

GRAVIMETAR ASKANIA G_{ss}-2 ZA ODREĐIVANJE UBRZANJA SILE TEŽE NA MORU

Dr Stjepan KLAČ — Zagreb

Određivanje ubrzanja sile teže na moru je skopčano s daleko većim poteškoćama nego analogni rad na čvrstoj Zemljinoj površini. Te poteškoće uzrokuju horizontalna i vertikalna ubrzanja koja potječu od gibanja broda (neposredna podloga za mjerenje), a mogu dostići iznos od 50% vrijednosti ubrzanja sile teže. Za određivanje ubrzanja sile teže na pučini postoje tri mogućnosti:

- a) mjerenje na palubi broda,
- b) mjerenje u podmornici i
- c) mjerenje pomoću gravimetra, koji je uronjen i lebdi u moru.

U blizini kopna (do dubine od 150 m) može se ubrzanje sile teže odrediti i pomoću gravimetara koji se nalaze u zabrtvljenom vanjskom kućištu i spuštenu su na dno mora.

Kod prvog načina mjerenja može se za prevoz upotrebiti povoljan brod i nije potrebno zaustavljanje zbog mjerenja. Na brodu se može pronaći povoljno mjesto za opažanje u pogledu komoditeta, stalnosti temperature i sl. Dnevno se mogu prevaliti velike udaljenosti i nisu potrebne izvanredne vožnje. Međutim, amplitude ubrzanja su u prosjeku 10 puta veće nego kod druge dvije metode.

Kod druge metode su, kao što smo već napomenuli, amplitude ubrzanja za čitav red veličine manje nego kod prve. Ujednačenost temperature je bolja. Podmornica se može lako podesiti uvjetima mjerenja, samo veliki nedostatak predstavlja skučenost prostora koja uz utrošak vremena od 30 minuta po stajalištu čini opažanje prilično tegobnim.

Kod treće metode je također amplituda ubrzanja manja nego kod mjerenja na površini samo se brod mora zaustaviti za svako mjerenje, instrumenat spustiti u more pa podići kod čega nastaju znatne promjene temperature. Prema tome, kod ove metode je potreban poseban brod za mjerenje što poskupljuje samo mjerenje.

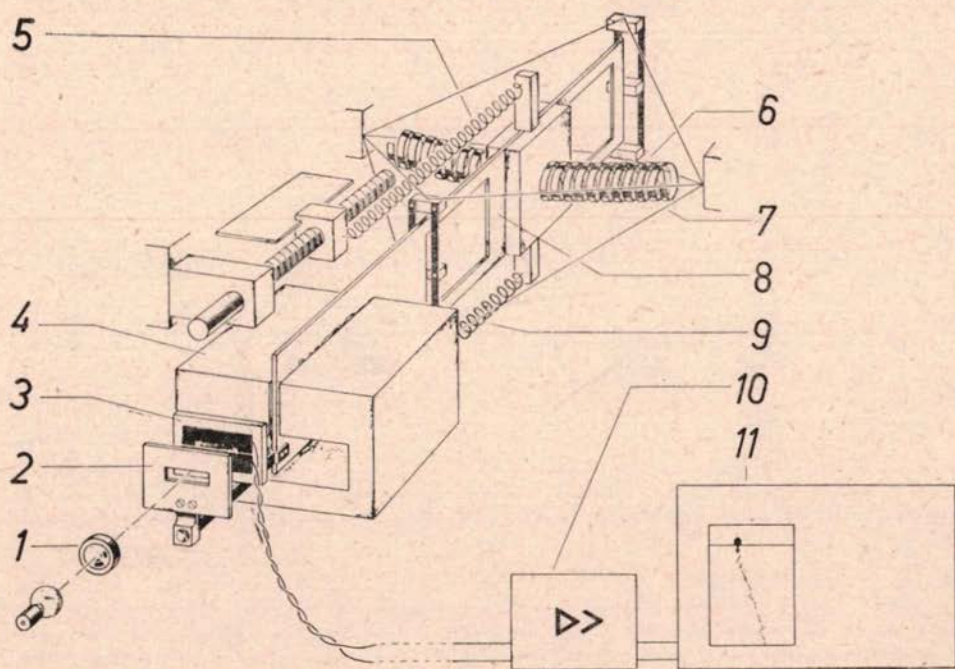
Ako bi bilo moguće smanjiti amplitude ubrzanja, kod prvog načina, koje potječu od gibanja broda on bi bio mnogo povoljniji nego ostala dva, a to je već danas moguće postići.

