

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik 12 (1984/1985)

Številka 3

Strani 171-175

Jože Rakovec:

MERJENJE HITROSTI VETRA, 2. del

Ključne besede: fizika.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/12/731-Rakovec.pdf>

© 1985 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2010 DMFA - založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

MERJENJE HITROSTI VETRA, 2. del

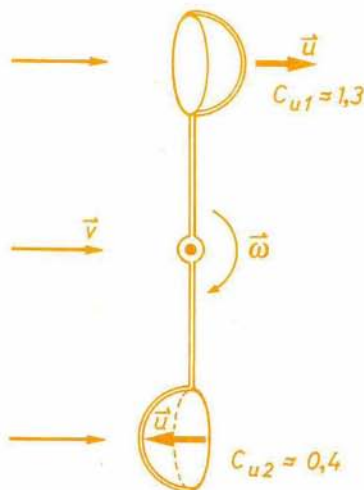
Danes za merjenje hitrosti vetra največ uporabljamo vrtljive *anemometre* z votlimi polkrogli. Ker veter piha v glavnem v horizontalni smeri (tipično razmerje med horizontalno in vertikalno komponento hitrosti je med 10^2 in 10^3), dobimo s takim anemometrom, ki je vrtljiv okrog vertikalne osi, skoraj celotno hitrost. Obenem merjenje hitrosti ni odvisno od smeri vetra. To določamo posebej s pomočjo *vetrokaza*, ki ima rep oblikovan na različne načine (glej prejšnjo številko Preseka).

Zaradi preprostosti za začetek vzemimo, da imamo na ročicah dolžine r le dve polkrogli s presekom S , ki se vrtita brez trenja v ležaju in ki sta v nekem trenutku v legi, kot je prikazana na sliki 1. Ker sta v tem trenutku votli polkrogli obrnjeni ena od vetra, druga pa v veter, sta sili *upora v sredstvu* na eno in drugo polkroglo različni. Zato se polkrogli vrtita, recimo pri stalnem vetru, ki ima hitrost \vec{v} , s kotno hitrostjo $\vec{\omega}$. Ob tem imata obodno hitrost $\vec{u} = \vec{\omega} \times \vec{r}$, ena proti vetru, druga od njega. Hitrost u pa mora biti ravno pravišnja: ob enakomernem vrtenju brez trenja ni navora na sistem, (saj se prav zato ta vrtil ne pospešeno), kar pomeni, da morata biti sili na obe polkrogli enaki. Ob upoštevanju *kvadratnega zakona upora* torej velja

$$\frac{1}{2} \rho S C_{u1} (v - u)^2 = \frac{1}{2} \rho S C_{u2} (v + u)^2$$

Odtod dobimo

$$v = u \frac{1 + \sqrt{C_{u1}/C_{u2}}}{1 - \sqrt{C_{u1}/C_{u2}}}$$



Slika 1. Vrtenje dajalnika za hitrost vetra z dvema votlima polkrogliama

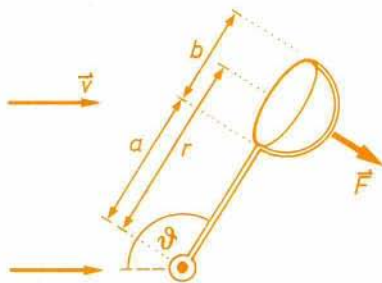
torej za vrednosti $C_{u1} \approx 1.3$ in $C_{u2} \approx 0.4$ približno velja $v \approx 3.5 u$, kar bi že bilo uporabno za približno umeritev takega anemometra: hitrost vetra je približno $3.5 \times r$ -kratna vrednost kotne hitrosti ω . Podrobnejša obravnava odkrije (kot že pri vetromeru na ploščo, prejšnja številka Preseka), da je seveda pomemben tudi dinamični vzgon, zato je treba napisati velikost tangencialne sile, ko je polkrogla v legi, ki jo določa kot θ glede na veter (slika 2a) takole:

$$F(\theta) = \frac{1}{2} \rho S (v^2 + u^2 + 2uv \cos\theta) C(\theta)$$

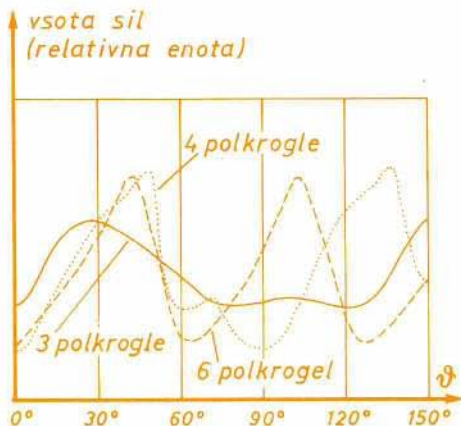
Ta sila se močno spreminja z lego polkrogle glede na veter, poleg tega pa imajo vrtljivi anemometri navadno tri, štiri, nekateri pa tudi več polkrogel. Zato se celotni navor $M = \sum F_i(\theta_j) \cdot r$ spreminja v enem obratu (slika 2b). Smiselno je določiti povprečni navor za ves obrat sistema z N polkrogliami

$$\overline{M} = \frac{N}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(\theta) \cdot r \, d\theta = \frac{1}{2} \rho S N r u^2 f(v/u)$$

Meritve kažejo, da je $f(v/u)$ npr. za sistem s tremi polkrogliami približno parabola: $f(v/u) = p + q(v/u)^2$, konstanti p in q pa sta odvisni še od konstrukcije (od razmerja med p in q , od tega, ali gre res za polkrogle ali pa so te nekoliko bolj stožčaste in podobno).



Slika 2a.



Slika 2b

Slika 2. Tangencialna sila na polkroglo se spreminja z vpadnim kotom vetra. Tudi vsota sil na ves sistem polkrogel se spreminja, v povprečju pa je preko enega obrata razmerje $1,05 : 1,00 : 1,12$ za sistem s tremi, štirimi in šestimi polkrogliami pri $a = 52$ mm in $b = 102$ mm.

Ta navor vetra na merilni sistem je potreben za premagovanje trenja v ležajih (ki ga sicer skušajo čimbolj odpraviti, ni pa povsem zanemarljivo), pa za premagovanje še kakih drugih sil, na primer magnetnih. Mnogo vrtljivih anemometrov ima namreč pod dajalnikom s polkrogلامي generator električne nateosti, ki ga dajalnik vrti, in inducirana napetost je potem tista količina, ki jo odčitamo na instrumentu. Skala instrumenta pa je narisana kar v metrih na sekundo. Vrednosti lahko tudi kam zapisujemo. Tako dobimo *anemograf*. Pišemo na pisalnik s papirjem ali pa kar na magnetno kaseto.

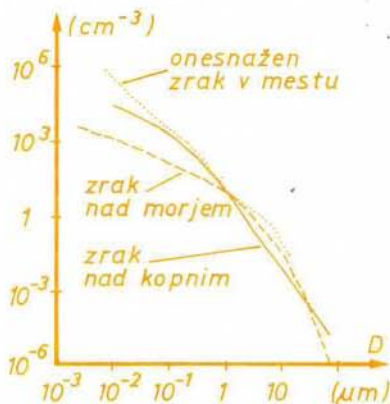
Med opisanimi anemografi je zanimiv tisti, ki ga v sodelovanju s Hidrometeorološkim zavodom SR Slovenije izdeluje Inštitut Jožef Stefan (slika 3). Ker so pri nas vetrovi po dolinah in kotlinah pogosto zelo šibki, so želeli čim nižji *prag instrumenta*, to je tisto najnižjo vrednost, pri kateri začne zanesljivo delovati. Zato so notranji navor skušali čimbolj zmanjšati. To so dosegli s posebnimi ležaji ter tako, da ne poganjajo generatorja, temveč štejejo frekvenco obratov dajalnika. Pod dajalnikom je plošča, ki ima po obodu izvrtane luknjice, nad njo je svetlobni vir, pod njo pa fotocelica, ki šteje svetlobne sunke, ko se plošča vrti. Podatke vodijo v integrator, kjer jih usklajujejo s podatki kvarčne ure, in ta integrator računa povprečne smeri in hitrosti vetra v nastavljenih časovnih intervalih od ene sekunde do več ur. Potem jih ali prikazuje na digitalni številčnici ali riše na pisalniku ali pa spravlja na magnetno kaseto za nadaljnjo uporabo – ali pa vse to skupaj. Vsa ta opravila vodi mikroročunalnik.

