

VENTILATOR ZA ODRŽAVANJE EKOLOŠKIH USLOVA U TUNELIMA

FAN FOR ECOLOGICAL CONDITION SUSTAIN IN TUNNELS

**MIROSLAV BENIŠEK, DEJAN ILIĆ,
ĐORĐE ČANTRAK i IVAN BOŽIĆ,
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd,
MIRKO PAJNIĆ i MILOŠ BEGOVIĆ,
Rudnap Group, Minel Kotlogradnja, Beograd, i
NOVICA JANKOVIĆ,
Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu, Beograd**

Reverzibilni mlazni aksijalni ventilator za održavanje ekoloških uslova u tunelima je aksijalni ventilator, specifične konstrukcije lopatica, koji može da radi naizmjenično u oba smera, zavisno od razlike pritiska ispred i iza tunela. Ventilatori se postavljaju redno u kaskadi, u tavanici tunela sa strane. Specifičan rad obrtnog kola se transformiše u kinetički deo specifičnog strujnog rada ostvarujući velike domete mlaza – veliku potisnu silu i na taj način kaskadno pogone nagomilane izduvne gasove motornih vozila koja se kreću ili stoje u tunelu.

Aksijalni ventilator je razvijen u saradnji Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu – Katedre za hidraulične mašine i energetske sisteme, i kompanije Rudnap Group Minel Kotlogradnja iz Beograda. Ventilator je ispitan na opitnom postrojenju u Laboratoriji Katedre. Prečnik kola modela ventilatora je $D_{em} = 500$ mm, a može se na osnovu ispitanih karakteristika preračunati i na izvođenja većih prečnika.

Reversible jet fan for ecological conditions in tunnels is an axial fan, with specific impeller construction, which can work in both directions, with almost identical characteristics, depending on the pressure difference at the tunnel inlet and outlet. Jet fans are distributed in a cascade row on the tunnel ceiling. Whole impeller specific energy is transformed into the kinetic part producing big jets and high forces for accumulated moving or standing motor vehicles gases evacuation. Jet fan has been developed in cooperation with the Hydraulic Machinery and Energy Systems Department Faculty of Mechanical Engineering University of Belgrade and company Rudnap Group Minel Kotlogradnja from Belgrade. The fan was tested on the Department Laboratory test rig. Impeller diameter of the fan model is $D_{em} = 500$ mm. Characteristics of the other fans impeller diameter sizes could be scaled-up on the basis of the similarity law.

Ključne reči: aksijalni ventilator; reverzibilnost; ekološki uslovi; tunel

Key words: axial fan; reversibility; ecological conditions; tunnel

1. Uvod

Globalna ekološka kriza izazvana ubrzanim tehnološkim razvojem značajno ugrožava životnu sredinu. Nerealno je očekivati da se „progres” uspori, već je neophodno stvoriti pogodnije uslove za život i rad ljudi, dok se ne nađu ekološki prihvatljivi proizvodni procesi i mašine koje će stvarati trajnu ravnotežu za opstanak živih bića na planeti Zemlji. Težnja je da ova dva procesa idu paralelno. Sa jednim ovakvim procesom stvaranja pogodnijih uslova za život ljudi, susreću se stanovnici velikih gradova i korisnici putnih pravaca sa velikom gustinom saobraćaja, gde se stvaraju velike količine izduvnih gasova. Ovakva mesta su tuneli, podzemni prolazi, zatvorene prostorije i sl. U pomenutim prostorima potrebno je stvoriti prihvatljive, standardima propisane, uslove za boravak ljudi. Primenjuju se različiti sistemi koji obezbeđuju zahtevani nivo prisustva izduvnih gasova [10].

Kao jedan od načina rešavanja i stvaranja ekoloških uslova u tunelima je primena reverzibilnih mlaznih aksijalnih ventilatora. Oni se postavljaju na pogodna mesta u tunelima, obično sa leve i desne strane tunela pri svodu, u kaskadnom rasporedu [10]. Na taj način zagađeni vazduh se evakuše iz tunela [2, 4, 5].

Reverzibilni mlazni aksijalni ventilatori su ventilatori koji spadaju u aksijalne strujne mašine specijalne namene. Za razliku od klasičnih strujnih mašina, mogu da menjaju smer strujanja, a da pri tome ostvaruju istovetne karakteristike u oba smera. Reverzibilnost rada ventilatora je neophodna, zavisno od pritisaka na ulazu u tunel i izlazu iz njega. Smer strujanja vazduha kroz ventilator uvek mora da bude od višeg ka nižem pritisku, kako bi se ostvario veći protok kroz tunel [10, 11].

