

UDK 621.63+533.6.071.4

Aerodinamična analiza zračne postaje

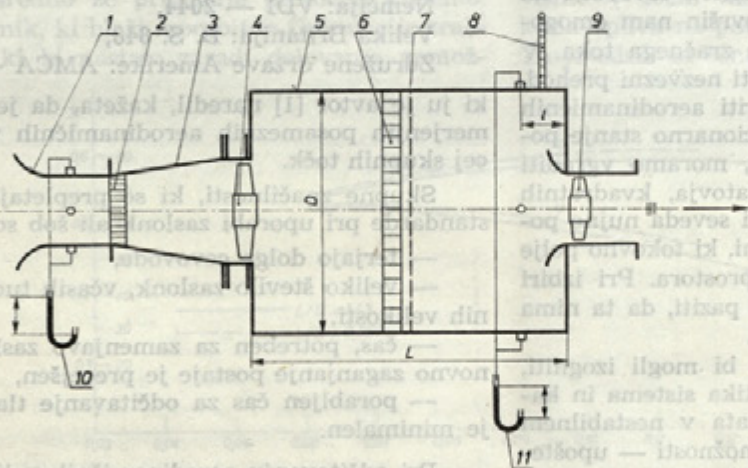
FRANC SCHWEIGER

1. Uvod

V programu Inštituta za turbinske stroje je gradnja nove zračne postaje, ki naj rabi za:

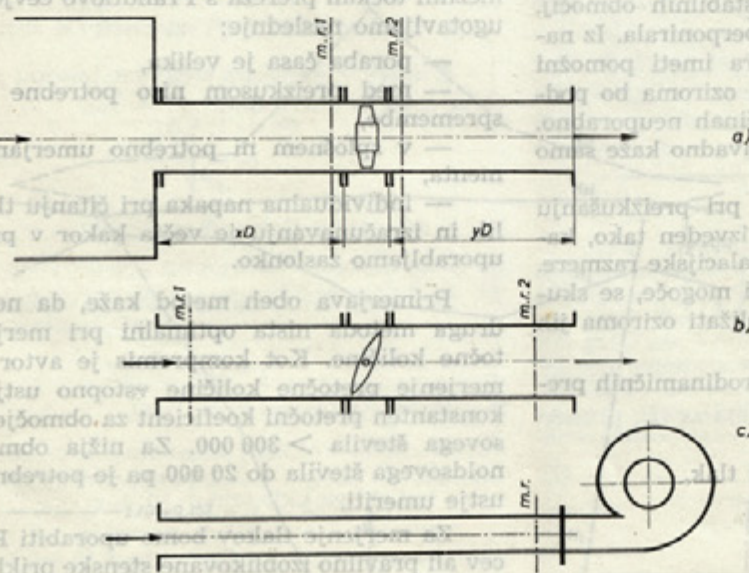
- preizkušanje aksialnih in centrifugalnih ventilatorjev,
- raziskave in razvoj ventilatorjev,
- aerodinamične raziskave na modelih hidravličnih strojev,
- osnovne aerodinamične raziskave.

Postaja bo univerzalna, tako da jo bo mogoče prirrediti za vse navedene raziskave. Osnovna zamisel je taka, da naj bi del postaje ostal stalen oziroma nespremenljiv (sl. 1), drugi del pa naj bi bil po potrebi spremenljiv (sl. 2), kakor pač zahteva raziskovalno delo. Stalni del postaje naj bi imel vgrajen merilnik pretoka, kakor tudi merilnike tlaka in to na najugodnejših mestih, ki so za to posebej predvidena. Vsestranska uporabnost postaje pa terja, da moramo imeti tudi pomožni ventilator, ki bo v večini primerov pomagal premagovati upor celotnega sistema oz. bo osnovni vir zračnega toka.



Sl. 1. Shema zračne postaje

- 1 — vstopno ustje, 2 — usmernik, 3 — sesalna cev, 4 — pomožni ventilator, 5 — kotel, 6 — usmernik, 7 — mreža, 8 — termometer, 9 — preizkušani ventilator, 10 — priključki za merjenje pretočne količine, 11 — priključki za merjenje tlakov



Sl. 2. Različni preizkusi

- preizkus ventilatorja v ceovodu,
- preizkus turbinske lopute, c) aerodinamični preizkus spirale

2. Zahteve postaje

Pri projektiranju postaje moramo upoštevati naslednje pogoje:

- postaja mora ustrezati aerodinamičnim zahtevam,
- meritve posameznih veličin morajo biti v mejah natančnosti zadevnih predpisov,
- postaja mora biti izvedena ekonomično.