Principov za merjenje vetra je še več: *upor* in *dinamični vzgon* uporabljajo še anemometri na propeler, *zastojni tlak* pa Pitotova ali Prandtllova cev. Princip *ohlajevanja* zaradi vetra je osnova za nekatere preproste, pa tudi za zelo fine instrumente. Z njimi lahko merimo tridimenzionalne nepravilnosti v turbulentnem toku zraka ali pa hitrost pretakanja krvi po žilah: merimo električni tok, ki je potreben, da tanko žičko ali opno vzdržujemo pri stalni temperaturi, medtem ko snovni (zračni) tok mimo nje odnaša toploto proč. Toda vsi ti in podobni instrumenti imajo eno pomembno napako: s tem, da jih postavimo v tok, na ta tok bolj ali manj sami vplivajo in zato s samim merjenjem *pokvarimo* tisto, kar *želimo* pravzaprav *meriti*.

Pri merjenju vetra je nekaj načinov, kjer se tej nevšečnosti izognemo. Zvočni, radarski ali laserski anemometri merijo od daleč. Delajo na osnovi *sipanja* oddane energije nazaj proti izvoru, kjer jo merimo s sprejemnikom. Če se ta energija siplje na premikajočih se telesih, pride do *Dopplerjevega pojava*, do spremembe frekvence oddanega valovanja. Ta sprememba je mera za hitrost. Gre pa tudi brez upoštevanja sprememb frekvence. Oglejmo si kako!

V naravi je v zraku veliko najrazličnejših drobnih delcev: prašnih in dimnih, kapljic in kristalčkov raznih snovi ipd. Nastajajo pri tleh v naravi zaradi vetra, ob gozdnih požarih, ob vulkanskih izbruhih, rastline med cvetenjem oddajajo cvetni prah, ob razburkanem morju prskajo v zrak kapljice in tako naprej. Zadnje čase z industrializacijo tudi človek s svojimi aktivnostmi bistveno

prispeva k temu, zato jih je posebno veliko v naseljenih področjih (slika 4). Ti delci — *aerosol* jim pravimo — pa so pri tleh zaradi vrtincev v zraku nekako združeni v bolj ali manj goste (nevidne) "oblake". Veter te oblake zanaša in ker so delci majhni in lahki, ni razlike med hitrostjo vetra in hitrostjo teh oblakov aerosola. Zato so zelo primerna tarča za merjenje hitrosti vetra s pomočjo sipanja svetlobe na njih.



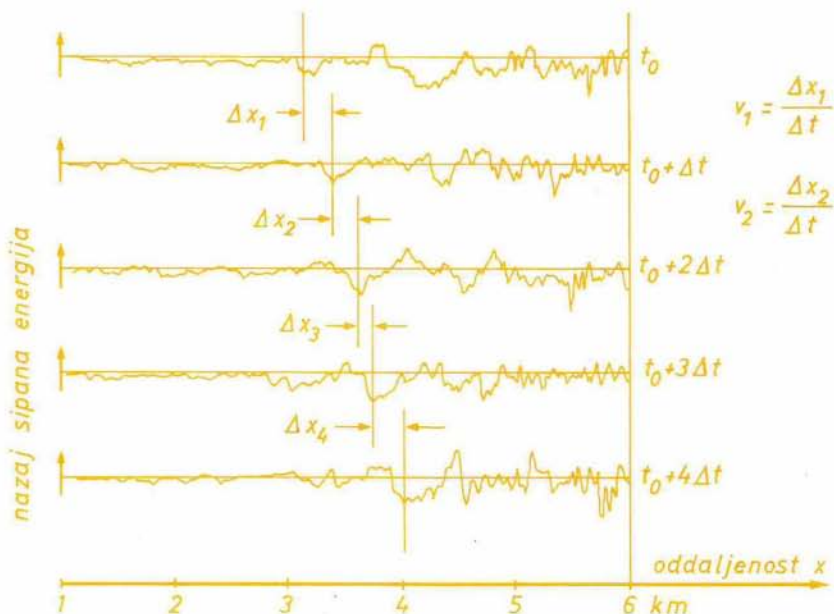
Slika 3. je objavljena na 4. strani ovitka

Slika 4. Porazdelitev števila delcev v zraku po velikosti (številska gostota $dN/d(\log D)$ v odvisnosti od premera D) v posameznih tipičnih zračnih masah.