Specifični stujni rad obrtnog kola ventilatora se transformiše u kinetički deo specifičnog strujnog rada, ostvarujući pri tom velike brzine vazduha i velike domete mlaza, odnosno veliku potisnu silu. Na taj način se kaskadno pogone nagomilani izduvni gasovi motornih vozila koja se kreću ili stoje u tunelu.

Osnovni cilj ovog rada je da se prikažu rezultati osvajanja jednog tipa reverzibilnog mlaznog aksijalnog ventilatora koji će ispuniti zahtevane uslove i to reverzibilnost, kompaktnost, veliku potisnu silu (veliku brzinu na izlazu, veliki protok), pogon asinhronim motorima koji svojim dimenzijama neće biti veći od prečnika glavčine ventilatora i laku montažu na svodu tunela [5, 6].

2. Projektovanje ventilatora – indirektan problem i proračun strujanja kroz ventilator, CFD analiza – direktan problem

Osnovni problem konstruisanja reverzibilnih mlaznih aksijalnih ventilatora (indirektan problem) za održavanje ekoloških uslova u tunelima i sličnim prostorima jeste kako za date uslove projektovati lopatični sistem koji će davati iste karakteristike u oba smera strujanja kada pritisci na krajevima tunela variraju. Očigledno je da bi se zadovoljila reverzibilnost, da oblik profila lopatica mora biti simetričan kako po uzdužnoj, tako i po poprečnoj osi profila. Skeletnica lopatice profila tada mora biti prava linija. Zbog postizanja jednakosti razmene energije profila i fluida duž radijusa, lo-

patica obrtnog kola mora biti dvostruke krivine, odnosno zavojna. Komplet lopatica dvostruko simetričnih profila je označen sa LP1.

U istraživanju oblika profila (indirektan problem) razvijen je i jedan asimetrični profil koji zadovoljava sve postavljene, prethodno navedene, uslove. Kako ovaj profil predstavlja inovaciju u oblikovanju kola reverzibilnih mlaznih aksijalnih ventilatora, to o obliku neće biti reči u ovom radu. Napominje se da se ulazni i izlazni oblik profila specijalno konstruišu. Ovaj komplet lopatica označen je sa LP2.

Radi eksperimentalnog ispitivanja reverzibilnog mlaznog aksijalnog ventilatora, konstruisan je model za sledeće uslove:

– protok: $Q = 4,53 \text{ m}^3/\text{s}$, prečnik kola: $D_{em} = 0,5 \text{ m}$, brzina obrtanja: $n_m = 2251 \text{ min}^{-1}$,

– unutrašnja snaga ventilatora: $P_{em} = 4 \text{ kW}$, aksijalna sila: $F_{zm} = 130 \text{ N}$.

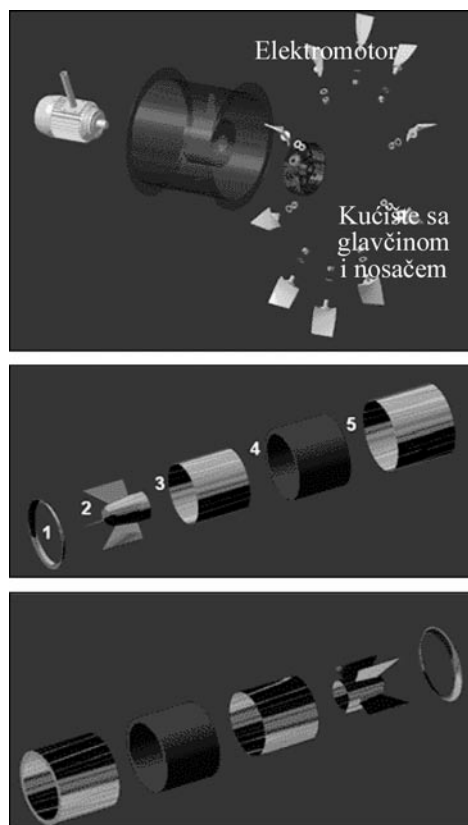
Za potrebe strujne analize (direktan problem) napravljen je 3D model u okviru softverskog paketa CATIA V5R18 (64bit) (sl. 1). Model ventilatora sadrži određen nivo “inteligencije” baziran na alatima CATIA Knowledge tako da se efikasno mogu menjati uglovi lopatica koji su i bili srž ovog ispitivanja. To podrazumeva promenu oblika lopaticice pri promeni ugla kako bi se zadovoljila prostorna ograničenja u pogledu zazora koji treba da se ostvari između lopatica i kućišta ventilatora.

