kao i kod njihala sa vizerom, ali je viziranje preciznije (tačnost horizontiranja $\pm 1'$). Za mjerenje vertikalnih kuteva, na luku je nanešena podjela u minutama.



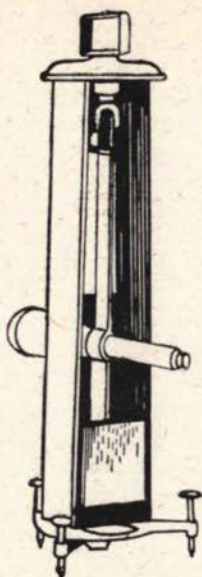
Sl. 1 — Shematski prikaz njihala sa vizerom



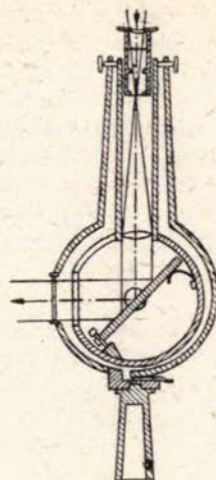
Sl. 2 — Picardov instrument s njihalom

Prvi nivelir s libelom opisan je 1702. god., a dozna libela izrađena je 1770. god. (Joh. T. Mayer). Međutim, zbog poteškoća u izradi, kvaliteta libela ne zadovoljava, pa je bilo potrebno čitavo XVIII stoljeće za poboljšanje njihove izrade. Zbog toga se još uvijek konstruiraju i instrumenti bez libela, a za horizontiranje nivelira traže se druga rješenja. Uglavnom se primjenjuju principi njihala, s time što njiše i čitav durbin. Kako se ovi instrumenti upotrebljavaju isključivo za niveliranje (za razliku od univerzalnijeg Picardovog instrumenta) možemo ih i smatrati prvim automatskim nivelirima. Poznate su konstrukcije takovih nivelira prema Huygensu i Römeru [2]. Iz tog razdoblja pri-

kazat ćemo automatski nivelir nepoznatog konstruktora, koji se isticao svojom funkcionalnošću, a primjerak se i danas čuva u Šumarskoj akademiji u Clausthalu (sl. 3).



Sl. 3 — Nivelir s automatskim horizontiranjem vizure iz godine 1799.



Sl. 4 — Couturierov nivelir iz godine 1878.

Durbin povećanja $8\times$, učvršćen je na njihalu obješenom o precizno izrađenim kardanskim ležajevima. Uz mogućnosti aretiranja, prigušenje njihaja u ulju, sa tačnošću horizontiranja od $\pm 10''$, ovaj je instrument svakako predstavljao značajno dostignuće. Nedostaci su mu bili prevelika težina i izvjesna neprikladnost pri rukovanju uzrokovano zaštitnom kutijom protiv vjetrova, kao i pomjeranje težišta izvlačenjem okularne cijevi pri izoštravanju, a što se moralo kompenzirati sa protutezima.

Do velikog napretka u izradi instrumenata dolazi u drugoj polovini XIX stoljeća naglim rastom optičko-mehaničke industrije. Npr. Carl ZEISS osniva poznatu tvornicu u Jeni 1846. god. koja za duže vrijeme preuzima glavnu ulogu u razvoju optičkih i geodetskih instrumenata, angažiranjem glasovitih stručnjaka i konstruktora kao što su E. ABBE, C. Pulfrich, H. WILD, A. König i O. Gruber.

U ovom razdoblju izrađuju se novi i bolji strojevi za izradu dijelova instrumenata, usavršavaju se metode serijske kontrole, naročito optičkih elemenata (Fraunhofer). Time dolazi i do poboljšanja optičke kvalitete durbina, što omogućava primjenu većih povećanja. Usavršava se i izrada libela, pa je već izrađen i prvi nivelir sa reverzionom libelom (Amsler—Laffon, Schaffhausen 1857. god.).

Zbog mogućnosti izrade libela zadovoljavajuće kvalitete, konstruktori instrumenata uvode libele kao sastavne dijelove instrumenata. Ali primjenom libele nastaju i mnoge teškoće prilikom mjerenja.

