

V

VAGE I UTEZI, glavne sastavnice mjer ног uređaja s pomoću kojega se određuje *masa* čvrstih, tekućih i plinovitih tvari. Umjesto naziva *masa*, u razgovornom se jeziku, iz tradicijskih razloga, rabi naziv *težina*. Pretežno se rabe uređaji koji djeluju po načelu *vage*, tj. sprave kojom se masa tijela (tereta) mjeri na osnovi djelovanja gravitacijske sile na mjereno tijelo i na usporedljive utege. Vaganjem, tj. određivanjem mase tijela s pomoću vaga, mjeri se i druge veličine koje obilježavaju čvrste, tekuće i plinovite tvari: gustoća, udio, obujam, svedena teretnica. Čvrsto i postojano tijelo znane mase namijenjeno mjerenu mase drugih tijela i tvari zove se *uteg*. U naše se doba rabe samo utezi od kovinskih slitina.

Poljoprivredne, industrijske, prometne, trgovačke i nadzorne vage sudjeluju u proizvodnji i kupoprodaji skoro svega novostvorenoga nacionalnog dobra te u međunarodnoj razmjeni. Radi zaštite građana i poduzeća od opasnih, lažnih, neispravnih i nedovoljno točnih mjernih rezultata, a i radi ravnopravnog trgovanja s inozemstvom, država putem mjeriteljskih propisa i mjeriteljskog nadzora obvezuje proizvođače i uvoznike vaga i utega na njihovo tipno ispitivanje prije nego što ih stave u prodaju. Osim toga, država pod prijetnjom kazne obvezuje vlasnike vaga i utega na periodično ispitivanje njihove ispravnosti. Nacionalni su mjeriteljski propisi u pravilu usklaćeni s dokumentima Međunarodne organizacije za zakonsko mjeriteljstvo (OIML). Toj organizaciji pripada stotinjak država; od 1993. godine i Republika Hrvatska. Vagarstvo ima skupni međunarodni temelj od 1883. godine.

M. Brezinšćak

Vaga je jedan od najstarijih mjernih uređaja. Vaga i vaganje često su istoznačne mjerjenju, pa osim izravnih imaju i mnogo šira značenja, označavajući svako odmjeravanje. Čovjekoliki prikaz Pravde u ruci drži vagu kao znak objektivna uspoređivanja.

Pretpostavlja se da su se »pravage« i postupak »vaganja« primjenjivali već prije desetak tisuća godina, a arheološki nalazi potvrđuju uporabu vaga prije sedam do devet tisuća godina. Pojedini su se dijelovi vaga različito razvijali: poluga vase, ovješiće ili uporište poluge, zdjelice za utege i vagane predmete, pokazivači ravnoteže, utezi i dr. Vage su se razvijale u nekoliko smjerova: jedne za precizna vaganja u zlatarstvu, draguljarstvu i novčarstvu, zatim u ljekarništvu, te u tehničkim i znanstvenim istraživanjima, druge za jednostavno i brzo vaganje u trgovini, obrnštvo i tehničkoj primjeni, treće za vaganje velikih i teških predmeta, kao što su mosne vase za vaganje vozila.

Zamisao vaganja proistjeće iz prirodnoga čovjekova instinkta odmjerivanja dvaju predmeta u rukama. Vaga kao instrument vrlo se vjerojatno temelji na nošenju tereta u dvijema košarama ovješenim na jarmenicu nošenu na ramenima, kako se to još i danas radi na Srednjem i Dalekom istoku, jer prve vase tisućljećima upravo tome slike.

Najstarije su vase po arheološkim nalazima i crtežima, npr. na staroegipatskom crtežu u Huneferovu papirusu iz ← XIII. st., odreda bile vase s vodoravnim polugom ovješenom ili poduprtom u sredini. Na relativno su dugim užicama ovješene zdjelice, jedna za vagane predmete, a druga za utege. Te su vase imale jednak krakove, što znači da je zbroj masa utega morao biti jednak masi vaganog tijela. Takve su se vase mogle vidjeti još doskora u ljekarnama ili zlatarskim radionicama.

Uza svu jednostavnost takvih vase postoji i velika poteškoća, jer je potreban slog utega, koji za javna mjerjenja moraju biti i umjereni s nekim »prauzimom«. U prvo su se vrijeme kao utezi rabili prikladni, svima poznati predmeti iz okoline,

npr. razni plodovi, kamenčići i dr. Na to podsjeća i naziv današnje jedinice za masu dragulja, dijamanta i pravoga biserja, *karat*, koji je nastao od grčkoga naziva za rogač, kojega su sjemenke služile kao utezi. Prvi su utezi bili od kamena, poslije od metala. Kao utezi, ili barem kao njihova osnova, rabile su se i posude odredenog obujma napunjene nekom tekućinom, najčešće vodom, ili sirkom tvari. Na to podsjećaju jednaki nazivi nekih jedinica mase i obujma, koje su se rabile sve do uvođenja Metarskog sustava, a i prvi se *prakilogram* oslanjao na kubni decimetar vode. Prautezi su čuvani u hramovima i drugim javnim ustanovama, jednako kao što se i današnji prakilogram čuva u Međunarodnom uredzu za utege i mjeru.

Velik je skok u razvoju vase i njihovoj uporabi bila tzv. *rimsko brzo vaga* nejednakih krakova, koju je opisao još rimski graditelj M. Vitruvije Polion u ← I. st. Na utežnoj je strani samo jedan uteg, koji ima niz položaja, čime se postižu različiti momenti, a na strani tereta na lancima ovješena zdjelica. Ravnoteža se postiže pomicanjem utega po utežnom kraku, a njegova »vrijednost« odgovara položaju na kraku, tj. na sredini kraka je polovicu, na desetini desetina itd. Vaga obično ima dva oslonca, za manje i veće terete. Oslonac se drži jednom rukom, a drugom se namješta uteg, čime je omogućeno brzo vaganje. Takve su se vase od rimskih vremena rabile na tržnicama sve do naših dana (prema tur. nazivanci *kantar*).

U sredini XVIII. st. konstruirao je H. Kühn tzv. nagibnu vagu, na kojoj pokazivač ravnoteže svojim položajem na lučnoj ljestvici pokazuje masu tereta. Mjerno se područje vaganja obično proširivalo dodavanjem vanjskih utega. Različite izvedbe takvih vase rabile su se u trgovinama sve doskora.

Gotovo dvije tisuće godina nakon rimske brze vase počeli su se na druge načine primjenjivati različiti krakovi na vase. Početkom XIX. st. konstruirao je A. Quintenz prvo stotinsku, a potom desetinsku vagu, na kojoj je krak utega veći od kraka tereta stotinu, odnosno deset puta. Stoga se masa tereta na desetinskoj vase računa kao deseterostruka masa utega.

Na decimalnoj je vase riješen i problem položaja tereta na platformi na koju se stavlja teret. Složeni sustav poluga na koje se oslanja platforma jednolično prenosi silu tereta bez obzira na položaj tereta na platformi. Takav sustav poluga primijenjen je i na stolnoj vase koju je sredinom XIX. st. konstruirao J. Béranger. Takve su vase otvorene ili zatvorene u kućištu na kojem su se simetrično nalazile zdjelice za teret i utege i pokazivač ravnoteže. Rabile su se također doskora kao ljekarničke, trgovачke i kuhinjske vase.

Na kraju XIX. st. počeo se na preciznim vagama, umjesto mehaničkoga pokazivača, rabiti svjetlosni snop, čime je omogućeno znatno povećanje ljestvice, a time i točnosti očitavanja. U XX. st. konstruirani su brojni tipovi vase: za precizna mjerjenja, za vrlo velike terete, za automatska vaganja pri pakiraju proizvoda, za mnoge industrijske primjene itd.

Još od Arhimedova vremena (← ~250. god.) vase služe i za posredna mjerjenja. Urajanjem tereta u tekućinu određuje se obujam nepravilnih tijela, gustoća tekućine, ili se »vaganjem« određuju razne sile (mekaničke, električne, magnetske). Na strani utega primjenjuju se druge sile poznatih vrijednosti, npr. sila opruge (vaga s oprugom, R. Hooke, 1678.), sila uvijanja niti (torzijska vase, Ch. A. Coulomb, 1784.).

Razvoj elektronike utjecao je i na vase. Ravnoteža je vase indicirana analognim, a potom digitalnim pretvornikom. To je omogućilo da se od 1960-ih godina umjesto analognih ljestvica na vagama postavljaju digitalni pokazivači koji odmah numerički pokazuju rezultat vaganja. Suvremene vase za većinu namjena danas imaju takve digitalne pokazivače, a kod mnogih se taj signal upotrebljava za dalju obradbu podataka: unos u računalu za obraćun svake vrste, npr. za zapisivanje u baze podataka, pisanje računa, ispis na papirnatu podlogu, za upravljanje postupkom pri automatskom vaganju, pakiranju, razvrstavanju i dr.

Z. Jakobović

SVJETSKI VAGARSKI TEMELJ

Međunarodni mjeriteljski sporazum. Sedamnaest država, od toga dvanaest europskih, potpisalo je 1875. u Parizu *Dogovor o metru* (Convention du Mètre) sa željom da se »osigura međunarodno jedinstvo i usavršava metrički sustav jedinica«. Počet-

kom 1996. Dogovoru je pripadalo 48 država, od toga 22 europske. Ključne su ove odredbe Dogovora:

1) Države potpisnice Dogovora osnivaju u Parizu trajan znanstveni Međunarodni ured za mjere i utege (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) i prema brojnosti svoga stanovništva snose troškove njegova uspostavljanja i održavanja.

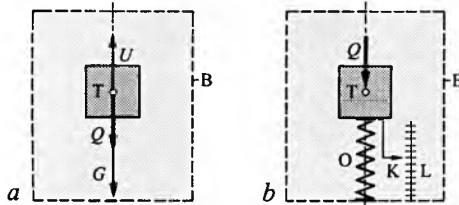
2) Međunarodni ured djeluje pod isključivom upravom i nadzorom Međunarodnog odbora za mjere i utege (Comité International des Poids et Mesures, CIPM), koji je podređen Općoj konferenciji za mjere i utege (Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM). Konferenciju tvore predstavnici svih ugovornih država, a sastaje se u Parizu najmanje jednom u šest godina.

3) Zadaće su Međunarodnog ureda za mjere i utege: a) uspoređivati i ovjeravati nove etalone metra i kilograma, b) pohranjivati međunarodne etalone, c) periodično uspoređivati nacionalne (državne) etalone s međunarodnim etalonima i njihovim etalonima svjedocima te uspoređivati termometričke etalone, d) uspoređivati nove etalone s temeljnim etalonima nemetričkih utega i mjera što se upotrebljavaju u raznim zemljama i u znanosti, e) umjeravati i uspoređivati mjerničke letve, f) uspoređivati etalone i precizne ljestvice za koje ovjeravanje zatraže države, učena društva i učenjaci, odnosno strukovnjaci.

Pojmovni i jezični utjecaji država članica iz Europe, Amerike i Azije osobito su se prelamali na strukovnjacima Ureda u početnom razdoblju njihova rada (1876–1900). Zato je na polju masenoga mjeriteljstva Konferencija morala radi izbjegavanja nesporazuma normirati neke mjerne veličine i definirati osnovnu masenu mjeru jedinicu. Pozivajući se na odluku svog odbora CIPM iz 1887., Treća je konferencija (1901) ovako definirala mjeru veličinu *težinu* (franc. poids; ta riječ u francuskom znači i uteg; jednako je dvoznačna i engleska riječ weight, a donedavno je bila i njemačka Gewicht): »Naziv *težina* označuje veličinu iste prirode kao što je *sila*; težina tijela umnožak je mase toga tijela i težnoga ubrzanja; posebno, normalna težina tijela umnožak je mase toga tijela i normalnoga težnog ubrzanja; ... vrijednost je normalnoga težnog ubrzanja $9,806\text{--}65 \text{ m/s}^2$...« Tako težinu tijela definira i međunarodna norma ISO 31/3(1992), koja to čini i jednadžbom:

$$G = m \cdot g, \quad (1)$$

gdje je m masa tijela kojemu je težina G , a g težno ubrzanje u težištu tijela. Naziv težno ubrzanje znači *ubrzanje slobodnoga pada*. Tijelo pada slobodno onda kad se njegovu gibanju prema Zemlji opire samo sila ustrajnosti, a to se događa prilikom pada u praznini (vakuumu).



Za vrijeme vaganja utezi se i vagani predmeti u pravilu ne nalaze u praznini nego u zraku, plinu, ulju, vodi ili kojem drugom fluidu. Zato uz težinu G na tijelo mase m i obujma V djeluje protivno usmjereni *uzgon* (sl. 1a):

$$U = V g \rho_a = \frac{m g \rho_a}{\rho}, \quad (2)$$

gdje je ρ_a gustoća fluida, a $\rho (=m/V)$ gustoća tijela; obje pri istoj temperaturi i pri istome tlaku. Posljedica je sila *teretnica*:

$$Q = G - U = (m - \rho_a V) \cdot g = G \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho}\right). \quad (3)$$

Tom silom opterećuju vagana tijela i upotrijebljeni utezi ležaju polužne vase kad ona miruju. Omjer Q/G manji je od broja 1 za $0,06\cdots 5$ promila, već prema tvorivu od kojeg su izrađeni predmeti i utezi.

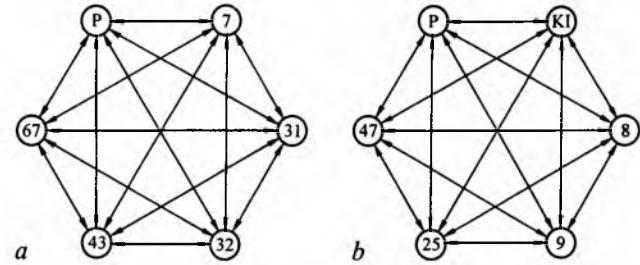
U nekim se normirnim publikacijama *težina* definira ovako: »Težina tijela koje miruje na nekom mjestu Zemlje jest sila kojom to tijelo u praznini tlači svoju podlogu«. Njome se zapravo zorno tumači pojmom praznine. U prozirnoj i brtvljenoj posudi nalazi se tijelo mase m poduprto oprugom (sl. 1b). Siše li se iz posude zrak, opruga se skraćuje, što pokazuje kazaljka na ljestvici. Smanjivanjem tlaka u posudi povećava se teretnica Q koja stiže oprugu. Najveću moguću vrijednost, $Q = G = m \cdot g$, teretnica bi dosegla ako bi se isisala i posljednja molekula zraka.

Svjetska masena pramjera. Sedam kilogramskih utega pohranjenih u podzemnom spremištu Međunarodnog ureda za mjere i utege u Sèvresu, predgrađu Pariza, tvori svjetski mjeriteljski vrh. To su: međunarodna pramjera (prototype international), ovdje označena slovom P, i šest kilogramskih etalona svjedoka (témoins) označenih znakom KI i brojevima 7, 8(41), 32, 43 i 47. U proteklih stotinjak godina ti su utezi upotrebljavani četiri puta (tabl. 1). Međunarodni odbor CIPM pridijelio je 1882. godine današnjoj pramjeri (P) masu 1 kilogram. Tu operativnu mjeriteljsku odluku mjerodavno je na međudržavnoj razini potvrdila Prva konferencija (1889). Treća je konferencija (1901) s pomoću međunarodne pramjere definirala jedinicu za masu kilogram, jednu od sadašnjih sedam osnovnih jedinica Međunarodnoga sustava (v. *Metrologija, zakonska*, TÉ 8, str. 500): »Kilogram je masa međunarodno pohranjene masene pramjere«. Učinila je to prilikom tumačenja naziva masa i težina, i to izjavom: »Kilogram je jedinica za masu; on je jednak masi međunarodne kilogramske pramjere« (Le kilogramme est l'unité de masse; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme).

Tablica 1
REZULTATI UMJERAVANJA SEKUNDARNIH SVJETSKIH MASENIH PRAMJERA PREMA MEĐUNARODNOJ PRAMJERI (P)

Oznaka utega	Godina			
	1889.	1939.	1946.	1989.
Masa etalona svjedoka: 1 kg +				
KI	+127 µg	+158 µg	+98 µg	+135 µg
No 7	-530 µg	-481 µg	-499 µg	-481 µg
No 8(41)	+260 µg	+341 µg	+300 µg	+321 µg
No 32	+70 µg	+133 µg	+107 µg	+139 µg
No 43	—	+260 µg	+306 µg	+330 µg
No 47	—	+358 µg	+405 µg	+403 µg
Masa međunarodnih etalona u BIPM: 1 kg +				
No 9	+282 µg	+333 µg	+300 µg	+312 µg
No 25	+107 µg	—	—	+158 µg
No 31	+162 µg	+159 µg	+115 µg	+131 µg

Šest etalona svjedoka i četiri etalona s kojima radi Ured BIPM umjerenje je prema pramjeri (P) najpreciznijim postupcima najtočnijom komparatorskom kilogramskom vagonom NBS-2 u ljeto 1989. godine (sl. 2). Prvi je dan u svakom od dva punjenja učinjeno svih 15 mogućih mjerjenja. Sutradan je, otprilike u isto doba dana, ponovno učinjeno 15 mogućih mjerjenja, ali obratnim redoslijedom. Računom izjednačenja dobila se mjerena nesigurnost $\pm 2,3 \mu\text{g}$ uz statističku sigurnost 68 %. Relativna nesigurnost (v. *Mjerna nesigurnost*, TE 8, str. 604) izmjerenih masa tih devet utega (tabl. 1) iznosila je u tom trenutku $\pm 2,3 \cdot 10^{-9}$ (68 %), tj. malo više od dvije milijarditinke. S pomoću tri radna etalona BIPM ovjeravaju se kilogramski etaloni pojedinih država. Samo se iznimno za umjeravanje nacionalnih etalona rabe etaloni svjedoci.



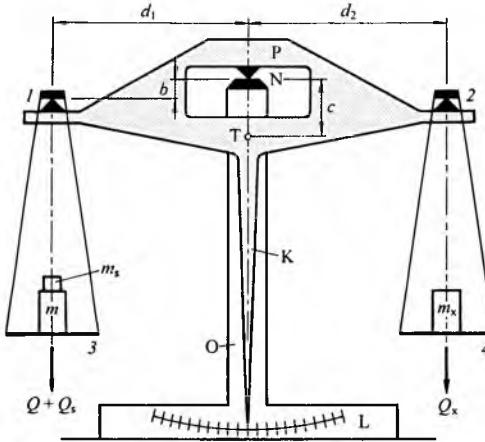
Sl. 2. Shema umjeravanja deset vrhunskih svjetskih kilogramskih etalona u jesen 1989. u dva punjenja vase (a, b)

Ovdje spominjani međunarodni i nacionalni kilogramski etaloni izrađeni su od slitine platine i iridija. Maseni je udio platine 90%, a iridija 10%, tako da se gustoća utega malo razlikuje od $21,54 \text{ kg/dm}^3$. Platina jamči postojanost prema koroziji, a iridij pridonosi tvrdoći utega, što povećava njihovu otpornost na habanje. Utezi su izrađeni u obliku valjka kojemu je promjer i visina $\sim 39 \text{ mm}$ pa im je obujam $\sim 46 \text{ cm}^3$, a ploština oko 72 cm^2 . U proteklih je 120 godina izrađeno oko 80 kilogramskih etalona. Od toga je posljednjih dvadesetak primjeraka maseno dotjerano i polirano tokarskim strojem uzastopnom uporabom sve finije dijamantne paste. Etaloni imaju na svome plaštu poliranjem upisan označni broj. Iznimke su međunarodna pramjera, koja na sebi nema nikakvu oznaku, i etalon svjedok koji se u službenim dokumentima označuje sa dva broja: 8(41). Na njemu je 1888. umjesto broja 8 pogreškom upoliran broj 41. On taj broj nosi i dalje, iako je sav pripadni pribor označen brojem 8. Ne postoji etalon s upoliranim brojem 8.

Prva je konferencija (1889) proglašila samo dva etalona svjedoka: KI i 1. Odbor CIPM je 1905. dodao još dva: 8 i 32. Budući da je zbog svoje izbočene osnovice pao s pladnja, 1925. godine isključen je etalon svjedok s brojem 1, a umjesto njega je uveden etalon s brojem 7. Godine 1938. dodani su kao svjedoci etaloni s brojevima 43 i 47.

Sve platinsko-iridijske ingote izradila je londonska tvrtka Johnson-Matthey Ltd. jer francuski pokušaj izrade slitine 1874. godine nije uspio; bilo je previše nečistoća i šupljina. Tvrta je 1879. isporučila tri valjka, od kojih je pariški graditelj vaga A. Collot doradom i ugađanjem izradio prva tri etalona, poslije donđena pod znakovima KI, KII i KIII. Četiri su mjeritelja 1880. u Observatoire de Paris (BIPM) u to vrijeme još nije imao svu potrebnu mjeru opremu) izmjerila masu tih utega prema platinskom *Kilogramme des Archives*, kojemu je od 1795. masa bila određena kao masa kubnoga decimetra destilirane vode. Primjerak KIII bio je najbliži arhivskom kilogramu i zato je 1883. odabran za međunarodnu masenu pramjeru. Uteg KI proglašen je etalonom svjedokom, a KII dodijeljen je 1889. godine Francuskoj. Ured BIPM je 1884. preuzeo od tvrtke Johnson-Matthey daljnjih 40 valjaka za izradbu kilogramskih etalona. Collot ih je u BIPM do 1888. dotjerao unutar mase $1 \text{ kg} \pm 1 \text{ mg}$ i time priredio za prvu međunarodnu ovjeru 1889. godine. U razdoblju 1929–1974. dovršena su 23 kilogramska etalona od slitine platine i iridija, a do 1986. godine preostalih 14. Otkada je to moguće, svaki se ingot neposredno nakon proizvodnje analizira spektroskopski i kemijski, gama-zračenjem se provjerava ima li šupljina, a hidrostatskim vaganjem doznaće gustoća.

Načelo vrhunskoga mjernog postupka. Vaganjem se doznaće razlika masa dvaju tijela. Ta je razlika pri vrhunskom vaganju (vaganju uz vrlo veliku osjetljivost) manja od milijuntinke mase vaganoga predmeta (tabl. 1). Postignuta merna nesigurnost izmjerena rezultata u naše je doba na razini milijarditinke



Sl. 3. Konstrukcijsko načelo jednakokrake ($d_1 = d_2$) precizne polužne vage komparatora. P nemagnetska čvrsta kovinska poluga, T težište poluge, K kazaljka poluge, O oslončni stup vage, L pokazna ljestvica kruto učvršćena na stup, N središnji zakretni ležaj (ležajna pločica od čelika, ahata ili safira učvršćena je na stup vage, ležajna prizma na polugu), 1 i 2 ležaji (s pločicom i prizmom), 3 i 4 pladnjevi s utezima, Q , Q_s i Q_x teretnice

($1 \mu\text{g}/1 \text{ kg}$). Načelo djelovanja tako točnih vaga, a to su polužne vage, pokazuje slika 3. U Zemljinu težnom polju g njije se čvrsta poluga izrađena tako da se praktički uopće ne savija pod djelovanjem teretnicā utega, pladnjeva, podložnih pločica i drugih pomicnih dijelova.

Nepoznata se masa m_x određuje s pomoću utega poznate mase m u tri koraka. Najprije se regulacijskim vijcima prazna vaga namjesti u vodoravan položaj, a zatim se istodobno stave na desni pladanj tijelo m_x , a na lijevi uteg m (sl. 3). Pošto se vaga iznjiše, poluga se smiri u kosom ravnotežnom položaju. Poluga se zakrenula za kut $\Delta\epsilon$, što je kazaljka svojim otklonom pokazala na ljestvici. Na lijevi se pladanj tada doda utežić m_s kojemu je masa baš tolika da se poluga smiri u vodoravnom položaju. Takvo stanje opisuje momentna jednadžba ravnoteže s obzirom na brid prizme u središnjem ležaju N:

$$(Q_s + Q) \cdot d_1 = Q_x \cdot d_2. \quad (4)$$

Prema definicijskoj jednadžbi (3) teretnice su triju utega

$$\begin{aligned} Q_s &= m_s \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right) g_s = m_s f_s g_s, \\ Q &= m \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho} \right) g_1 = m f g_1, \\ Q_x &= m_x \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_x} \right) g_2 = m_x f_x g_2. \end{aligned} \quad (5)$$

Pritom se indeks 1 odnosi na lijevi pladanj, indeks 2 na desni, indeks s na pretežni utežić, a f općenito označuje uzgonski faktor:

$$f = \frac{Q}{G} = 1 - \frac{\rho_a V}{m} = 1 - \frac{\rho_a}{\rho}. \quad (6)$$

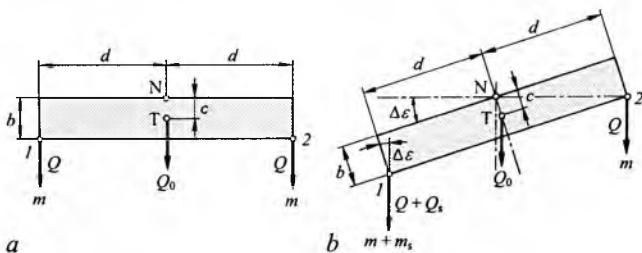
Uvrštavanjem triju teretnica u jednadžbu (4) dobiva se opći rezultat (mjerna jednadžba):

$$m_x = m \frac{f g_1 d_1}{f_x g_2 d_2} \left(1 + \frac{m_s}{m} \cdot \frac{f_s g_s}{f g_1} \right). \quad (7)$$

Ako su mjerne okolnosti takve da se može staviti $d_1 = d_2$ (npr. pri supstitucijskom vaganju), $g_1 = g_2$ zbog podjednako visokih utega, $g_s = g_1$ zbog $m_s/m = (0,5 \dots 3) \cdot 10^{-6}$, te ako pretežni uteg ima gustoću mjerenga ($f_s = f$), jednadžba se (7) pojednostavljuje u oblik

$$m_x = (m + m_s) \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_x}}. \quad (8)$$

O nesigurnosti poznavanja mase sitnoga, pretežnog utega m_s izravno ovisi točnost mjerenga rezultata. Tim se utegom eksperimentalno određuje osjetljivost vase u svakom konkretnom mjerenu, tj. pri stvarnom opterećenju vase. Slika 4 a pokazuje opterećenu, uravnoteženu i smirenou polugu vase sa slike 3 kad je izrađena kao jednakokraka vaga ($d_1 \approx d_2 = d$). Doda li se na lijevi pladanj pretežni uteg m_s , poluga će se zanjihati, a zatim smiriti u novom ravnotežnom položaju. U tom će se položaju poluga zakenuti za kut $\Delta\epsilon$ (sl. 4 b). Namjesti li se poluga tako da bridovi



Sl. 4. Određivanje osjetljivosti jednakokrake polužne vase pri teretu m

svih triju ležajnih prizama (*I*, *N*, *2*) budu u istoj ravnini (*b*=0), momenti će teretnica biti

$$\begin{aligned} M_1 &= (Q_s + Q)d \cos \Delta\epsilon, \\ M_2 &= Qd \cos \Delta\epsilon + Q_0 c \sin \Delta\epsilon, \end{aligned} \quad (9)$$

gdje je Q_0 teretnica poluge, a c udaljenost težišta od brida središnjeg ležaja. Izjednače li se uzgonski faktori s brojem 1, iz jednakosti momenata $M_1=M_2$ u novom ravnotežnom položaju slijedi

$$\frac{m_s}{\Delta\epsilon} = m_0 \frac{c}{d}, \quad (10)$$

gdje je m_0 masa poluge. Budući da je riječ o vrlo malim kutovima, uzeto je $\tan \Delta\epsilon \approx \Delta\epsilon$.