Konstrukcija modela se sastoji od sledećih delova:

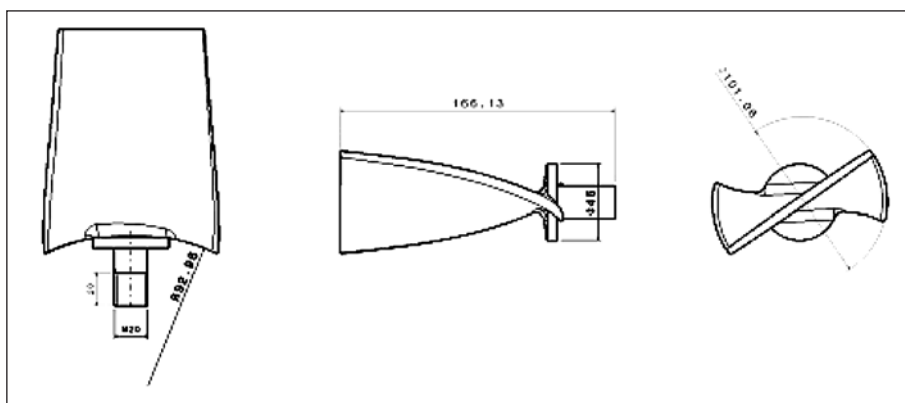
– **obrnog kola** modela, koje ima 10 lopatica dvostruke krivine (slika 2) i postavljeno je u kućište sa glavčinom i nosačem. Lopatice su pričvršćene za glavčinu maticama M20, čime je omogućeno njihovo zakretanje, odnosno promena ugla nastrujavanja;

– **elektromotora** (slika 1), koji se postavlja u kućište tako da ne remeti strujnu sliku. Njegov napojni kabl je sproveden putem čelične cevi kroz kućište; motor je asinhroni, dvopolni;

– **kućišta sa glavčinom i nosačem** (slika 1), koje prihvata obrtno kolo modela i obezbeđuje stabilan rad i spoj sa elektromotorom;

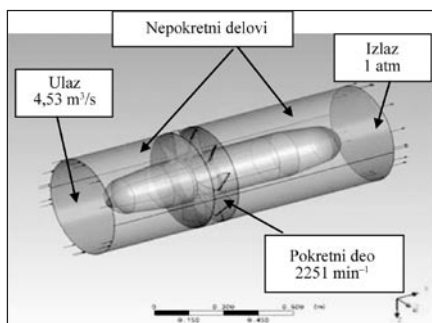


Slika 1. 3D prikaz konstrukcije modela: 1 – ulovnik, 2 – nastrojna kapa, 3 – perforirani lim, 4 – mineralna vuna, 5 – omotač (lim)

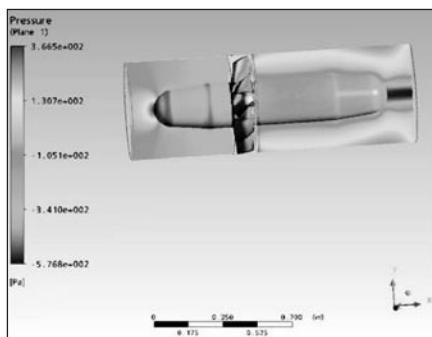


Slika 2. Lopatica obrtnog kola

– **čelične cevi**, koje se pričvršćuju sa prednje i zadnje strane konstrukcije, unutrašnjeg i spoljašnjeg prečnika 500 mm i 584 mm. One služe za umirivanje vazdušne struje (slika 1).



Slika 3. Definisiranje analiziranog problema



Slika 4. Polje pritiska ispred i iza ventilatora

Pored formiranja 3D modela radi prostorne analize i otklanjanja eventualnih nedostataka, delovi ovog sklopa su iskorišćeni za CFD analizu strujanja kroz ventilator. Radno kolo i nastrojne kape su unekoliko uprošćeni za potrebe analize strujanja kako bi se skratio postupak pripreme.

Za potrebe analize formiran je klaster od šest računara od kojih je svaki imao procesor sa dva jezgra. Na raspolaganju je bilo ukupno 11 GB RAM memorije. Paralelno procesiranje omogućava značajnu uštedu vremena pri složenim proračunima, a u nekim slučajevima postaje neminovnost. Napravljena je lokalna konekcija šest personalnih računara pomoću switch-a 10/100 od 8 portova i mrežnih kablova kategorije 5E. CFD analiza [8] se može uopšteno podeliti na tri faze:

1. preprocessing koji podrazumeva potpuno definisanje CFD problema koji je potrebno rešiti – definisanje proračunske mreže, izbor fluida i njegovih osobina, zadavanje graničnih uslova (slika 3), uslova konvergencije, podešavanje parametara proračuna itd.;

2. **solver** koji predstavlja proračun za set podataka definisan u prvoj fazi. Na početku ove faze, moguće je definisati metode proračuna u zavisnosti od platforme na kojoj se vrši proračun,

3. **postprocessing** koji sadrži različite alate za prikaz rezultata dobijenih proračunom.