Za kvalitetu libele i njenu upotrebljivost pri mjerenju mjerodavna je tačnost s kojom možemo vrhuniti libelu, odnosno tačnost očitavanja

položaja mjehura libele pomoću podjele. Ova tačnost ne ovisi samo o osjetljivosti libele tj. veličini radijusa brušene plohe, već i o dužini mjehura, kvaliteti materijala cijevi i tekućine, kao i kvaliteti izrade plohe. Pokretljivost mjehura ovisi o adheziji tekućine i stakla, te o dužini mjehura. Duži mjehuri su pokretljiviji i nemirniji. Tačnost vrhunjena se povećanjem dužine mjehura povećava, ali prevelika pokretljivost mjehura otežava rad, a može ga i onemogućiti jer mjehur tada reagira i na najmanje promjene vanjskih upliva. Najveći upliv na dužinu mjehura, osjetljivost libele, a time i tačnost libele ima, kao što je poznato, promjena temperature. Naglije promjene temperature uslovljuju napetosti u metalnom kućištu libele, a time i staklenoj cijevi, te dolazi do promjene zakrivljenosti brušene plohe. Nejednoliko zagrijavanje cijevi uzrokuje promjenu položaja mjehura i to u smjeru izvora topline. Kod nekih libela dolazi do tzv. »vučenja« mjehura, kome je uzrok u prvom redu u kemijskom sastavu stakla i pogreškama brušenja. Iz ovih razloga glavna tangenta libele pri mjerenju ne registrira onaj položaj osi instrumenta datih rektifikacijom.

Opazrač je prisiljen da ovim uzrocima poklanja posebnu pažnju prilikom preciznih mjerenja, da strpljivo kontrolira njihov utjecaj, a isto tako i svoj rad, što produžuje tok mjerenja i brže dovodi do umora. Ti faktori utječu tada na tačnost i ekonomičnost mjerenja.

To su razlozi zbog kojih primjena libele nije poželjna kod mjerenja.

Ipak, libela je našla svoje mjesto na geodetskim instrumentima inercijom razvoja instrumenata, zbog jednostavnosti njene ugradnje i rektifikacije, tim više što složenija izrada instrumenata bez libele nije još bila dovoljno kvalitetna ni prikladna za terenski rad.

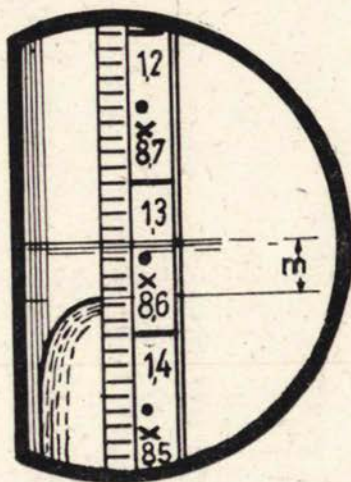
Iako se konstruktore priklanjaju tada instrumentima s libelama, ipak istraživački duh čovjeka ne miruje, pa se uz klasične nivelire s libelama pojavljuju tu i tamo i nove konstrukcije koje, naravno baziraju na prethodnim iskustvima. Iz tog razdoblja spomenimo interesantnu konstrukciju nivelira kod kojeg je durbin upotrebljen kao njihalo (Couturier 1878. god.). Zrcalo ispred objektiva otklanja zrake za 90°, tako da optička os durbina stoji vertikalno, pa je i pogled u instrument odozgo. Time je izbjegnuta upotreba protuutega kod izoštravanja slike. (Sl. 4).

Instrument ima uređaj za aretiranje, a isto tako mehanički uređaj za prigušenje njihaja. Jednostavan je, lakó prenosiv i, unatoč malog povećanja durbina, omogućava tačnost horizontiranja $\pm 10''$.

Instrumenti ovakovih konstrukcija nisu se afirmirali u prvom redu zbog konstruktivnih poteškoća pri izradi nivelira veće tačnosti. (Izrada ležajeva, jače prigušenje). Osim toga niveliri s libelama, uz veća proizvodna iskustva, omogućavali su veće tačnosti horizontiranja, unatoč nedostataka libele. Međutim, ideja automatskog horizontiranja vizure sa joćitim praktičnim prednostima nije mogla više biti napuštena i samo je privremeno ostala neostvarena težnja.