Usvajajući prvi način određivanja ubrzanja sile teže kao najpovoljniji, u novije vrijeme su konstruirana dva instrumenta i to gravimetar koji mjeri ubrzanje sile teže pomacima elastičnih pera i aneroid-

-gravimetar koji određuje ubrzanje sile teže na osnovu razlika pritisaka koji pokazuju živin barometar i aneroid (s metalnim membranama odnosno kutijama).

Mi ćemo ukratko razmotriti prvi slučaj, jer je drugi još u fazi ispitivanja. Određivanje ubrzanja sile teže pomoću gravimetara s elastičnim perima može se opet izvesti na dva načina. Prvi način zahtijeva naročito osjetljivi električni upravljački mehanizam za održavanje poluge s masom u horizontalnoj ravnini, a kao mjerni pokazatelj služi električna struja. U drugom slučaju treba pojačavati prigušenje poluge s masom, proporcionalno brzini u tolikoj mjeri da se srednja vrijednost čitanja može pripisati statičkoj vrijednosti ubrzanja sile teže na tom mjestu. Takav slučaj nastupa kad otkloni poluge i kod periodičkih ubrzanja od ± 50000 mgala ostaju u linearnom području. Ovaj posljednji način je primjenjen kod gravimetra Askania Gss2 po A. Grafu, koji ćemo u nastavku opisati.

Osnovni princip tog gravimetra je isti kao i kod ostalih gravimetara firme Askania, od Gs4 do Gs12. To znači da se radi, o neastaziranom gravimetru čiju polugu s masom održavaju u horizontalnom položaju dva horizontalna torziona pera. Poluga koja nosi masu izrađena je iz aluminijske ploče koja kod vertikalnog gibanja presijeca jako magnetsko polje, čime se postiže veoma jako prigušenje. Kod gravimetra za određivanje ubrzanja sile teže na moru je važno da se poluga pomiče samo u vertikalnom smjeru. Budući da kod plovidbe broda nastaju i horizontalna ubrzanja, koja iskrivljuju mjerenja ubr-