Međunarodna organizacija za zakonsko mjeriteljstvo (OIML, v. *Metrologija, zakonska, TE8, str. 500*) ovako definira *osjetljivost vase*:

$$S = \frac{\Delta\epsilon}{m_s} \quad (11)$$

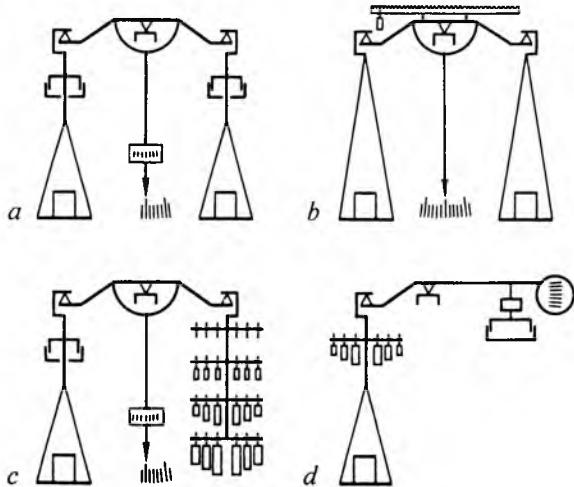
i propisuje da se u konkretnim iskazima mora navesti na koje se opterećenje vase m ta osjetljivost odnosi. Znak ϵ u jednadžbi (11) prema OIML može označavati bilo koju veličinu odabrano za iskazivanje promjene položaja poluge vase zbog stavljanja ili skidanja pretežnog utega m_s . Prema tome se za istu prevagu osjetljivost pojavljuje u više oblika:

$$m_s = \frac{\Delta\epsilon}{S_1} = \frac{\Delta s}{S_2} = \frac{\Delta E}{S_3} = \frac{\Delta n}{S_4} \text{ itd.} \quad (12)$$

Slova ϵ , s , E , n redom označuju kut, pomak (duljinu), električni napon i brojnost podjeljaka na ljestvici. Njima redom pripadaju osjetljivosti S označene u jednadžbi (12) indeksima 1 do 4. Vrijednosti osjetljivosti S_1 iskazuju se npr. jedinicom miliradijan po miligramu, osjetljivosti S_2 jedinicom milimetar po mikrogramu itd. S takvim općim značenjem osjetljivosti vase S jednadžba (8) prelazi u oblik

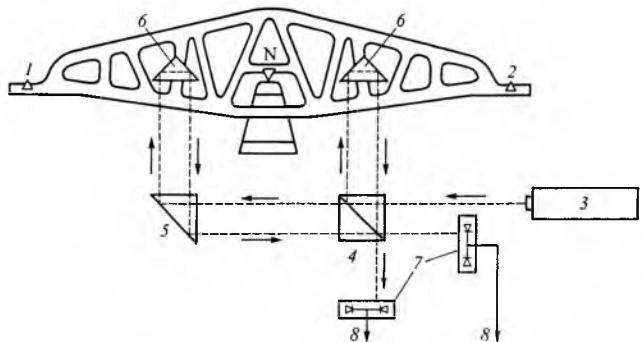
$$m_x = m \frac{\frac{1 - \rho_a}{\rho}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_x}} + \frac{\Delta\epsilon}{S}. \quad (13)$$

Iz temeljne se mjerne jednadžbe (7) vidi da nesigurnost poznavanja omjera duljina polužnih krakova d_1/d_2 pri normalnom vaganju (sl. 4, sl. 5 a, b) izravno utječe na točnost mernoga rezultata. Za vrijeme jednoga mernog niza taj se omjer može održavati stalnim na taj način da se ne prekida dodir prizama s njihovim



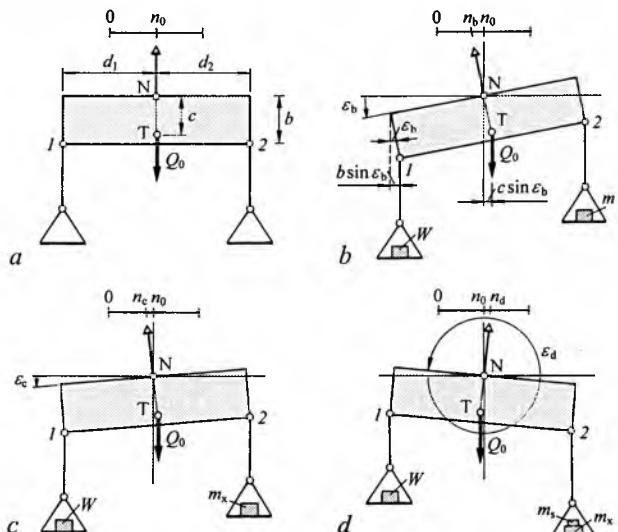
Sl. 5. Četiri načina djelovanja precizne polužne vase. *a* vaga s prigušnim uređajem i projektorom u nagibnom području, *b* vaga s uređajem za premeštanje utega jahača, *c* jednopladanska vaga s uređajem za isključivanje i uključivanje utega, *d* dvoležajna jednopladanska supstitucijska vaga s protuutegom i uređajem za izmjenu uteži.

ležajnim pločicama. Još je bolje kad se taj dodir održava stalno pod punim teretom. Pritom se u vagu ugrađuje uključni uređaj za kompenzaciju utege (sl. 5 c, d). U novijim se preciznim vagama interferometrom prati njihanje poluge i pratećom računalnom tehnikom procjenjuje ravnotežni otklon poluge na temelju pet-šest njihaja (sl. 6). Takva je tehnika osobito važna uz vrhunske komparatore s dugim njihajnim periodom. Tako period vase NBS-2 traje ~37 sekunda.



Sl. 6. Vaga s interferometrom za praćenje i elektroničku obradbu njihanja poluge. *N* središnji ležaj vase, *I* i *2* krajnji ležaji, *3* laserski izvor, *4* djonilo zrake, *5* kretajuća prizma, *6* reflektorske prizme, *7* diferencijalne fotodiode, *8* električni signali

Vrhunski supstitucijski komparatori služe za najtočnije umjeravanje etalonskih utega. Svi se mjeri postupci obavljaju na jednom kraku polužne vase (sl. 5 d, sl. 7), a na drugome kraku stalno visi protuuteg. Za vrijeme mernog postupka, uključivši prigušenje njihanja poluge, ne prekida se dodir bridova prizama s njihovim ležajnim pločicama pa su duljine krakova stalne ako se temperatura ne mijenja. Najtočnije vase, osobito kilogramski komparatori, stavljuju se u toplinski izolirane posude u kojima se održavaju stalna temperatura, tlak i još neke veličine. Da bi duljina kraka bila sigurna $\pm 1 \cdot 10^{-9}$ (u relativnom iskazu), temperaturna razlika između krajeva poluge ne smije premašiti 50 mikrokelvina.



Sl. 7. Mjerenje razlike masa dvaju podjednakih utega nadomjesnom (supstitucijskom) metodom s pomoću besprekidne jednokrake polužne vase

Određivanje razlike masa $m_x - m$ dvaju podjednakih utega (tabl. 1) s pomoću takvih vaga obavlja se u najmanje četiri koraka. Najprije se praznoj vagi pridijeli ishodište pokaznoga sustava (sl. 7 a). Zatim se vaga optereti poznatim (usporedbenim) utegom m i protuutegom W (sl. 7 b) te se odčita otklon poluge ϵ_b ili n_b . U trećem se koraku nadomješta uteg m utegom m_x kojemu se određuje masa (sl. 7 c). Određivanje osjetljivosti vase s pomoću pretežnoga utega mase m_s (koja milijuntinka mase utega m) četvrti je merni korak (sl. 7 d). Rezultat se doznaće s pomoću tri ravnotežne momentne jednadžbe. One se ovdje ispisuju u vrlo pojed-

nostavljenu obliku, za vagu s $b=0$ i s drugim idealiziranim okolnostima, npr. $g=g_x=\dots$, $f=f_x=\dots$:

$$\begin{aligned} Wd_1 \cos \varepsilon_b &= m d_2 \cos \varepsilon_b + m_0 c \sin \varepsilon_b, \\ Wd_1 \cos \varepsilon_c &= m_x d_2 \cos \varepsilon_c + m_0 c \sin \varepsilon_c, \end{aligned} \quad (14)$$

$$Wd_1 \cos \varepsilon_d = m_x d_2 \cos \varepsilon_d + m_0 c \sin \varepsilon_d + m_s d_2 \cos \varepsilon_d.$$

Uvedu li se znakovi $p=d_1/d_2$ i $S=d_2/(cm_0)$ te tan $\varepsilon \approx \varepsilon$, zbog neznatnih otklona poluge, tri ravnotežne jednadžbe dobivaju oblik

$$\begin{aligned} pW &= m + \frac{\varepsilon_b}{S}, \\ pW &= m_x + \frac{\varepsilon_c}{S}, \\ pW &= m_x + \frac{\varepsilon_d}{S} + m_s. \end{aligned} \quad (15)$$

Budući da je masa m_s pretežnog utega poznata, iz jednadžbi se dobivaju rješenja za masu, odnosno za osjetljivost:

$$m_x - m = m_s \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_c}{\varepsilon_c - \varepsilon_d}, \quad (16)$$

$$S = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_d}{m_s}. \quad (17)$$

Obično se mjerna jednadžba zapisuje u obliku

$$m_x = m + \frac{\varepsilon_b}{S} - \frac{\varepsilon_c}{S}. \quad (18)$$

U skladu s definicijama *osjetljivosti* S (11) i (12), pod znakovima ε mogu se razumjeti različite veličine: brojnost n podjeljaka na pokaznoj ljestvici (st. 7), duljina, električni napon, kut, brojnost električnih impulsa itd.

Tablica 2

DVOJNO SUPSTITUCIJSKO VAGANJE U PET KORAKA

Korak	Teret	Otklon
1.	m_x	n_1
2.	m	n_2
3.	$m + m_s$	n_3
4.	$m_x + m_s$	n_4
5.	m_x	n_5

Mjeritelji u Međunarodnom uredu BIPM i u američkom National Institute of Standards and Technology (NIST) imaju najtočnije kilogramske komparatore na svijetu, NBS-2 i Voland-1. Da bi relativna nesigurnost samog vaganja bila na razini $\pm 1 \mu\text{g}$, dakle $\pm 1 \cdot 10^{-9}$ u relativnom iskazu, služe se *dvojnim supstitucijskim postupkom*. Pritom jedan od utega biva po tri puta na mjerljivoj pladnju, a drugi uteg i sručni pretežni uteg po dva puta (tabl. 2). U tih pet koraka, poput onih na slici 7, pokazna naprava pokazuje otklone n_1 do n_5 . Pet je korak zapravo provjera prvoga koraka, a time i stabilnosti pokaznog sustava, odnosno ponovljivosti vase. Pripadna mjerna jednadžba glasi

$$m_x - m = \rho_a (V_x - V) + \frac{n_1 - n_2 - n_3 + n_4}{-n_2 + n_3 + n_4 - n_5} (m_s - \rho_a V_s) + p(h, A, t). \quad (19)$$

Krajnji desni član je popravak koji ovisi o razlici visine težišta triju utega, o razlici njihovih ploština, o dnevnom vremenu i trajanju mjerjenja (komparatoru V-1 osjetljivost padne $\sim 0,2\%$ za dva i pol sata punog opterećenja) i o još nekim utjecajima. Osjetljivost je vase

$$S = \frac{(n_3 + n_4) - (n_2 + n_5)}{m_s - \rho_a V_s}. \quad (20)$$

Iako su krakovi dvoležajnih vase NBS-2 i V-1 dugi samo pedesetak milimetara, njihajni im period traje oko pola minute.

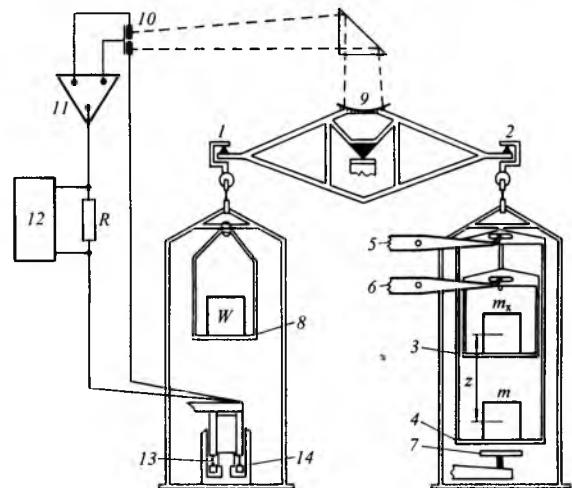
Zato se ravnotežni položaj n procjenjuje s pet uzastopnih otklona poluge y_1, \dots, y_5 na istu stranu. Zatim se jednadžbom

$$n = \frac{1}{12} (2y_1 + 3y_2 + 2y_3 + 3y_4 + 2y_5) \quad (21)$$

određuje ravnotežni položaj n svakoga od pet koraka.

Vaga NBS-2 djeluje u Međunarodnom uredu od 1973., a služi samo za umjeravanje kilogramskih etalona izrađenih od platinsko-iridijske slitine, plemenitih čeličika i bronce. To je polužna vaga s dva ležaja. Na drugom se kraku nalazi protuteg sastavljen od dva podjednaka diska uložena u polugu vase. Čitava se vaga nalazi u brtvljenom i toplinski izoliranom uspravnom čeličnom valjku. Vaga može odjednom primiti šest valjkastih kilogramskih utega. Transportni mehanizam omogućuje da se na pladanju stavlja bilo koji od šest utega, a da pritom oba ležaja budu stalno opterećena punim teretom za trajanja svih pet mjerljivih koraka. Vagom se upravlja mehanički s pomoću zakretne užadi koja ulazi u brtvljeni valjak kroz nekoliko bočnih prvrta. Tako se upravlja kružnim transporterom, podizачem utega, podizачem pretežnoga jahača i kočnicom prigušnika. Kroz prvrte prolaze i električni vodovi koji s osjetila u nutrini valjka stalno dobavljaju podatke o temperaturi, tlaku i vlažnosti zraka. Temperatura se održava stalnom na ± 1 milikelvin, a tlak na $\pm 0,3$ paskala. Obično se u jednome mjerljivom nizu izmjere masene razlike četiri utega, i to ovim redoslijedom: A → B, B → C, C → D, D → A, A → C, B → D. Slova označuju utege. Svako mjerjenje razlike sastoji se od spomenutih pet koraka (tabl. 2). Jedan takav mjerljivi niz traje oko dva i pol sata. Sutradan, otprikljike u isto doba dana, obavi se drugi mjerljivi niz, ali obrnutim redoslijedom: B → A, C → B, D → C, A → D, C → A, D → B. Na oklopu vase NBS-2 nalaze se brtvljeni stakleni prozorići kroz koje prolazi svjetlosni snop na ljestvicu i teleskop, i kroz koje se promatra položaj utega u vagi. Međunarodni ured BIPM tu vagu neprestano dotjeruje i dopunjjuje, prije desetak godina automatskim uređajem za odčitavanje njihanja poluge, a nakon toga sustavom za računalnu obradbu svih dijelova svakoga mjerljivog niza. Osim toga, Ured razvija novu vrstu komparatora, bez ležajnih prizama i pločica. Umjesto njih služe ovjesne vrpce od slitine bakra i berilija debljine $\sim 50 \mu\text{m}$. Prethodni eksperimentalni podaci pokazuju da je normni odmak uspoređivanja kilogramskih utega takvom vagom $\sim 0,5 \mu\text{g}$, tj. $\sim 5 \cdot 10^{-10}$ u relativnom iskazu.

Preinaka u besprekidnu vase. Britansko vrhunsko mjerilište National Physical Laboratory utvrdilo je pokušima da zbog prekidanja dodira između ovjesnih prizama i ležajnih pločica prilikom stavljanja i skidanja utega njihova vaga uzrokuje pogrešku od približno $\pm 50 \mu\text{g}$ na 500 g , tj. oko $\pm 1 \cdot 10^{-7}$ u relativnom iskazu. Preinakom te vase u besprekidnu supstitucijsku vase uspjeli su nesigurnost smanjiti na $\pm 2 \cdot 10^{-9}$. Preinake se mogu jednim dijelom pratiti na slici 8. Dodana su dva nosača s pladnjevima 3 i 4



Sl. 8. Kilogramska polužna vaga naknadno usavršena za besprekidno supstitucijsko vaganje u britanskom mjeriteljskom institutu National Physical Laboratory. 1 i 2 krajnji ležaji, 3 i 4 unutarnji nosači utega, 5 i 6 daljnjski upravljanje ručice, 7 regulacijski vijak, 8 nosač protuteg, 9 sferno zrcalo, 10 fotočelije, 11 pojazač, 12 digitalni voltmeter, 13 električni namot, 14 magnet

na kojima se nalaze uspoređivani utezi m_x i m . Svakim od njih može se opteretiti ovjesna prizma 2, što se čini s pomoću daljinski upravljanja ručica. Mase nosača 3 i 4 međusobno se razlikuju samo toliko koliko se nije dalo izbjegći dotjerivanjem, ali je ta razlika poznata. Regulacijskim vijkom ograničava se podizanje glavnog nosača na 0,3 mm pa se time zakretanje poluge ograničava na ~ 1 miliradijan. Drugom je glavnom nosaču dodan unutarnji nosač 8 koji nosi protuteg W , održava simetriju vase i sprječava pojavu nevjernosti zbog necentričnosti utega.

Zrcalo baca svjetlosni snop na par fotočelija, a razlika izlaznih struja fotočelija dolazi u pojačalo. Pojačana se struja mjeri posredno digitalnim voltmetrom i prolazi električnim namotom, čime se stvara kompenzacijска sila između namota i trajnoga magneta smještena na glavnom nosaču. Struja (i njezin smjer), a time i odčitanje voltmetra, razmjerni su sili potreboj da bi se poluga zadržala u opisanom položaju s obzirom na fotočelije. Toj sili $Q = g/fm$ razmjerna je manjkajuća ili suvišna masa. Otpor i namot ugođeni su tako da se na voltmetru može izravno odčitati manjkajuća ili suvišna masa.

Tako se nadomještanje utega m_x utegom m obavlja pod praktički punim teretom i bez prekidanja dodira u ležajima. Pri obradbi mjernih rezultata mora se uzeti u obzir razlike težnih ubrzanja zbog razlike visina $z = h_x - h$ na kojima su težišta utega. U masenom je mjeriteljstvu za težno ubrzanje g_h na nadmorskoj visini h dovoljno točan iskaz

$$g_h = g_R(1 - ch), \quad (22)$$

gdje je g_R težno ubrzanje na razini mora, a c stalnica ($c = 2,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1}$). Ako je u nekom primjeru $z = 12 \text{ cm}$, relativna razlika težnih ubrzanja iznosi $\Delta g/g = z/c = 30 \cdot 10^{-9}$, što pri vaganju kilogramskih utega znači promjenu mase od $30 \mu\text{g}$.

Iako se dvoležajne supstitucijske vase s elektrodinamičkom kompenzacijom sile teretnice proizvode za laboratorijsko tržište tek od 1950. godine (Mettler, Sartorius), njihova su načela otkrivena stotinjak godina prije. A. C. Becquerel je 1837. u Parizu izradio prauzorak polužne vase kojom je mjerio silu što djeluje između trajnoga magneta i namota kojim teče istosmjerna struja. K. Ångström je u Stockholmu izradio 1895. elektromehaničku mikrovagu, a Th. Gast u Darmstadtu 1944. automatsku mikrovagu s elektromagnetskom kompenzacijom sile, kojom su upravljali sklopovi s elektronikama kao tadašnji vrhunski uređaji.

Prijelaz na čelične etalone. U naše se doba rabe normirani utezi kojima je nazivna masa 1 mg do približno 10 t, tj. u rasponu od deset dekada. Od toga se gornjih sedam dekada u pravilu izrađuje od sivoga lijeva (lijevanog željeza) ili od čelika. Pritom se nadzorni i etalonski utezi izrađuju od plemenitih čelika (s velikim udjelima nikla i kroma). Gustoća je takvih utega $7,8 \dots 8,2 \text{ kg/dm}^3$. Dio se utega srednjih dekada izrađuje od mjedi gustoće $8,4 \dots 8,8 \text{ kg/dm}^3$ i od bronce gustoće $7,4 \dots 8,8 \text{ kg/dm}^3$. Dakle, gotovo se svi radni i nadzorni utezi izrađuju od kovinskih slitina kojima je gustoća $\sim 8 \text{ kg/dm}^3$.

Sve te utege namijenjene javnom prometu ili preciznim mjernim postupcima treba umjeriti, tj. mjeridbom doznati kolika im je masa, uzimajući pritom u obzir da je međunarodnoj pramjeri međunarodnim dogovorom pridijeljena masa točno 1 kg. Gustoća te pramjere iznosi $\sim 21,5 \text{ kg/dm}^3$, a obujam $\sim 46 \text{ cm}^3$. Umjeravanje čeličnoga kilogramskog utega s pomoću te pramjere ili njezinih etalona svjedoka zahtijeva dodatan mjeriteljski napor jer je obujam čeličnoga utega skoro tri puta veći ($\sim 125 \text{ cm}^3$) od obujma međunarodne pramjere. Zato se razlika njihovih teretnica

$$Q_x - Q = -g \rho_a (V_x - V) + g(m_x - m) \quad (23)$$

pojavljuje pri supstitucijskom vaganju komparatorom NBS-2 ili Voland-I kao prilična sila. U izrazu (23) indeks x označuje čelični utez. Pri gustoći zraka od $1,21 \text{ kg/m}^3$ drugi se član izraza može zanemariti pa razlika svedenih uzgona (što je i razlika svedenih teretnica) iznosi

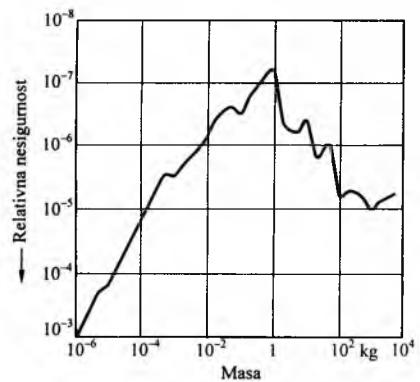
$$\frac{Q_x - Q}{g} = -1,21 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (125 - 46) \text{ cm}^3 = -96 \text{ mg}. \quad (24)$$

To čini 96 milijuntinka mase uspoređivanih etalona koji se normalno razlikuju samo za milijuntinku ili dvije (tabl. 1). Primjere-

no tome vase NBS-2 i V-1 izrađene su tako da najveći otklon poluge ne premaši 4 mg. Zato se pri mjerjenju razlike $m_x - m$ čeličnom utegu dodaje čelični predmet kojemu je masa $m_d \approx 96 \text{ mg}$. Time se razlika teretnicâ dovodi na približno $\pm 1 \text{ mg}$, a mjerena se jednadžba (19) proširuje:

$$m_x - m = -m_d + \rho_a (V_x + V_d - V) + \\ + \frac{n_1 - n_2 - n_3 + n_4}{-n_2 + n_3 + n_4 - n_5} (m_s - \rho_a V_s) + p(h, A, t). \quad (25)$$

Zbog nesigurnosti svoje mase i svojeg obujma, dodani čelični predmet nerazmjerne povećava nesigurnost mjerene masene razlike $m_x - m$. Čak ni najbolji čelični utezi mase 100 mg ($\approx 96 \text{ mg}$) nemaju relativnu nesigurnost manju od $2 \cdot 10^{-5}$ (sl. 9), pa bi i oni u takvom primjeru, pri određivanju mase čeličnog etalona m_x , uzrokovali dodatnu nesigurnost od najmanje $\pm 2 \mu\text{g}$. Budući da ima i drugih dodatnih izvora nesigurnosti, BIPM umjerava čelične etalone vagom NBS-2 s nesigurnošću $\pm 15 \mu\text{g}$ (68 %), a to je šest puta netočnije od nesigurnosti kojom umjerava platinsko-iridijske kilogramske etalone. Točnije od $15 \mu\text{g}$ ne može ga umjeriti ni neko drugo mjerilište jer nema bolju vagu od NBS-2. Zato je državama skromnijega mjeriteljskog ugleda primjeren do vrha svoga masenog mjeriteljstva započinju s čeličnim kilogramskim etalonom umjerjenim u Međunarodnom uredu ili u inozemnom mjerilištu na razini Ureda. Hrvatsko državno mjeriteljstvo ima tako svoje ishodište u čeličnom etalonu s nesigurnošću $100 \mu\text{g}$ ili $1 \cdot 10^{-7}$ u relativnom iskazu pri statističkoj sigurnosti 95 %.



Umjeravanje utežnih slogova. Točnost umjeravanja utega ovisi o nesigurnosti svih utega koji sudjeluju u nekom stvarnom mjernom postupku. Primjeri su pretežni uteg (jahač) $m_s \approx 3 \text{ mg}$ i dodatni uteg $m_d \approx 96 \text{ mg}$ u mjerenoj jednadžbi (25). Budući da se nikada ne zna koji će uteg u kojоj prilici zatrebiti, sustavno se umjeravaju *desetni slogovi* (garniture) utega, i to kroz sve dekade od kilograma naviše i naniže. Tako se npr. u sustavu 1225 *desetgramske utežni slog* sastoji od utega nazivnih masa 1 g, 2 g, 2^g i 5 g te obilježava znakom $\Sigma 10$, što znači da zbroj *nazivnih masa* četiri utega toga sloga iznosi 10 gram. Zvjezdicom se označava drugi uteg iste nazivne mase. *Stogramske utežni slog* sastoji se od utega nazivnih masa 10 g, 20 g, 20^g i 50 g te obilježava znakom $\Sigma 100$; u takvoj se notaciji broj uvijek odnosi na mjeru jedinicu gram.

Umjeravanje utežnih slogova je mjereno-računski postupak kojim se svakom utegu sloga pridjeljuje njegova masa s obzirom na kilogramski etalon. Potrebna ili postižljiva točnost umjeravanja dobiva se ispunjavanjem triju odrednica: 1) Vagama uspoređivani skupovi utega oblikuju se u slogove tako da razlika masâ tih slogova bude što manja kako bi vage djelovale kao komparatori, tj. sa svojim najboljim mjeriteljskim svojstvima. 2) Obavlja se veći broj masenih usporedbi nego što je prijeko potrebno za određivanje mase umjeranih utega. Ta prekobrojna mjerena, obuhvaćena računom izjednačenja, smanjuju pogreške umjernog postupka. 3) Iz sloga vrhunskih vaga različitih nosivosti (tabl. 3) odabiru se za pojedine masene usporedbe one vase koje u postupak unose najmanju moguću nesigurnost.

Tablica 3

PODATCI O VAGAMA KOJE TEMELJNI NJEMAČKI MJERITELJSKI INSTITUT PTB RABI ZA UMJERAVANJE VRHUNSKIH UTEGA U MASENOM RASPONU OD 1 mg DO 100 t

Uporabno mjerne područje	Vrsta vase i najveći teret	Normni odmak i relativni normni odmak*
$0,5 \text{ mg} < m < 4 \text{ g}$	Elektromehanička ultramikrovaga s uključnim uređajem za utege, 4 g	$0,2 \mu\text{g}$ $4 \cdot 10^{-6} \dots 5 \cdot 10^{-8}$
$4 \text{ g} < m < 30 \text{ g}$	Mehanička mikrovaga s uključnim uređajem za utege, 30 g	$1,5 \mu\text{g}$ $4 \cdot 10^{-7} \dots 5 \cdot 10^{-8}$
$30 \text{ g} < m < 50 \text{ g}$	Mehanička mikrovaga s uključnim uređajem za utege, 50 g	$2 \mu\text{g}$ $(7 \dots 4) \cdot 10^{-8}$
$50 \text{ g} < m < 200 \text{ g}$	Elektromehanička makrovaga s uključnim uređajem, 200 g	$10 \mu\text{g}$ $2 \cdot 10^{-7} \dots 5 \cdot 10^{-8}$
$200 \text{ g} < m < 1 \text{ kg}$	Elektromehanička makrovaga s uključnim uređajem, 1 kg	$< 25 \mu\text{g}$ $1,3 \cdot 10^{-7} \dots 2,5 \cdot 10^{-8}$
1 kg	Etalonska polužna jednakokraka vaga s optičkim odčitanjem, 1 kg	$5 \mu\text{g}$ $5 \cdot 10^{-9}$
1 kg	Dvoležajna polužna komparatorska vaga s napravom za izmjenu usporedivih utega, s uključnim uređajem za ugradene utege i s elektromagnetskom kompenzacijom, 1 kg	$(2 \dots 1) \mu\text{g}$ $(2 \dots 1) \cdot 10^{-9}$
$1 \text{ kg} < m < 2 \text{ kg}$	Elektronička komparatorska vaga, 2 kg	$50 \mu\text{g}$ $(5 \dots 2,5) \cdot 10^{-8}$
$2 \text{ kg} < m < 5 \text{ kg}$	Jednakokraka polužna vaga, 5 kg	$0,32 \text{ mg}$ $1,5 \cdot 10^{-7} \dots 6,5 \cdot 10^{-8}$
$5 \text{ kg} < m < 10 \text{ kg}$	Elektronička komparatorska vaga, 10 kg	$0,1 \text{ mg}$ $(2 \dots 1) \cdot 10^{-8}$
$10 \text{ kg} < m < 20 \text{ kg}$	Jednakokraka polužna vaga s kazaljkom, 20 kg	3 mg $(3 \dots 1,5) \cdot 10^{-7}$
$20 \text{ kg} < m < 50 \text{ kg}$	Automatizirana jednakokraka polužna vaga s induktivnim pretvornikom, 50 kg	$0,3 \text{ mg}$ $1,5 \cdot 10^{-8} \dots 6 \cdot 10^{-9}$
$50 \text{ kg} < m < 200 \text{ kg}$	Jednakokraka polužna vaga s kazaljkom, 200 kg	$(40 \dots 135) \text{ mg}$ $(8 \dots 7) \cdot 10^{-7}$
$200 \text{ kg} < m < 5 \text{ t}$	Jednakokraka dvojna polužna vaga, 5 t	$(80 \dots 180) \text{ mg}$ $4 \cdot 10^{-7} \dots 4 \cdot 10^{-8}$
$5 \text{ t} < m < 100 \text{ t}$	Mehanička tračnička mosna vaga s optičkim odčitavanjem, 100 t	$0,4 \text{ kg}$ $8 \cdot 10^{-5} \dots 4 \cdot 10^{-6}$

*Iskazani se relativni normni odmak (uz statističku sigurnost 68%) odnosi na grane uporabnoga mernog područja.