XX stoljeće s novim tehničkim pronalascima i naglim razvojem industrije otvorilo je i u tom pogledu nove mogućnosti. Napušta se zanatski način izrade instrumenata, a optičko-mehanička industrija

već ima niz specijaliziranih stručnjaka za pojedine razvojne sektore koji usvajaju nove tehnološke procese i nova tehnička otkrića. Naravno, to nije išlo bez poteškoća, pa čak i otpora stručnih ljudi konzervativnih shvaćanja, a koji puta i posebnih ličnih interesa. Spomenimo, samo za ilustraciju, rad jednog od najvećih pionira u razvoju geodetske instrumentalne tehnike — Heinricha Wilda koji dolazi u tvornicu ZEISS - Jena 1908. godine. Njegova su osnovna nastojanja bila, da se masa i veličina geodetskih instrumenata smanji i da se uz pojednostavljenje olakša rad na terenu racionalnim prilagođavanjem funkcije instrumenata prema svrsi mjerenja. Revolucionarne, za to vrijeme, bile su njegove konstrukcije sa limbovima od stakla, umjesto od metala, sa sistemima prizama za očitavanje libele, optičkih sistema prenosa za očitavanje limbova. Tim više, što je uvođenje ovih novosti bilo još tehnološki teško izvedivo, zbog sjedinjavanja svih elemenata u malom prostoru instrumenta, a zahtjevalo je veće nove investicije. Zbog toga su ova nastojanja naišla na otpor i samo stvaralačka energija, bez ličnog interesa, uz suradnju iskusnog stručnog osoblja, mogla je omogućiti, da su poteškoće prebrođene i da je razvoj modernih instrumenata naglo krenuo naprijed.



Sl. 5 — Vidno polje Heckmann-ovog nivelira

Očitavanje sa niti: $l = 1,34$ m, put mjehura libele: $m = 35$ mm,
 Ukupno očitavanje: 1,3435 m

Ovi impulsi stvaranja i općeg kretanja naprijed u razvoju instrumenata nisu mimoišli ni područje automatskih nivelira. Razvojni put u tom smislu kreće u dva pravca — uz primjenu libela, te u konstrukcijama nivelira bez cijevne libele.

U prvom slučaju pošlo se sa stanovišta, da kvalitet izrade osjetljivih libela zadovoljava, pa libelu ne treba ukloniti iz mjernog procesa, tim više što je tačnost vrhunjenja povećana primjenom lupa, a poseb-

no konstrukcijom očitavanja pomoću koincidencije mjehura libele (H. Wild 1908.). Po tome je osnovni nedostatak pri mjerenju sa ovim nivelirima dužina vremenskog intervala između vrhunjenja libele i viziranja, odnosno, očitavanja na letvi. Da se taj interval skрати i ubrza mjerni proces uvodi se automatizacija preslikavanjem mjehura libele u vidno polje durbina uz samu sliku podjele letve, pa se i letva čita pomoću slike mjehura libele.

Kod ovih tipova automatskih nivelira spomenut ćemo konstrukciju Heckman-ovog nivelira iz 1932. god. (sl. 5).

Ako označimo sa l očitavanje na letvi pomoću niti, sa n udaljenost niti od horizontalne vizure na letvi, sa m put mjehura mjeren na letvi, sa d udaljenost letve i α nagib vizure, to slijedi:

$$\begin{aligned} n &= d \alpha \\ m &= kd \alpha, \end{aligned}$$

gdje je k konstanta uvjetovana svojstvima optičkog sistema (kod Heckmannovog nivelira, građenog u tvornici Beithaupt-Kassel, ova konstanta iznosi 10).

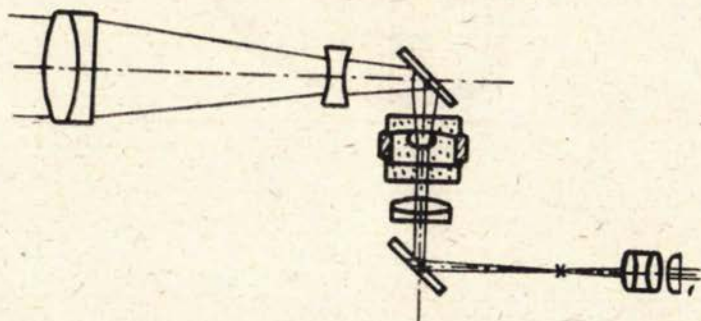
Slijedi

$$n = \frac{m}{k},$$

te je ukupno očitavanje

$$l + \frac{m}{k}$$

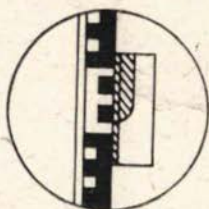
Interesantna je konstrukcija Drodofskog 1940. god., koji primjenjuje doznu libelu i uvodi mjehur libele, kao leću, u tok zraka svjetlosti (sl. 6).