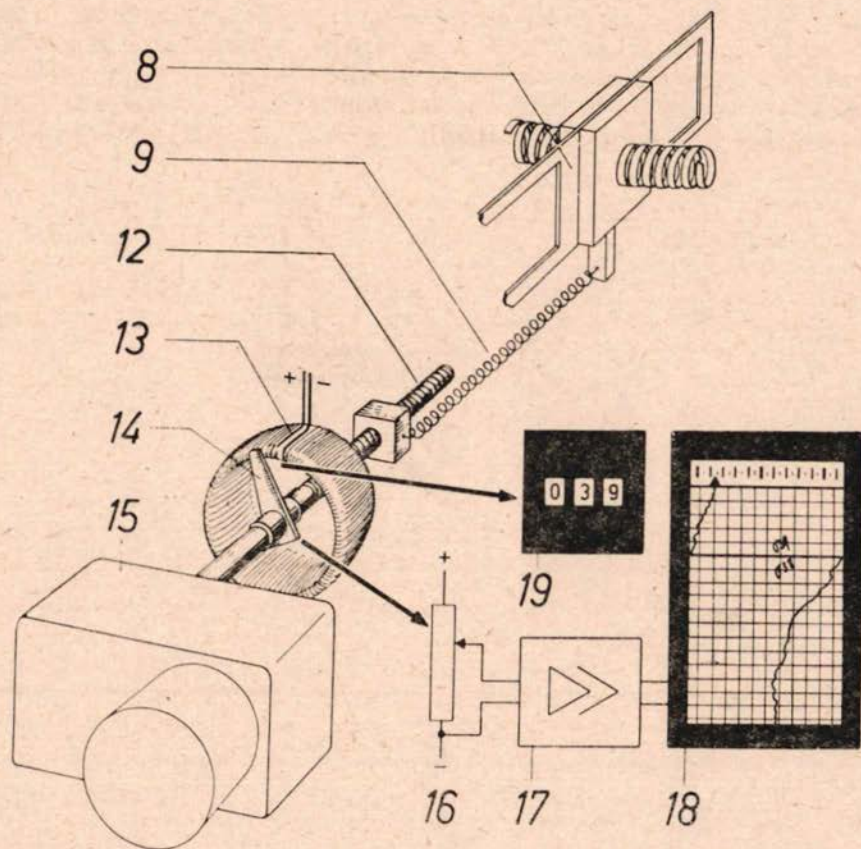


Sl. 1

zanja sile teže, treba polugu pločastog oblika učvrstiti s kućištem pomoću 8 niti kako se to vidi na slici 1. Kod takovog načina učvršćenja djeluje os torzionih pera kao fiksna os, a da se kod toga ne pojavljuje trenje i sl.

Na slici 1 označuje:

- 1 — uređaj za osvjetljenje (žarulja i optika)
- 2 — zaslon s prorezom
- 3 — fotoelemente
- 4 — magnet za prigušenje
- 5 — mjerno pero s mjerilom (ručno pokretanje)
- 6 — torziona pera
- 7 — niti za pričvršćenje poluge
- 8 — polugu
- 9 — pero za promjenu mjernog doseg — ranije — koje se sada automatski regulira i služi za mjerenje
- 10 — pojačalo
- 11 — kompenzacioni uređaj za grafičku registraciju »Enograf«



Sl. 2

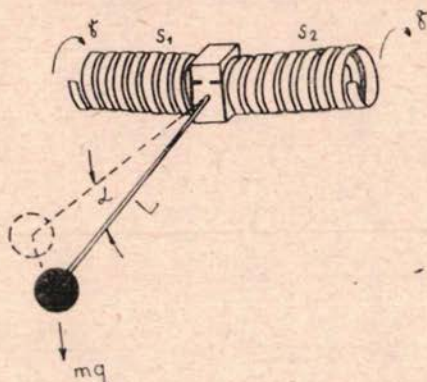
Otklon od nultog (horizontalnog) položaja se obuhvaća fotoelektričnim putem i odvodi do posebnog instrumenta za registriranje. Na poluzi postoji otvor kroz koji se osvijetljaju obje površine diferencijalne fotoćelije, tako da su u nultom (horizontalnom) položaju obje površine jednako osvijetljene. Za dovodenje poluge u nulti položaj služi kompenzaciono pero s finim vijkom. Da se izbjegnu pogreške navoja tog vijka čitanja položaja kompenzacionog pera se vrše optički.

Na sl. 2 vidimo shematski presjek uređaja za automatsku registraciju i na toj slici označuje:

- 8 — polugu
- 9 — mjerno pero
- 12 — mjernu osovinu s navojima
- 13 — potencijometar
- 14 — klizni prsten
- 15 — motor s pogonom
- 16 — potencijometar shematski prikazan
- 17 — pojačalo
- 18 — kompenzacioni uređaj za grafičku registraciju »Minicomp«
- 19 — brojčanik

Osiguranje od promjena zračnog pritiska i adiabatskog efekta se izvodi na identičan način kao i kod ostalih gravimetara firme Askania.

Matematsku teoriju ćemo ukratko objasniti pomoću slike 3.