Budu li svi utezi od jednakoga tvoriva, mjerne se jednadžbe bitno pojednostavuju. Takav *kilogramski utežni slog* može se prema kilogramskom etalonu m_e umjeravati ovim mernim usporedbama (x je izmjerena razlika masi):

$$\begin{aligned}
 m_e &= m_{500} + m_{200} + m_{200}^* + m_{100} + x_1, \\
 m_e &= m_{500} + m_{200} + m_{200}^* + m_{\Sigma 100} + x_2, \\
 m_{500} &= m_{200} + m_{200}^* + m_{100} + x_3, \\
 m_{500} &= m_{200} + m_{200}^* + m_{\Sigma 100} + x_4, \\
 m_{200} + m_{100} &= m_{200}^* + m_{\Sigma 100} + x_5, \\
 m_{200} + m_{\Sigma 100} &= m_{200}^* + m_{100} + x_6, \\
 m_{200} &= m_{200}^* + x_7, \\
 m_{200} &= m_{100} + m_{\Sigma 100} + x_8, \\
 m_{200}^* &= m_{100} + m_{\Sigma 100} + x_9, \\
 m_{100} &= m_{\Sigma 100} + x_{10}.
 \end{aligned} \tag{26}$$

Moguće su i druge usporedbe. Iz jednadžbi je očvidno da stogamski utežni slog u nizu mernih usporedbi služi kao jedan uteg. Zbog deset mjerjenja postoji pet prekobrojnih jednadžbi, jer su nepoznanice mase četiriju utega kilogramskog sloga i masa stogamskoga sloga kao celine.

Ako se ne zahtijeva postižljiva točnost, dovoljno je da se obavi samo pet prijekog potrebnih mernih usporedbi. To su one kojima je rezultat x_1, x_3, x_8, x_9 i x_{10} . Od pripadnih pet jednadžbi, s pomoću definicije odmaka

$$r = m - m_0, \tag{27}$$

gdje je m stvarna, a m_0 nazivna masa utega, i uz $r_e = m_e - 1000 \text{ g}$, slijedi:

$$\begin{aligned}
 r_{500} &= \frac{1}{2}(r_e - x_1 + x_3), \\
 r_{200} &= \frac{1}{5}(2r_{500} - 2x_3 + 3x_8 - 2x_9 - x_{10}), \\
 r_{200}^* &= r_{200} - x_8 + x_9, \\
 r_{100} &= \frac{1}{2}(r_{200} - x_8 + x_{10}), \\
 r_{\Sigma 100} &= r_{100} - x_{10}.
 \end{aligned} \tag{28}$$

Analognim se postupcima umjeravaju ostali utežni slogovi, sve do posve sitnoga desetmiligramskega sloga. Na tom kraju umjereno niza mora, međutim, postojati dodatni utežić kojemu je masa bliska masi najmanjeg utega. Obično se označuje zvezdicom, npr. $m_{0,001}^*$ ako umjeravanje završava s desetmiligramskim sloganom (1, 2, 2*, 5 mg).

Osim što se ovakvim mernim i računskim postupcima doznaže stvarna masa $m = m_0 + r$ svakog utega, računom se izjednačenja doznaće i raspodjela nesigurnosti na pojedine utege. Te se nesigurnosti unoše u prikladne tablice i dijagrame (sl. 9), koji svjedoče o mjeriteljskoj osposobljenosti nekog mjerilišta ili neke mjeriteljske zajednice u određenom trenutku.

TEHNIČKE IZVEDBE VAGA

Normirano razvrstavanje vase. Normacijske organizacije industrijski razvijenih država i njihovi međunarodni savezi razvrstavaju vase prema:

a) *namjeni* u prodavaonici, kućanstvu, industrijskoj radionici, laboratoriju, poljoprivrednom i rudarskom skladištu, cestovnom, željezničkom, brodskom i zračnom prometu i dr.,

b) *ovjerljivosti* u poslovnom i službenom prometu te u drugim gospodarskim područjima i zaštitim službama, tj. svadje gdje se vase moraju tipno odobriti i periodično ovjeravati,

c) *automatiziranosti* mernoga postupka vase za odvagivanje, diskontinuirano vaganje i kontinuirano vaganje, za transportnu vrpcu i razvrstavanje jaja i drugih predmeta,

d) *smirivanju*, tj. svojstvu da vase nakon promjene tereta prije ili kasnije zauzme nov ravnotežni položaj,

e) *mernom načelu*, npr. poput uobičajene podjele vase na *mehaničke*, koje mehanički uravnotežuju teretnicu i pokazuju izmjerenu vrijednost, i na *elektromehaničke* s električnim mernim pretvornikom ili kompenzatorom,

f) *mernom sustavu* kao što su merna opruga, elektrodinamički kompenzator sile, elektrootpornički pretvornik sile, mehaničko poluže, kapacitivni pretvornik pomaka, magnetoelastični pretvornik, hidraulični silomjer itd.,

g) *dinamičnosti*, tj. relativnom gibanju vaganoga tereta prema prijamniku, npr. prilikom neprekidnoga vaganja na transportnoj vrpci.

Prema *izvedbi* vase se svrstavaju u 13 velikih skupina. To su:

1) analitičke i laboratorijske vase koje služe za osobito točna mjerjenja. U pravilu su to vase prvoga i drugoga točnosnog razreda prema OIML, i to malih tereta. Dijele su se u tri podskupine: mehaničke polužne vase, elektroničke analitičke vase, posebne vase;

2) maloprodajne stolne vase koje se razvrstavaju u mehaničke trgovачke vase s iskazivanjem cijene robe, maloprodajne vase s izračunavanjem cijene i iskazivanjem drugih podataka, vase za priređivanje i označivanje pakovina, automatske maloprodajne vase;

3) platformne vase za trgovinu, poljoprivredu i industriju, tj. vase s ravnom plohom kao prijamnikom tereta. Ta se ploha (platforma, most) u pravilu oslanja na nekoliko uporišta, npr. na ležajne prizme, na silomjere (silomjerne čelije), kuglaste oslonce itd. To su vase za diskontinuirano vaganje: teret se stavlja na ravni prijamnik, izvaze u mirovanju i zatim skine s prijamnika. Privremeno ili stalno vase se stavljaju u različite visine: na stol, u transportnu vrpcu iznad tvorničkih strojeva, na skladišni pod, u vagarsku jamu tako da je platforma u razini tla itd.;

4) vase za viseći teret s prijamnikom tereta oblikovanim tako da može preuzeti ovješeni teret. U prvu se skupinu svrstavaju vase za mirujući ili gotovo mirujući teret: ručna opružna vaga (silomjeri, dinamometri), rimska vaga (kantar), kranska opružna vaga, elektronička kranska vaga, hidraulična kranska vaga za terete do 370 t itd. U drugoj su skupini vase za pokretne viseće terete: kranska vaga, konzolna vaga, kransko vozno vitlo, gravdevska vitlo, ljevaoničke vase itd.;

5) vase za izračunavanje transportnih pristojba koje ovise o masi predmeta, izmjerama, vrsti otpreme, postupku, daljinskoj zoni i inozemnom području. Izračun se odnosi na kopneni promet željeznicom ili cestom, zračni promet te na pomorski promet. Prilikom se ističu poštanske pismovne i paketne pošiljke u željeznicom i zračnom prometu. Poštanske su vase raznovrsne, od najjednostavnijih pismovnih mehaničkih i elektromehaničkih vase do digitalnih kranskih vase;

6) osobne vase u zdravstvu koje služe kao dijagnostičko pomagalo. To su elektromehaničke osobne vase nosivosti do 200 kg, osobne vase s pomičnim utezima, krevetne vase, sjedeće vase i vase za dojenčad nosivosti do 16 kg izrađene kao vase s pomičnim utezima ili kao elektroničke vase. Posebne su zdravstvene vase one što se rabe pri hemodijalizi;

7) vase za cestovnu i kolosiječnu (tračničku) vozila. Razvrstavaju se u mehaničke polužne vase, elektromehaničke vase i hibridne izvedbe. Prijamnik tereta (platforma) prilagođen je teretu koji se važe: čitavo vozilo, osovinski pritisak, pritisak jednoga kotača. Osim toga, razlikuju se vaganje u vožnji i u mirovanju. Platforme (mostovi, otuda naziv mosna vaga) izrađuju se kao željezne i betonske plohe oslonjene na brojne ležaje i silomjere. Nosivost željezničkih mosnih vase ovisi o duljini mosta, npr. 167 t za most dugačak 14 m. Stacionarne cestovne vase s mostom 18 m × 3 m imaju nosivost ~60 t;

8) vase za kontinuirano vaganje sipkih tereta. Upotrebljavaju se za optimalno upravljanje industrijskim procesima, za bilanciranje rudnih zaliha i drugih sirovina te za izračunavanje utroška sirovina. Mjere maseni protok i neprekidno ga integriraju u masu protekloga sipkog tereta. Većina je takvih vase ugrađena u transportnu vrpcu; pri širini od 2 200 mm i brzini 4 m/s mjereni maseni protok doseže 20 000 t/h. Takve se vase izrađuju i kao dozirne za punjenje vreća sipkim teretom;

9) automatske vase za diskontinuirano vaganje i odvagivanje živežnih namirnica, lijevaka, gnojiva, pastoznih mješavina i dr. Mnogobrojne su vrste takvih dozirnih vase preko kojih se pune tisuće raznovrsnih pakovina, tj. onih proizvoda što su bez nazočnosti kupca tako zatvoreni da im se količina ne može promjeniti bez očevidećih preinaka;

10) spremničke vase za odvagivanje sirovina i priređivanje mješavina za tehnološki proces. To su u pravilu silomjeri s električnim pretvornikom. Silomjeri se ugrađuju u ovjesne ili tlačne ležaje spremnika sa zrnatim, praškastim i tekućim sirovinama. Ručnim ili automatskim upravljanjem na prikladan se način i u potrebnom trajanju otvara zasun na dnu spremnika i time ispušta zahtijevani sirovinski obrok. Ispod spremnika prolazi transportna vrpca, zakretna ploča ili vozilo s posudama. U velikim skladišnim tornjevima s dvadeset i više uspravnih valjkastih spremnika (silosa) vase se pomicaju na konzolama i tako poslužuje čitav toranj;

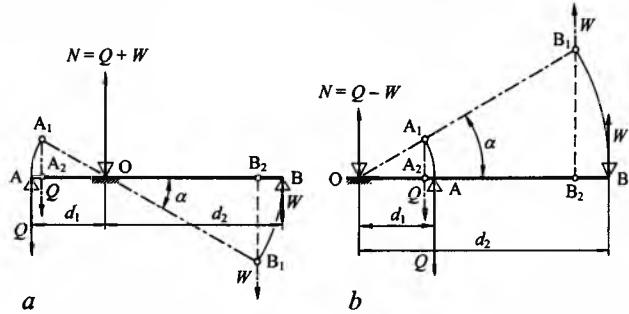
11) usporedbene, nadzorne, sortirne i klasirne vase koje služe za razvrstavanje pakovina, jaja i drugih proizvoda, a i u druge svrhe. Tako se npr. u izradbi pakovina njihova masa (težina) održava unutar propisanih granica, odnosno u proizvodni se proces vraćaju one pakovine što su prekoračile dopuštene masene granice, najčešće automatskim skretanjem. U automobilskoj se industriji sortirnim vagama prelagani vijci izlaze, a preteški vraćaju na skraćivanje;

12) kuhijske, osobne, dijetne i pismovne vase u kućnoj uporabi. Te vase ne podliježu državnom nadzoru. Najčešće se izrađuju kao polužne vase s pomičnim utegom, te nagibne i opružne vase. Pokazna je naprava u pravilu zakretni ili okretni brojčanik, odnosno bubanj i zakretna kazaljka, u novije doba i digitalni iskaz;

13) vase kojima se namjenski ne određuje masa. One služe za brojenje predmeta nazivno jednake mase, npr. kovanica (novca) i drugih kovinskih predmeta, za određivanje gustoće čvrstih tijela,

tekućina i plinova (hidrostatske vase), za izračunavanje udjela zemljanih primjesa na krumpiru, za određivanje prividne gustoće žitarica, finoće konca i alkoholnog udjela u vinima i žesticama, za izračunavanje obujma naftnog spremnika ili cijelog broda (tanke-ra) itd.

Polužni sustavi vase. Poluga prvoga reda zakreće se oko oslonca O smještenoga između njezinih krajeva A i B, a poluga drugoga reda oko oslonca O na jednome od njezinih krajeva (sl. 10). Sila teretnica $Q = mg_f$ djeluje na polugu u točki A, a ravnotežna protusila $W = wgf_w$ u točki B na drugom kraju poluge dugačke $d = d_1 + d_2$. Polužni krac OA = d_1 , zove se teretni krac poluge, a krac OB = d_2 ravnotežni krac. Osim sila Q i W na polugu djeluje u ležaju O oslopska reakcija $N = Q \pm W$. Predznak plus vrijedi za polugu prvoga reda, a predznak minus za polugu drugoga reda.



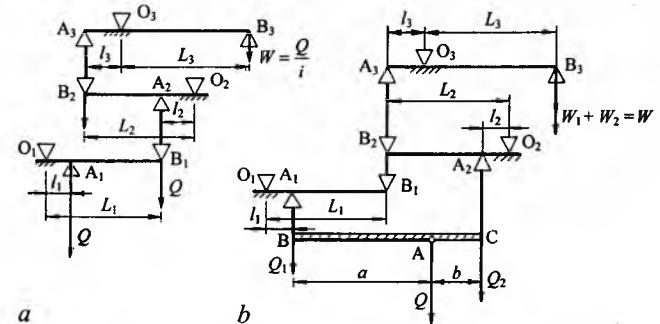
Sl. 10. Ravnoteža poluge AOB. a poluga prvoga reda, b poluga drugoga reda

Poluga je u ravnoteži kad je zbroj momenata sila jednak nuli i kad je zbroj sila jednak nuli. Za polugu prvoga reda u općem je slučaju (sl. 10a, označeno crtom i točkom) $M_Q = M_W$, odnosno $Qd_1 \cos \alpha = Wd_2 \cos \alpha$ ili $Q = W \cdot d_2 / d_1$ te $m = w \cdot d_2 / d_1$, ako su uzgonski faktori tereta mase m i ravnotežnih utega ukupne mase w međusobno jednakili ili ako su razlike među njima zanemarive. S označama na slici 10b iste se jednadžbe dobivaju za polugu drugoga reda.

Količnik (i) duljega i kraćega kraka vase zove se **polužni prijenos**. Udrži li se više poluga u sustav namijenjen uravnoteženju teretnice Q manjom silom $W = Q/i$, nastaje platformna (mosna) polužna vaga s prijenosom

$$i = i_1 \cdot i_2 \cdot i_3 \cdots i_n. \quad (29)$$

Polužni se sustavi u vagarstvu tvore prema konkretnim potrebama pa su zato kinematičke sheme vase vrlo raznovrsne. Oslanja li se polužni sustav prijamnika tereta na jednu ovjesnu točku, kaže se da ima jednu kinematičku granu. Oslanja li se na dvije ili više točaka, označuje se kao dvokinematički ili kao višekinematički sustav. Slika 11a prikazuje polužni sustav s jednom granom, a slika 11b s dvije grane. Svaki od sustava sastoji se od dviju



Sl. 11. Polužni sustavi vase s jednom kinematičkom granom (a) i s dvije kinematičke grane (b)

poluga drugoga reda i jedne poluge prvoga reda, ali je prvi sustav opterećen silom Q u jednoj točki A_1 poluge $O_1A_1B_1$, a u drugom sustavu ta ista sila Q djeluje na prizme A_1 i A_2 polugâ $O_1A_1B_1$ i $O_2A_2B_2$. Polužni je prijenos prvoga sustava

$$i = \frac{Q}{W} = \frac{L_1}{l_1} \cdot \frac{L_2}{l_2} \cdot \frac{L_3}{l_3}, \quad (30)$$

dok su prijenosi dviju kinematičkih grana drugoga sustava

$$i_1 = \frac{L_1}{l_1} \cdot \frac{L_3}{l_3} \text{ te } i_2 = \frac{L_2}{l_2} \cdot \frac{L_3}{l_3}. \quad (31)$$

Djeluje li teretnica Q u točki A platforme BAC (sl. 11 b), ona se razlaže na sile Q_1 i Q_2 što djeluju u točkama B i C. Silu Q_1 u točki A₁ poluge O₁A₁B₁ uravnovežuje sila W_1 u točki B₃ poluge A₃O₃B₃:

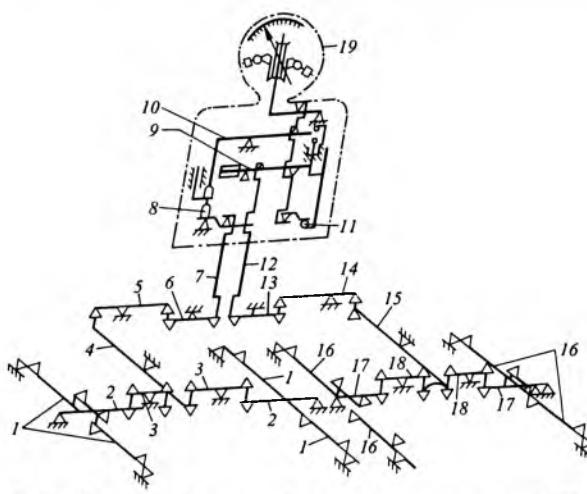
$$W_1 = \frac{Q_1}{i_1} = Q_1 \cdot \frac{l_1}{L_1} \cdot \frac{l_3}{L_3}. \quad (32)$$

U istoj točki B₃ silu Q_2 uravnovežuje sila

$$W_2 = \frac{Q_2}{i_2} = Q_2 \cdot \frac{l_2}{L_2} \cdot \frac{l_3}{L_3}. \quad (33)$$

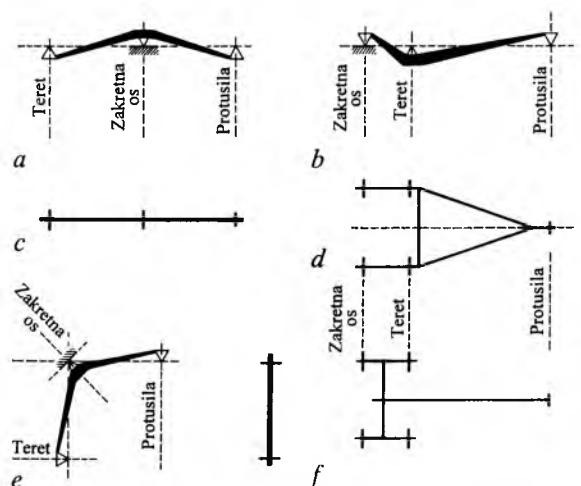
Polužni sustav na slici 11b ilustrira primjer kad u točki A djeluje teretnica $Q=2000\text{ N}$. Razmaci su $a=400\text{ mm}$, $b=100\text{ mm}$, krakovi su $l_1=50\text{ mm}$, $L_1=250\text{ mm}$, $l_2=75\text{ mm}$, $L_2=375\text{ mm}$, $l_3=60\text{ mm}$, $L_3=240\text{ mm}$. Treba izračunati polužni prijenos $i=Q/W$ i ravnotežnu силу W . Sila Q_1 iznosi: $Q_1=Q \cdot b/(a+b)=2000\text{ N} \cdot 100/500=400\text{ N}$, a sila $Q_2=Q-Q_1=1600\text{ N}$. Prvi je prijenos $i_1=(250/50) \cdot (240/60)=20$, a drugi $i_2=(375/75) \cdot (240/60)=20$. Prva je ravnotežna sila $W_1=Q_1/i_1=400/20=20\text{ N}$, a druga $W_2=Q_2/i_2=1600/20=80\text{ N}$. Ukupna je ravnotežna sila $W=W_1+W_2=100\text{ N}$, a prijenos (redukcija) sustava $Q/W=2000/100=20$. Da je konstruktor vage odabralo omjer $l_3/L_3=2$, bila bi to decimalna vaga s $i=Q/W=10$.

Najrazgranatiji polužni sustavi ugrađuju se u vagonske vase nosivosti do 200t s prijenosom do $i=1 \cdot 10^4$ (sl. 12). Obično imaju dvije platforme, veću duljinu $\sim 16\text{ m}$ i manju od $\sim 4\text{ m}$. Na većoj se važu četveroosovinski i šesteroosovinski vagoni, a osmeroosovinski na obje platforme zajedno. Mechanizam veće platforme tvore četiri glavne poluge 1 koje preko prijenosnih poluga 2 do 6 i preko uspravne motke 7, preklopke 8 i poluge 10 prenose reducirani teretnicu na pokazni uređaj 19. Četiri glavne poluge 16 osnovica su male platforme. S pomoću prijenosnih poluga 17, 18, 13 do 15 i uspravne motke 12, uključene u poluge 9 i 10, reducirana se teretnica prenosi na pokazni uređaj 19. Dovoljan je samo jedan mjerni uteg 11 mase w između 10 i 20kg, što uz $i=10000$ odgovara teretu 100t i 200t. Pritom je reducirana sila $\sim 100\text{ N}$.



Sl. 12. Kinematička shema vagonske dvoplatformne vase nosivosti 200t

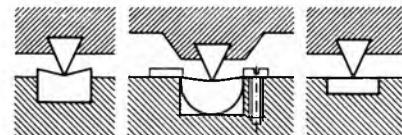
Raznovrsne se poluge i motke (sl. 13) međusobno povezuju zglobovima, osloncima, ovjesištimi i stremenima. Što se tiče kakvoće gradiva i preciznosti izradbe, najzahtjevниji su ležaji. Poluge se u pravilu opremaju ležajima s klinovima (noževima) i prizmama te udubljenim ili ravnim podložnim pločicama, a i samonamjestivim polukuglastim podlogama (sl. 14). Oba se dijela ležaja izrađuju ili od čelika ili od sintetskog korunda i tehničkoga ahata. Platforme velikih vase opremaju se čeličnim samonamjestivim i upravljanim ležajima u kojima umjesto



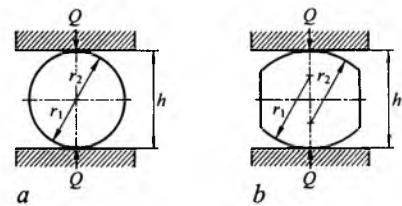
Sl. 13. Definicije i znakovi poluga u kinematičkim shemama polužnih vaga. a) dvokraka, b) jednokraka, c) zasebna, d) trokutna, e) kutna, f) zakretna poluga

prizme služe strojni dijelovi oblikovani prema kugli ($r_1=r_2$, $r_1+r_2>h$, $r_1+r_2<h$, sl. 15).

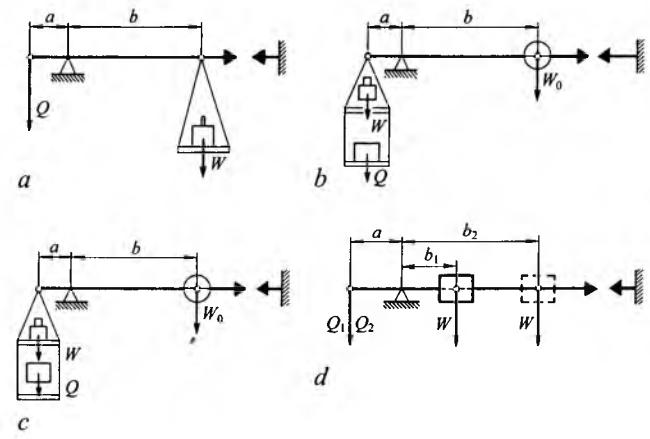
Sl. 14. Presjek triju izvedbi ležaja s prizmom kao gornjim dijelom oslončkoga ležaja



Sl. 15. Presjek samonamjestivog (a) i upravljačkog ležaja (b) velikih platformnih vase



Vage s pomičnim utegom. Njihovo je ishodište jednopolužna vaga sa stalnom duljinom krakova poluge (sl. 16a). Na utežni se pladanj mora dodatno staviti toliko utega ukupne mase w da moment njihove teretnice bW bude jednak momentu aQ tereta kojemu je masa m . Zato je pri jednakim uzgonskim faktorima $Q=W \cdot b/a$, odnosno $m=w \cdot b/a$. Vaga s nepomičnim protuutegom W_0 (sl. 16b, c) ne zahtijeva poznavanje omjera b/a jer teret i utezi u zastupno opterećuju isti krak pa je u istom ravnotežnom položaju $Q=W$, odnosno $m=w$.



Sl. 16. Prijelaz klasične polužne vase (a, b, c) na vase s pomičnim utegom (d)

Polužna se vaga od davnine izrađuje i tako da je dovoljan jedan jedini mjerni uteg mase w , ali se taj uteg mora *pomicati* uzduž duljega kraka poluge. Za teret Q_1 momentna jednadžba daje mjerni rezultat $Q_1=W \cdot b_1/a$, odnosno $m_1=w \cdot b_1/a$, a za veći teret $Q_2=W \cdot b_2/a$ (sl. 16d). Pritom je $a=\text{const.}$, tj. razmak između

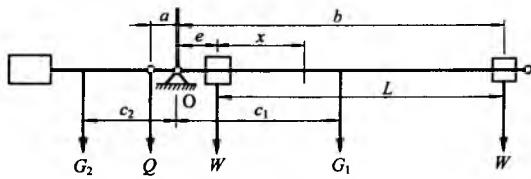
oslonca (ovjesišta) vase i hvatišta tereta Q je stalan. Uzmu li se u obzir vlastite mase vase (oba kraka, protuteg, prateći dijelovi), momentne su jednadžbe vase s pomičnim utegom (sl. 17):

$$\begin{aligned} c_2 G_2 &= eW + c_1 G_1, \\ c_2 G_2 + aQ &= (e+x)W + c_1 G_1. \end{aligned} \quad (34)$$

Prva se jednadžba odnosi na praznu vagu ($Q=0$), a druga na bilo koji teret Q između ništice i nosivosti vase (Q_0) pri odmaku pomičnog utega $x=x_0=b-e=L$ od ishodišnoga položaja prazne vase. Iz momentnih jednadžbi nastaje mjerna jednadžba:

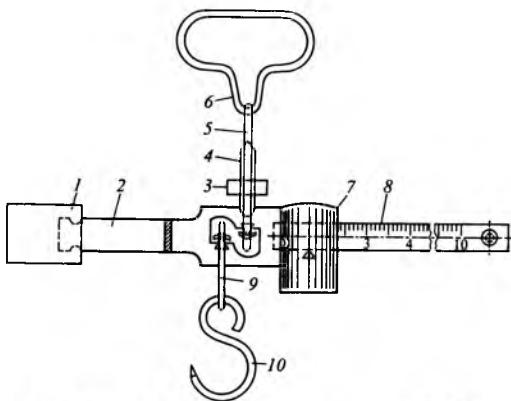
$$Q = W \cdot \frac{x}{a}, \quad m = w \cdot \frac{x}{a}, \quad (35)$$

iz koje slijedi da se pri poznatoj masi w pomičnog utega i pri stalnom kraku a masa m tereta Q doznaće odčitanjem odmaka x pomičnog utega. Pri $x=L$ vase postiže svoju nosivost $Q_0=W \cdot L/a$, odnosno $m_0=w \cdot L/a$. Bude li $a=20 \text{ mm}$, $L=400 \text{ mm}$ i m_0 (nosivost)=10 kg, trebat će pomični uteg mase $w=10 \text{ kg} \cdot 20/400=0,5 \text{ kg}$. Mjerna se jednadžba može iskazati i nosivošću m_0 , tj. u obliku $m=C \cdot x$, gdje je za svaku vagu s pomičnim utegom stalnica $C=m_0/L$. U našem je primjeru $C=25 \text{ g/mm}$.