Sl. 6 — Mjehur dozne libele kao leća u durbinu nivelira

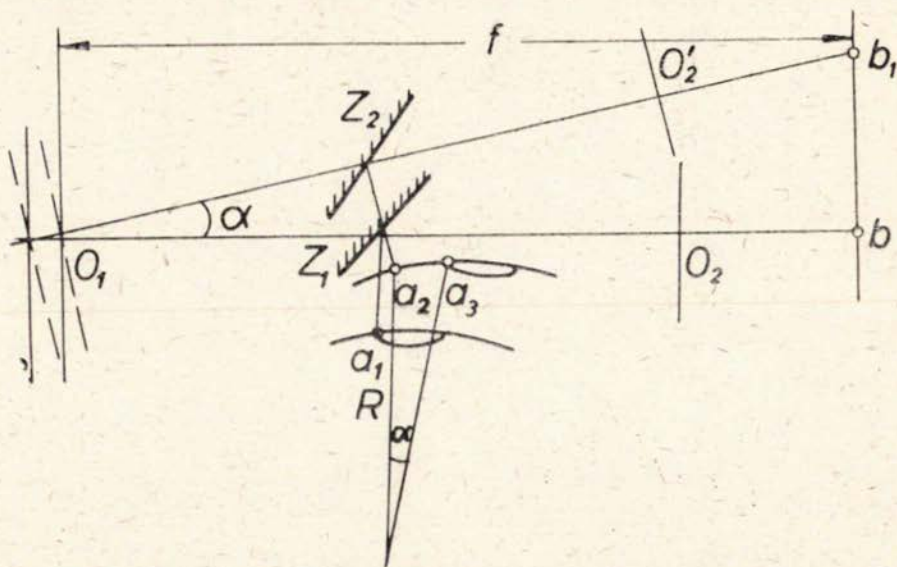
Tačnost korizontiranja iznosila je $\pm 0,5''$, međutim, kvaliteta slike nije zadovoljavala, što je uz određene vremenske okolnosti na terenu bilo nepovoljno.

Razvoj ovih tipova nivelira dostiže kulminaciju konstrukcijom automatskog nivelira NTS-46, po Stodolkiewicz-u, koji je proizveden u Sovjetskom Savezu (1947. god.) i primjenjuje se u nižim redovima nivelmana. Za osnovno horizontiranje služi dozna libela osjetljivosti $\pm 1,5'$. Krajevi mjehura cijevne libele dovedeni su u vidno polje durbina pomoću posebnog sistema prizama i leća, tako da su jedan prema drugom obrnuti, te njihova koincidencija zamjenjuje horizontalnu nit nitnog križa (sl. 7).



Sl. 7 — Vidno polje nivelira NTS-46

Fukcija automatskog horizontiranja i shema nivelira prikazana je na sl. 8a i 8b. Pri horizontiranoj vizurnoj osi preslikava se kraj mjehura libele (a_1) kroz sistem prizama — shematiziran zrcalom Z — i



Sl. 8a — Shema funkcije automatskog horizontiranja NTS-46

objektiv O_2 u tačku b koja leži u žarišnoj ravnini objektiva durbina O_1 . Nagibom durbina za kut α otlanja se i sistem očitavanja libele za isti kut (na sl. 8a Z_1 dolazi u Z_2 , a O_2 u položaj O'_2). Tačka a_1 došla je u a_2 i ona se preslikava sada u tačku b_1 . Međutim, uslijed nagiba, pomjera se i mjehur libele, te kraj mjehura ne predstavlja više tačka a_2 , već a_3 .