Sl. 3

Na toj slici označuje: m — masu gravimetra, L — dužinu poluge, α — kut otklona poluge od horizontale, Θ — torzionu konstantu, γ — kut uvijanja potreban da pera drže polugu u približno horizontalnom položaju i g — ubrzanje sile teže. Na osnovu uvjeta ravnoteže mora biti:

$$mgL\cos\alpha = \Theta(\alpha + \gamma), \quad (1)$$

odnosno za male kuteve otklona od horizontalnog položaja

$$\Delta\alpha = \gamma(1 - \alpha\gamma) \frac{\Delta g}{g}. \quad (2)$$

Iz ovog izraza se vidi da je osjetljivost, kod položaja poluge ispod horizontale (α pozitivan), nešto manja nego kad je poluga iznad horizontale (α negativan). Međutim, kod periodičnog gibanja poluge dobiva se srednja vrijednost kuta α .

Pretpostavimo da je ubrzanje sile teže g periodična funkcija izražena na slijedeći način:

$$g = g_0 + v \sin(\omega t),$$

gdje označuje: g_0 — ubrzanje sile teže na tom mjestu i v — amplitudu vertikalnog ubrzanja. Tada u slučaju ravnoteže možemo napisati:

$$[g_0 + v \sin(\omega t)] mL \cos \alpha = \Theta (\alpha + \gamma) \quad (3)$$

Predpostavimo: $\alpha = 0$ i $v = 0$, pa iz (3) dobivamo:

$$g_0 mL = \Theta \gamma \quad (4)$$

Podijelivši izraz (4) sa (3) dobit ćemo nakon zanemarivanja članova trećeg reda:

$$\alpha^2 + 2 \frac{\alpha}{\gamma} - 2 \frac{v}{g_0} \sin(\omega t) = 0.$$

Rješenjem ove kvadratne jednadžbe i razvojem u red njenih korijena, zadržavajući članove drugoga reda dobivamo:

$$\alpha = \frac{v \gamma}{g_0} \sin(\omega t) - \frac{v^2 \gamma^3}{2g_0^2} \sin^2(\omega t). \quad (5)$$

Ako tražimo srednju vrijednost kuta α u jednom periodu, bit će:

$$\int \sin(\omega t) dt = 0$$

$$\int \sin^2(\omega t) dt = \frac{1}{2}, \quad \text{odnosno}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{v^2 \gamma^3}{4g_0^2} \quad (6)$$

Izraz (6) nam daje utjecaj nelinearnosti u ovisnosti o amplitudi — u vertikalnog ubrzanja koje potječe od plovidbe broda. U izrazu (6) treba pod v podrazumijevati reduciranu amplitudu uslijed magnetskog prigušenja, pa ćemo je ubuduće označavati kao v_r . Da bismo mogli $\bar{\alpha}$ izraziti u miligalima moramo se potsjetiti da u našem slučaju vrijedi odnos:

$$\bar{\alpha} : \gamma = \Delta g : g_0, \quad \text{odnosno}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta g}{g_0} \gamma. \quad (7)$$

Usporedivši (6) i (7) dobit ćemo:

$$\Delta g = v_r^2 \frac{\gamma^2}{4g_0}.$$

Izračunajmo jedan numerički primjer. Neka je $\gamma = 1.5\pi$, $v = \pm 2000$ mgala, magnetsko prigušenje za 6-sekundni period $1 : 50$, dakle $v_r = \pm 400$ mgala, odnosno

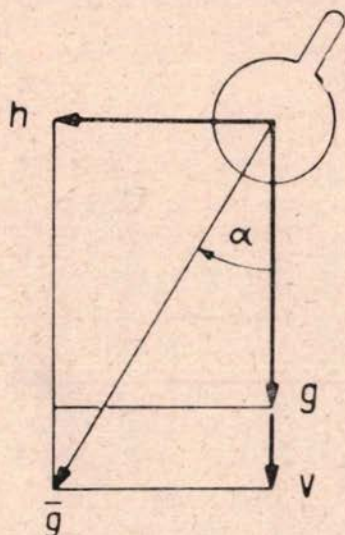
$$\Delta g = \frac{400^2 \times (1.5\pi)^2}{4 \times 981000} = 0.9 \text{ mgala.}$$

Napomenimo na kraju da je bitan sastavni dio svakog gravimetra za mjerenje ubrzanja sile teže na moru uređaj za njegovo horizontiranje na brodu. U načelu postoje dva načina za horizontiranje gravimetra na palubi brodova koji plove i to su:

1) mjerenje gravimetrom koji je učvršćen u kardanskom zglobu i 2) mjerenje gravimetrom, koji je stalno održavan u horizontalnoj ravnini posebnim uređajem.