Proračun je obavljen korišćenjem metoda PVM Distributed Parallel. Svaki od 12 procesora je imao svoju oblast proračuna (partition) čime je vreme analize skraćeno.

Postprocessing je iskorišćen za prikaz rezultata dobijenih proračunom. Prikazano je polje pritiska (slika 4) i brzina (slika 5) ispred i iza ventilatora.

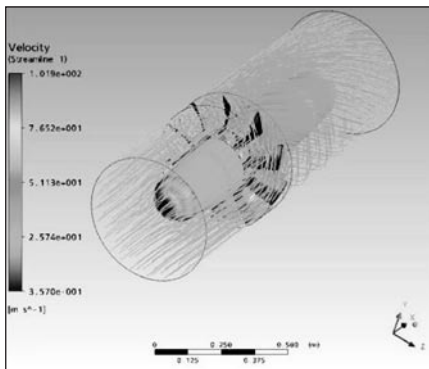
3. Eksperimentalno ispitivanje pogonskih karakteristika reverzibilnog mlaznog aksijalnog ventilatora

Nakon izrade fizičkog modela reverzibilnog mlaznog aksijalnog ventilatora neophodna su eksperimentalna ispitivanja kako bi se utvrdile projektne karakteristike. Tako je konstruisano opitno postrojenje (slike 6–8).

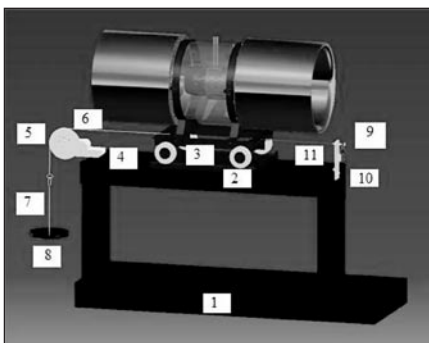
Opitno postrojenje se sastoji od (slika 6):

1) **postolja**, čija je osnovna svrha da prihvati konstrukciju modela ventilatora i da obezbedi stabilnost i nesmetan rad, radi dobijanja što preciznijih rezultata merenja. Stoga je izrađena od masivnih, čeličnih U profila [5, 7];

2) **postolja za kolica**, koje predstavlja čeličnu tablu, vijcima pričvršćenu za postolje; na nju su postavljene šine po kojima se kolica kreću;



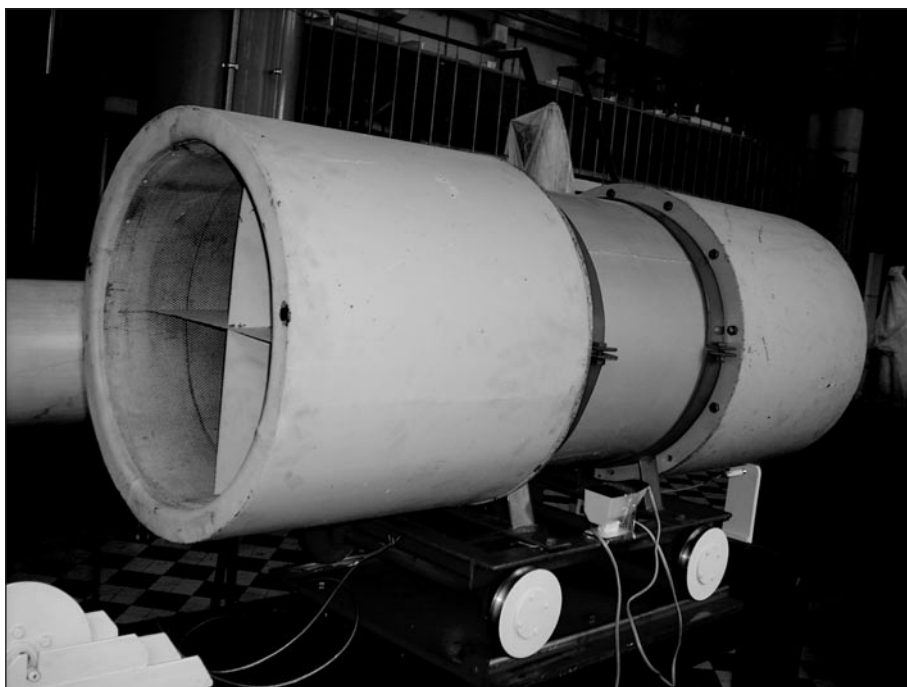
Slika 5. Brzinsko polje ispred i iza ventilatora



Slika 6. 3D model opitnog postrojenja



Slika 7. Izgled opitnog štanda u Laboratoriji



Slika 8. Model reverzibilnog mlaznog aksijalnog ventilatora na opitnom štandu

3) **kolica**, za koja se vezuje konstrukcija modela; ona omogućavaju kretanje duž šina i merenje aksijalne potisne sile koja se ostvaruje radom ventilatora;