Slika 5. Nazaj sipana energija laserskega žarka v odvisnosti od oddaljenosti, iz katere prihaja ta sipana energija. Iz pomikov značilnih oblik Δx v intervalih Δt računamo hitrost. (T_u je $\Delta t = 40$ s, vmesne slike niso narisane.)

Z laserjem, ki v zelo kratkih intervalih (približno na vsako stotinko sekunde) odda svetlobni curek trajanja okrog 10 ns ($= 10^{-8}$ s), preiskujemo zrak okrog mesta merjenja. Na aerosolu se del svetlobe sipa nazaj proti oddajniku, kjer to nazaj sipano energijo merimo s sprejemnikom. Iz zaostanka med časom oddaje in sprejema lahko izračunamo, kako daleč je posamezen oblak aerosola. Seveda dobimo veliko odbojev: od vsakega oblaka, ki je v smeri svetlobnega curka, se nekaj sipa nazaj. Od enako gostih oblakov se sicer sipa enako energije, vendar gostota te sipane energije pada s kvadratom razdalje, ko se širi po prostoru, zato dobimo od oddaljenih oblakov aerosola manj energije. Če to upoštevamo, izračunamo krivulje intenzivnosti gostote oblakov v odvisnosti od oddaljenosti, kakršne so narisane na sliki 5. Take slike dobimo v gostih časovnih intervalih (na sliki 5 so narisane le nekatere od krivulj). Zaporedne slike krivulj si zapomnimo in jih primerjamo med seboj. Iz premikov značilnih oblik v zaporednih slikah lahko izračunamo hitrost premikanja oblaka aerosola in s tem hitrost vetra na tistem mestu, ki pripada posamezni značilni obliki. Vidimo, da smo pravzaprav dobili ne le hitrost v eni točki, temveč razporeditev hitrosti vetra na premici vzdolž laserskega žarka. Še več — če z žarkom otipavamo ves prostor okrog sebe, podobno kot to dela radar, dobimo lahko z merjenji iz enega mesta celo prostorsko sliko gibanja zraka.

Seveda je skoraj odveč pripomniti, da gredo podatki iz sprejemnika pri takemle merjenju kar naravnost v računalnik ali pa vsaj v mikroročunalnik. Ob tem pa lahko nekatere podatke zavržemo in ohranimo le nekatere. To storimo



z računskimi postopki, rečemo jim *matematično filtriranje*, ali pa s pravimi, elektronskimi filtri. Če nas na primer zanima povprečna hitrost vetra, bomo zavrgli vse tiste odboje, ki prihajajo iz oblakov aerosola, ki so majhni in ki se v času hitro spreminjajo. Če pa nas zanima na primer problem razširjenja onesnaževanja v zraku (ki je podobno širjenju aerosola), pa so prav ti podatki važni, saj govorijo o turbulentnih motnjah hitrosti, torej o tem, kako se onesnaženje z vrtinci širi v vse večji prostor.

Tule pa kar končajmo, saj smo od vozlov in boforov, s katerimi smo začeli v prejšnji številki Preseka, prišli prav do današnjih dni.

Jože Rakovec

Literatura:

1. Kleinschmidt, *Handbuch der Meteorologischen Instrumente*, Berlin, Springer, 1935
2. *Meteorological Monographs, Vol 11, Meteorological Observations and Instrumentation*, Boston, American Meteorol.Soc., 1970
3. *Meteorological Office, Meteorology for Mariner*, London, H.M.S.O., 1967
4. Eloranta et al., *The Determination of Wind Speed in the Boundary Layer by Monostatic Lidar*, *J. Applied Meteorol.*, 14, 1485 – 1489 (1975)
5. *Wallace and Hobbs, Atmospheric Science*, New York, Academic Press, 1977