U prvom slučaju djeluje na mjerni sistem osim ubrzanja sile teže g — vertikalno ubrzanje — v i obje komponente horizontalnog ubrzanja h_x i h_y , dok u drugom slučaju djeluje samo ubrzanje sile teže i srednja vrijednost vertikalnog ubrzanja — v . Razmotrimo oba slučaja.

1) Učvršćenje gravimetra u kardanskom zglobu.



Slika 4

Utjecaj vertikalnog ubrzanja — v se eliminira na moru, pa ostaje samo utjecaj horizontalnog ubrzanja h . Pretpostavimo da h poprima male vrijednosti i da je zadano izrazom:

$$h = h_0 \sin(\omega t),$$

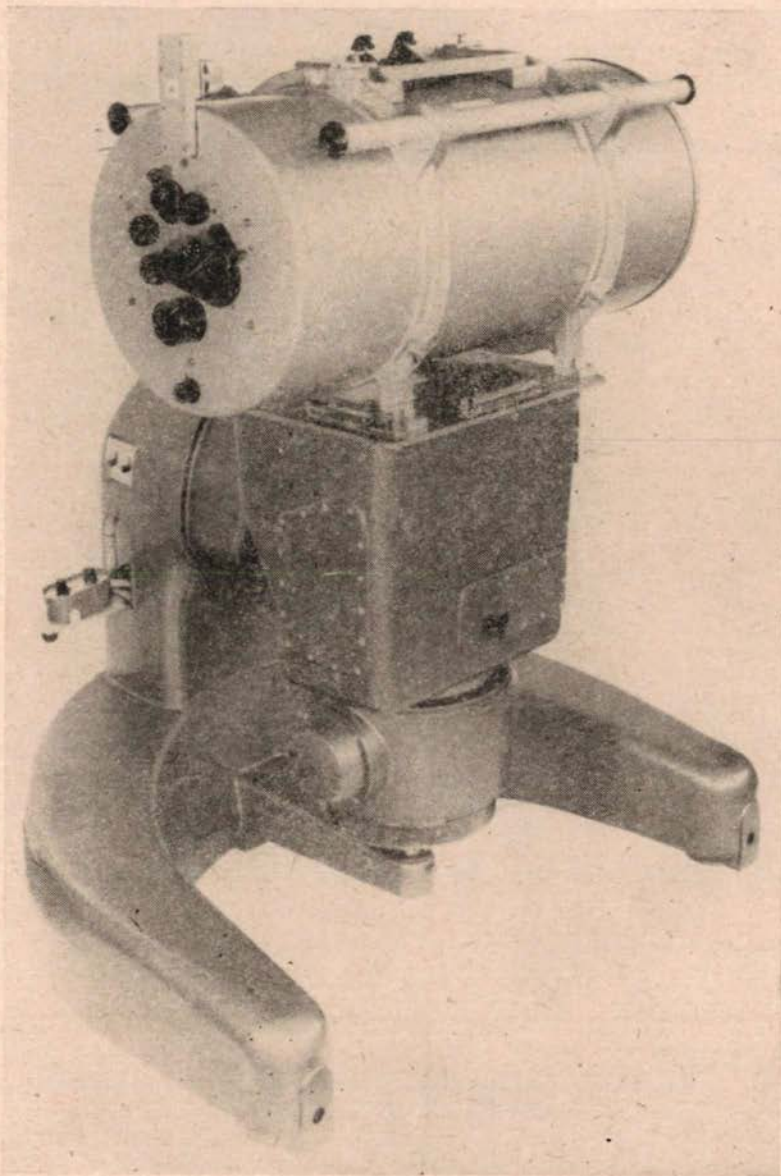
pa po teoremu srednje vrijednosti u periodu t možemo napisati:

$$\begin{aligned} \bar{g} &= \frac{1}{t} \int_0^t \sqrt{g^2 + h_0^2 \sin^2(\omega t)} dt = \\ &= \frac{1}{t} \int_0^t g \left[1 + \frac{h_0^2}{g^2} \sin^2(\omega t) \right]^{1/2} dt = \\ &= g + \frac{1}{4} \frac{h_0^2}{g} \end{aligned}$$

odnosno:

$$\frac{h}{g} - g = \frac{1}{4} \frac{h_0^2}{g}$$

Ako pak zamijenimo prema slici 4 $\frac{h}{g} = \frac{h_0}{g} = \operatorname{tg} \alpha = \alpha,$



Sl. 5

dobit ćemo definitivno:

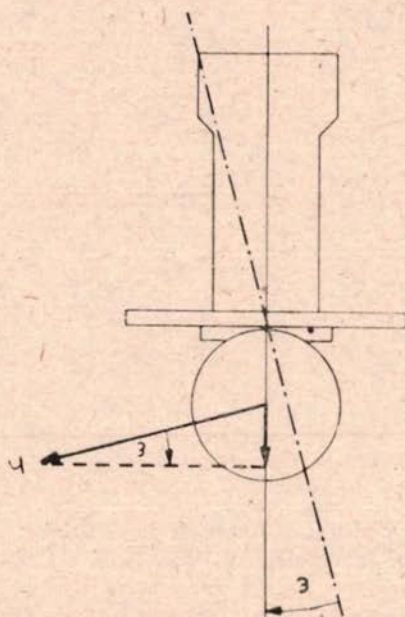
$$\Delta g = \bar{g} - g = \frac{1}{4} g \alpha^2. \quad (9)$$

Kao što je vidljivo iz slike 4, dobiva se preveliko ubrzanje za iznos Δg koji nazivamo Browneova korekcija prema Browneu ili engleski »second order effect«. Radi ilustracije navedimo da je kod $h_0 = \pm 50000$ mgala, $\Delta g = 625$ mgala.

2) Stalno održavanje gravimetra u horizontalnoj ravnini.

Kod tog načina mora biti održavana horizontalnost veoma tačno npr. pomoću uređaja koji rade na principu žiroskopa. Taj je način primjenjen kod gravimetra Askania Gss2, slika 5.

Usprkos toga nastaju pod utjecajem horizontalnih ubrzanja i malog naginjanja broda ε periodička kolebanja oko smjera vertikale, sl. 6.



Sl. 6

Neka se ε mijenja u istom periodu kao i horizontalno ubrzanje h , tj. neka je:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_0 \sin(\omega t + \beta) \\ h &= h_0 \sin(\omega t + \lambda) \end{aligned} \quad (10)$$

Iz slike 5 slijedi

$$\bar{g} = g \cos \varepsilon - h \sin \varepsilon,$$

a jer je ε mali kut:

$$\bar{g} = g - h\varepsilon, \quad \text{odnosno korekcija}$$

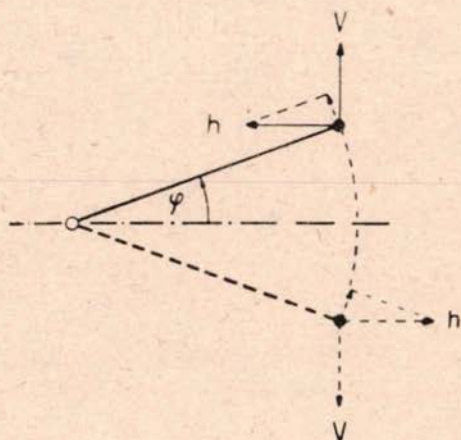
$$\Delta g = \bar{g} - g = -h\varepsilon. \quad (11)$$