4) **postolja za kotur**, izrađeno od čeličnih U profila, za potrebe baždarenja davača sile;

5) **kotura**, koji se pomoću osovine smešta u žleb na postolju za kotur. Služi za kretanje sajle. Obrtanje kotura je obezbeđeno radijalnim, kotrljajnim, jednoređim ležajem;

6) **sajle**, kojom se preko kotura, povezuju kolica i tegovi za baždarenje. Koristi se čelična, hromirana sajla prečnika 3 mm;

7) **nosača tegova**, koji se sastoji iz dva dela: postolja (tasa) na koje naležu etalonirani tegovi i kuke kojom se kači na omču sajle. Baždaren je i izrađen od čelika;

8) **etaloniranih tegova**, koji služe za baždarenje davača sile;

9) **davača sile**, koji služi za merenje aksijalne sile koju ostvaruje model pri radu. Korišćen je model 355, tipa S3, hermetički zapečaćen davač sile, firme **Vishau**;

10) **nosača davača sile**, čija je funkcija pričvršćivanje davača sile za postolje i povezivanje sa kolicima putem merne trake. Izrađen je od čelične ploče i pričvršćen preko četiri vijka da ne bi došlo do savijanja i da bi se obezbedila potrebna tačnost merenja;

11) **merne trake**, koja služi za povezivanje davača sile i kolica; ona prenosi aksijalnu silu na davač; poseduje mnogo bolje karakteristike od čelične sajle koja je prvobitno korišćena u tu svrhu; dilatacija je manja i obezbeđuje se stabilniji rad i preciznije merenje;

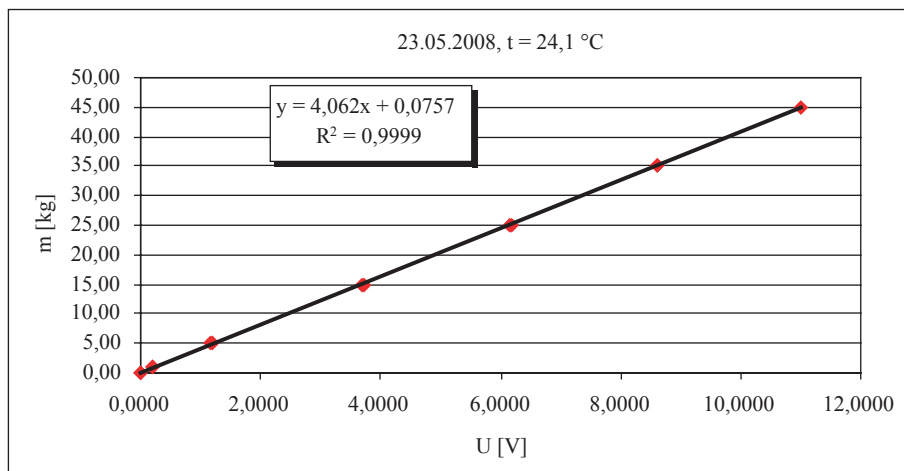
12) **mernog pretvarača**, za kondicioniranje signala sa davača sile, koji je realizovan kao posebna prenosna jedinica u siluminskom kućištu. Uređaj je projektovan za napajanje mrežnim naponom 220 V AC, 50 Hz. Priklučenje davača na merni pretvarač vrši se šestožilnim širmovanim kablom. Izlazi iz mernog pretvarača su naponski i strujni signali [3];

13) **frekventnog regulatora**, koji se koristi u svrhu regulacije broja obrtaja elektromotora, odnosno radnog kola ventilatora. U opitnoj instalaciji koristi se digitalni, frekventni regulator DS2000, proizvođača firme MOOG. Regulator je trofazni, radi na naponima od 65 V do 506 V i učestanostima od 50 Hz i 60 Hz. Radi na temperaturama od 0°C do 40°C;

14) **multifunkcijskog mernog uređaja testo 400**, koji služi za merenje temperature i vlažnosti vazduha. Priključivanjem odgovarajućih mernih sondi, može meriti i brzinu strujanja vazduha i temperaturu tačke rose. Merenje se obavlja putem sonde koja meri temperaturu i vlažnost vazduha, u svrhu određivanja njihovog uticaja na eksperimentalna merenja;

15) **živinog barometra**, kojim se pre svakog ispitivanja vršilo merenje vazdušnog pritiska, radi određivanja gustine vazduha.

Postupak baždarenja davača sile, model 355, tipa S3, firme *Vishau*, sastoji se od opterećivanja davača sile etaloniranim tegovima, očitavanja rezultata i njihovog unošenja u baždarni dijagram, na osnovu koga se, tokom merenja, vrši očitavanje aksijalne sile. Za baždarenje se koristi ista instalacija kao i za samo ispitivanje ventilatora, uz određene modifikacije. Za potrebe baždarenja davača sile koriste se kotur, nosač kotura, sajla i etalonirani tegovi. Baždarenje se vrši pre svakog merenja. Na slici 9 je prikazana jedna od baždardnih krivih.