Z aerodinamičnimi zahtevami razumemo oblikovanje zračnega kanala, tako da so izgube sistema čimmanjše, da se ne pojavlja odlepljanje toka, posebno v bližini mest, kjer merimo posamezne aerodinamične veličine. Profili hitrosti naj bodo turbulentni in razdelitev hitrosti po prerezu čimbolj uniformna. Tlačni priključki in njihova okolica na steni zračnega kanala morajo biti gladki, brez vdolbin ali izboklin, očiščeni, nikakor pa ne brušeni. Zračni tok ne sme pulzirati, ker to onemogoča preizkus. V nasprotnem primeru bi bili dobljeni rezultati napačni.

Zvezni prehodi z enega premera cevovoda na drugega ter ravnost stenskih površin nam omogočajo, da preprečimo odlepljanje zračnega toka. V primerih, ko smo prisiljeni izvesti nezvezni prehod, v tem področju ne smemo meriti aerodinamičnih parametrov. Da bi takšno nestacionarno stanje popravili in dobili uniformni tok, moramo vgraditi primerne usmernike v obliki satovja, kvadratnih elementov ali mreže. Ti elementi seveda nujno povečujejo upor sistema, so pa edini, ki tokovno polje popravijo z najmanjšo porabo prostora. Pri izbiri pomožnega ventilatorja moramo paziti, da ta nima nestabilnih področij obratovanja.

V primeru, če se temu ne bi mogli izogniti, moramo paziti, da se karakteristika sistema in karakteristika ventilatorja ne sekata v nestabilnem področju. Dodatno — v mejah možnosti — upoštevamo še, da pomožni ventilator in ventilator, ki ga preizkušamo nimata skupnih nestabilnih območij, ki bi se v najslabšem primeru superponirala. Iz navedenih razlogov izhaja, da mora imeti pomožni ventilator stabilno karakteristiko, oziroma bo področje pri majhnih pretočnih količinah neuporabno, saj se nestabilni gradient tlaka navadno kaže samo v tem območju.

V večini primerov, posebno pri preizkušanju ventilatorjev, mora biti preizkus izveden tako, kakor terjajo pogonske oziroma instalacijske razmere. Kadar to iz tehničnih razlogov ni mogoče, se skušamo tem razmeram čimbolj približati oziroma jih idealizirati.

Veličine, ki jih merimo pri aerodinamičnih preizkusih so naslednje:

- pretočna količina,
- totalni, statični, dinamični tlak,
- vrtilna hitrost,
- potrebna moč,
- barometriški tlak,

- temperatura okolja,
- temperatura v sistemu,
- vlažnost zraka,
- geometrične velikosti,
- šum.

Postaja kakor tudi instrumenti, ki jih uporabljamo za merjenje navedenih veličin, morajo biti:

- zanesljivi,
- natančni,
- uporabljeni v območju, v katerem je instrument najbolj občutljiv,
- morajo dopuščati ponovljivost z razsipanem v dopustnih mejah,
- in imeti ustrezno ceno.

Pregled in analiza različnih nacionalnih standardov in priporočil za preizkušanje ventilatorjev:

- Češkoslovaška: Č. S. N. — 123061,
- Belgija: SBM — 508,
- Francija: CETIAT — 1964,
- Nizozemska: NEN — 1048-II,
- Japonska: JIS — B 8330,
- Nemčija: VDI — 2044,
- Velika Britanija: B. S. 848,
- Združene države Amerike: AMCA — 210,

ki ju je avtor [1] naredil, kaže, da je pri raznih merjenjih posameznih aerodinamičnih veličin precej skupnih točk.

Skupne značilnosti, ki se prepletajo skozi vse standarde pri uporabi zaslonk ali šob so naslednje:

- terjajo dolge cevovode,
- veliko število zaslonk, včasih tudi nenavadnih velikosti,
- čas, potreben za zamenjavo zaslonk in ponovno zaganjanje postaje je precejšen,
- porabljen čas za odčitavanje tlačne razlike je minimalen.

Pri odčitavanju aerodinamičnih veličin v posameznih točkah prereza s Prandtlovo cevjo pa lahko ugotovljamo naslednje:

- poraba časa je velika,
- med preizkusom niso potrebne nikakršne spremembe,
- v splošnem ni potrebno umerjanje instrumenta,
- individualna napaka pri čitanju tlačnih razlik in izračunavanju je večja kakor v primeru, če uporabljamo zaslonko.