Uvrštenjem izraza (10) u (11) dobiva se

$$\Delta g = \frac{1}{2} h_0 \varepsilon_0 \cos(\lambda - \beta). \quad (12)$$

Shvaćajući $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t + \beta)$ kao otklon postolja gravimetra od horizontalne ravnine, kod $\Delta g = 2$ mgala, $h = \pm 50000$ mgala i prema laboratorijskim pokusima $(\lambda - \beta) = 80^\circ$ dobiva se $\varepsilon_0 = 1.6'$

Međutim, ovdje treba upozoriti na još jedan utjecaj, odnosno korekturu, koja nastaje uslijed horizontalnog ubrzanja, ako periodi horizontalnog i vertikalnog ubrzanja postanu isti.



Sl. 7

Na slici 7 vidimo polugu s masom otklonjenu od horizontale, pod utjecajem vertikalnog ubrzanja $v = v_0 \sin(\omega t)$, za kut $\varphi = \varphi_0 \sin(\omega t + \varphi)$.

Ako u momentu maksimalnog otklona poluge i horizontalna komponenta $h = h_0 \sin(\omega t + \lambda)$ poprimi svoju maksimalnu vrijednost, nastaje jedna pogreška koja se ne može poništiti, a izražava se formulom:

$$\Delta g = \frac{1}{2} E v_0 h_0 D \cos(\psi - \lambda). \quad (13)$$

Taj je utjecaj u literaturi poznat pod nazivom »cross coupling effect«. U formuli (13) označuje E — statičku osjetljivost gravimetra (5.10^{-6} mgala) i D — redukciju amplitude uslijed magnetskog prigušenja (cca 0,005).

Za eliminiranje tog utjecaja postoje tri mogućnosti:

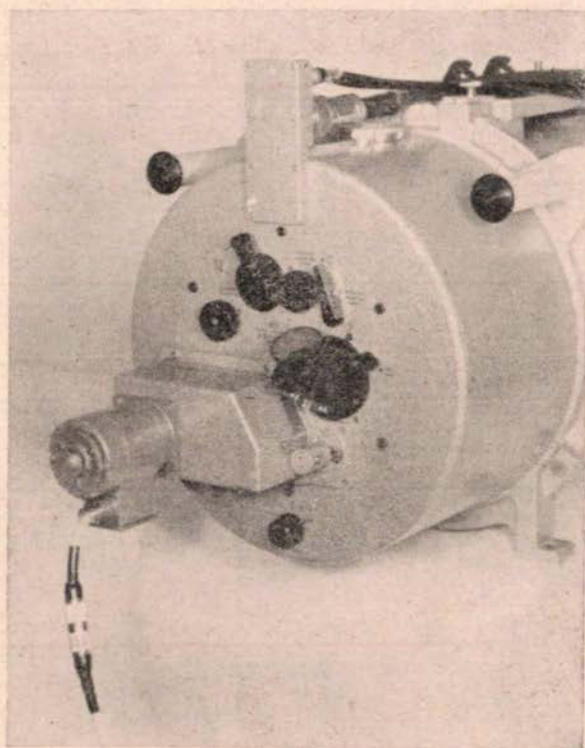
1) Mjerenje v_0 , h_0 , λ i računanje φ i Δg .

2) Okretanje postolja s gravimetrom, kod svake promjene kursa broda, tako da poluga s masom bude okomita na h , kod čega će se Δg poništiti, što se vidi iz formule (13).

3) Prolaženje iste gravimetrijske strane istog dana u oba smjera i ukoliko prilike na moru ostanu iste, $\cos(\varphi - \lambda)$ će promijeniti predznak i utjecaj će se poništiti.