Slika 9. Baždarna karakteristika davača sile

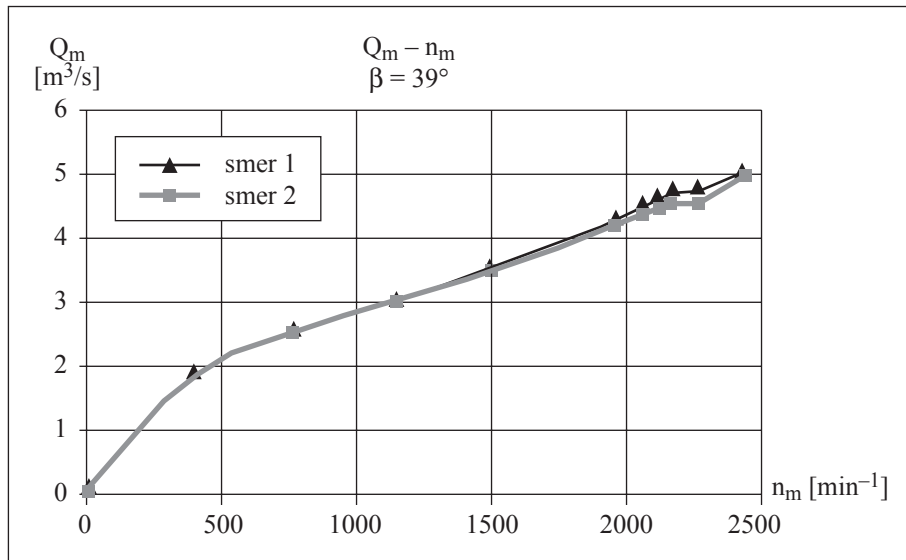
4. Određivanje karakteristika modela reverzibilnog mlaznog aksijalnog ventilatora

Ispitivanja karakteristika modela reverzibilnog mlaznog aksijalnog ventilatora obavljena su na instalaciji opisanoj u prethodnom poglavlju, u Laboratoriji Katedre

za hidraulične mašine i energetske sisteme Mašinskog fakulteta u Beogradu. Tokom ispitivanja, merene su sledeće veličine: potisna aksijalna sila, polje brzina na ulazu i izlazu iz ventilatora, brzina obrtanja, snaga motora, temperatura vazduha i barometarski pritisak [1]. Merenja su obavljena za različite uglovne položaje oba seta lopatica obrtnog kola $\beta = 28^\circ, 31^\circ, 33^\circ, 35^\circ, 39^\circ$ i 45° i pri različitim konstantnim brzinama obrtanja $n = 400, 800, 1200, 1600, 2080, 2200, 2500, 2565 \text{ min}^{-1}$. Merenja su, takođe, obavljena za dva smera strujanja.

Na osnovu velikog broja dobijenih rezultata, određen je najbolji uglovni položaj lopatica obrtnog kola za oba kompleta lopatica LP1 i LP2. Utvrđeno je da obrtno kolo sa kompletom lopatica LP2 daje bolje rezultate od kola sa lopicama LP1, u pogledu potisne sile, protoka i snage motora.

Na dijagramima (slike 10, 11 i 12) prikazani su rezultati merenja protoka, potisne sile i unutrašnje snage ventilatora za komplet lopatica LP2 pri uglovnom položaju $\beta = 39^\circ$.



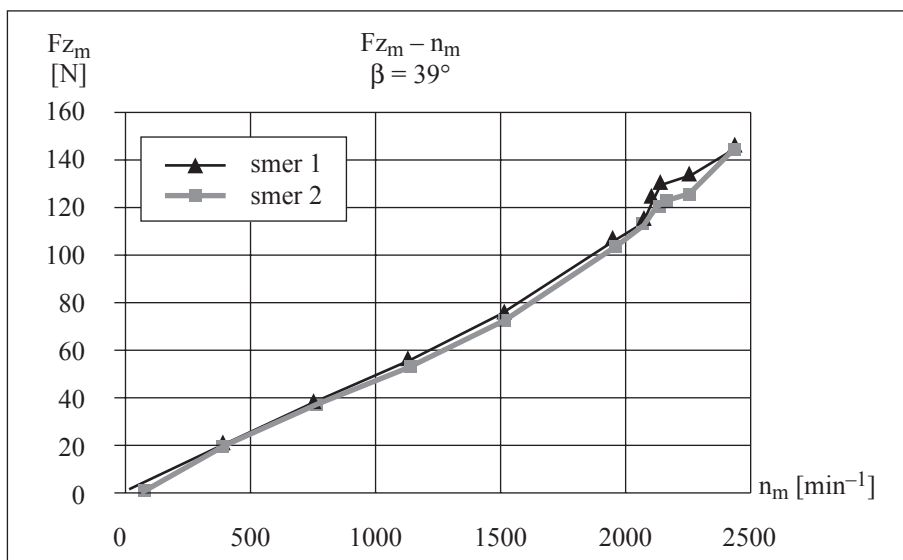
Slika 10. Dijagram promene protoka za oba smera strujanja