Sl. 17. Shema polužne vase s pomičnim utegom

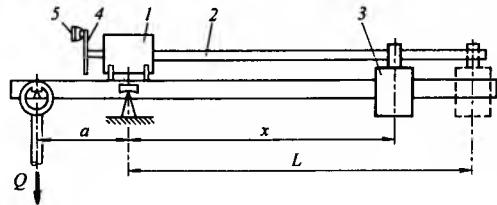
Ručnu vagu s pomičnim utegom opisao je Rimljani Vitruvije u \leftarrow I. st. Zato se ta vrsta vase zove *rimsko* vase, a u našim krajevima i *kantar*, što je turcizam arapskoga podrijetla koji znači (mjerna) sprava. Preteča je rimske vase polužna vase s pomičnim oslonskim ležajem (O na sl. 17) koju su u Kini upotrebljavali petnaest stoljeća prije Krista. Današnja vase s pomičnim utegom u pravilu je ručna vase nosivosti 10 ili 20 kg (sl. 18). Željezna ili mjeđena plosnata poluga 2 oslanja se prizmom na ležajnu pločicu u obujmici 5 ovješenoj o ručku 6 kojom se vase drži prilikom vješanja tereta i pomicanja utega 7 da bi se našao ravnotežni položaj. Teretna kuka 10 visi na stremenu 9 ovješenom o teretnu prizmu. U dulji je dio poluge urezana jednolična ljestvica 8 i brojevi koji iskazuju masu vaganoga tereta. Ravnotežni položaj pokazuje uspravna kazaljka 4 u obujmici 5. Njihanje poluge ograničava spona 3. Protuteg 1 nepomično je ugrađen u kraču stranu poluge 2.



Sl. 18. Današnja rimska vase (kantar) nosivosti 10 ili 20 kg

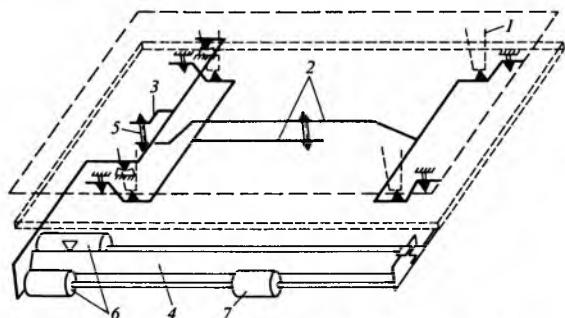
U teškoj se industriji upotrebljava *automatizirana* rimska vase (sl. 19). Servomotor 1 pomiciće s pomoću preciznog vretena 2 uteg 3, a kodirna ploča 4 označuje za koliki se je kut φ zakrenulo vretno. Dekoder 5 proizvodi analogni ili digitalni signal koji u elektronički obračunski sustav dojavljuje položaj $x=k\varphi$ pomičnog utega te za uravnoveženi položaj vase izračunava masu tereta

$m=w k \varphi / a$. Slovo k u jednadžbama označuje stalnicu pretvornika.



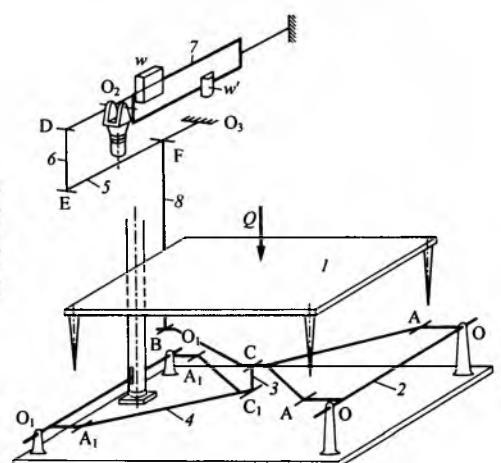
Sl. 19. Automatizirana uporaba polužne vase s pomičnim utegom u teškoj industriji

Već su stari Kinezi imali vase s dvije ili tri ovjesne prizme različito udaljene od oslopske prizme O (sl. 17). Njima su pripadale različite pokazne ljestvice na polugi. U naše se pak doba proizvode *kuhinjske vase* s nekoliko pomičnih (kliznih) utega (sl. 20). Uteg 7, tzv. tara, pomiciće se pri uravnoveženju prazne vase. Pošto se na pladanju stavlja vagana tvar, ravnoteža se najprije uspostavlja velikim pomičnim utegom 6, a potom manjim utegom. U kulinjske vase nosivosti 10 kg veliki se uteg može uglaviti na vodilici u koracima po pola kilograma, dok je druga vodilica, s manjim pomičnim utegom, označena u koracima po pet grama, tj. 5 g je vrijednost podjeljka. Četiri potpornja 1 prenose silu teretnicu s pladnjem na dvije poluge 2. Poluga pomičnih utega 3, na koju se nastavlja klizni uredaj 4, spojena je stremenom 5 s jednom od dviju poluga 2.

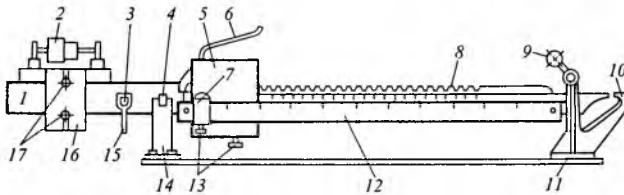


Sl. 20. Kinematička shema kulinjske vase s tri klizna utega

Prijenosne polužne platformne vase namijenjene su vagonu čvrstih predmeta i pakovina. Normirane su im nosivosti između 100 kg i 3 t. Sastoje se od raznovrsnih polužnih sustava, a rezultat vaganja iskazuju ili pokaznom mjerom polugom ili kružnom pokaznom ljestvicom ili zorno uporabljениm utezima. Kinematička shema na slici 21 prikazuje vase s *pokaznom mjerom polugom*, i to za nosivosti 200 kg, 500 kg i 1000 kg. Polužni sustav, na koji se oslanja platforma 1 za prijam tereta Q , sastoji se od poluge 2 i 4 međusobno povezanih spojnicom 3, prijenosne poluge 5 i mjerne poluge po kojoj mjeritelj može pomicati veći uteg w ili manji uteg w' . Veću polugu 2 povezuje s prijenosnom polugom 5 motka 8. Spojnica 6 povezuje mjeru polugu s prijenosnom.

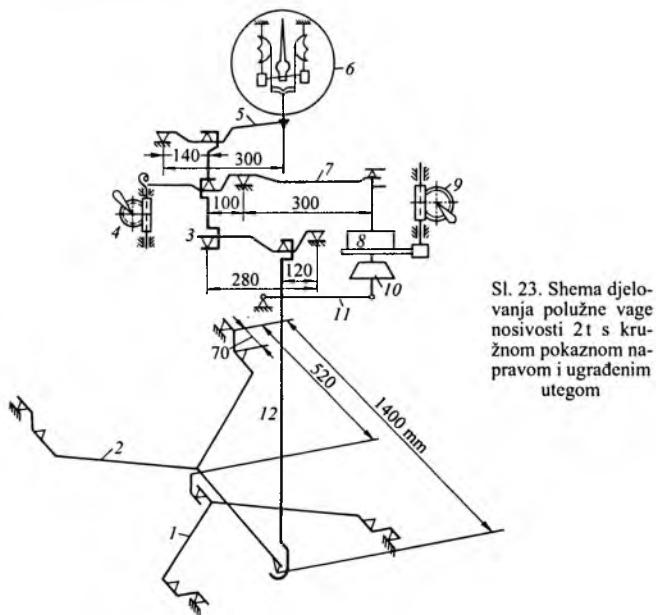


Stvarne okolnosti (sl. 21) za vagu nosivosti 500 kg pokazuju ovi podatci: duljine krakova $OA = O_1A_1 = 85$ mm, $OC = OC_1 = 395$ mm, $OB = 850$ mm, $O_3F = 53$ mm, $O_3E = 265$ mm, $O_2D = 48$ mm ($=a$ na sl. 17), duljina glavne mjerne ljestvice $L = 240$ mm, duljina dopunske ljestvice 384 mm pri njezinoj pokaznoj vrijednosti 20 kg. Polužni su prijenosi $i_1 = i_2 = 850/85 = (395/85) \cdot (850/395) = 10$, a prijenos je cijelokupnoga sustava $i = i_1 \cdot 265/53 = 50$. Pomični se utezi određuju jednadžbom (35), ali uzimajući u obzir polužni prijenos i , tj. jednadžbom $w = m \cdot (a/L)/i$. Tako se za veći pomični uteg izračunava $w = 500 \text{ kg} \cdot (48/240)/50 = 2 \text{ kg}$, a za manji $w' = 20 \text{ kg} \cdot (48/384)/50 = 50 \text{ g}$. Da nema poluge 5, prijenos bi sustava bio $i = 10$, pa bi pomični utezi morali imati pet puta veću masu.



Sl. 22. Mjerna poluga prijenosne automobilske vage nosivosti 15t

Pokaznu mjeru polugu prijenosne automobilske vase nosivosti 15t prikazuje slika 22. U željeznu su polugu 1 utisnute oslonska prizma 4 i teretna prizma 3. Oslonska prizma leži na podložnim pločicama u staku 14, a o teretu je prizmu ovješena spojnica 15 koja mjeru polugu povezuje s polužnim sustavom. Na desnoj je strani poluge urezana temeljna ljestvica u koracima po 500 kg od ništice do 15 t. Uzduž poluge mjeritelj ručkom 6 pomiče veći klizni uteg 5. Na polugu je pričvršćena letva 12 s dopunskom ljestvicom u koracima po 5 kg od ništice do 500 kg. Uzduž te mjerne letve mjeritelj premješta manji pomični uteg 7. Na lijevom se dijeli mjerne poluge može pomicati uteg 16 za grubo namještanje ravnotežnog položaja prazne vase (tara). Dva utega 2 služe za fino ugađanje. Vijcima 17 osigurava se potreban položaj utega 16. Desni kraj mjerne poluge prolazi kroz okvir 11 s kočnicom 9 i pokaznikom ravnoteže 10. Za vrijeme prijenosa i prijevoza vase vijcima se 13 učvršćuju pomični utezi 5 i 7. Ljestvične mjerne poluge polužnih vase međusobno se razlikuju samo u nazivnoj pokaznoj vrijednosti, izmjerama i pokojoj nebitnoj konstrukcijskoj pojedinosti.

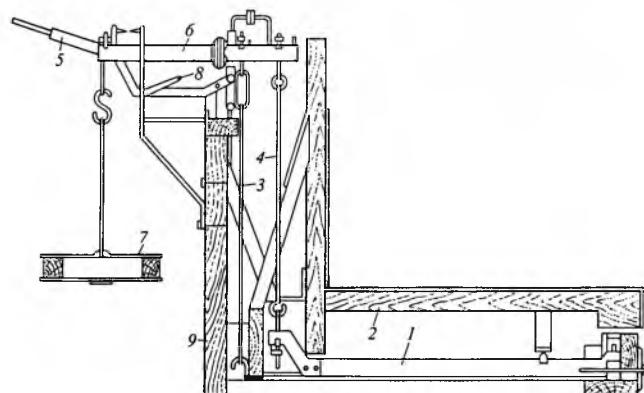


Sl. 23. Shema djelovanja polužne vase nosivosti 2t s kružnom pokaznom napravom i ugrađenim utegom

Prijenosnu polužnu vase nosivosti 2t s kružnom pokaznom napravom 6 i ugrađenim utegom 8 prikazuje slika 23. Polužni su sustav sastoji od dviju poluga, manje 1 i veće 2. Motka 12 povezuje polugu 1 s međupolužjem koje se sastoji od poluga 3, 5 i 7. Poluge 3 i 5 služe za prijenos reducirane teretnice na pokaznu

napravu 6, a poluga 7 preuzima na sebe pladanj 10 na koji se stavlja uteg 8 s pomoću mehanizma 9. Strunom 11 pladanj se održava u uspravnom položaju prilikom njihanja poluge 7, a kočnicom 4 vaga se zakoči ili otkoči. Budući da je ugrađen samo jedan uteg 8, mjereno se područje mehanizmom 9 dijeli u dva raspona: od 0 do 1000 kg i od 1000 kg do 2000 kg. Zato naprava 6 ima ljestvicu s 1000 podjeljaka po 1 kg. To je stotinska vaga jer je njezin polužni prijenos $i = (1400/70) \cdot (280/120) \cdot 300/140 = 100$. Stoga je naprava 6 pri punom teretu opterećena silom $\sim 100 \text{ N}$, tj. kao da je opterećuje predmet mase 10 kg. Promjer je kružne ljestvice 400 ili 500 mm. Pokazna se naprava može opremiti pretvornicima koji mjerne podatke prenose računalnom sustavu, tiskaljkama, magnetnom pamtilu itd.

Prijenosna polužna vaga sa zorno uporabljenim utezima puno je pridonijela početkom XX. st. preporodu hrvatske poljoprivrede i seljačkog zadrugarstva. To je desetinska (decimalna) vaga, tj. polužna vaga s prijenosom $i = 10$ (sl. 24). Uteg mase w na mjerenoj strani vase predstavlja deseterostruku vrijednost vaganoga tereta na platformi, $m = 10 \cdot w$. Vagu je 1822. prijavio patentnom uredu u Strasbourgu benediktinac A. Quintenz. Njegova strasbourgška vaga uskoro je osvojila čitav svijet.



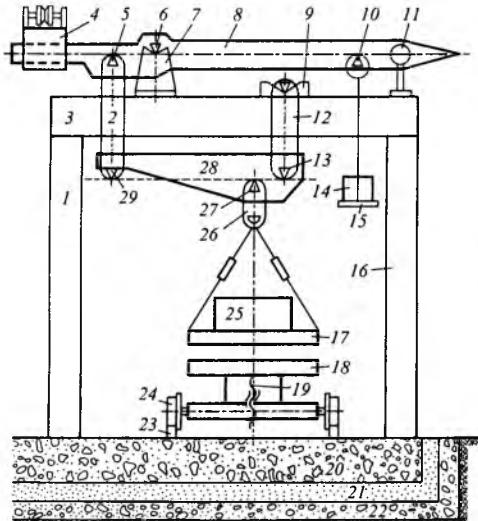
Sl. 24. Desetinska (decimalna) vaga

Desetinska vaga ima polugu 1 drugoga reda na koju se preko prizama oslanja platforma 2. Motkom 4 poluga 1 je spojena s mjerom polugom 6. Prednji kraj platforme 2 priključuje motku 3 na polugu 6. Oslonska prizma mjerne poluge pritiše ležajnu pločicu učvršćenu na stupu 9. Mjerni se utezi stavljaju na nosač 7 ovješen o lijevi kraj poluge 6 preko treće prizme. Njihanje poluge prekida se kočnicom 8. Trošenje prizama ublažuje se uporabom odvojnika 5.

Nepokretna masena mjerilišta. Uporabne okolnosti ili posebne tehničke značajke određuju da se neke vrste vase stalno upotrebljavaju na istome mjestu. Takve su nepokretne vase smještene na posebno izgrađene temelje ili su pričvršćene na zidove i grede, odnosno ugrađene u industrijske proizvodne procese. Najčešće su to mosne i vagonetne vase nosivosti 1, 2, 3, 5 i 6t za vaganje tereta koji se prevoze ručnim kolicima, viličarima i drugim prometalima. Njihova je platforma u razini poda, a poluži s ležajima i silomjerima u betonskim jamama i kanalima. Vagonetne vase imaju u platformu ugrađene tračnice. Za vaganje kamiona i teglača izrađuju se mosne vase nosivosti 10–50t, a u željezničkoj mreži vagonske mosne vase nosivosti do 200t (sl. 12).

Nadzorne vase u ispitivalištima te osobito točne i specijalne vase u mjeriteljskim institutima također su nepokretne. Stotinsku nadzornu vase nosivosti 2000 kg za umjeravanje velikih utega prikazuje slika 25. To se mjerilište sastoji od polužja s prijenosom $i = 100$, kućišta, kolica, temelja i 100 utega, svaki s nazivnom masom 20 kg. Mechanizam vase sastoji se od poluge drugoga reda 28 s prizmama 13, 27 i 29 te od mjerne poluge 8 s prizmama 5, 6 i 10. Proluga se s pomoću spojnica 12 oslanja na ležajnu pločicu 9 pričvršćenu na vodoravnu gredu 3 kućišta vase. O prizmu 27 ovješena je spojnicom 26 platforma 17 na koju se stavlja teret 25. Jednom je to ispitivani uteg, a drugi put mjereni utezi. Spojnicom 2 poluga je 28 priključena na mjeru polugu 8 koja se prizmom 6 oslanja na stalak 7 učvršćen u kućište. O prizmu 10 ovješen je nosač 15 protutega 14. Na lijevoj se strani mjerne poluge nalazi

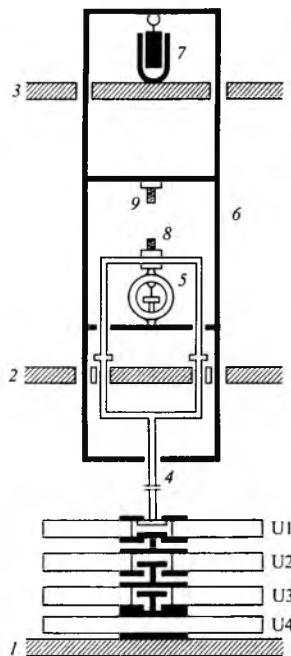
regulator ravnotežnog položaja 4, a na desnoj strani mikrolještivca 11 optičkoga pokaznog uređaja. Kočnica mjernog prstena nije nacrtana.



Sl. 25. Nepokretna nadzorna vaga nosivosti 2000 kg za umjeravanje utega na jednom kraku

Kućište je zavarena željezna konstrukcija koja se sastoji od grede 3 i dvaju stupova (1, 16) ubetoniranih u temelj koji se radi zaštite od vibracija sastoje od betonske ploče 20 položene na sloj pijeska 21 u betonskom koritu 22. Utezi se dovoze kolicima s kotačima 24 na tračnicama 23, hidrauličnom dizalicom i manipulativnom platformom 18. Zbog $i=100$ masa je protuteg 14 stotinu puta manja od mase mjernih utega.

Najveće su vase na svijetu one kojima se umjeravaju elastični čelični *mjerni prstenovi*, ključni dio opružnih vase nosivosti do nekih 500 t. S pomoću golemih utega gravitacijski se proizvodi teretica $Q = mg(1 - \rho_a/\rho)$ što rasteže ili tlaci mjerni prsten kojemu se pritom neutralna crta elastično preobličuje od kružnice u eliptičnu krivulju. Elastične promjene izmjeru x prstena mijere se mehanički ili električki i tako doznaje ovisnost $x=f(Q)$, odnosno $x=f(m, g, \rho_a, \rho)$, tj. ovisnost o masi utega, težnom ubrzaju, gustoći zraka i gustoći utega. Tako umjereni prsten zatim se na drugome mjestu upotrebljava kao *silomjer* $Q=f(x)$, odnosno kao vaga s funkcijom $m=f(x, g, \rho_a, \rho)$.

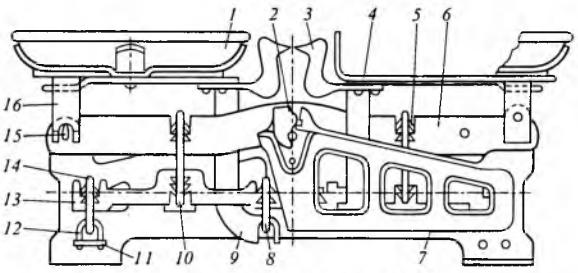


Sl. 26. Shema trideset metara visoke vase za umjeravanje vrhunskih elastičnih mjernih prstenva i drugih silomjera

Na najnižoj etaži 1 zgrade ti se veliki utezi u obliku diskova naslažu jedan povrh drugoga i na poseban način međusobno zakvače. Na najviši uteg U1 zakvačen je čelični okvir 4 koji se preko umjeravanoga elastičnog mjernog prstena 5 oslanja na veći čelični okvir 6. Umjeravanje prstena 5 počinje tako da hidraulična dizalica 7 na etaži 3 podiže okvir 6, a zajedno s njime i uteg U1; ostali utezi dalje naliježu na najnižu etažu zgrade. Zatim se dizalica zaustavi, pri čemu je prsten tlačno napregnut teretnicom $Q(U1)$ prvog utega, i odčita promjena $x(U1)$ na prstenu. Zatim se ponovno pokrene dizalica 7, koja nakon stanovitoga mrvog hoda zahvati i uteg U2, izmjjeri se pripadna deformacija prstena, ponovno pokrene dizalica itd. Na takav se način mjerni prsten postupno može napregnuti silom koja je jednaka zbroju teretnica svih utega, okvira 4 i spojnog pribora. Iz dobivenih se parova vrijednosti dobiva umjerna krivulja $x=f(Q)$ pri tlačenju prstena. Odgovarajuća se ovisnost pri rastezanju prstena mjeri tako da se posebnom maticom spoje vijci 8 i 9 pa onda okvir 4 visi na okviru 6. Uz opisano postrojenje u NIST postoje još dva manja: jedno ima utega ukupne mase ~ 150 t (visina 19 m), a drugo ~ 55 t (17 m). Promjer najvećih utega iznosi ~ 3 m, a najmanjih ~ 1 m.

Utežne stolne vase obilježile su razdoblje 1850–1960. pošto je J. Béranger, konstruktor vase iz Lyona, 1849. u Engleskoj patentirao simetričnu jednokraku stolnu polužnu vagu kojom se lako barata jer posluživanju ne smetaju dotad uobičajene uzice na kojima su visjele zdjelice za teret i utege. Osim toga Béranger je vaganje učinio brzim i točnjim time što je praktično ostvario zamisao koju je 1669. godine u Parizu iznio G. P. Roberval. Prema njegovoj ideji paralelogramskog polužja postaje svejedno na koje se mjesto pladnja stavљa uteg. Početkom XIX. st. tu je zamisao potvrdio matematičar L. Poinsot utvrđivši da odmak utega od sredine prijamnika tereta doduše stvara bočni pritisak na oslonac, ali ne mijenja uspravnu silu. Sve donedavno Bérangerove su se stolne vase masovno proizvodile s nosivostima 2, 5, 10 i 20 kg u gotovo izvornom obliku. Pritom su se uobičajile dvije izvedbe: otvorena i zatvorena.

Mehanizam otvorene izvedbe utežne stolne vase (sl. 27) sastoji se od glavne poluge 6, dviju poluga 13, pladnjeva 1 i 4 te kućišta 7. Na glavnoj poluzi ima pet prizama: srednja prizma 2 je oslopska, dvije krajnje prizme 15 pripadaju prijamnicima tereta, a dvije manje 5 su spojne. Poluge 13 povezane su s glavnom polugom spojnicama 10, a s kućištem spojnicama 14. Potonu su stremeni 11 pričvršćene o stranicu 11 kućišta. Svaki od prijamnika tereta oslanja se na prizme 15 glavne poluge prtegjem 16, a na spojnicu 8 poluge 13 nogama 9. Ravnotežu pokazuju kazaljke 3.



Sl. 27. Utežna stolna vaga s otvorenim mehanizmom

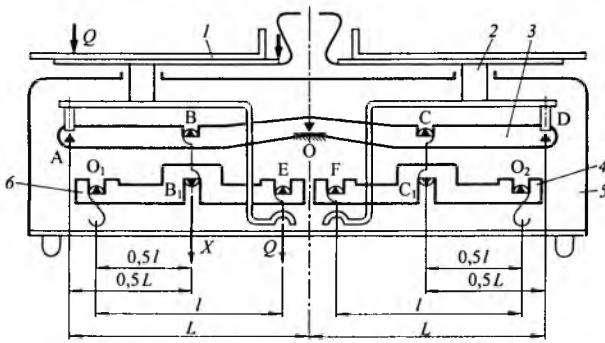
Zatvorena izvedba stolne vase (sl. 28) razlikuje se od otvorene u tome što prijamnici tereta 2 imaju komore za tariranje i što je cijelokupni mehanizam zatvoren u oklop 5 koji ga štiti od onečišćenja. Iz kinematike zatvorene izvedbe očevidno je da ravnoteža Bérangerove vase ne ovisi o položaju tereta i utega na pladnju. Pet prizama na poluzi 3 označeno je slovima A, B, O, C, D, a šest prizama dviju poluga 6 i 4 slovima O₁, B₁, E, F, C₁, O₂. Bérangerovo pravilo određuje da je

$$i = \frac{d_{OA}}{d_{OB}} = \frac{d_{OD}}{d_{OC}} = \frac{d_{O,E}}{d_{O,B_1}} = \frac{d_{O,F}}{d_{O,C_1}}, \quad (36)$$

gdje je d udaljenost između pojedinih prizama. Stavi li se teret Q povrh prizme A, na polugu će 3 djelovati moment $M_1 = Q d_{OA}$. Premjesti li se taj isti teret posve desno povrh prizme E, na polugu će 6 djelovati moment $M_2 = Q d_{O,E}$, koji je jednak momentu

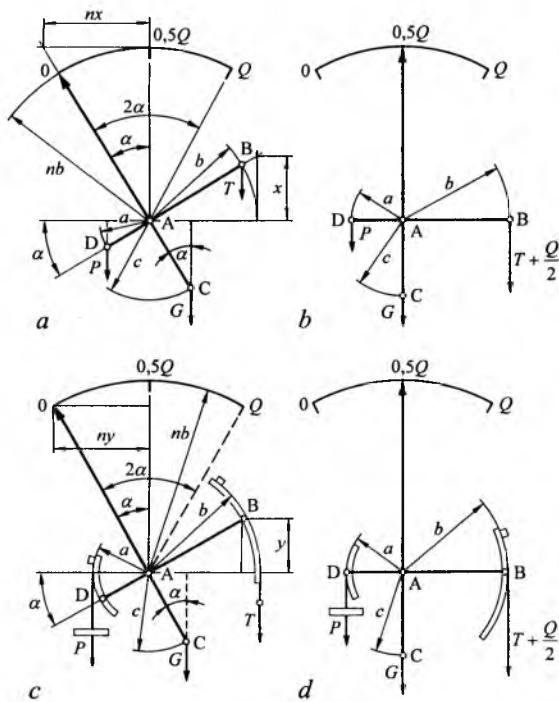
Vaga za umjeravanje mjernih prstenva u američkom državnom mjerilištu National Institute of Standards and Technology (NIST) golemo je mjerne postrojenje visoko tridesetak metara i opremljeno s dvadesetak čeličnih utega, svaki mase ~ 25 t (sl. 26).

$M_3 = X d_{OB_i}$. Iz jednakosti $M_2 = M_3 = M_4$ slijedi $X = Q d_{OE} / d_{OB_i}$. Silu X prenosi stremen BB_1 na polugu 3 pa se stvara moment $M_4 = X d_{OB} = Q d_{OB} d_{OE} / d_{OB_i}$. Provjera jednakosti $M_4 = M_1$ pokazuje da je $d_{OA} / d_{OB} = d_{OE} / d_{OB_i}$, tj. dokazano je Bérangerovo pravilo. U normiranih je vaga $i=2$, npr. kada je $L=150$ mm, a $l=120$ mm.



Sl. 28. Utežna stolna vaga sa zatvorenim mehanizmom

Nagibne vase s kružnom ljestvicom. Njihovu je uporabu 1747. u Leipzigu potaknuo H. Kühn proizveo jednokraku polužnu vagu s velikim dvostranim nagibnim područjem i kazaljkom povrh kružne ljestvice. U našoj je doba nagibna vaga razvijena u mnogo vrsta različitih nosivosti, a upotrebljava se u trgovini i praktički u svim industrijskim granama, napose kao pokazna naprava stotinskih polužnih vase (19 na sl. 12, 6 na sl. 23). Iz povijesnih se razloga neke izvedbe te vase zovu kvadrantne vase, npr. poštanske i tekstilne, a ovjesna poluga kvadrantom.