Primerjava obeh metod kaže, da ne prva, ne druga metoda nista optimalni pri merjenju pretočne količine. Kot kompromis je avtor izbral za merjenje pretočne količine vstopno ustje, ki ima konstanten pretočni koeficient za območje Reynoldsovega števila $> 300\,000$. Za nižja območja Reynoldsovega števila do $20\,000$ pa je potrebno vstopno ustje umeriti.

Za merjenje tlakov bomo uporabiti Prandtlovo cev ali pravilno izoblikovane stenske priključke, kar

pa je odvisno od zahtev in potreb raziskovalnega dela.

Vrtilno hitrost bomo merili z elektro-magnetnim tipalom, ki prenaša impulze v digitalni instrument, kjer hitrosti navadno odčitamo kar neposredno.

Druge veličine bomo merili glede na posebne zahteve raziskovalnega dela.

Ekonomske pogoje upoštevamo pri projektiranju postaje tako, da za predvideno postajo uporabljamo nekatere obstoječe elemente ter da vse preureditve, ki bi bile potrebne zaradi novih zahtev raziskovalnega dela, izvedemo hitro in brez posebnih stroškov.

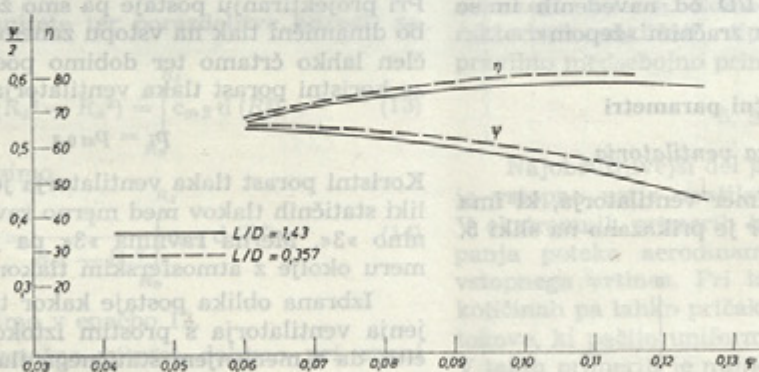
3. Osnutek postaje

Analiza vseh obravnavanih pogojev, ki jih moramo upoštevati pri projektu zračne postaje, nas pripelje do oblike postaje, prikazane na sliki 1. Stalni del postaje sestoji iz vstopnega ustja, opremljenega s štirimi stenskim priključki, ki so vezani na kolektor. Iz kolektorja odvezujemo srednji tlak, ki nam posredno že prikazuje pretočno količino. Sledi usmernik, ki blaži morebitne fluktuacije zračnega toka, ki bi nastale zaradi delovanja pomož-