5. Postupak preračunavanja rezultata modelskih ispitivanja na prototip reverzibilnog mlaznog aksijalnog ventilatora prečnika D_{ep}

Rezultati modelskih ispitivanja se mogu preračunati na prototip reverzibilnog mlaznog aksijalnog ventilatora željenog prečnika D_{ep} . Sve veličine modela su označene sa "m", a protipa sa "p".

Korišćenjem jednakosti značica snage (λ), dobija se:

$$\lambda_m = \lambda_p \Rightarrow \frac{P_m}{D_{em}^2 u_m^3} = \frac{P_p}{D_{ep}^2 u_p^3} \Rightarrow P_p = P_m \left(\frac{D_{ep}}{D_{em}} \right)^5 \cdot \left(\frac{n_p}{n_m} \right)^3.$$



Slika 11. Dijagram promene potisne sile za oba smera strujanja

Iz uslova kinematske sličnosti sledi jednakost značica protoka (ϕ):

$$\phi_m = \phi_p \Rightarrow \frac{Q_m}{A_m \cdot u_m} = \frac{Q_p}{A_p \cdot u_p},$$

$$A = \frac{\pi}{4}(D_e^2 - d_g^2) = \frac{\pi}{4}D_e^2 \left[1 - \left(\frac{d_g}{D_e} \right)^2 \right] = \frac{\pi}{4}D_e^2(1 - v^2)$$

$$\frac{Q_m}{\frac{\pi}{4}D_{em}^2(1 - v_m^2) \cdot u_m} = \frac{Q_p}{\frac{\pi}{4}D_{ep}^2(1 - v_p^2) \cdot u_p},$$

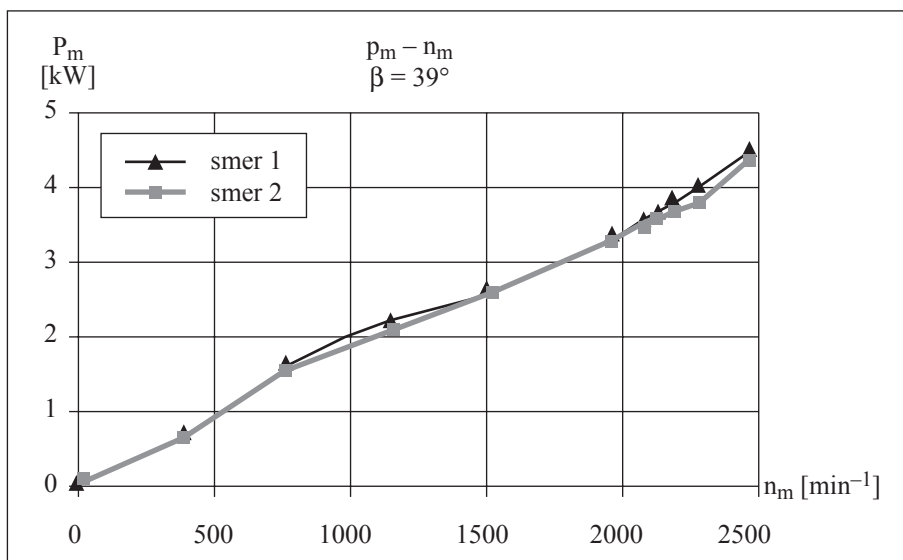
gde je $v_m = v_p \Rightarrow Q_m = Q_p \cdot \left(\frac{D_{em}}{D_{ep}} \right)^3 \cdot \frac{n_m}{n_p}$.

Bezdimenzioni prečnici su jednaki za model i prototip ($v_m = v_p$).

Iz uslova dinamičke sličnosti proizilazi značica napora (ψ):

$$\begin{aligned} \psi_m = \psi_p &\Rightarrow \frac{2Y_m}{u_m^2} = \frac{2Y_p}{u_p^2} \Rightarrow \frac{2 \cdot \Delta p_{tm}}{\rho_m \cdot u_m^2} = \frac{2 \cdot \Delta p_{tp}}{\rho_p \cdot u_p^2} \Rightarrow \Delta p_{tm} = \\ &= \Delta p_{tp} \cdot \left(\frac{D_{em}}{D_{ep}} \right)^2 \cdot \left(\frac{n_m}{n_p} \right)^2. \end{aligned}$$

gde je $\Delta p_t = Y/\rho$ specifični strujni rad u obliku totalnog pritiska.