Sl. 29. Načelo djelovanja nagibne vase s ravnom polugom (a, b) i nagibne vase s celičnim ovjesnim vrpčama (c, d)

Načelo djelovanja nagibne vase s ravnim polugom tumači slika 29, na kojoj su tereti i utezi predočeni teretnicama. Točka A označuje brid oslopske prizme poluge BD vase nosivosti Q . Okomito na polugu učvršćena je kazaljka 0C. Teretna prizma u točki B preuzima teretnicu T neopterećenog prijamnika i vaganog tereta. Teretica protutreta G uravnotežuje nosivost Q , a teretica protutreta P prazni prijamnik, to je tzv. tara. Točka C predstavlja hvatište sile G , a točka D hvatište sile P (sl. 29a, b). Nagibna se vaga obično konstruira tako da poluga bude vodoravna kad kazaljka A0 pokazuje pola nosivosti, tj. pola mjerograđana raspona ($Q/2$). Kad vaga nije opterećena (sl. 29a), sustav

poluga-kazaljka miruje u ravnotežnom položaju obilježenu momentnom jednadžbom $aP \cos \alpha - cG \sin \alpha - bT \cos \alpha = 0$. Stavi li se na prijamnik teret $Q/2$, poluga i kazaljka zakrenut će se udesno za kut α i smiriti u takvom položaju da će krakovi a i b zauzimati vodoravan položaj, a krak c uspravan (sl. 29b). Pripadna je momentna jednadžba $aP - bT - bQ/2 = 0$. Iz dviju jednadžbi slijedi

$$\frac{Q}{2} = G \frac{c}{b} \tan \alpha = G \frac{c}{b} \cdot \frac{x}{b}. \quad (37)$$

S pomoću $\tan \alpha$, odnosno omjera x/b , kružna se ljestvica polujmera nb razdjeli na podjeljke; n je slobodno odabran višekratnik. Ljestvica je simetrična s obzirom na $Q/2$, ali nije jednolična: prema lijevom i prema desnom kraju ljestvica se zgušćuje, tj. širina je podjeljaka najveća u sredini. Tako se unutar kuta od 15° razlika podjeljaka promjeni za 5%. To je jedan od razloga zašto ljestvica obično ne premašuje $2\alpha = 50^\circ$.

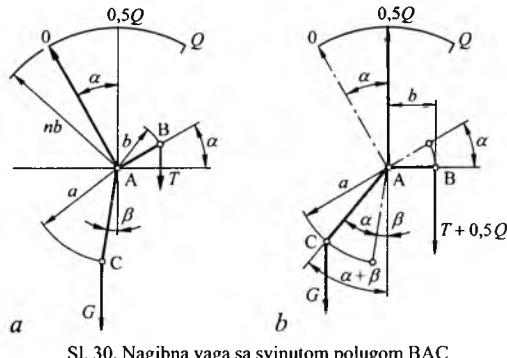
Nejednoličnost ljestvice može se smanjiti do 2% na 15° konstrukcijom prema slici 29c, d. Valjkasti segment polujmera b zamjenio je prizmu B, a umjesto zglobova D ugrađen je valjkasti segment polujmera a . Teret P i $T + T$ -vagani teret sada su ovješeni o tanku celičnu vrpcu položenu na luk segmenta i učvršćenu na njihovu gornjem dijelu. Za praznu je vagu momentna jednadžba $aP - cG \sin \alpha - bT = 0$, a za $Q/2$ (sl. 29d) $aP - bT - bQ/2 = 0$. Kružna se ljestvica, zapravo njezin isječak unutar kuta 2α na kružnici polujmera nb , crta s pomoću mjerne jednadžbe

$$\frac{Q}{2} = G \frac{c}{b} \sin \alpha = G \frac{c}{b} \cdot \frac{y}{b}. \quad (38)$$

Opisana dva rješenja uglavnom se rabe za vase u transportnim vrpčama. Kao stolne, poštanske i još neke vase služe polužne vase bez protutrega P , ali opremljene svinutom polugom BAC (sl. 30a) da bi se pri neopterećenoj vazi svi njezini dijelovi nalazili u postojanoj ravnoteži. Za praznu je vagu $aG \sin \beta - bT \cos \alpha = 0$, a za polovični je teret $aG \sin(\alpha + \beta) - bT - bQ/2 = 0$ (sl. 30b). Iz tih jednadžbi slijedi rješenje

$$Q = G \frac{2a}{b} [\sin(\alpha + \beta) - \sin \beta / \cos \alpha] \quad (39)$$

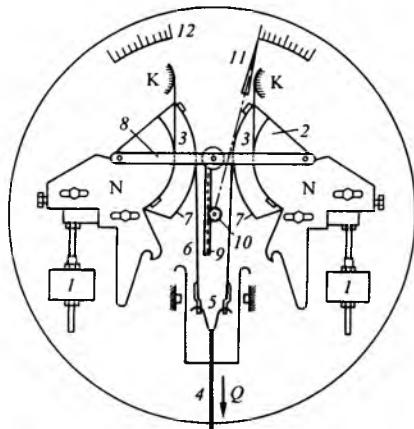
koje omogućuje izradbu kružne pokazne ljestvice i konstrukciju protutrega.



Sl. 30. Nagibna vaga sa svinutom polugom BAC

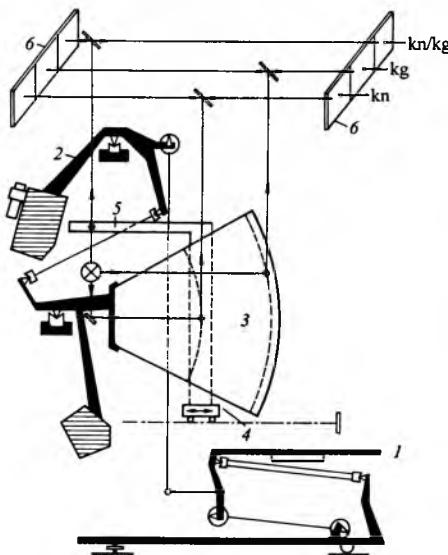
Jednolična i puna kružna pokazna ljestvica, po potrebi i višestruka, ostvaruje se s pomoću ekscentričnih segmenta ugrađenih u dvojni njihajni sustav. Dva nagibna protutrega 1 kruto su učvršćena na pripadnim nasuprotnim njihalima N (sl. 31). Preko segmenta 2 njihala su ovješena o celične vrpe 3 pričvršćene na kućište K. Vaganica teretica Q nateže preko motke 4 i stremena 5 celičnu vrpcu 6 učvršćenu na vrhu segmenta 7. Povećavanjem teretrice Q utezi se otklanaju od uspravnice, poprečna se letva 8 spušta, a zupčanica 9 preko zupčanika 10 zakreće kazaljku 11 koja svojim vrhom pokazuje masu vaganoga tereta. Motka se može priključiti na polužni sustav skoro svih platformnih vase.

U trgovackim se stolnim vagama nosivosti do 20 kg (sl. 32) obično ne rabi dvojni sustav poput onoga na slici 31, nego jednostuki, ali opremljen tiskaljkom (izdavanje računa s podatcima o cijeni, masi, plaćenoj svoti, datumu itd.), informacijskim prozor-



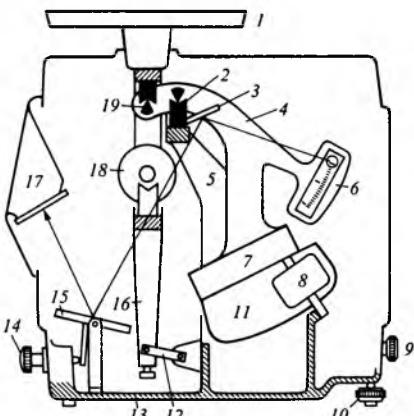
Sl. 31. Dvojni njihajni sustav mjereno-pokaznog uredaja koji djeluje po načelu nagibne vase s čeličnim vrpčama

čicima za kupca i prodavača te čitačima povezanim sa središnjim obračunskim sustavom.



Sl. 32. Shema trgovske stolne nagibne vase s optičkom projekcijom mase, cijene i plaćene svote.
1 prijamnik tereta, 2 poluga vase, 3 dijapozitiv izmjerene mase i plaćene svote, 4 namještanje cijene, 5 ljestvica s cijenom, 6 prozorčić

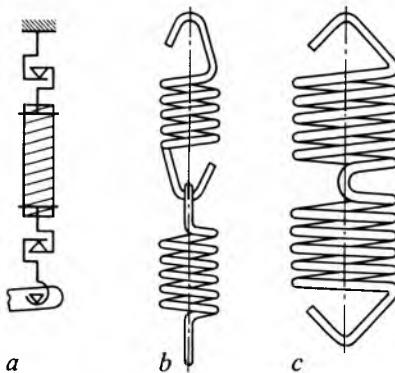
Vrlo je široka uporaba jednopladanjskih nagibnih vaga sa svinutom polugom u tehničkim analizama (sl. 33). Pladanj 1 za prijam tereta leži na motki 16 ovješenoj o prizmu 19 svinute poluge 4 koja se oslanja na ležajnu pločicu 2 ugrađenu u kućište vase, tj. u stalak 5. Pri donjem je kraju motke 16 spojka 12 koja je održava uspravnom. Na srednjem se dijelu motke nalazi sprava u koju se ugrađuje jedan ili više utega 18. Pri teretu do polovice nosivosti uteg 18 leži na motki 16, a pri većem se teretu skida s nje (na crtežu nije prikazan manipulativni mehanizam). Na polugu 4 učvršćeni su uteg 7 i 8 (njime se namješta težiste poluge) te aluminijска pločica 11 magnetnoga prigušnika njihanja. Otkloniški kut poluge 4, nastao djelovanjem vaganoga tereta, opaža se na mikroljestvici 6 učvršćenoj na poluzi. Kroz tu ljestvicu prolazi iz žarulje svjetlosni snop. Prolazeći kroz zrcalne sustave 3 i



Sl. 33. Tehnička nagibna vaga

15 svjetlosni snop prenosi ljestvice na zaslon 17. Ništica prazne vase namješta se zakretanjem zrcala 15 s pomoću dugmeta 14. Za vrijeme prijenosa ili prijevoza vase mehanizam se ukoči kočnicom kojom se djeluje s pomoću dugmeta 9. Mehanizam i prateći dijelovi oklopjeni su kućištem 13. Vijcima 10 vase se dovodi u ravnotežni položaj. U neke se od takvih vase ugrađuje i naprava za uravnoteživanje tare.

Opružne vase mjeru silu pa se zato zovu i *silomjeri*. Na mjestu poznata težnog ubrzanja g mogu se umjeriti tako da temeljem izmjerene teretnice $Q = mg(1 - \rho_s/\rho)$ iskazuju masu m vaganoga tijela. U jednadžbi je ρ gustoča vaganoga tijela, a ρ_s gustoča fluida u kojemu se važe (najčešće je to zrak, a ponekad voda ili ulje). Ključna je sastavnica opružne vase *mjerne opruga*, tj. prikladno oblikovano elastično tijelo koje se nakon prestanka djelovanja sile vraća u prvobitni položaj. Mjerne se opruge najčešće izrađuju od plemenitih čelika obrađenih posebnim toploinskim postupcima. Oblikovane su kao valjkaste opruge na rastezanje (sl. 34), tanjuraste na tlačenje, prstenaste na rastezanje i tlačenje (sl. 26, sl. 35), plosnate spiralne te žičane uvijene. Stalnosti pokazivanja opružnih vase pridonosi valjano oblikovanje opruge umetanjem jezgre (sl. 34 a), nastavljanjem desnovojne opruge ljevovojnom (sl. 34 b), uporabom jedne opruge izradene jednim dijelom desnovojno, a drugim ljevovojno (sl. 34 c).

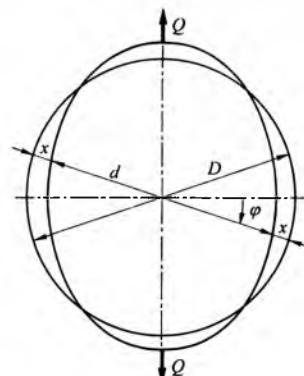


Sl. 34. Tri izvedbe valjkaste mjerne opruge izrađene od toploinski obradene i normalizirane okrugle čelične žice

Vrhunska se merna točnost postiže mernom oprugom u obliku čeličnog prstena, osobito zato jer je u elastičnom području merna jednadžba vrlo jednostavna i lako provjerljiva na histeretu. Rastezanjem se merni prsten (sl. 26) produlji u smjeru sile Q i stisne u poprečnom smjeru. Mjeranjem se pri pojedinim kutovima φ doznaju izobličeni promjeri d , odnosno skraćenja $2x=D-d$ (sl. 35). Budući da teorija daje mernu jednadžbu

$$2x = Q \frac{d^3}{16EI} \left(\frac{4}{\pi} - \varphi \cdot \sin \varphi - \cos \varphi \right), \quad (40)$$

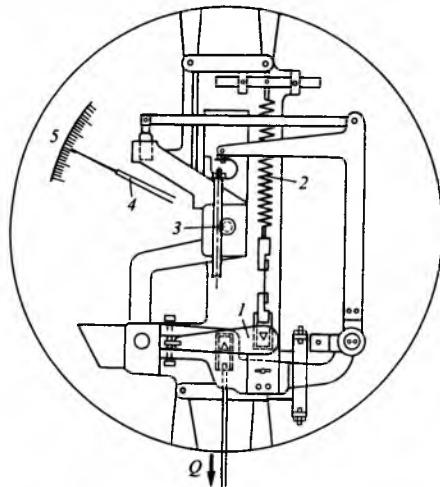
gdje je E modul elastičnosti, a I moment presjeka prstena, ona pri uporabi mernog prstena u opružnoj vazi služi kao izvor poznavanja sile Q . Karakteristične su mjerne točke pri $\varphi=0$ i $\varphi=\pi/2$.



Sl. 35. Izobličenje mernog prstena (sa sl. 26) pri mjerjenju i umjeravanju

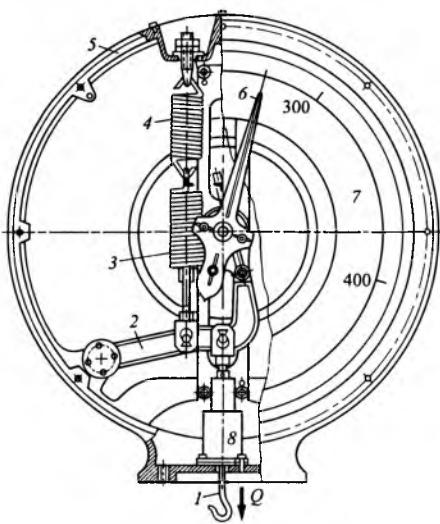
Razvoj željeznih slitina sa znatnim udjelima nikla, kroma, mangana, molibdena, titana i berilija omogućio je izradbu tako

dobrih mjernih opruga da se opružne vage ravnopravno nose s polužinama, a u nekim su industrijskim granama nezamjenljive. U naše se doba opružne vage rabe u širokom rasponu od posve sitnih laboratorijskih vaga nosivosti 5 miligrama pa sve do tvorničkih kranskih vaga nosivosti nekoliko desetaka tona, što čini raspon 1 prema 10 milijardi! Suvremena industrijska opružna vaga (sl. 36) sadrži mnogobrojno iskustvo polužnog vagarstva.



Sl. 36. Tipični mjeri uredaj industrijske opružne vage.
1 poluga za ugadanje mjerne opruge, 2 merna opruga,
3 zupčanica za okretanje zupčanika s kazaljkom, 4 ka-
zaljka, 5 pokazna ljestvica

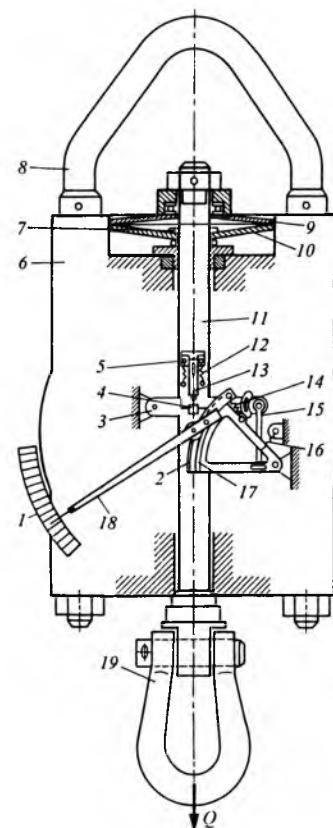
Na tehnološkoj opružnoj vagi (sl. 37) nosivosti 1 t i mjerne nesigurnosti $\sim 1\%$ djeluje teretnica Q preko motke 1 na polugu 2 spojenu s oprugom 3 koja je ovješena o oprugu 4 učvršćenu u kućište 5 od lijevanog željeza. Pod djelovanjem teretnice Q opruge se rastežu i pritom sustavom zupčanica-zupčanik zakreću kazaljku 6, koja se zakreće usporedno s ljestvičnom ravjinom 7. Zbog pogonskih nečistoća čitav je mehanizam zatvoren u staklenom kućištu 5, odijeljen od okoliša hidrauličnim čepom 8.



Sl. 37. Mjemo-pokazna naprava tehnološke opružne vage nosivosti 1000 kg

Opružna vaga s tanjurastom oprugom kranska je vaga nosivosti 10 t (sl. 38), u kojoj gornji elastični tanjur 9 pod djelovanjem teretnice Q pritišće na donji opružni tanjur 10; pritom oba tanjura elastično mijenjaju svoj prvobitni oblik. Teretnica vuče svornjak 11 na koji je pričvršćen potisnik 13 koji se oslanja na izdanak 4 prijenosne poluge 3. Ta poluga prenosi gibanje letve 15 segmentu 17 s kojim je vezana zupčanica 2. Zupčanik zakreće kazaljku 18 ispred pokazne ljestvice 1. Valjkasta opruga 14 onemogućuje mrtvi hod, a ploča 7 sprječava neelastično izobiljeđenje mjerne opruge prilikom preopterećenja vage. Dvije simetrične opruge 12 preuzimaju preko vijka 5 udarce nastale naglim podi-

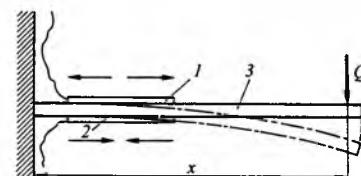
zanjem ili spuštanjem tereta ovješenog o stremen 19. Vaga se vješa o kranski podvoz stremenom 8.



Sl. 38. Kranska opružna vaga s tanjurastom oprugom nosivosti 10t

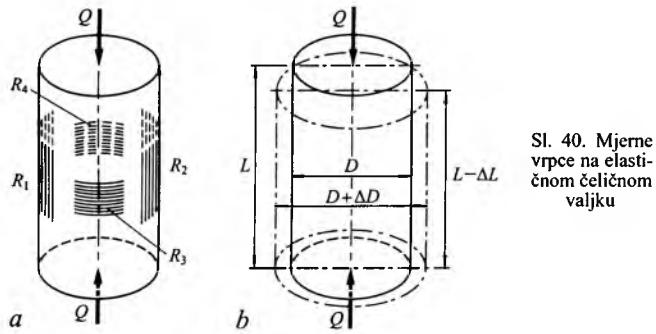
Elektrootporničke silomjerne vage pripadaju mnogobrojnoj skupini *elektromehaničkih* vaga, tj. vaga s *prevornikom mehaničke sile* (teretnice) u električnu veličinu. U vagarstvu se najčešće rabi elektrootpornički prevornik koji relativnu promjenu izmjera $\epsilon = \Delta x / x = \text{const.}$ Q elastičnoga mjernog tijela pretvara u odredivu promjenu električnoga otpora $\Delta R/R = S \cdot \epsilon$ prikladno oblikovane žice od pobakrena nikla ili koje druge slitine ili u promjenu otpora tanke vodljive folije. Slovo S označuje osjetljivost dotičnoga mjernog uređaja, $S = (\Delta R/R)/(\Delta x/x)$, koja je stalna u određenom rasponu ϵ , a približno je $S = 1 + 2\mu + (\Delta\rho/\rho)(\Delta x/x)$, gdje je μ Poissonov omjer, a ρ električna otpornost žice ili folije.

Elektrootpornički se prevornik sastoji od dva temeljna dijela: od elastičnoga tijela koje preuzima silu Q i pritom se privremeno izobiljeđuje te od rastezogn osjetila (žičanoga ili folijskoga električnog otpornika) priljepljena na to elastično tijelo (v. *Električna mjerjenja*, TE 3, str. 654; v. *Tenzometrija*, TE 12, str. 685). Priljepljena otpornička merna vrpca mijenja svoj otpor razmerno izobiljeđenju ϵ , a time i razmerno sili Q , dakle $Q = \text{const.} \cdot \Delta R/R$. Slika 39 prikazuje primjer kad su dvije mjerne vrpce 1 (električnih otpora R_1 i R_3) priljepljene na gornju plohu grede 3, a druge dvije vrpce 2 (električnih otpora R_2 i R_4) na donju plohu. Pod djelovanjem sile Q otpori R_1 i R_3 se povećaju, jer se otpornik produljio, a istodobno se zbog skraćenja smanjuje otpor donjih vrpca. Otpornici R_1 do R_4 grane su električnoga mjernog mosta koji se razgodi kad se dvama otpornicima električni otpor poveća, a preostalima smanji. Posljedica je toga električni napon U u diagonalni mosta razmjeran sili Q ili u poznatom odnosu $Q = f(U)$ prema toj sili.

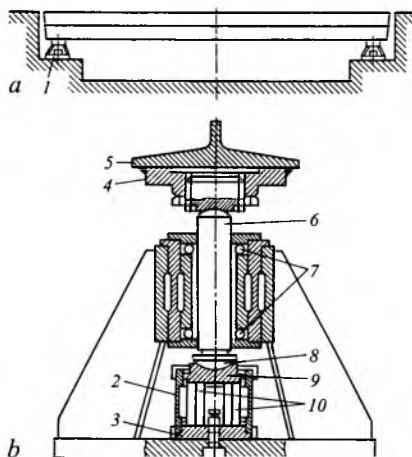


Sl. 39. Shema djelovanja elektrootporničkog silomjera

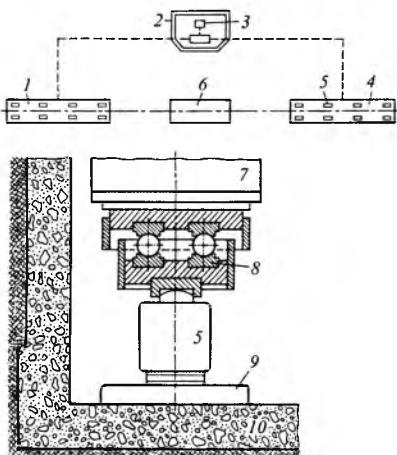
U vagama se najčešće rabe *otpornički silomjeri* s kovinskim valjkom kao prijamnikom teretnice. Na njega su zalijepljene četiri



mjerne vrpce (sl. 40 a), dvije za opažanje skraćenja ΔL njegove duljine i dvije za registraciju povećanja ΔD promjera elastičnoga valjka (sl. 40 b). Za tehnološke vase dostatna je merna nesigurnost $\pm 1\%$ od nosivosti vase. Silomjeri za ovjerljive silomjerne vase izrađuju se s nesigurnošću manjom od $\pm 0,1\%$. Na točnost silomjera bitno utječe montažne okolnosti; osobito je važno da se sprječe poprečne sile i preopterećenja. U presjeku mosta automobilske vase (sl. 41 a) označen je položaj jednoga od četiriju silomjera 1 razmještenih u četiri kuta ispod platforme. Sastav silomjera prikazuje slika 41 b. Četiri elastična čelična stupa 10 nose prilijepljene otporničke mjerne vrpce; za svaki je stup jedan merni most. Stupovi se oslanjaju na ploču 3 obuhvaćenu potpornjem 2. Uspravna se sila tereta s glavne platformne grede 5 prenosi na elastične stupove 10 preko ležaja 4, svornjaka 6, kuglaste glave 8 i ležajno-pritisne ploče 9. Kuglični ležaji 7 usmjeravaju svornjak 6. Naponi dobiveni iz mernih mostova pojačavaju se i obrađuju u obližnjoj obračunskoj jedinici te prenose i pohranjuju na drugim mjestima gdje je to potrebno (uprava, skladište, carina itd.).



Budući da neprekidno raspolažu električnim mernim podatcima, silomjerne su vase pogodne i za vaganje teretnih željezničkih vagona, čak i u gibanju brzinama 4 do 6 km/h za vrijeme punjenja vagona sippkim teretima (sl. 42). Vaga se sastoji od dviju



razmaknutih platformi 1 i 4 dugačkih po dvadesetak metara. Između njih je utovarna naprava 6 koja nasipa teret dok vagon prolazi pored nje. Prva platforma važe prazan vagon a druga napunjeni. Svaka se platforma oslanja na osam elektrootporničkih silomjera 5 ugrađenih u nepropusna kućišta. Registracijski uređaj i tiskaljka 3 spojeni su sa silomjerima oklopjenim kabelima. Mjerna prostorija 2 može biti u udaljenom utovarnom uredu. Teretnicu prenosi do silomjeru poprečna platformna greda 7 preko samonamjesta kuglastog ležaja 8. Silomjer stoji na željeznoj ploči 9 ubetoniranoj u temelj 10. Dopuštena je merna pogreška 0,25%.

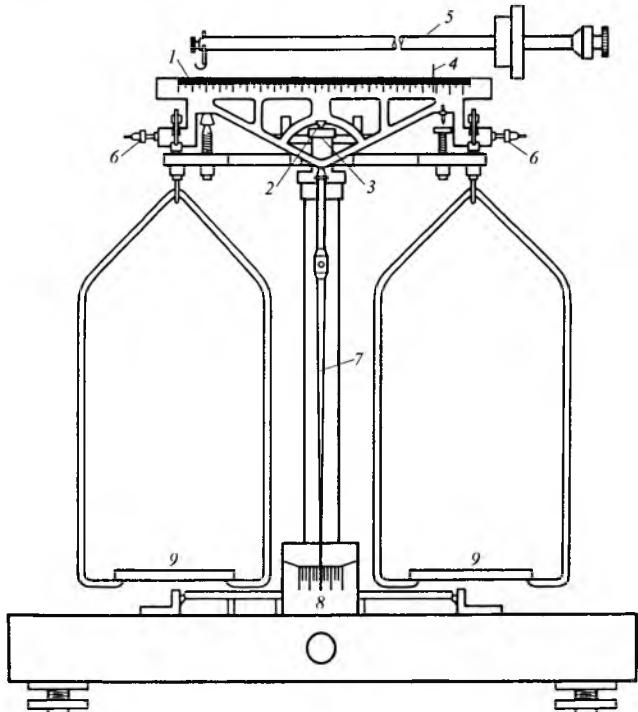
M. Brezinščak

Laboratorijske vase. Za laboratorijski se rad upotrebljavaju vase koje se ubrajaju u razred finih vase i u razred preciznih vase, dakle one vase koje su prikladne za vaganje malih masa. Fine vase za rad u laboratoriju nazivaju se *analitičkim vagama*. Najčešće se upotrebljavaju analitičke vase s najvećim teretom od 100 g i s mernom nesigurnošću od $\pm 0,1 \text{ mg}$.

Dvije su osnovne konstrukcijske vrste laboratorijskih vase: mehaničke i elektroničke vase.

Mehaničke laboratorijske vase. Prema konstrukciji i načinu vaganja razlikuju se mehaničke vase jednakih krakova s dvije zdjelice (s dva pladnja) i vase s jednom zdjelicom.

Analitička vaga s dvije zdjelice preteče je svih analitičkih vase, a danas se praktički više ne upotrebljava. Osnovni je dio vase metalna poluga jednakih krakova s osloncem u sredini poluge na nosivom stupu. Na krajevima poluge vise zdjelice, a na sredini je poluge kazaljka, koja na ljestvici pokazuje otklone poluge (sl. 43). Neopterećena je vaga u stanju vodoravne ravnoteže, jer su momenti na desnom i lijevom kraku jednakvi. Vaga ima mehaničke uređaje za kočenje i za ugadanje vodoravnog položaja. Da bi bila zaštićena od vanjskih utjecaja, vaga je smještena u kućište s vratačima.



Sl. 43. Analitička vaga jednakih krakova. 1 poluga, 2 ahatna prizma, 3 ahatna pločica, 4 jahač, 5 šipka za stavljanje jahača, 6 vijci za ugadanje ravnotežnog stanja, 7 kazaljka, 8 ljestvica, 9 zdjelice

Vaga ima slog utega u rasponu masa od 100 g do 1 g i od 500 mg do 10 mg, pa se uravnoteženjem tereta ručnim stavljanjem utega na zdjelicu može odrediti masa tereta do stotinke grama (10 mg). Miligrami i desetinke miligrema određuju se finim uravnoteženjem pomoću jahače, utega od platinske žice mase 10 mg. Jahač se stavlja na krak vase na kojem se nalazi ljestvica od 100 jednakih podjeljaka, svaki s vrijednošću od 0,1 mg.