Promatrajući posve teoretski, određivanje ubrzanja sile teže pomoću gravimetra koji je učvršćen u kardanskom zglobu je nepovoljnije, radi velikog Browneovog efekta, nego određivanje ubrzanja sile teže pomoću gravimetra koji je učvršćen na horizontalnom postolju. Međutim, kod praktične izvedbe teško je dati izrazitu prednost jednom načinu. Danas je već u tvornici Askania konstruiran i jedan savršeniji model.

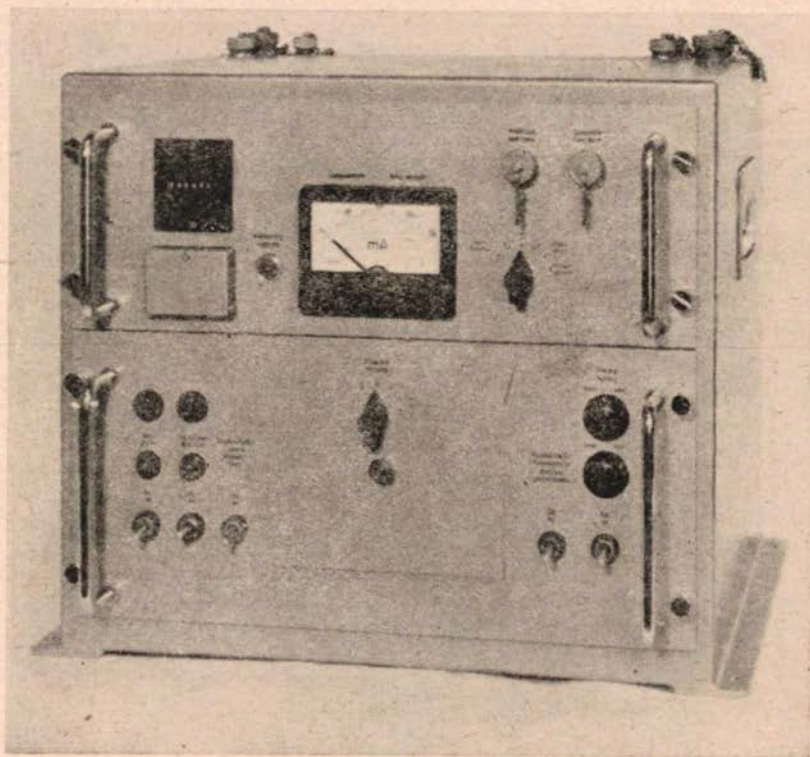
Kod prvog modela Gss-2 su promjene ubrzanja sile teže otklanjale polugu s masom od nultog položaja, otkloni su obuhvaćeni, fotoelektričnim putem, pojačavani i registrirani, kao što je već ranije objašnjeno. Kod novog modela s automatskim upravljanjem mjerna poluga s masom se dovodi automatski u nulti položaj. To se postiže na taj način što dva potencijometra, u kompenzacionom uređaju za grafičku registraciju — Enografu —, djeluju na pomoćni motor kad pisaljka



Sl. 8

odnosno poluga, nije u nultom položaju pa motor pokreće mjernu osovinu (12) odnosno mjerno pero (9), sl. 8.

Motor djeluje na mjerno pero dok poluga s masom ne dođe u nulti položaj a potencijometar dovodi registrirani napon do drugog kompenzacionog uređaja »Minicomp« koji registrira položaj mjerne osovine odnosno momentanu srednju vrijednost ubrzanja sile teže. Na sl. 9 vidimo upravljačku kutiju gravimetra s kompenzacionim uređajem »Enograf«.



Sl. 9

Dosadnja ispitivanja i mjerenja su pokazala da unutarnja tačnost iznosi $\pm (0,5 - 1,0)$ mgala, a vanjska ± 2 mgala i kod amplituda ubrzanja od ± 100000 mgala zbog visokog stepena prigušenja.

LITERATURA:

- A. Graf: Das Seegravimeter
- R. Schulze: Das Askania-Seegravimeter Gss2 nach Graf
- R. Schulze: Das automatisierte Askania-Seegravimeter