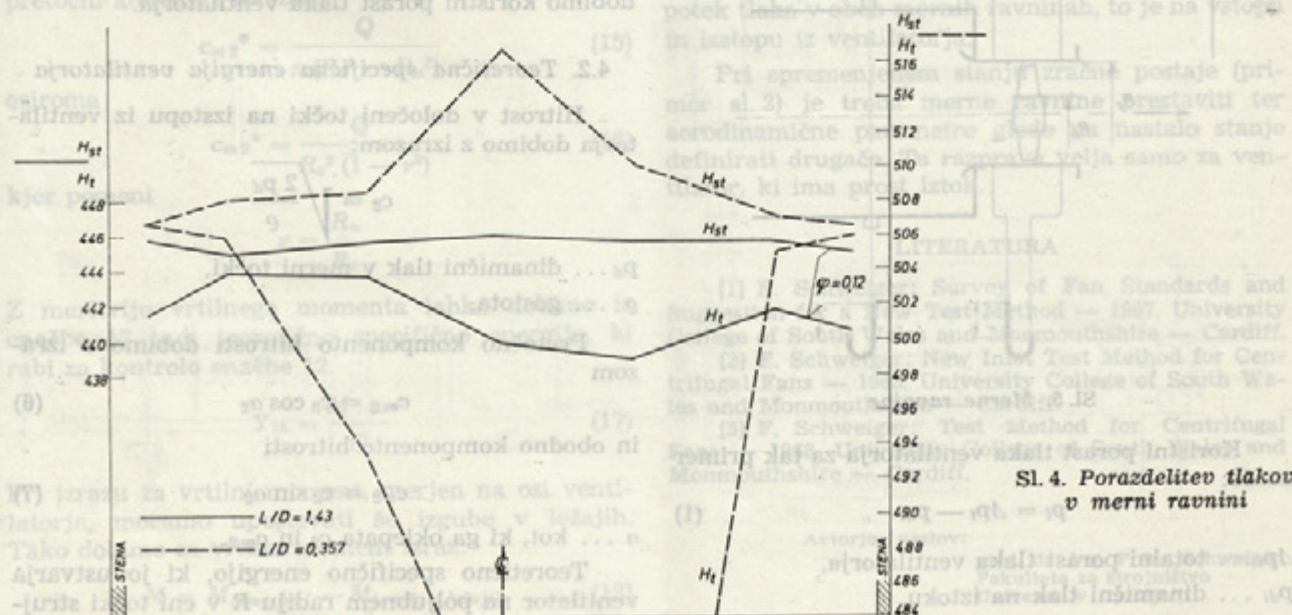
nega ventilatorja in efektivne stenske priključke na vstopnem ustju. Takoj za pomožnim ventilatorjem je nameščen umirjevalni kotel. Nezvezni prehod med sesalno cevjo in umirjevalnim kotlom povzroča nepravilnosti v zračnem toku in v porazdelitvi hitrosti. Nujno je, da porazdelitev hitrosti popravimo, tako da se čimbolj približamo uniformnemu toku. Vgraditev primerne usmernika nam v najkrajši razdalji tok popravlja in omogoča, da lahko zopet uporabljamo stenske priključke ali Prandtlovo cev za merjenje statičnega tlaka.

Pojavlja se vprašanje, kje naj bodo nameščeni stenski statični priključki, da bo vrednost odčitka enaka srednji vrednosti statičnega tlaka na izbranem prerezu? Kolikšen naj bo premer kotla, da bo dinamična višina zanemarljivo majhna in bo hitrost uniformna?

Ta vprašanja je avtor obdelal v poročilih [2], [3], kjer so podane podrobne analize. Tu naj bodo omenjene samo glavne smernice. Premer kotla naj bo prilagojen poprečni hitrosti v kotlu. Njena orientacijska vrednost naj bo v razmerju 0,3% celotne višine v točki maksimalnega izkoristka. Dolžina kotla vpliva na potek višine tlaka in na izkoristek. To je eden od osnovnih parametrov, ki odločajo o



Slika 3. Vpliv razmerja L/d na karakteristike ventilatorjev



Slika 4. Porazdelitev tlakov v merni ravnini

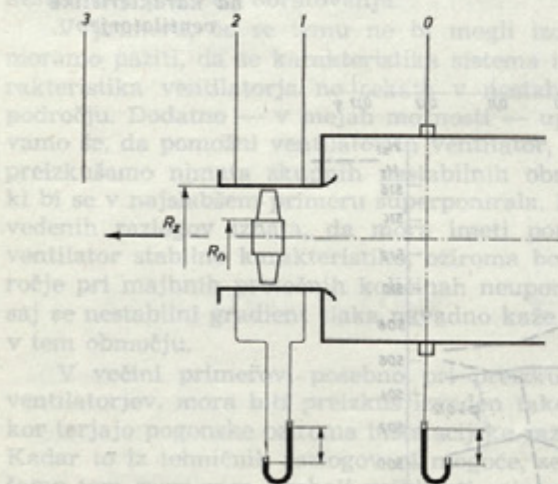
dolžini kotla. Na sliki 3 je prikazana odvisnost razmerja dolžine in premera kotla od poteka nekaterih aerodinamičnih parametrov. Porazdelitev statičnega in totalnega tlaka po prerezu v območju optimalne pretočne količine pri različnih razmerjih L/D (dolžina kotla/premer kotla) kaže, da moramo imeti neko določeno minimalno vrednost L/D (sl. 4). Eksperimentalni podatki kažejo, naj bi bila minimalna vrednost razmerja $L/D > 1$. Pri tako izbrani vrednosti razmerja L/D je potek statične in totalne višine uniformen in nimamo zaznavnih odstopanj med stenskimi odčitki statičnega tlaka in poprečno vrednostjo statičnega tlaka po premeru kotla.