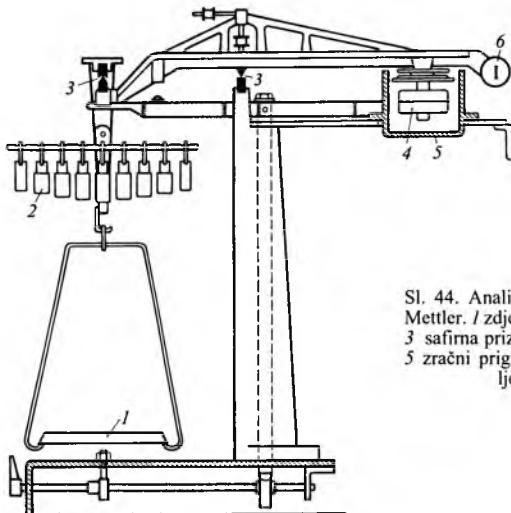
Postoje različite izvedbe analitičkih vaga s dvije zdjelice. Usavršeniji su tipovi lančana vaga, na kojoj se desetinke miligrama određuju na pomoćnoj ljestvici, te vage s magnetnim ili zračnim prigušivačem, koji omogućuje brzo smirivanje njihanja i mnogo brže vaganje.

Precizna mehanička laboratorijska vaga takođe je vaga jednakih krakova, ali je grublje izradbe, s većim maksimalnim teretom (obično do 2 kg) i većom mjernom nesigurnošću ($\pm 0,01$ g).

Vaga s jednom zdjelicom ima mehanički uređaj za stavljanje utega i uređaj za izravno optičko odčitavanje stotinke, tisućinke i desetinučinke grama, tako da je vaganje mnogo brže i jednostavnije. To je poluautomatska vaga, a može biti s jednakim i s nejednakim krakovima. Osim zdjelice koja je dostupna za rukovanje, svi se dijelovi vage nalaze u metalnom kućištu. Slog utega smješten je unutar kućišta, a utezi, koji imaju oblik jahača (100 g, 90...10 g, 9...1 g, 0,9...0,1 g), stavljuju se na vagu ili skidaju okretanjem pripadnih gumba. Gumbima se pokreću metalne šipke mehaničkog sustava za spuštanje i podizanje utega s kraka vage. Ako vaga ima jednakne krake, ona je u osnovnoj konstrukciji slična klasičnoj analitičkoj vagi i važe se uravnoteženjem predmeta na zdjelici, koja se nalazi na jednom kraku vage, stavljanjem utega potrebne mase na drugi krak vage.

Bitna je karakteristika poluautomatske vage što se važe uz pomoć optičke ljestvice. Na kraju kazaljke ili na kraju duljega kraka (u vaga s nejednakim krakovima) nalazi se mikroljestvica koja se projicira na zaslon, na čelnom dijelu vase, kao optička ljestvica. Uz nju se nalazi i pomicna pomoćna ljestvica (*nonij*). Optička se ljestvica pomiče zajedno s polugom vase, tako da se na zaslonu može pratiti smjer njezina pomicanja, a time i uravnoteženje vase.

Analitička vaga tvrtke Mettler danas se od mehaničkih analitičkih vaga vjerojatno najčešće upotrebljava. To je vaga nejednakih krakova; na kraćem kraku visi zdjelica i na njemu se nalazi slog utega, a na duljem se kraku nalazi protuteg (sl. 44). Vaga je stalno jednako i maksimalno opterećena i njezina je osjetljivost stalna. Važe se tako da se na zdjelicu stavlja teret, pa se skidanjem utega uspostavlja ravnoteža (supstitucijska metoda). Na čelnom dijelu, uz optičku ljestvicu, nalazi se i dodatni nonij, pomoću kojeg se ručnim ugadanjem može odčitati stotinka miligrama.



Sl. 44. Analitička vaga tvrtke Mettler. 1 zdjelica, 2 slog utega, 3 safina prizma, 4 protuteg, 5 zračni prigušivač, 6 optička ljestvica

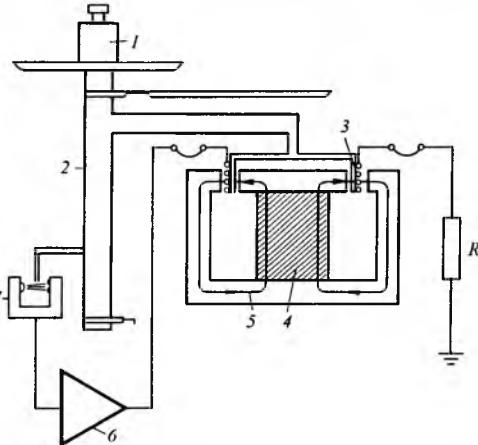
Električne laboratorijske vage. Električne vage ne upotrebljavaju utege, a imaju digitalno električko pokazivanje rezultata vaganja na zaslonu (ekranu). Prema vrijednosti digitalnog podjeljka ljestvice (*d*) laboratorijske električne vage mogu biti:

- ultramikroanalitičke vage ($d=0,1 \mu\text{g}$),
- mikroanalitičke vage ($d=1 \mu\text{g}$),
- polumikroanalitičke vage ($d=0,01 \text{ mg}$),
- makroanalitičke vage ($d=0,1 \text{ mg}$) i
- precizne vage ($d=1 \text{ mg}$).

Precizne vage imaju raspon ljestvice od $10^4 \dots 10^5$ podjeljaka, a analitičke vage i više od 10^7 podjeljaka.

Električne laboratorijske vage sastoje se od tri osnovna dijela: od prijenosnog mehanizma za prevođenje ulazne sile u mjerljivu silu, od mjernog pretvornika za dobivanje električnog signala proporcionalnog sili te od električnog dijela za izračunavanje (mikroprocesor) i za pokazivanje rezultata.

Prijenosni mehanizam. Teret na zdjelici vase djeluje zbog gravitacije silom na podlogu. Sila se prevodi u mjerljiv oblik pomoću pokretnih dijelova: mehaničkih nosača i poluga. Na vase s visecom zdjelicom rezultirajuća sila nastaje u ovjesnom ležaju i dovodi se do mjernog pretvornika preko poluge vase. Na vase s stojčicom zdjelicom (sl. 45) prijenosi se mehanizam sastoji od nosivog stupa koji u okomitom položaju pridržavaju i vode dva para usporednih vodilica, pa se sila može do mjernog pretvornika odvesti s bilo kojeg mesta nosivog stupa, izravno ili preko poluge.



Sl. 45. Električna vaga s elektromagnetskom kompenzacijom sile. 1 uteg, 2 prijenosni mehanizam 3 zavojnica, 4 stalni magnet, 5 magnetsko polje, 6 upravljačka elektronika, 7 fotoelektrični pokazivač položaja

Mjerni pretvornik radi uglavnom na načelu elektromagnetske kompenzacije sile. Pokretni dijelovi vase (nosivi stup i vodilice sa zdjelicom i utegom, te zavojnicu u magnetskom polju stalnog magneta) održavaju se u lebdećem ravnotežnom stanju dijelovanjem protusile koja odgovara sili utega (sl. 45). Protusila nastaje protjecanjem električne struje kroz zavojnicu i nastankom magnetske indukcije, što se regulira fotoelektričnim pokazivačem vertikalnog položaja.

Prilikom vaganja s povećanjem tereta na zdjelici spuštaju se pomicni dijelovi vase, a s njima i zaslon, koji tako mijenja proplustnost svjetlosti u fotoelektrični pokazivač položaja. Na temelju dobivenoga električnog signala mijenja se struja kroz zavojnicu sve dok se pomicni sustav ne vrati opet na svoju ravnotežnu visinu, a masa je vaganog predmeta razmjerana struji.

U nekim vagama sila se kompenzira poništavanjem zakretnog momenta. Pomicna je zavojnica povezana s polugom vase, a zakretni se moment, uzrokovan teretom koji se važe, kompenzira protusmjernim momentom kao posljedicom protjecanja struje kroz zavojnicu i djelovanja polja stalnog magneta. Kad je vaga u ravnoteži, regulacijski sustav mijenja električnu struju kroz zavojnicu tako da poluga stalno ostaje u traženom vodoravnom položaju. Prilikom vaganja struja je proporcionalna zakretnom momentu, a time i masi tereta koji se važe.

Spomenutim ili sličnim načinima kompenziranja sile mjerni pretvornik daje električnu veličinu razmjeru masi vaganog predmeta, i to ili u obliku napona koji se mjeri digitalnim voltmetrom ili kao frekvenciju koju registrira mjerilo frekvencije.

Danas se proizvodi mnogo različitih modela električnih vaga, pa se analitički laboratorijski, prema svojim potrebama i mogućnostima, mogu opremiti laboratorijskim vagama širokog raspona točnosti, od ultramikroanalitičkih (maksimalnog tereta 3 g) do makroanalitičkih (100...160 g) i različitih preciznih vaga. Tvornice laboratorijskih vaga (Mettler, Sartorius, Cahn i druge) proizvode i posebne vage i dodatne uređaje za vaganje pri visokim ili niskim temperaturama, u vakuumu, u specifičnoj plinskoj atmosferi, u magnetnom i električnom polju, u kapljevinama itd.

MEĐUNARODNO NORMIRANI UTEZI

Normirani i ovjereni utezi. Uteg je kovinsko tijelo znane mase namijenjeno određivanju mase drugih tijela vaganjem. Massa, gustoću, oblik, izmjere, hravavost i druga svojstva *normiranih utega* propisuje međunarodna strukovna organizacija. Normirani se utezi prema namjeni razvrstavaju među radne, nadzorne i etalonske. *Ovjeren* je onaj uteg kojemu je ovlaštena mjeriteljska služba ispitala svojstva i na određeno mu vrijeme odobrila javnu uporabu te svoje odobrenje iskazala ovjernicom ili žigom ili i ovjernicom i žigom. Osim utega opisanih ovim člankom upotrebljavaju se i utezi koji nisu međunarodno normirani: ugradbeni, pomicni, jahači, kuglasti, prstenasti, pločasti itd.

Međunarodna organizacija za zakonsko mjeriteljstvo (OIML) donosi od 1968. *međunarodne preporeuke* s pomoću kojih na svjetskoj razini normira mjere i mjerila (v. *Metrologija, zakonska*, TE 8, str. 496). Na utege se izravno odnose preporeuke OIML broj 111, 33, 47 i 52, a neizravno i one preporeuke što se bave vagama. Europski savez i drugi državni savezi pretiču te preporeuke u *odrednice*, a države ih izdaju kao *propise* koji se pod prijetnjom kazne moraju primjenjivati u javnom, službenom i poslovnom prometu. Propisi određuju nazivne vrijednosti utega, uporabljenе mjerne jedinice, dopuštene odmake od nazivnih vrijednosti za pojedine vrste utega (razrede točnosti), dopuštene raspone gustoće kovina ili slitina od kojih se utezi izrađuju, oblike i izmjere utega, obrađenost njihove površine, otpornost na habanje i koroziju, označivanje, ugađanje prilikom umjeravanja, način pakovanja itd. U Hrvatskoj su ovlaštena mjerilišta 1986. ovjerila ~100 000 utega, od toga je ~30 000 bilo novih utega (tzv. prva ovjera), a 1982. ~140 000, odnosno 33 000. Pritom je državni propis određivao da se utezi moraju ponovno ispitati, umjeriti i ovjeriti u ovlaštenim mjerilištima najkasnije dvije godine nakon prethodne ovjere.

Tablica 4

DOPUŠTENI ODMAK UTEGA RAZREDA M₃, M₂ i M₁*

Nazivna vrijednost	Dopušteni odmak od nazivne vrijednosti		
	Razred M ₃ mg	Razred M ₂ mg	Razred M ₁ mg
1 mg	–	–	±0,20
2 mg	–	–	±0,20
5 mg	–	–	±0,20
10 mg	–	–	±0,25
20 mg	–	–	±0,3
50 mg	–	–	±0,4
100 mg	–	±1,5	±0,5
200 mg	–	±2,0	±0,6
500 mg	–	±2,5	±0,8
1 g	±10	±3	±1,0
2 g	±12	±4	±1,2
5 g	±15	±5	±1,5
10 g	±20	±6	±2
20 g	±25	±8	±2,5
50 g	±30	±10	±3
100 g	±50	±15	±5
200 g	±100	±30	±10
500 g	±250	±75	±25
1 kg	±500	±150	±50
2 kg	±1000	±300	±100
5 kg	±2500	±750	±250
10 kg	±5000	±1500	±500
20 kg	±10000	±3000	±1000
50 kg	±25000	±7500	±2500

*Prema međunarodnoj preporeuci OIML R 111 iz 1996. godine

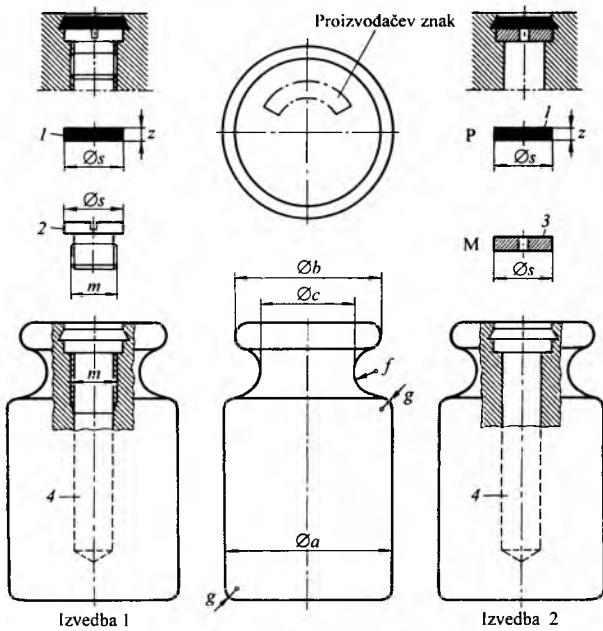
Radni utezi služe za očevidno vaganje robe ili su ugrađeni u vage, a nadzorni se i etalonski utezi rabe za umjeravanje drugih utega te za ispitivanje i ovjeru vaga. Prema točnosti se normirani utezi dijele u razrede, od najmanje točnoga razreda M₃ do naj-

točnjega razreda E₁. Pritom naziv *točnost* upućuje na razliku između dopuštene mase utega i nazivne mase tog utega. U razredu M₂ ima, npr., uteg nazivne mase 10 kg *dopušteni odmak* ±1,5 g (tabl. 4). To znači da je valjan ako mu masa ima bilo koju vrijednost između 10 kg – 1,5 g = 9,9985 kg i 10 kg + 1,5 g = 10,0015 kg. Umjesto naziva (dopušteni) odmak, u pojedinim se sredinama, državama, normama i propisima rabe nazivi tolerancija, otklon, pogreška, granice pogrešaka, nesigurnost i odstupanje. Relativni je dopušteni odmak u ovom primjeru $\epsilon = \pm 1,5 \text{ g} / 10 \text{ kg} = \pm 1,5 \cdot 10^{-4}$, a relativna razlika između najveće i najmanje dopuštene vrijednosti $3 \cdot 10^{-4}$. Treći se način razvrstavanja utega uobičajio prema namjeni u vezi s točnošću pa se utezi razvrstavaju u trgovacke (M₃, M₂), precizne (M₁), analitičke (F₂, F₁) i etalonske (E₂, E₁).

Trgovacki utezi razreda M₃ upotrebljavaju se uz vage četvrtog i trećeg točnosnog razreda, a utezi razreda M₂ za prvo umjeravanje utega M₃ te uz vage trećeg razreda. Utezi se moraju označiti jednim od znakova napisanih u prvom stupcu tablice 4. Valjkasti se uteg mora izraditi u jednom komadu, i to u obliku valjka s drškom nalik na spljoštenu kuglu. Kvadarni se uteg smije izraditi od dva dijela (držak u obliku bešavne željezne cijevi jedan je dio, a tijelo utega drugi), ali oni moraju biti nerazdvojivo međusobno spojeni.

Valjkasti se utezi mogu izrađivati od onih tvoriva gustoće 7...9,5 kg/dm³ kojima je tvrdoća jednakna ili veća od tvrdoće lijevanje mjeđi, a postojanost na habanje i na koroziju u najmanju ruku usporediva s otpornošću brižljivo izrađena sivoga željeznoga ljeva. Od sivoga se ljeva ne smiju izrađivati utezi manji od 100 g. Površina se utega može ispolirati i zaštititi slojem otpornim na udarce i koroziju. Kvadarni se utezi izrađuju samo od sivoga ljeva.

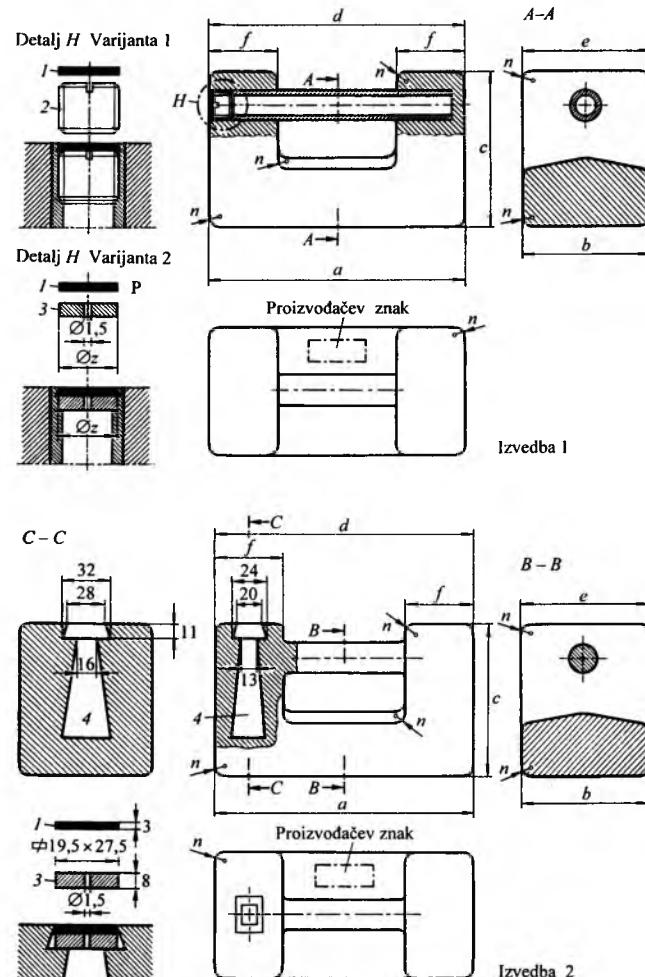
Svi kvadarni utezi te valjkasti utezi od 10 kg do 100 g moraju imati šupljinu za ugađanje. Utezi od 1 g, 2 g, 5 g i 10 g ne smiju imati šupljinu, a oni od 20 g i 50 g mogu je imati. Šupljina za ugađanje ima na valjkastim utezima oblik suosnoga valjkastog prvrtka koji je na gornjoj strani proširen. Šupljina se nakon masenog ugađanja zatvara mjeđenim čepom na vijak ili mjeđenom pločicom (sl. 46, lijevo i desno). Čep ili pločica osiguravaju se olovnom pločicom koja se utisne toliko da zapuni žlijeb. Šupljina se mora izraditi tako da nakon ugađanja utega olovnim opiljcima dvije trećine njezina obujma ostanu prazne. Kvadarni se utezi na sličan način ugađaju ili u željeznoj rukohvatnoj cijevi ili u šupljini izrađenoj lijevanjem (sl. 47).



Sl. 46. Dvije izvedbe valjkastih utega prema međunarodnoj preporeuci OIML R 111 (1996). 1 olovna pločica, 2 mjeđeni čep, 3 mjeđena pločica, 4 šupljina za ugađanje (izmjere navedene u tablici 5)

Nazivna vrijednost utega i proizvođačev znak moraju se označiti reljefno, u udubljenoj ili izbočenoj izvedbi, na gornjoj

strani drška (glave) valjkastog utega te na gornjoj plohi središnjeg dijela kvadarnog utega. Na valjkaste utege od 500 g do 10 kg može se nazivna vrijednost naznačiti i na plaštu. Ovjerni žig ovlaštenog mjerilišta utiskuje se u olovnu pločicu koja zatvara šupljinu za ugađanje. Ako je uteg bez šupljine, žig se utiskuje u njegovo dno.



Sl. 47. Dvije izvedbe kvadarnih utega prema međunarodnoj preporuci OIML R 111 (1996). 1 olovna pločica, 2 mjedeni čep, 3 mjedena pločica, 4 šupljina za ugađanje (kote iskazane u milimetrima; izmjere sadrži tablica 6)

Bitne izmjere valjkastih i kvadarnih utega prema međunarodnim preporukama OIML donose tablice 5 i 6.

Tablica 5

NEKE OD MEĐUNARODNO NORMIRANIH IZMJERA VALJKASTIH UTEGA RAZREDA M₃, M₂ I M₁

Uteg	Izmjere (mm)							
	a	b	c	f	g	m	s	z
1 g	6	5,5	3	0,9	0,5	—	—	—
2 g	6	5,5	3	0,9	0,5	—	—	—
5 g	8	7	4,5	1,25	0,5	—	—	—
10 g	10	9	6	1,5	0,5	—	—	—
20 g	13	11,5	7,5	1,8	0,5	4	5	1
50 g	18	16	10	2,5	1	6	7	1,5
100 g	22	20	13	3,5	1	6	7	1,5
200 g	28	25	16	4	1,5	8	10	2
500 g	38	34	22	5,5	1,5	8	10	2
1 kg	48	43	27	7	2	14	18	3
2 kg	60	54	36	9	2	14	18	3
5 kg	80	72	46	12	2	20	24	3
10 kg	100	90	58	15	3	20	24	3

*Prema međunarodnoj preporuci OIML R 111 (1996). Značenje općih znakova tumači se na slici 46. Visina utega nije normirana jer ovisi o tvorivu.

Tablica 6

NEKE OD MEĐUNARODNO NORMIRANIH IZMJERA KVADARNIH UTEGA RAZREDA M₃, M₂ I M₁

Uteg	Izmjere (mm)							
	a	b	c	d	e	f	n	z
5 kg	150	75	84	152	77	36	5	16
10 kg	190	95	109	193	97	46	6	16
20 kg	230	115	139	234	117	61	8	27
50 kg	310	155	192	314	157	83	10	27

*Prema međunarodnoj preporuci OIML R 111 (1996). Značenje općih znakova tumači se na slici 47.

Precizni utezi razreda M₁ služe za prvo umjeravanje utega razreda M₂ i za ugradnju u vage drugog razreda, a upotrebljavaju se i za vaganje u ljekarništvu, tehnički i drugdje. Kvadarni utezi razreda M₁ imaju nazivne vrijednosti 5 kg, 10 kg, 20 kg i 50 kg, valjkasti utezi od 1 g do 50 kg, a pločasti i žičani utezi od 1 mg do 1 g. Dopuštenje odmake od nazivne vrijednosti donosi tablica 4 u stupcu za razred M₁. Preporuke OIML određuju da se za utege razreda M₁ do E₁ pod nazivnom vrijednošću razumijeva izvaga, tj. rezultat vaganja u zraku pri međunarodno normiranim okolnostima bez uzgonskog ispravka.

Utezi nazivne vrijednosti 1 mg do 1 g izrađuju se u obliku višekutnih kovinskih pločica ili u obliku žičica savijenih u višekut. Jednogramski se uteg razreda M₁, dakle, pojavljuje u tri normirana oblika. Oblik utežnih pločica i žičica omogućuje prepoznavanje nazivnih vrijednosti:

1 mg, 10 mg, 100 mg i 1000 mg utjelovljuje se trokutnom pločicom ili žičicom u obliku jednoga odlomka,

2 mg, 20 mg i 200 mg utjelovljuje se četverokutnom pločicom ili dvokrakom žičicom,

5 mg, 50 mg i 500 mg utjelovljuje se peterokutnom pločicom ili žičicom oblikovanom u pet odlomaka.

Preporuke OIML dopuštaju da se utežni slogovi tvore na četiri načina:

$$(1; 1; 2; 5) \times 10^n \text{ kg},$$

$$(1; 1; 1; 2; 5) \times 10^n \text{ kg},$$

$$(1; 2; 2; 5) \times 10^n \text{ kg},$$

$$(1; 1; 2; 2; 5) \times 10^n \text{ kg}.$$

Eksponent n označuje pozitivni ili negativni cijeli broj ili ništicu. Pojedinačni utezi ili utežni slogovi razreda M₁ do nazivne vrijednosti 500 g moraju se pohranjivati u kovčežiću za utege sa znakom M₁ na poklopцу. Svi utezi razreda F₂ do E₁ moraju se pohranjivati u kovčežićima. Imaju li u utežnom slogu jedan ili dva dodatna utega iste nazivne vrijednosti, oni se radi razlikovanja označuju jednom ili dvjema zvjezdicama (ili točkicama) ako su to pločasti utezi te jednom ili dvjema ušicama ako su to žičani utezi.

Prema preporukama OIML utezi razreda M₁ do E₁ izrađuju se od kovina ili od kovinskih slitina odabranih tako da ubočajena uporaba utega zanemarivo utječe na promjenu njihove mase. Tvorivo kvadarnih utega od 5 do 50 kg razreda M₁ mora biti otporno prema koroziji i na habanje barem poput sivoga lijeva. Valjkasti utezi razreda M₁ od 10 kg i manje moraju se izradivati od mjedi ili od tvoriva istovrijednog sastava. Gustoća utega mora biti unutar granica koje prema preporuci OIML broj 33 određuje jednadžbu

$$\rho = \frac{48 \text{ kg/dm}^3}{6 - \epsilon \cdot 10^5}, \quad (41)$$

gdje je ε relativni dopušteni odmak. Tako je, npr., za kilogramski uteg razreda E₁ (tabl. 7) $\epsilon = \pm 0,50 \text{ mg/kg} = \pm 5 \cdot 10^{-7} \text{ pa}$ jednadžba daje dopušteni raspon $7,93 \dots 8,07 \text{ kg/dm}^3$.

Površina valjkastih utega razreda M₁ od 1 g do 10 kg mora biti polirana. Površine utega razreda M₁ od 1 g i više mogu se zaštititi prikladnim slojem, a za ugađanje može se upotrebljavati olovo. Nazivne se vrijednosti obilježavaju kao za utege M₂.

Analitički i etalonski utezi. Analitički utezi razreda F₂ služe za prvo umjeravanje nadzornih i radnih utega razreda M₁ i katkada za umjeravanje utega razreda M₂ te za vaganje zlata i dragulja vagama drugog razreda. S pomoću utega razreda F₁ umjeravaju se utezi razreda F₂ i vage prvoga razreda. Etalonski utezi

razreda E_2 i E_1 upotrebljavaju se pri vrhunskim umjeravanjima utega i ispitivanjima najpreciznijih vaga. Mjeriteljska svojstva utega razreda F_2 do E_1 prema preporuci OIML broj 111 sadrži tablicu 7.

Tablica 7

DOPUŠTENI ODMAK NADZORNIH I ETALONSKIH UTEGA RAZREDA F_2 do E_1^*

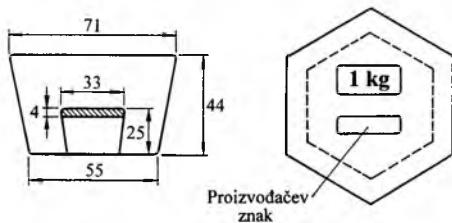
Nazivna vrijednost	Dopušteni odmak od nazivne vrijednosti			
	Razred F_2 mg	Razred F_1 mg	Razred E_2 mg	Razred E_1 mg
1 mg	±0,06	±0,020	±0,006	±0,002
2 mg	±0,06	±0,020	±0,006	±0,002
5 mg	±0,06	±0,020	±0,006	±0,002
10 mg	±0,08	±0,025	±0,008	±0,002
20 mg	±0,10	±0,03	±0,010	±0,003
50 mg	±0,12	±0,04	±0,012	±0,004
100 mg	±0,15	±0,05	±0,015	±0,005
200 mg	±0,20	±0,06	±0,020	±0,006
500 mg	±0,25	±0,08	±0,025	±0,008
1 g	±0,3	±0,10	±0,030	±0,010
2 g	±0,4	±0,12	±0,040	±0,012
5 g	±0,5	±0,15	±0,050	±0,015
10 g	±0,6	±0,20	±0,060	±0,020
20 g	±0,8	±0,25	±0,080	±0,025
50 g	±1,0	±0,30	±0,10	±0,030
100 g	±1,5	±0,5	±0,15	±0,05
200 g	±3,0	±1,0	±0,30	±0,10
500 g	±7,5	±2,5	±0,75	±0,25
1 kg	±15	±5	±1,5	±0,50
2 kg	±30	±10	±3,0	±1,0
5 kg	±75	±25	±7,5	±2,5
10 kg	±150	±50	±15	±5
20 kg	±300	±100	±30	±10
50 kg	±750	±250	±75	±25

*Prema međunarodnoj preporuci OIML R 111 iz 1996. godine

Kovina ili slitina za utege razreda F_1 do E_1 mora biti praktično nemagnetična. Utezi tih triju skupina ne moraju imati držak (glavu), tj. mogu se izrađivati u obliku pravoga valjka. Utezi razreda E_2 i E_1 moraju biti od punoga komada, tj. bez šupljine za ugadanje. Utezi do razreda F_1 mogu imati šupljinu, ali njezin obujam ne smije premašiti 20% od ukupnog obujma utega. Šupljina se može smjestiti ispod drška ili izvesti na drugi pogodan način. Kao tvorivo za ugadanje smije se upotrebljavati isti materijal od kakva je izrađen uteg ili čisti kositar ili molibden. Površina utega razreda F_2 do E_1 od 1 g i više može se zaštитiti kovinskim slojem.