Ako mjerilo preslikavanja sistema očitavanja libele označimo sa β , to za kompenzaciju mora biti zadovoljen uvjet:

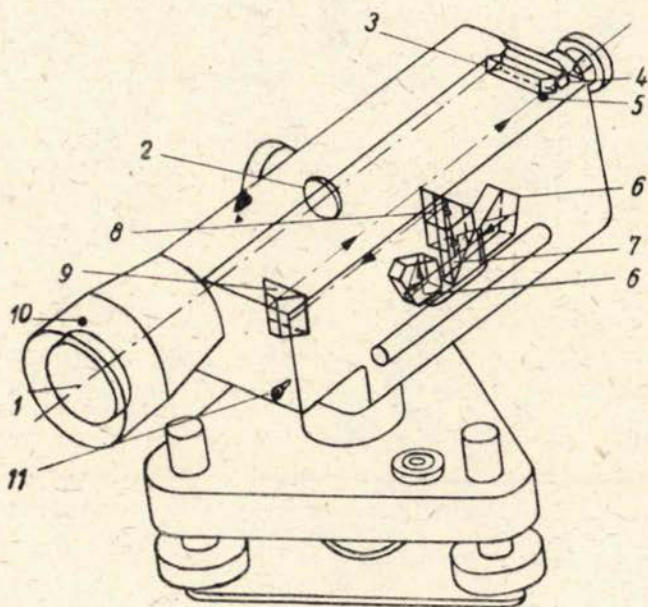
$$\overline{a_2 a_3} \beta = \overline{b b_1}$$

Kako je $\overline{b b_1} = f \hat{a}$, a $\overline{a_2 a_3} = R \hat{a}$

gdje su f/\hat{z} . daljina objektiva, R radijus libele, slijedi

$$\begin{aligned} R \hat{a} \beta &= f \hat{a} \\ R \beta &= f \end{aligned}$$

Time smo dobili uvjetnu jednadžbu za kompenzaciju koja daje odnos između žarišne daljine objektiva durbina, radijusa libele i mjerila preslikavanja sistema očitavanja libele.



Sl. 8b — Shema nivelira NTS-46

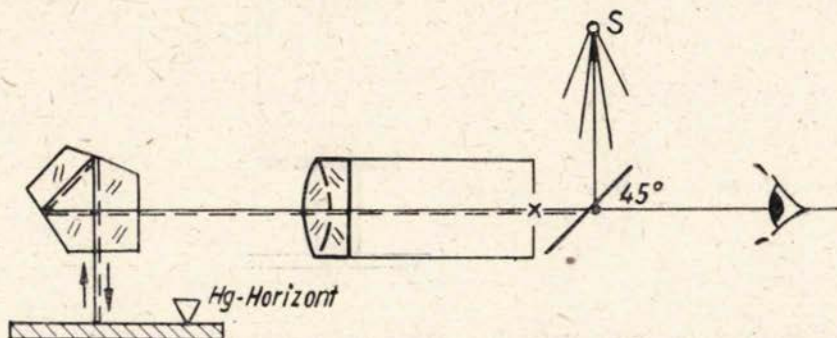
- 1,2 objektiv durbina (θ_1)
- 3 rombična prizma
- 4 okular
- 5 objektiv (θ_2)
- 6—9 sistem prizama (Z)
- 10 vijak za ekscentrični pomak objektiva durbina
- 11 vijak za reguliranje dužine mjehura libele (pomakom vanjske prizme 6)

Durbin nivelira NTS-46 ima \hat{z} . daljinu $f = 314$ mm, pa je izabrano mjerilo preslikavanja $\beta = 0.022$, kako bi se koristila osjetljivost libele uobičajene veličine kod ovih nivelira. Iz uvjetne jednadžbe dobivamo $R = 14273$ mm, te je osjetljivost $29''/2$ mm.

Za rektifikaciju glavnog uvjeta nivelira, objektiv durbina se pri zakretanju pomiče ekscentrično.

U drugom pravcu razvoja automatskih nivelira polazilo se sa stanovišta da primjena cijevne libele, zbog svojih nedostataka, nije poželjna pri mjerenju. Nova tehnička dostignuća pružala su u tom smislu nove i šire mogućnosti. Stare zamisli i iskustva koriste se sada u novim uvjetima.

Na početku ovog stoljeća konstruiran je nivelir sa živinim horizontom (Claude i Driencourt). Funkcija ovog nivelira zasnovana je na principu **autokolimacije** (preslikavanja slike objekta, odgovarajućim optičkim putem, u ravninu samog objekta). Svjetlost (*S*) se pomoću poluprozirnog zrcala reflektira u smjer optičke osi durbina i osvjetljava nitni križ (sl. 9). Zrake s nitnog križa prolaze kroz objektiv i