Mesto odvzema statičnega tlaka na steni umirjevalne posode je eksperimentalno določeno z razmerjem $l/D \geq 0,2$, kjer pomeni l razdaljo statičnega priključka od prirobnice kotla oziroma do vstopne prirobnice ventilatorjevega okrova. Navedena razmerja veljajo za primer, ko imamo vgrajeno v kotel mrežo (zaželen je tudi usmernik) s 40 % proste površine. Splošno pa lahko rečemo, da bomo uporabljali manjše vrednosti razmerij L/D in l/D takrat, kadar nam je na voljo mreža z manjšo prosto površino, ki pa ima večji učinek na uniformno porazdelitev toka. Zaželeno je, da po možnosti uporabljamo večja razmerja l/D od navedenih in se s tem izognemo škodljivim zračnim »žepom«.

4. Aerodinamični parametri

4.1. Porast tlaka ventilatorja

Obravnavali bomo primer ventilatorja, ki ima prost iztok v ozračje, kakor je prikazano na sliki 5.



Sl. 5. Merne ravnine

Koristni porast tlaka ventilatorja za tak primer znaša:

$$p_i = \Delta p_t - p_{d1} \quad (1)$$

Δp_t ... totalni porast tlaka ventilatorja,

p_{d1} ... dinamični tlak na iztoku.

Totalni porast tlaka ventilatorja dobimo iz razlike tlakov v ravnini 3 in 0.

$$\Delta p_t = (p_{st3} + p_{d3}) - (p_{st0} + p_{d0}) \quad (2)$$

Dalje velja

$$p_{d1} = p_{d3} \quad (3)$$

Predpostavimo, da je

$$p_{t0} = p_{t1}$$

totalni tlak,

p_{st} ... statični tlak,

p_d ... dinamični tlak.

Indeksi 0, 1, 3 ustrezajo posameznim mernim ravninam.

Enačbi 2 in 3 vstavimo v enačbo 1 ter dobimo:

$$p_i = p_{st3} - p_{st0} - p_{d0}$$

Člen $(p_{st3} - p_{st0})$ označimo z razliko tlakov p_{st3-0} in dobimo izraz:

$$p_i = p_{st3-0} - p_{d0} \quad (4)$$

Enačba 4 nam pove, da je koristen porast tlaka ventilatorja enak razliki statičnih tlakov med mernima ravninama 0 in 3 in dinamičnega tlaka v ravnini 0. Pri projektiranju postaje pa smo že upoštevali, naj bo dinamični tlak na vstopu zanemarljivo nizek. Ta člen lahko črtamo ter dobimo poenostavljen izraz za koristen porast tlaka ventilatorja:

$$p_i = p_{st3-0} \quad (5)$$

Koristen porast tlaka ventilatorja je torej enak razliki statičnih tlakov med merno ravnino »0« in ravnino »3«. Merna ravnina »3« pa je v našem primeru okolje z atmosferskim tlakom.

Izbrana oblika postaje kakor tudi primer merjenja ventilatorja s prostim iztokom nam omogoča, da z merjenjem statičnega tlaka na vstopu že dobimo koristen porast tlaka ventilatorja.

4.2. Teoretična specifična energija ventilatorja

Hitrost v določeni točki na izstopu iz ventilatorja dobimo z izrazom:

$$c_2 = \sqrt{\frac{2 p_d}{\rho}}$$

p_d ... dinamični tlak v merni točki,

ρ ... gostota.

Pretočno komponento hitrosti dobimo z izrazom

$$c_{m2} = c_2 \cos \alpha \quad (6)$$

in obodno komponento hitrosti

$$c_{u2} = c_2 \sin \alpha \quad (7)$$

α ... kot, ki ga oklepata c_2 in c_{m2} .

Teoretično specifično energijo, ki jo ustvarja ventilator na poljubnem radiju R v eni točki struj-

nega polja in pri pogoju, da je vstopna komponenta $c_{u1} = 0$, dobimo z uporabo Eulerjeve enačbe

$$y_{th} = u c_{u2} \quad (8)$$

Specifično energijo integriramo po vsem radiju ter dobimo:

$$Y_{th} = \frac{1}{G} \int y_{th} dG \quad (9)$$

V zgornji enačbi pomenijo

$$G = c_{m2}^* \pi (R_2^2 - R_n^2) \rho \quad (10)$$

oziroma

$$dG = \pi \rho \int_{R_n}^{R_2} c_{m2} d(R^2) \quad (11)$$

c_{m2}^* ... poprečna pretočna hitrost,

c_{m2} ... pretočna hitrost v neki točki.