Pločasti i žičani utezi nazivne vrijednosti 1 g i manje nemaju nikakvu oznaku vrijednosti. Valjkasti utezi razreda E_2 i E_1 nizivne vrijednosti 1 g i više nemaju nikakve oznake vrijednosti, oni razreda F_1 imaju brojčani iznos (bez mjerne jedinice) obilježen bruniranjem ili graviranjem, a oni razreda F_2 imaju slovo F i nizivnu vrijednost. Na utezima od 1 kg i više iskazuje se znak kg, a na onima od 1 do 500 g znak g. Imaju li šupljinu za ugadanje, utezima se razreda F_2 ovjerni žig utiskuje u pločicu, a nemaju li šupljine, utiskuje se u njihovu donju plohu. Na svim kovčićima s utezima razreda F_1 , E_2 i E_1 mora biti otisak ovjernoga žiga i navedba točnosnoga razreda.

Ostali normirani utezi. Međunarodna preporuka OIML broj 52 normira devet šesterokutnih utega (sl. 48) nizivnih vrijednosti 100 g do 50 kg (tabl. 8) izrađenih od sivog lijeva. Tri najveća utega



Sl. 48. Šesterokutni uteg prema međunarodnoj preporuci OIML R 52 (1980). Brojevi iskazuju milimetarske izmjere kilogramskog utega.

imaju šesterokutni provrt uzduž čitave visine i u njemu poprečni držak za nošenje. Visina je utega između 21 i 150 mm, razmak nasuprotnih gornjih bridova 34...283 mm, a razmak donjih 26...266 mm. Utezi moraju imati šupljinu za ugadanje s pomoću olova. Pošto se novi utezi ugode, najmanje dvije trećine obujma šupljine mora ostati prazno. Površina mora biti glatka, neporozna, a bridovi i uglovi zaobljeni. Utezi mogu biti zaštićeni prikladnim protukorozijskim slojem. Žig se utiskuje u olovo izlive u šupljinu za ugadanje. Dopušteni relativni odmak mase šesteročutnih utega od nizivne mase smije iznositi $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ (tabl. 8).

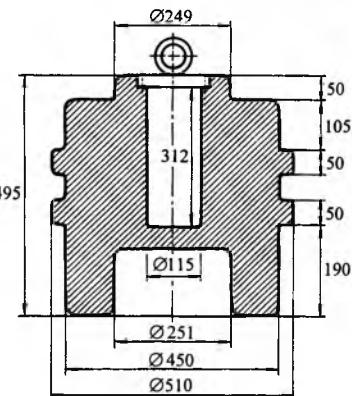
Tablica 8

DOPUŠTENI ODMAK ŠESTEROKUTNIH UTEGA*

Nazivna vrijednost	Dopušteni odmak
100 g	±100 mg
200 g	±100 mg
500 g	±250 mg
1 kg	±0,5 g
2 kg	±1,0 g
5 kg	±2,5 g
10 kg	±5,0 g
20 kg	±10,0 g
25 kg	±25,0 g

*Prema preporuci OIML R 52 (1980)

Preporuka OIML broj 47 normira velike nadzorne utege nizivnih vrijednosti 50 kg do 5 t (tabl. 9) koji se upotrebljavaju za ispitivanje i umjeravanje neautomatskih vaga četvrtog i trećeg razreda. Najčešće se izrađuju od lijevanog željeza u obliku kvadrarnih utega, složivo-kotrljivih (sl. 49) i kotrljivih. Dopuštena su i druga tvoriva ako udovoljavaju zahtjevima za gustoću u vezi s izvagom i za postojanost u normalnim uporabnim okolnostima.



Sl. 49. Kotrljivi i složivi valjkasti nadzorni uteg prema međunarodnoj preporuci OIML R 47 (1976). Brojevi iskazuju milimetarske izmjere utega od 500 kg.

Mogu se prevući zaštitnim slojevima. Imaju jednu ili dvije šupljine za ugadanje. Na utegu moraju biti navedeni njegova nizivna vrijednost i maksimalan broj podjeljaka vase koja se njime može ispitati prilikom prvog ovjeravanja (tabl. 9).

Tablica 9

DOPUŠTENI ODMAK VELIKIH NADZORNIH UTEGA U OVISNOSTI O BROJU PODJELJAKA n ISPITIVANE VAGE*

Nazivna vrijednost	Dopušteni odmak od nizivne vrijednosti			
	$n=1000$	$n=3000$	$n=5000$	$n=10000$
50 kg	±17 g	±8,5 g	±5 g	±2,5 g
100 kg	±33 g	±17 g	±10 g	±5 g
200 kg	±66 g	±33 g	±20 g	±10 g
500 kg	±170 g	±85 g	±50 g	±25 g
1 000 kg	±330 g	±170 g	±100 g	±50 g
2 000 kg	±660 g	±330 g	±200 g	±100 g
5 000 kg	±1,7 kg	±850 g	±500 g	±250 g

*Prema preporuci OIML R 47 (1976)

U draguljarstvu se upotrebljavaju karatni utezi. Naziv potječe od masene jedinice (metrički) karat (=200 mg). Iako karatne uteze organizacija OIML ne normira, dopušta njihovu uporabu.

Tablica 10 sadrži dopuštene odmake karatnih utega u Njemačkoj, SAD i Australiji. Znak za jedinicu metrički karat nije međunarodno normiran. U Njemačkoj se rabi Kt, a drugdje znakovi c, ct, cm i CM, katkada s točkom na kraju. Organizacija OIML rabi znak ct.

Tablica 10

DOPUŠTENI ODMAK NOVIH I POPRAVLJENIH KARATNIH UTEGA U NJEMAČKOJ, SAD I AUSTRALIJI

Nazivna vrijednost Kt	Dopušteni odmak od nazivne vrijednosti		
	Njemačka mg	SAD mg	Australija mg
0,005	—	◊	±0,1
0,01	±0,2	◊	±0,1
0,02	±0,2	◊	±0,1
0,05	±0,5	◊	±0,1
0,1	±0,5	◊	±0,1
0,2	±0,5	◊	±0,15
0,25	—	±0,3	—
0,5	±1	±0,5	±0,2
1	±1	±0,75	±0,2
2	±1	±1	±0,3
3	—	±1,5	—
5	±2	±2	±0,5
10	±3	±3	±0,7
20	±6	±5	±1
30	—	±6	—
50	±10	±7,5	±2
100	±15	±12,5	±2
200	±25	—	±3
500	±30	—	±5

Napomena: znak ◊ označuje da za sve vrijednosti manje od 0,25 Kt dopušteni odmak iznosi ±0,3 mg.

Prema njemačkom se propisu karatni utezi od 0,01 do 0,5 Kt izraduju od čistog aluminija ili aluminijskih slitina otpornih prema koroziji, a oni od 1 do 500 Kt od mjedi ili od nemagnetičnoga čelika. Prvi imaju oblik pravokutnih pločica s jednim zavrnutim bridom i dva kruna ugla ili s jednim zavrnutim i tri kruna ugla. Drugi se izraduju poput okrenute krunje piramide kvadratnoga presjeka. Sve površine moraju biti glatke i polirane. Utezi se moraju obilježiti nazivnim brojem i znakom Kt. Čini se to graviranjem ili utiskivanjem u gornju vodoravnu površinu. Na utezima od 0,05 Kt i na manjima može se izostaviti znak Kt.

Ima širom svijeta mnogo vrsta utega koji su normirani i dopušteni propisima samo u pojedinim državama. U SAD, Velikoj Britaniji i ostalim zemljama engleskoga govora zakonito se rabe utezi koji se označuju prema masenim jedinicama ounce, pound (avoirdupois weights), grain, scruple, dram, pennyweight, ounce (apothecaries and troy weights) itd.

Iskazivanje utega izvagom. Imalo točnije vaganje predmeta u zraku zahtijeva uzimanje u obzir popravka uzrokovana zračnim uzgonom. Da bi se bez tog popravka mogli s poznatom nesigurnošću unutar određenih razreda točnosti umjeravati utezi i vagati predmeti poznatoga raspona gustoće, međunarodno je u okviru OIML utvrđeno da se utezi iskazuju mjerom veličinom (*dogovorna*) izvaga. Izvaga z utega mase m definira se jednadžbom

$$z = m \cdot (1 + k), \text{ uz } k = \frac{\rho_{(20)}}{1 - \frac{c}{b}} - 1, \quad (42)$$

gdje znak $\rho_{(20)}$ označuje gustoću tog utega pri temperaturi 20 °C, tj. $\rho_{(20)} = m/V_{(20)}$, a preostala dva slova označuju ove međunarodne stalnice: $b = 8000 \text{ kg/m}^3$ (referentna gustoća utega), $c = 1,20 \text{ kg/m}^3$ (referentna gustoća zraka).

Pojam dogovorna izvaga proizlazi iz temeljne ravnotežne jednadžbe jednokrake vase ili jednopladske (jednokrake) vase. Prvi je uteg u ravnoteži s drugim kad su njihove (*sile*) teretnice međusobno jednakе, $Q_1 = Q_2$, tj.

$$g(m_1 - \rho_a V_1) = g(m_2 - \rho_a V_2), \quad (43)$$

$$m_1(1 - \rho_a/\rho_1) = m_2(1 - \rho_a/\rho_2), \quad (44)$$

gdje indeksi a, 1 i 2 označuju zrak, prvi uteg i drugi uteg. Važe li se pri temperaturi 20 °C, gustoće su utega $\rho_{1(20)}$ i $\rho_{2(20)}$. Bude li pritom gustoća zraka jednaka referentnoj, $\rho_a = c$, ravnotežna se jednadžba pojednostavnjuje:

$$(1 + k_1) \cdot m_1 = (1 + k_2) \cdot m_2, \text{ odnosno } z_1 = z_2. \quad (45)$$

Općenito vrijedi $z = z_1 + z_2 + \dots$. Za utege se k nalazi u približnom rasponu od $+1 \cdot 10^{-4}$ (platsinski utezi) do $-3 \cdot 10^{-4}$ (aluminijski utezi).

Preporuke OIML broj 20 i 33 nalažu da se utezi umjeravaju u zraku kojemu se gustoća ρ_a ne razlikuje od referentne vrijednosti c za više od ±10%, tj. da je gustoća zraka u mjerilištu unutar raspona 1,08 i 1,32 kg/m³. Osim toga nalažu da gustoća utega, zajedno sa suplinama, bude takva da umjeravanje pri gustoći zraka 0,9 · c ili pri 1,1 · c ne pridonosi mjerenoj pogrešci više od 1/4 dopuštenog odmaka (na jednu stranu) za dotični točnosni razred. S tim se odredbama izvodi jednadžba

$$\rho = \frac{c}{\frac{c}{b} - 0,25 \cdot \frac{\epsilon}{0,1}} = \frac{48000 \text{ kg/m}^3}{6 - \epsilon \cdot 10^5} \quad (46)$$

koja određuje dopušteni raspon gustoće utega. U skladu sa svim tim preporuka OIML broj 33 (1972) ovako definira *dogovornu izvagu*: »Dogovorna vrijednost rezultata vaganja nekog tijela u zraku jednaka je masi etalona kojemu je gustoća pri dogovorno odabranoj temperaturi jednaka dogovorno odabranoj gustoći, a koji u zraku dogovorno odabrane gustoće pri toj referentnoj temperaturi uravnotežuje to tijelo«. Definicija se odnosi na sve utege koji tvore vagu, tj. na utege u užem smislu, protutege, pomične utege, ugrađene prstenaste ili drukčije utege u vodoravnom ili uspravnom položaju te na one dijelove vase koji utječu na zakretni moment poluge. Posebni propisi određuju temperaturni raspon za pojedine razrede prilikom ugadanja i umjeravanja.

Državni etalonski utezi. Hrvatski državni mjeriteljski i narmacijski zavod upravlja ovlaštenim mjerilištim koja ovjeravaju vase i uteze. Na vrhu slijednog sustava zavod raspolaže kilogramskim državnim etalonom, državnim referentnim utežnim sloganom (tabl. 11), državnim radnim etalonskim sloganom i vrhunskim vaga komparatorima nosivosti 10 kg, 1 kg, 50 g i 5 g.

Državni etalon je čelični uteg mase $m = 1 \text{ kg} - 1,06 \text{ mg} \pm \pm 100 \mu\text{g}$, odnosno izvage $z = 1 \text{ kg} - 0,12 \text{ mg} \pm 100 \mu\text{g}$. Relativna je nesigurnost $\pm 1 \cdot 10^{-7}$ pri statističkoj sigurnosti 95%. Pri temperaturi 20 °C obujam je tog utega $124,217 \pm 0,020 \text{ cm}^3$, a gustoća $8050,4 \pm 1,3 \text{ kg/m}^3$. Proizvođač je njemačko poduzeće Sartorius. Uteg je 20. studenoga 1995. ovjerio vrhunski njemački mjeriteljski institut Physikalisch-Technische Bundesanstalt u Braunschweigu.

Državni referentni etalonski slogan tvori 28 čeličnih utega razreda E₁ proizvodnje Sartorius, nazivne vrijednosti 5 kg ··· 1 mg (tabl. 11). U sklopu organizacije Deutscher Kalibrierdienst (DKD) utege je umjerio Landesamt für Mess- und Eichwesen Brandenburg (DKD-K 08 601) u Potsdamu. Umjernica je izdana 31. ožujka 1995., a sadrži izvagu svakog utega, masu, nesigurnost (95%), obujam pri 20 °C i nesigurnost gustoći pri 20 °C i nesigurnost te mjerne okolnosti (tlak, temperatura, vlažnost).

Državni radni etalonski slogan tvori 29 čeličnih utega razreda E₂ proizvodnje Sartorius, nazivne vrijednosti 10 kg ··· 1 mg. U sklopu organizacije DKD utege je umjerilo mjerilište DKD-K 10 501 u poduzeću Sartorius (Göttingen), ovlašteno od Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Umjernica za desetkilogramske utege izdana je 26. studenoga 1995., a za ostalih 28 utega 4. kolovoza 1995. Umjernica sadrži (dogovoru) izvagu svakog utega i njezinu nesigurnost te podatke o zračnome tlaku, temperaturi i vlažnosti za vrijeme umjeravanja.

Opisana hrvatska masena pramjera i državni etalonski sloganovi omogućuju umjeravanje etalonskih utega u rasponu od 1 mg do 10 kg, tj. u rasponu 1 prema 10 milijuna. Za umjeravanje pojedinačnih utega i čitavih utežnih sloganova, od desetkilogramskih do

desetmiligramskih, služe četiri komparatora proizvodnje Sartorius. Između hrvatske pramjere i državnoga kilogramskog etalon-skog sloga posreduje komparator Sartorius C 1000 S kojemu je iskazani normni odmak $\pm 5 \mu\text{g}$, odnosno $\pm 5 \cdot 10^{-9}$ u relativnom iskazu. Komparator je u biti jednokraka vaga s elektromagnetskom kompenzacijom, vrpčanim ovjesom, ugrađenim utezima koji omogućuju promjene u koracima po 100 g, mehanizmom za izmjenu utega u mjernom postupku, električkom obradbi rezultata i automatskim upravljanjem. Maksimalna je opteretivost vage 1000,5 g, a razlučivanje 1 μg .

Tablica 11

VRHUNSKI MASENI ETALONI HRVATSKE MJERITELJSKE SLUŽBE

Nazivna vrijednost	Masa utega	Dogovorna izvaga	Nesigurnost (95%)
<i>Državni maseni etalon</i>			
1 kg	1 kg - 1,06 mg	1 kg - 0,12 mg	$\pm 0,10 \text{ mg}$
<i>Državni referentni etalonski slog</i>			
5 kg	5 kg - 5,1 mg	5 kg + 0,0 mg	$\pm 0,8 \text{ mg}$
2 kg	2 kg - 0,2 mg	2 kg + 0,4 mg	$\pm 0,3 \text{ mg}$
2* kg	2 kg - 0,4 mg	2 kg + 0,2 mg	$\pm 0,3 \text{ mg}$
1 kg	1 kg - 0,73 mg	1 kg + 0,15 mg	$\pm 0,15 \text{ mg}$
500 g	500 g - 0,42 mg	500 g - 60 μg	$\pm 80 \mu\text{g}$
200 g	200 g - 0,19 mg	200 g - 20 μg	$\pm 30 \mu\text{g}$
200* g	200 g - 0,21 mg	200 g - 40 μg	$\pm 30 \mu\text{g}$
100 g	100 g - 34 μg	100 g - 8 μg	$\pm 15 \mu\text{g}$
50 g	50 g - 48 μg	50 g - 11 μg	$\pm 10 \mu\text{g}$
20 g	20 g + 8 μg	20 g - 8 μg	$\pm 8 \mu\text{g}$
20* g	20 g - 18 μg	20 g + 0 μg	$\pm 8 \mu\text{g}$
10 g	10 g - 16 μg	10 g - 5 μg	$\pm 6 \mu\text{g}$
5 g	5 g - 3 μg	5 g + 1 μg	$\pm 5 \mu\text{g}$
2 g	2 g + 5 μg	2 g + 5 μg	$\pm 4 \mu\text{g}$
2* g	2 g + 9 μg	2 g + 10 μg	$\pm 4 \mu\text{g}$
1 g	1 g + 4 μg	1 g + 5 μg	$\pm 3 \mu\text{g}$
500 mg	500 mg - 4,0 μg	500 mg + 1,3 μg	$\pm 2,5 \mu\text{g}$
200 mg	200 mg + 0,9 μg	200 mg + 3,0 μg	$\pm 2,0 \mu\text{g}$
200* mg	200 mg + 0,2 μg	200 mg + 2,3 μg	$\pm 2,0 \mu\text{g}$
100 mg	100 mg + 2,7 μg	100 mg + 3,8 μg	$\pm 1,5 \mu\text{g}$
50 mg	50 mg - 0,6 μg	50 mg + 0,0 μg	$\pm 1,2 \mu\text{g}$
20 mg	20 mg + 0,8 μg	20 mg + 1,0 μg	$\pm 1,0 \mu\text{g}$
20* mg	20 mg + 0,5 μg	20 mg + 0,7 μg	$\pm 1,0 \mu\text{g}$
10 mg	10 mg - 0,3 μg	10 mg - 0,2 μg	$\pm 0,8 \mu\text{g}$
5 mg	5 mg + 0,7 μg	5 mg - 0,8 μg	$\pm 0,8 \mu\text{g}$
2 mg	2 mg + 0,8 μg	2 mg + 1,1 μg	$\pm 0,8 \mu\text{g}$
2* mg	2 mg + 0,1 μg	2 mg - 0,6 μg	$\pm 0,8 \mu\text{g}$
1 mg	1 mg + 0,0 μg	1 mg - 0,3 μg	$\pm 0,8 \mu\text{g}$

*Drugi uteg jednake nazivne mase

Desetkilogramski komparator C 10 000 S+YLA 01 C ima iskazani normni odmak $\pm 0,1 \text{ mg}$, odnosno $\pm 1 \cdot 10^{-8}$ u relativnom iskazu i razlučivanje $10 \mu\text{g}$. Pedesetgramska komparator, s označkom C 50 S, ima iskazani normni odmak $\pm 3 \mu\text{g}$ i razlučivanje $1 \mu\text{g}$, a petgramska (C 5 S) ima $\pm 1 \mu\text{g}$ i $0,1 \mu\text{g}$.

DRŽAVNI NADZOR VAGA I UTEGA

Državni mjeriteljski propisi. Prema hrvatskoj državnoj naredbi iz 1994. godine obvezno se nadziru mjerila koja se upotrebljavaju u trgovackim poslovima te pri utvrđivanju poreza i davanja; u pripremi službenih izvještaja u sudbenim i upravnim postupcima; pri katastarskim izmjerama; u zdravstvu, veterinarstvu, dijagnostici i medicinskoj obradbi ljudi i životinja te ispitivanju lijekova; u zaštiti okoliša, zaštiti na radu i od nesreća; u nadzoru prometa i u tarifnim sustavima. Mjeriteljski zakon iz 1994. ovlašćuje, među ostalim, ravnatelja hrvatskog državnog mjeriteljskog i normacijskog zavoda da propisuje mjeriteljske zahtjeve kojima mjerila moraju udovoljavati što se tiče mjeriteljskih zna-

čajki, da propisuje način obavljanja tipnog ispitivanja mjerila i da određuje razdoblja u kojima se mjerila moraju ponovno ovjeravati. Ravnatelj je 1996. naredbom propisao ovjerna razdoblja unutar kojih se mjerila moraju ponovno ovjeriti. Za vage i utege ovjerna su razdoblja 1, 2 i 5 godina, prema ovom rasporedu:

Jednogodišnje razdoblje: neautomatske vage točnosnih razreda III i III nosivosti više od 9 t; automatske vage u prijenosnoj vrpci točnosnih razreda I i 2; automatske vage točnosnih razreda A i B; građevinske vage; vage za mjerjenje mase motornih vozila u pokretu; vage s uređajem za tiskanje naljepnica prilikom izrade pakovina; automatske nadzorne vage; automatske vage razvrstavalice; utezi točnosnih razreda F₁, F₂, M₁, M₂ i M₃.

Dvogodišnje razdoblje: neautomatske vage prvog, drugog, trećeg i četvrtog točnosnog razreda nosivosti do 9 t; utezi točnosnih razreda E₁ i E₂.

Petogodišnje razdoblje: mjerne naprave vaga nosivosti više od 9 t.

Do 30. kolovoza 1996. Republika Hrvatska donijela je sljedeće mjeriteljske zakone, odluke, naredbe i pravilnike:

Zakon o preuzimanju Zakona o mjernim jedinicama i mjerilima koji se u Republici Hrvatskoj primjenjuje kao republički zakon (Narodne novine, broj 53 od 8. listopada 1991., str. 1547). Napomena: Prema tom zakonu Republika Hrvatska preuzeala je oko 450 jugoslavenskih mjeriteljskih propisa. Oni što su doneseni do 31. siječnja 1987. registrirani su u časopisu Mjeriteljski vjesnik, str. 120, 199, 288, 378 i 563,

Zakon o ustrojstvu i djelokrugu ministarstava i državnih upravnih organizacija (NN, 72/94, str. 2149),

Zakon o mjernim jedinicama (NN, 58/93, str. 1469),

Zakon o mjeriteljskoj djelatnosti (NN, 11/94, str. 252; ispravak u 37/94, str. 1353),

Odluka o visini i načinu plaćanja naknada za pokriće troškova tipnog ispitivanja mjerila, pregleda etalona, uzoraka referentnih tvari i mjerila (i Tarifa) (NN, 49/92, str. 1178),

Podatak o vrijednosti boda za plaćanje naknada za pokriće troškova za ispitivanje mjerila, pregleda etalona, uzoraka referentnih tvari i mjerila (NN, 83/93, str. 1953),

Naredbu o žigovima i ispravama kojima se ovjerava ispravnost mjerila (NN, 93/94, str. 2607),

Naredbu o vrstama mjerila za koja se provodi mjeriteljski nadzor (NN, 93/94, str. 2615; dopuna u 15/95, str. 509),

Naredbu o razdobljima za ponovno umjeravanje etalona i ovjernim razdobljima za ponovno ovjeravanje mjerila (NN, 50/96, str. 2158),

Pravilnik o službenoj iskaznici djelatnika ovlaštenih za mjeriteljski nadzor (NN, 25/94, str. 882),

Pravilnik o uvjetima za ovlašćivanje ovlaštenih mjeriteljskih laboratorijsa za ovjeravanje i ugradnju uredaja za nadzor rada vozača i kretanja vozila u cestovnom prometu (NN, 22/95, str. 681),

Pravilnik o mjeriteljskim zahtjevima za uklopne satove za upravljanje tarifom i potrošnjom (NN, 42/95, str. 1259),

Pravilnik o mjeriteljskim zahtjevima za statička brojila djelatne električne energije razreda točnosti I i 2 (NN, 42/95, str. 1262),

Pravilnik o mjeriteljskim zahtjevima za uredaje kojima se nadzire rad vozača i kretanje vozila u cestovnom prometu (NN, 44/95, str. 1310),

Pravilnik o mjeriteljskim zahtjevima za taksometre (NN, 13/96, str. 574),

Pravilnik o uvjetima za ovlašćivanje ovlaštenih mjeriteljskih laboratorijsa za ovjeravanje i ugradnju taksometara (NN, 40/96, str. 1494),

Pravilnik o mjeriteljskim zahtjevima za vlagomjere kojima se mjeri vlažnost zrna žitarica i sjemenki uljarica (NN, 44/96, str. 1631).

Međunarodne mjeriteljske preporuke OIML podloga su za izradbu državnih (nacionalnih) mjeriteljskih propisa. Međunarodna organizacija za zakonsko mjeriteljstvo (OIML – Organisation Internationale de Métrologie Légale) osnovana je u jesen 1955. sa sjedištem u Parizu. U naše doba organizaciju tvori pedesetak država članica i četrdesetak dopisnih država članica. Republika Hrvatska je dopisna članica od 1. prosinca 1993. godine.

Organizacija OIML izdaje posebno na francuskom i posebno na engleskom jeziku međunarodne preporuke (R – International Recommendations), međunarodne dokumente (D – International Documents), rječnike (V – Vocabularies), ostale publikacije (P – Publications) i časopis Bulletin OIML.

Hrvatski prijevodi naslova onih izdanja organizacije OIML koja se odnose na vage, utege i okolnosti u vezi s njima, sa stanjem 31. srpnja 1996. godine (iskazana godina označuje kada je odobreno najnovije izdanie):

R 15 – Mjerila prividne gustoće žitarica, 1974,

R 33 – Dogovorno vrijednost rezultata vaganja u zraku, 1980,

R 42 – Kovinski žigovi za ovjerovaljive, 1982,

R 47 – Etalonski utezi za ispitivanje vaga velike nosivosti, 1980,

R 50 – Automatske vage s neprekidnim zbrajanjem (vaganje na vrpci), 1994,

R 51 – Automatske vage razvrstavalice. Dio 1: Mjeriteljski i tehnički zahtjevi. Ispitivanje, 1996,

R 51 – Automatske vage razvrstavalice. Dio 2: Oblik ispitnog izvještaja, 1996,

R 52 – Radni šesterokutni utezi od 100 g do 50 kg, 1980,

- R 60 – Mjeriteljski propisi za teretne ćelije, 1992; Dodatak A: Ispitni izvještaj, 1994,
 R 61 – 1 – Automatski gravimetrijski dozatori. Dio 1: Mjeriteljski i tehnički zahtjevi (u tisku, 1996),
 R 61 – 2 – Automatski gravimetrijski dozatori. Dio 2: Oblik ispitnog izvještaja (u tisku, 1996),
 R 74 – Elektroničke vase, 1994,
 R 76 – 1 – Neautomatske vase. Dio 1: Mjeriteljski i tehnički zahtjevi. Ispitivanje, 1992; Promjena br. 1, 1994,
 R 76 – 2 – Neautomatske vase. Dio 2: Izvještaj o tipnom ispitivanju, 1994; Promjena br. 1, 1996,
 R 106 – Automatske tračničke vase, 1994; Dodatak: Ispitni postupci i oblik ispitnog izvještaja (u tisku, 1996),
 R 107 – Automatske vase s neprekidnim zbrajanjem i diskontinuiranim umjeravanjem, 1994; Dodatak: Ispitni postupci i oblik ispitnog izvještaja (u tisku, 1996),
 R 111 – Utezi točnosti razreda E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₂, M₃, 1996,
 D 01 – Mjeriteljski zakon, 1975,
 D 02 – Zakonite mjerne jedinice (u tijeku je izmjena, 1966),
 D 03 – Zakonska kvalifikacija mjerila, 1979,
 D 05 – Načela uspostavljanja shema umjeravanja mjerila, 1982,
 D 06 – Dokumentacija o etalonima i umjernim spravama, 1983,
 D 08 – Načela izbora, službenog priznavanja, uporabe i pohrane etalona, 1984,
 D 09 – Načela mjeriteljskog nadzora, 1984,
 D 10 – Savjetnik za određivanje razdoblja ponovnog umjeravanja mjerne opreme što se upotrebljava u ispitivalištima, 1984,
 D 11 – Opći zahtjevi za elektronička mjerila, 1984,
 D 12 – Područja uporabe mjerila koja podliježu ovjeri, 1986,
 D 13 – Odrednice za dvostrano i mnogostrano priznavanje ispitnih rezultata tipnih ispitivanja i ovjera, 1986,
 D 14 – Ospozivljavanje osoblja u zakonskom mjeriteljstvu, 1989,
 D 15 – Načela izbora ispitnih značajki mjerila, 1986,
 D 16 – Načela osiguranja mjeriteljskog nadzora, 1986,
 D 18 – Opća načela mjerne uporabe ovjerenih referentnih materijala, 1987,
 D 19 – Tipno ispitivanje i tipno odobrenje, 1988,
 D 20 – Prva i daljnje ovjere mjerila i mjernih procesa, 1988,
 D 23 – Načela mjeriteljskog nadzora ovjernih uredaja, 1993,
 V 01 – Rječnik zakonskog mjeriteljstva (francusko-engleski), 1978,
 V 02 – Međunarodni rječnik temeljnih i općih mjeriteljskih naziva (francusko-engleski), 1993.