Sl. 9 — Princip funkcije nivelira Claude-Driencourt sa Hg-horizontom

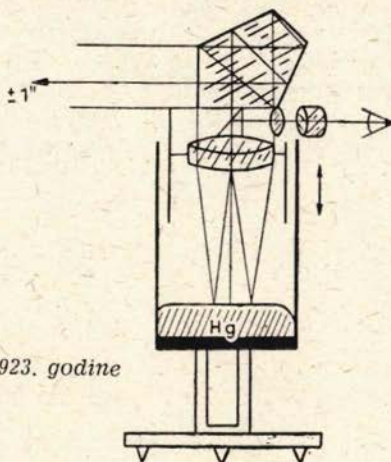
nakon otklona na pentagonalnoj prizmi, koja pokriva polovinu vidnog polja, reflektiraju se na živinom horizontu i ponovo vraćaju u durbin. Živin horizont je time optičkim putem dat kao zrcalna ploha okomita na horizontalnu vizuru. Slika letve, koju daje nezaklonjeni dio objektiva, očitava se u času koinecidencije horizontalne niti i njene reflektirane slike. Tačnost horizontiranja iznosila je $\pm 1,2''$. Iako se kod ovog instrumenta još ne može govoriti o nekom automatskom principu mjerenja, ipak je pokazan novi put u isključivanju libele s nivelira — pomoću optičkih rješenja.

Ovaj putokaz bio je značajan iz dva razloga. Prvo se pokazalo, da se i relativno jednostavnim konstrukcijama i uz tačnost koja može zadovoljiti, može zamijeniti »nezamjenljiva« nivelaciona libela klasičnih nivelira, a drugo uvidjela se široka mogućnost i elegancija optičkih rješenja, što će nešto kasnije omogućiti snažan razvoj preciznih automatskih nivelira.

Već H. Wildova konstrukcija 1920. godine s inventivnošću velikog konstruktora, otkrila je jasno ove nove mogućnosti. H. Wild je živin horizont direktno uklopio u hod zraka svjetlosti koje od objekta-letve prolaze kroz objektiv durbina, pa je s time postigao i automatsko horizontiranje vizure — što je i osnovno svojstvo automatskih nivelira (sl. 10).

Nivelir je izradila tvornica Zeiss u Jeni 1923. god. Tačnost horizon-tiranja iznosila je $\pm 1''$. [3] Na sličnom principu imamo i konstrukciju Beckera iz godine 1933.

Ipak, unatoč osjetljivog napretka i inventivnih rješenja, ovi niveliri nisu našli primjenu, naročito zbog osjetljivosti na vibraciju i oksidacije površine žive koja je štetila kvaliteti slike. Ni pokušaji primjene tekućine, umjesto žive, unutar toka zraka svjetlosti u durbinu u svrhu kom-



Sl. 10 — Nivelir Zeiss-Wild 1923. godine

penzacije durбина, nisu uspjeli, unatoč jednostavnosti funkcije. Razlog tome bio je u smanjenju kvalitete slike uz veća povećanja durbina, kao i ovisnosti funkcije o promjenama temperature, a što je bila glavna zamjerka primjeni libele. Možemo samo spomenuti, da je na principu autokolimacije izrađen i primijenjen jedan tip nivelira u Sovjet-skom Savezu, te je dao i dobre rezultate.

Sumarno možemo reći za čitavo razdoblje prve polovine XX stoljeća, da unatoč novih tehničkih mogućnosti novih ideja i rješenja, naročito optičkih, unatoč i pojedinačnih uspjeha nekih automatskih nivelira, nije došlo do šire afirmacije ovakvih tipova nivelira. To su ostale samo zanimljivosti u širokom svijetu raznovrsnih geodetskih instrumenata. Niveliri s libelama, usavršeni i precizni, zadržali su dominirajući položaj u praksi.

Prekretnicom u razvoju automatskih nivelira možemo smatrati 1950. godinu. Te se godine pojavljuje u augustu na geodetskoj izložbi u Kölnu automatski nivelir Ni2 firme Zeiss—Opton, Oberkochen.

Sjedinjujući princip starih konstrukcija (instrumenti s njihalima) s mogućnostima optičkih rješenja — afirmiranih u raznim varijantama u novijim geodetskim instrumentima (H. Wild), ostvarena je konstrukcija praktičnog nivelira. Ta se konstrukcija sastoji od njihala unutar durbina tzv. **optičkog kompenzatora** tj. uređaja za kompenzaciju nagiba na principu optičkog uklapanja elementa koji se njiše, u tok zraka svjetlosti durbina.

(Nastavit će se)