Z vpeljavo enačb (10) in (11) v enačbo (9) dobimo izraz za teoretično specifično energijo po vsem radiju:

$$Y_{th} = \frac{1}{R_2^2 - R_n^2} \frac{\omega}{c_{m2}^*} \int_{R_n}^{R_2} R c_{u2} c_{m2} d(R^2) \quad (12)$$

Iz pogoja kontinuitete ter porazdelitve hitrosti po radiju dobimo:

$$c_{m2}^* (R_2^2 - R_n^2) = \int_{R_n}^{R_2} c_{m2} d(R^2) \quad (13)$$

nakar lahko izrazimo

$$c_{m2}^* = \frac{1}{R_2^2 - R_n^2} \int_{R_n}^{R_2} c_{m2} d(R^2) \quad (14)$$

in ta izraz vstavimo v enačbo 12.

Poprečno pretočno hitrost dobimo pri znani pretočni količini z izrazom:

$$c_{m2}^* = \frac{Q}{\pi (R_2^2 - R_n^2)} \quad (15)$$

oziroma

$$c_{m2}^* = \frac{Q}{R_2^2 (1 - \nu^2)} \quad (16)$$

kjer pomeni

$$\nu = \frac{R_n}{R_2}$$

Z meritvijo vrtilnega momenta lahko dobimo iz enačbe 17 tudi teoretično specifično energijo, ki rabi za kontrolo enačbe 12.

$$Y_{th} = \frac{M \cdot \omega}{G} \quad (17)$$

Pri izrazu za vrtilni moment, merjen na osi ventilatorja, moramo upoštevati še izgube v ležajih. Tako dobimo za vrtilni moment izraz:

$$M = M_{izmerjeni} - M_{trenje\ v\ ležajih} \quad (18)$$

Celotni porast tlaka ventilatorja med ravninama 1 in 2, slika 5, na izbranem radiju znaša:

$$\Delta p = \rho \cdot y \quad (19)$$

Za celotni porast specifične energije ventilatorja med ravninama 1 in 2 po vsem radiju rotorja dobimo:

$$Y = \frac{1}{(R_2^2 - R_n^2)} \frac{1}{c_{m2}^*} \int_{R_n}^{R_2} y c_{m2} d(R^2) \quad (20)$$

Enačbo 20 rešimo z grafičnim integriranjem. Dobljeni izraz pomeni poprečno vrednost porasta specifične energije ventilatorja.

Izkoristek ventilatorja je podan z razmerjem veličin, izraženih v enačbah (20), (17) oziroma (12).

$$\eta = \frac{Y}{Y_{th}} \quad (21)$$

Primerno je tudi, da druge veličine ventilatorja, kakor so pretočna količina, tlak ali specifična energija in moč, izrazimo z brezdimenzijskimi števili. Prednost takega izražanja aerodinamičnih parametrov je ta, da so neodvisni od dimenzij, hitrosti in merskega sistema. Edino takšno prikazovanje karakteristik različnih tipov ventilatorja nam da pravilno medsebojno primerjavo.

5. Sklep

Najobčutljivejši del projektirane zračne postaje je vstopno ustje ventilatorja, ki ga preizkušamo. V ekstremnih primerih bi se lahko pojavila odstopanja poteka aerodinamičnih parametrov zaradi vstopnega vrtnca. Pri izredno majhnih pretočnih količinah pa lahko pričakujemo izrazite sekundarne tokove, ki pačijo uniformni potek hitrosti in tlaka. V takih primerih je nujno, da najprej kontroliramo potek tlaka v obeh mernih ravninah, to je na vstopu in izstopu iz ventilatorja.

Pri spremenjenem stanju zračne postaje (primer sl. 2) je treba merne ravnine prestaviti ter aerodinamične parametre glede na nastalo stanje definirati drugače. Ta razprava velja samo za ventilator, ki ima prost iztok.

LITERATURA

- [1] F. Schweiger: Survey of Fan Standards and Suggestion for a New Test Method — 1967. University College of South Wales and Monmouthshire — Cardiff.
- [2] F. Schweiger: New Inlet Test Method for Centrifugal Fans — 1968. University College of South Wales and Monmouthshire — Cardiff.
- [3] F. Schweiger: Test Method for Centrifugal Fans — 1968. University College of South Wales and Monmouthshire — Cardiff.

Avtorjev naslov:

prof. dr. ing. Franc Schweiger,
Fakulteta za strojništvo
Univerze v Ljubljani