Mjeriteljske odrednice Europske zajednice druga su podloga za izradbu europskih državnih mjeriteljskih propisa. Namjena je odrednicā smanjivanje trgovinskih zapreka među državama članicama. Tehničke trgovinske zapreke uzrokuju razlike među propisima kojima se štite javni interesi (zdravlje, hrana, sigurnost, okoliš i dr.), razlike među ispitnim i potvrđnim postupcima te razlike među industrijskim normama.

Početkom 1996. države članice EZ obvezuju ove odrednice u vezi s vagama i utezima:

Neautomatske vase (1990, broj 384; prva promjena 1993, broj 68),
 Automatske vase za neprekidno vaganje (1975, broj 410),

Automatske nadzorne vase i razvrstavalice (1978, broj 1031),

Bločni utezi 5 do 50 kg i valjkasti utezi 1 g do 10 kg srednje točnosti (1971, broj 317),
 Utezi 1 mg do 50 kg viših razreda točnosti (1974, broj 148).

Ostale mjeriteljske odrednice Europske zajednice registrirane su u časopisu Mjeriteljski vjesnik, str. 650 i 1277.

Mjeriteljski zahtjevi za vase. Preporuka se OIML R 76 nazivno odnosi samo na neautomatske vase, tj. na one koje za vrijeme mjerjenja poslužuje čovjek, npr. stavljujući i skidajući teret s pladnja. Ta je preporuka, međutim, i temelj preporukama organizacije OIML i državnim propisima za automatske vase kojima se odvaguje sipka ili tekuća tvar bez izravne čovjekove pomoći.

Organizacija OIML razvrstava neautomatske vase u četiri točnosna razreda:

prvi razred, označen znakom $\textcircled{1}$ ili $\textcircled{1}$, obuhvaća najtočnije vase; uobičajili su se nazivi: fine vase, vrlo točne vase, vase osobite točnosti;

drugi razred, označen znakom \textcircled{II} ili \textcircled{II} , obuhvaća vase koje se označuju kao precizne vase, točne vase, vase velike točnosti;

treći razred, označen znakom \textcircled{III} ili \textcircled{III} , obuhvaća vase koje se najčešće nazivaju trgovackim vagama i vagama srednje točnosti;

četvrti razred, označen znakom \textcircled{IV} ili \textcircled{IV} , obuhvaća najmanje točne vase; uobičajili su se nazivi: grube vase, vase obične točnosti, vase obične preciznosti.

Pokazna naprava vase smije iskazivati mjereni rezultat samo s pet masenih mjernih jedinica. To su: mikrogram (μg), miligram (mg), gram (g), kilogram (kg) i tona (t). Međusobni su odnosi: $\mu\text{g} = 10^{-6}\text{ g}$, $\text{mg} = 10^{-3}\text{ g}$, $\text{kg} = 10^3\text{ g}$, $t = 10^3\text{ kg}$. Organizacija OIML dopušta uporabu jedinice metrički karat (ct=0,2 g) za posebne namjene, npr. u prometu dragulja.

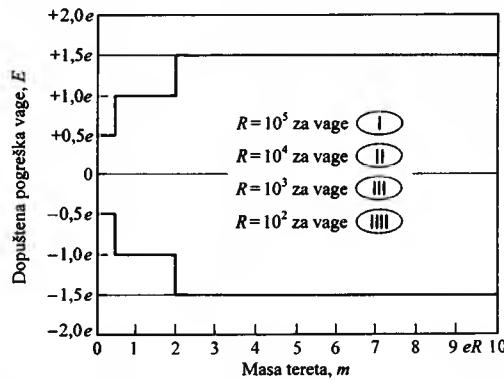
Stoljetno vagarsko iskustvo naputilo je organizaciju OIML da četiri točnosna razreda oblikuje usporednim propisivanjem:
 a) vrijednosti ovjernog podjeljka e i vrijednosti načina na koji se vaga (tabl. 12),

Tablica 12
MJEĐUNARODNA SVOJSTVA NEAUTOMATSKIH VAGA*

Točnosni razred vase	Vrijednost ovjernog podjeljka $e = \text{Max}/n$	Brojnost ovjernih podjeljaka, n		Najmanji teret Min
		najmanja	najveća	
Prvi razred $\textcircled{1}$	1 mg $\leq e$	50 000	neograničena	100 e
Dруги razred \textcircled{II}	1 mg $\leq e \leq 50 \text{ mg}$ 100 mg $\leq e$	100 5 000	100 000 100 000	20 e 50 e
Treći razred \textcircled{III}	100 mg $\leq e \leq 2 \text{ g}$ 5 g $\leq e$	100 500	10 000 10 000	20 e 20 e
Četvrti razred \textcircled{IV}	5 g $\leq e$	100	1 000	10 e

*Prema međunarodnoj preporuci OIML R 76

b) brojnosti ovjernih podjeljaka n u vezi s najvećom dopuštenom masom (Max u notaciji OIML) vaganog tereta (tabl. 12),



Sl. 50. Ovisnost dopuštena pogreška vase o masi vaganog tereta pri prvom ovjeravanju; e vrijednost ovjernog podjeljka

c) najveće dopuštene pogreške E vase pri prvom ovjeravanju u tri razine koje se odnose kao 1:2:3 (tabl. 13, sl. 50), što s pretodredenim e i n ujedno propisuje dopuštene relativne pogreške $f = E/m$ u ovisnosti o masi tereta $m = n \cdot e$ (tabl. 13, sl. 51),

d) najmanje dopuštene mase (Min u notaciji OIML) vaganoga tereta (tabl. 12), čime se onemogućuje beskrajani porast relativne mjerne pogreške (tabl. 14, sl. 51),

Tablica 13
NAJVEĆE DOPUŠTENE POGREŠKE NEAUTOMATSKIH VAGA PRI PRVOM OVJERAVANJU*

Točnosni razred vase	Najveće dopuštene pogreške vase pri prvom ovjeravanju		
	$E = \pm 0,5 e$	$E = \pm 1 e$	$E = \pm 1,5 e$
Masa $m = n \cdot e$ vaganoga tereta			
Prvi razred $\textcircled{1}$	100 e ... 0,5 · 10^5 e	(0,5 ... 2) · 10^5 e	(2 ... ∞) · 10^5 e
Dруги razred \textcircled{II}	20 e ... 0,5 · 10^4 e	(0,5 ... 2) · 10^4 e	(2 ... 10) · 10^4 e
Treći razred \textcircled{III}	20 e ... 0,5 · 10^3 e	(0,5 ... 2) · 10^3 e	(2 ... 10) · 10^3 e
Četvrti razred \textcircled{IV}	10 e ... 0,5 · 10^2 e	(0,5 ... 2) · 10^2 e	(2 ... 10) · 10^2 e
Pripadne relativne pogreške $f = E/m$			
	$f = \pm 1/(2n)$	$f = \pm 1/n$	$f = \pm 3/(2n)$
Prvi razred $\textcircled{1}$	$\pm 0,5 \cdot 10^{-2} \dots \pm 1 \cdot 10^{-5}$	$\pm (2 \dots 0,5) \cdot 10^{-5}$	$\pm (0,75 \dots 0) \cdot 10^{-5}$
Dруги razred \textcircled{II}	$\pm 2,5 \cdot 10^{-2} \dots \pm 1 \cdot 10^{-4}$	$\pm (2 \dots 0,5) \cdot 10^{-4}$	$\pm (0,75 \dots 0,15) \cdot 10^{-4}$
Treći razred \textcircled{III}	$\pm 2,5 \cdot 10^{-2} \dots \pm 1 \cdot 10^{-3}$	$\pm (2 \dots 0,5) \cdot 10^{-3}$	$\pm (0,75 \dots 0,15) \cdot 10^{-3}$
Četvrti razred \textcircled{IV}	$\pm 5 \cdot 10^{-2} \dots \pm 1 \cdot 10^{-2}$	$\pm (2 \dots 0,5) \cdot 10^{-2}$	$\pm (0,75 \dots 0,15) \cdot 10^{-2}$

*Prema međunarodnoj preporuci OIML R 76

Tablica 14

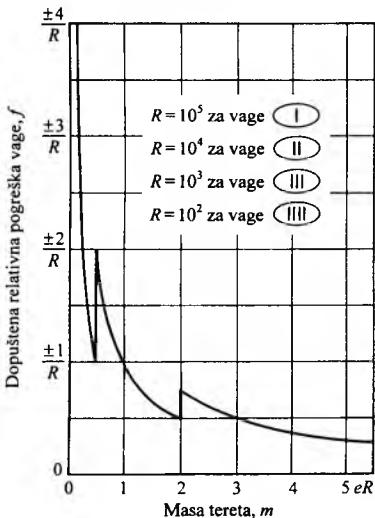
DOPUŠTENE RELATIVNE POGREŠKE NEAUTOMATSKIH VAGA PRI NAJMANJEM I PRI NAJVJEĆEM DOPUŠTENOM TERETU

Točnosni razred vaga	Relativna pogreška pri teretu	
	Min	Max
Prvi razred (I)	$\pm 0,5 \cdot 10^{-2}$	0*
Drugi razred (II)	$\pm 2,5 \cdot 10^{-2}$ $\pm 1 \cdot 10^{-2}$	$\pm 1,5 \cdot 10^{-5}$ $\pm 1,5 \cdot 10^{-5}$
Treći razred (III)	$\pm 2,5 \cdot 10^{-2}$	$\pm 1,5 \cdot 10^{-4}$
Četvrti razred (III)	$\pm 5 \cdot 10^{-2}$	$\pm 1,5 \cdot 10^{-3}$

*Teoretski, pri beskrajno velikoj masi tereta

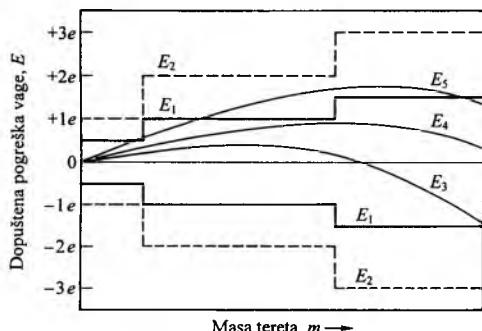
e) dvostrukе dopuštene pogreške za vase u uporabi (crtkano na sl. 52).

Pojam *podjeljak* potječe iz tradicionalnog iskazivanja mernog rezultata pokaznom napravom izrađenom u obliku označene ljestvice i kazaljke. Takva se ljestvica (skala) sastoji od niza oznaka, npr. crtica, koje se ponavljaju u jednakim razmacima i time tvore ljestvicu. Ponavljeni ljestvični lik, npr. razmak omeden dvjema uzastopnim crticama, zove se *podjeljak*, *razdjel*, *razdio*. U vase crticice iskazuju izmjerenu *masu* vaganoga tereta. Zato ljestvični podjeljak predstavlja razliku masa koje pripadaju uzastopnim crticama. Ta se masena razlika zove (*masena*) *vrijednost podjeljka* i označuje slovom *d*. Riječ u zagradi može se ispustiti ako nema opasnosti od zabune. Ima li vase digitalni pokazni uređaj, naziv *vrijednost podjeljka* označuje razliku dviju uzastopno iskazanih masenih vrijednosti na zaslonu ili u ispisu.



Sl. 51. Ovisnost dopuštene relativne pogreške vase o masi vaganog tereta pri prvom ovjeravanju

Vrijednost podjeljka (*d*) stvarno je obilježje vase, nacrtano na ljestvici ili pohranjeno u pamćenju digitalne naprave. Radi jedinstvenog propisivanja mjeriteljskih zahtjeva za sve ovjerljive vase, rabi se pojma *vrijednost ovjernog podjeljka* (*e*). Taj dogovorni pojma organizacija OIML definira drugim stupcem tablice 12 i jednadžbama



Sl. 52. Definicije, međusobni odnosi i ovisnost pogrešaka vase o masi vaganog tereta

$$d < e \leq 10d,$$

$$e = 10^r g$$
(47)

gdje je *r* pozitivan ili negativan cijeli broj ili niština. Osim toga, organizacija OIML propisuje tri oblika vrijednosti (stvarnog) podjeljka: $d = 1 \cdot 10^r g$, $d = 2 \cdot 10^r g$ i $d = 5 \cdot 10^r g$. Prema tim pravilima dobivaju se, npr., ovi parovi vrijednosti stvarnog i ovjernog podjeljka: $d/e = 0,1 g/1 g$; $0,2 g/1 g$; $0,5 g/1 g$. Iznimka je vaga prvoga točnosnog razreda sa $d < 1 mg$, za koju je $e = 1 mg$. Dodatno, preporuka OIML R 76 određuje $e = d$ za one vase koje nemaju vanjski pokazni uređaj nego samo vlastitu pokaznu ljestvicu.

Za jednopodručne vase proizvođač odabire vrijednost *e* unutar opisanih pravila. Za višepodručne vase proizvođač mora udovoljiti još i zahtjevu da masa *Max* nižeg područja bude jednaka masi *Min* višeg područja. Taj zahtjev ilustrira tablica 15 za tropodručnu vodu razreda (III). Brojnost *n* ovjernih podjeljaka izračunana je s pomoću jednadžbe $n = Max/e$.

Tablica 15
PRIMJER MJEŘITELJSKIH SVOJSTAVA VIŠEPODRUČNE VAGE

Mjeriteljsko svojstvo	Područje		
	prvo	drugo	treće
Min	20 g	2 kg	5 kg
Max	2 kg	5 kg	15 kg
<i>e</i>	1 g	2 g	10 g
<i>n</i>	2000	2500	1500

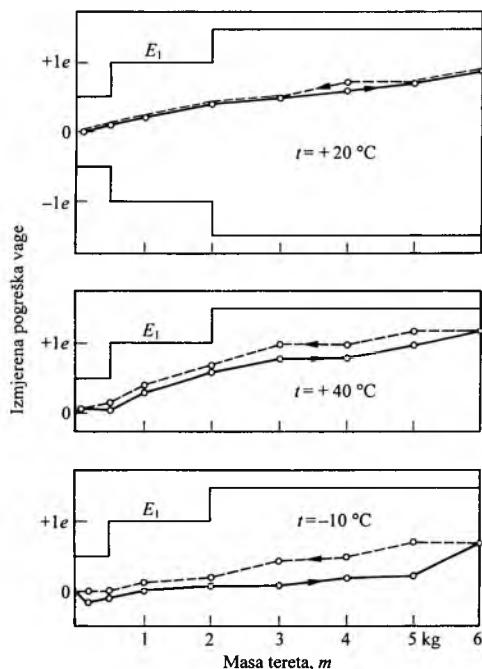
Mjeriteljska i druga svojstva raznovrsnih *automatskih vase* određuju međunarodne preporuke OIML broj 50, 51, 61, 106 i 107. Odredbe tih preporuka u pravilu proglašavaju obvezna mjeriteljska zakonodavstva svih država uključenih u međunarodnu trgovinu.

Tipno ispitivanje vase omogućuje donošenje prosudbe o tome hoće li neka vrsta vase u jednogodišnjem ili dvogodišnjem razdoblju između dviju obveznih ovjera zadržati iskazana mjeriteljska i druga svojstva. Tipno odobrenje dobiva od mjerodavne tehničke vlasti onaj tip vase koji je prilikom ispitivanja udovoljio državnim propisima. Prvoj (početnoj) i daljim ovjerama smiju se podvrgnuti samo vase s tipnim odobrenjem.

Postupak tipnog odobravanja vase, uključivo i tipno ispitivanje, traje 2 do 12 mjeseci, već prema složenosti predloženog tipa vase i uvedenim novotarijama. Obavljaju se mjeriteljsko i funkcionalno ispitivanje. U sklopu mjeriteljskog ispitivanja prosudba se temelji na ovisnosti mjerne pogreške vase o masi vaganog tereta u polju najveće dopuštene pogreške E_1 prilikom prve ovjere, odnosno u polju najveće dopuštene pogreške E_2 tijekom uporabe vase (crtkano na slici 52). Pogreška se pritom definira kao razlika vrijednosti iskazane pokaznom napravom vase i mase vaganog ispitnog utega. Pogreška E_3 pri referentnim okolnostima mora u valjane vase biti unutar polja E_1 . Krivulja E_4 prikazuje povećanu pogrešku vase zbog djelovanja utjecajnih i poremećajnih veličina. O mjeriteljskim propisima ovisi smije li krivulja E_4 izaći iz polja E_1 . Krivulja E_5 prikazuje pogrešku vase nakon ispita izdržljivosti. Razlika $E_3 - E_5$ predstavlja dodatnu pogrešku uzrokovana tim dugotrajnim ispitom.

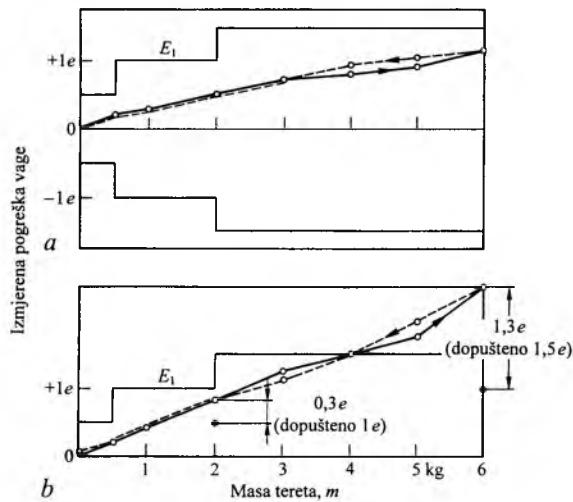
Preporuka OIML R 76 određuje da neautomatske vase svih četiriju točnosnih razreda moraju imati propisana mjeriteljska svojstva u temperaturnom rasponu od $-10^\circ C$ do $+40^\circ C$ ako na njima nisu iskazani niži rasponi. Najuži iskazani rasponi smiju biti: $30^\circ C$ za vase četvrtog i trećeg razreda, $15^\circ C$ za vase drugog razreda te $5^\circ C$ za vase prvog razreda. Ovisnost točnosti vase pri najmanje tri temperature u tom rasponu mora se istražiti prilikom tipnog ispitivanja. Slika 53 opisuje rezultat ispitivanja trgovacke stolne vase s digitalnom pokaznom napravom pri temperaturama $+20^\circ C$, $+40^\circ C$ i $-10^\circ C$. Pogreška je mjerena pri povećavanju tereta od *Min* do *Max* = 6 kg i pri smanjivanju tereta (crtkano). Opoža se razdvajanje uzlazne i silazne krivulje (histereza) kad se radna temperatura bitno odmakne od $20^\circ C$, ali je vase ispunila zahtjeve jer je pogreška ostala unutar polja E_1 (sl. 52).

Još veće promjene krivulje pogreške $E(m)$ nastaju prilikom tipnog ispitivanja za vrijeme ispita izdržljivosti. Računa se, nai-



Sl. 53. Ovisnost pogreške trgovacke stolne vase nosivosti 6 kg pri temperaturama $+20^{\circ}\text{C}$, $+40^{\circ}\text{C}$ i -10°C

me, da se u jednom ovjernom razdoblju vaga prvog razreda optereći do Max i rastereti do ništice ~ 50 tisuća puta, vaga drugog do četvrtog razreda ~ 200 tisuća do 500 tisuća puta, a uređaj za iskazivanje cijene oko milijun puta. Tolikim se promjenama opterećenja u neprekinutom pokusu izlažu vase prilikom ispitivanja izdržljivosti. Pošto je prije spomenuta stolna vaga s digitalnom pokaznom napravom 230 tisuća puta opterećena i rasterećena petkilogramskim utegom, prvotna se krivulja pogreške (sl. 54 a) bitno podigla (sl. 54 b), ali nije prekoracila propisima dopuštene granice. Dvije pune točke označuju pogrešku vase prije ispitivanja izdržljivosti.



Sl. 54. Pogreška vase prije (a) i nakon (b) 230 tisuća opterećenja i rasterećenja petkilogramskim utegom

Međunarodne preporuke OIML i državni mjeriteljski propisi nalažu da se prilikom tipnog ispitivanja vase provjere ili izmjere brojna svojstva. Tako se u sklopu funkcionalnog ispitivanja utvrđuju: mogućnosti uporabe, djelotvornost pokaznih naprava, tipkovnica, uređaja za tariranje, uređaja za namještanje ništice, uređaja za isključivanje i uključivanje utega, tiskaljki itd., možebitne mogućnosti pogrešnog posluživanja i upravljanja, mogućnosti otkrivanja pogrešaka, odzivi na poneke vanjske utjecaje kao što su kosi položaj, udarno opterećivanje i rasterećivanje, podizanje mosta vase, vodoravno udarno opterećenje, elektromagnetski poremećajni utjecaji.

U sklopu pak mjeriteljskog dijela tipnog ispitivanja mjerjenjem se doznaju: mjerena pogreška vase pri najmanje tri temperature, mjerena pogreška pri raznim tarama, pokazna pogreška pri najvećem teretu, pomak nultočke u ovisnosti o temperaturi, ponovljivost, osjetljivost, razlučivost, osjetljivost na bočno opterećenje, osjetljivost na kosi položaj, svojstva vase tijekom osmosatnog ili četverosatnog ispitiva, odziv na uključivanje itd.

M. Brezinšćak

LIT. za svjetski vagarski temelj: M. Thiesen, Kilogrammes prototypes. Travaux et mémoires du BIPM 9(1898), 3–21. — M. J. R. Benoit, L'étalonnage des séries de poids. Travaux et mémoires du BIPM 13(1907), 1–48. — Ch. Éd. Guillaume, L'œuvre du Bureau international des poids et mesures. Gauthier-Villars, Paris 1927. — A. Bonhoure, Kilogrammes prototypes. Travaux et mémoires du BIPM 22(1966), C1–82. — M. Brezinšćak, Mjerjenje i računanje u tehniči i znanosti. Tehnička knjiga, Zagreb 1971. — H. E. Almer, National Bureau of Standards One Kilogram Balance NBS No. 2. Journal of Research of the NBS 76 C(1972), No. 1–2, 1–10. — M. Brezinšćak, Procjenjivanje mjerne nesigurnosti (Razmotreno na metodama preciznog mjerjenja mase). Savezni zavod za mjeru i dragocjene kovine, Beograd 1976. — J. Skákala, F. Silný, Metrologie hmotnosti (Presne vážení v laboratořích). UNM, Praha 1976. — R. S. Davis, Recalibration of the U. S. National Prototype Kilogram. Journal of Research of the NBS 90(1985), No. 4, 263–283. — M. Brezinšćak, Nestalnost mase vrhunskih etalona. Mjeriteljski vjesnik 5(1987), No. 4, 637–642. — M. Kochsiek, Derzeitige Genauigkeitsgrenzen bei 1 kg-Komparatorwaagen. PTB-Mitteilungen 97(1987), No. 3, 179–186. — T. J. Quinn et al., A 1 kg Mass Comparator Using Flexure-Strip Suspensions: Preliminary Results. Metrologia 23(1986/87), No. 2, 87–100. — D. Baumgärtl, New Weighing Center at the Office of Weights and Measures for Legal Metrology in West-Berlin. Bulletin OIML 30(1989), No. 116, 11–20. — M. Kochsiek, Handbuch des Wägens. Vieweg, Braunschweig-Wiesbaden² 1989. — S. L. Lewis et al., An Intercomparison of Standards of Mass and Mass Measurement Techniques at 50 g and 10 g. Between Four European National Standards Laboratories. Metrologia 27(1990), No. 4, 233–244. — J. G. Ulrich, Ein Spezialgewichtsatz zur Bestimmung von OIML-Gewichtssätzen und dessen Anwendung. PTB-Mitteilungen 100(1990), No. 2, 113–118. — M. Gläser et al., Automation of High-Accuracy Weighing at some Western European National Measurement Laboratories. PTB-Mitteilungen 102(1992), No. 3, 163–171. — G. Girard, The Third Periodic Verification of National Prototypes of the Kilogram (1988–1992). Metrologia 31(1994), No. 4, 317–336.

LIT. za tehničke izvedbe vase: K. E. Haeberle, Zehntausend Jahre Waage. Bizerba, Balingen 1967. — M. Brezinšćak, Mjerjenje i računanje u tehniči i znanosti. Tehnička knjiga, Zagreb 1971. — J. Skákala, F. Silný, Metrologie hmotnosti. UNM, Praha 1976. — D. Profos, Handbuch der industriellen Messtechnik. Vulkan Verlag, Essen 1978. — J. Hasselbach, Betriebsmesstechnik, u djelu: Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie, Band 5. Verlag Chemie, Weinheim⁴ 1980. — Č. I. Gauzner, C. C. Kubilus, A. P. Osokina, A. H. Pavlovskij, Izmerenie massy, obema i pliostnosti. Izdatelstvo staničarow, Moskva 1982. — NBS Handbook 44, Specifications, Tolerances, and other Technical Requirements for Weighing and Measuring Devices (as adopted by the 69th National Conference on Weights and Measures 1984). National Bureau of Standards, Gaithersburg 1984. — M. Kochsiek, Handbuch des Wägens. Vieweg, Braunschweig-Wiesbaden² 1989.

LIT. za međunarodno normirane utege: Recommandation OIML Nos 111, 33, 47, 52. — S. L. Lewis et al., An Intercomparison of Standards of Mass and Mass Measurement Techniques at 50 g and 10 g. Between Four European National Standards Laboratories. Metrologia 27(1990), No. 4, 233–244. — J. G. Ulrich, Ein Spezialgewichtsatz zur Bestimmung von OIML-Gewichtssätzen und dessen Anwendung. PTB-Mitteilungen 100(1990), No. 2, 113–118. — M. Gläser et al., Automation of High-Accuracy Weighing at some Western European National Measurement Laboratories. PTB-Mitteilungen 102(1992), No. 3, 163–171.

M. Brezinšćak Z. Jakobović Z. Šoljić

VAKUUMSKA TEHNIKA, grana tehnike koja se bavi proračunom i izradbom uređaja za ostvarivanje, mjerjenje i održavanje vakuma. Pod vakuumom se razumijeva prostor u kojem se plin ili para nalaze pod tlakom nižim od atmosferskoga. Naziv potječe od latinske riječi *vacuum* praznina, prazan prostor.

Vakuumska se tehnika široko primjenjuje u industriji pri različitim tehnološkim postupcima. Važna je njezina primjena u metalurgiji, kemijskoj, farmaceutskoj i prehrabenoj industriji, elektrotehnici, elektronici, medicini itd. Glavne su prednosti primjene vakuma što se pri nižim tlakovima neki procesi odvijaju na temperaturama mnogo nižim od onih koje su potrebne kad vlada atmosferski tlak, pa se tako sprečava toplinska razgradnja materijala i štedi energija, vakuum se smatra tzv. čistom atmosferom u kojoj je bitno smanjena mogućnost onečišćenja i reakcije materijala s nepoželjnim tvarima i nečistoćom iz okoliša, vakuum olakšava transport materijala, pa se iz sirovina ili proizvoda lakše uklanjaju nečistoće, u vakuumu je mnogo manji broj sudara među česticama, tj. mnogo je veći njihov srednji slobodni