Slika 12. Dijagram promene unutrašnje snage ventilatora za oba smera strujanja

Određivanje sile potiska prototipa F_{zp} :

$$F_{zp} = \dot{m} \cdot \bar{c}_z, \text{ gde je } \bar{c}_z = \frac{Q}{A},$$

$$\varphi_E = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_e^2 (1-v^2) \cdot u_e}, \quad Q = \varphi_E \cdot \frac{\pi \cdot D_e^2 (1-v^2) \cdot u_e}{4} = \varphi_E \cdot \frac{\pi^2 \cdot D_e^3 (1-v^2) \cdot n}{240},$$

$$F_z = \rho \cdot \frac{4}{\pi \cdot D_e^2} \cdot \left[\varphi_E \cdot \frac{\pi^2 \cdot D_e^3 (1-v^2) \cdot n}{240} \right]^2 =$$

$$= \rho \cdot \pi^3 \cdot \varphi_E^2 \cdot D_e^4 \cdot \frac{(1-v^2)^2 \cdot n^2}{120^2} \Rightarrow \frac{F_z}{\rho \cdot D_e^4 \cdot n^2} = \pi^3 \cdot \varphi_E^2 \cdot \frac{(1-v^2)^2}{120^2},$$

$$\left(\frac{F_z}{\rho \cdot D_e^4 \cdot n^2} \right)_m = \left(\frac{F_z}{\rho \cdot D_e^4 \cdot n^2} \right)_p \Rightarrow F_{zp} = F_{zm} \frac{\rho_m}{\rho_p} \cdot \left(\frac{D_{ep}}{D_{em}} \right)^4 \cdot \left(\frac{n_p}{n_m} \right)^2.$$

Korišćene oznake

- Q [m³/s] – zapreminski protok,
- D_e [m] – spoljašnji prečnik kola (prečnik uz kućicu),
- d_g [m] – unutrašnji prečnik kola (prečnik uz glavčinu),
- v [–] – bezdimenzijski prečnik (odnos unutrašnjeg i spoljašnjeg prečnika),
- n [min⁻¹] – brzina obrtanja,
- P [W] – unutrašnja snaga ventilatora,
- F_z [N] – aksijalna sila,

Y [J/kg] – specifični strujni rad,
 Δp_t [Pa] – pad pritiska,
 φ [–] – značica protoka,
 ψ [–] – značica napora,
 φ_e [–] – brzinska značica protoka,
 λ [–] – značica snage,
 u [m/s] – obimska brzina,
 A [m²] – površina poprečnog preseka,
 c_z [m/s] – projekcija srednje brzine na osu z,
 m [kg] – masa,
 \dot{m} [kg/s] – maseni protok,
 ρ [kg/m³] – gustina,
 t [°C] – temperatura,
 U [V] – napon,
 f [Hz] – učestanost.

Indeksi

p – prototip,
 m – model.

6. Zaključak

Na osnovu istraživanja i razvoja obavljenih u okviru ovog rada, može se zaključiti sledeće:

– Da je osvojen jedan novi tip reverzibilnog mlaznog aksijalnog ventilatora sa malim stepenom reakcije kod koga je skoro sva specifična strujna energija obrtnog kola realizovana u vidu kinetičke energije, pri čemu se postižu velike brzine, odnosno protoci i potisne sile.

– Istraživanja i razvoj su obavljeni indirektnim metodom za dva tipa profila lopatica obrtnog kola – simetrični profil (LP1) i asimetrični profil (LP2).

– Sačinjeni su 3D modeli reverzibilnog mlaznog aksijalnog ventilatora za dva tipa profila lopatica.

– Izvršen je proračun 3D strujanja kroz ventilator, odnosno CFD analiza (indirektan problem).

– Konstruisana je opitna instalacija na kojoj su izvršena obimna eksperimentalna ispitivanja oba tipa ventilatora za različite uglovne položaje lopatica obrtnog kola i za različite brzine obrtanja.

– Pre ispitivanja izvršena su sva baždarenja mernih instrumenata, pri čemu je posebna pažnja posvećena baždarenju merača sile.

– Dobile se karakteristike reverzibilnog mlaznog aksijalnog ventilatora sa obrtnim kolom sa lopaticama tipa LP2, bolje su od obrtnog kola sa lopaticama tipa LP1. Eksperimentalni rezultati daju potvrdu o dobrom projektovanju obrtnog kola.

Zahvalnica

Rad je potpomognut sredstvima Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije u okviru inovacionog projekta broj 451-01-2960/2006-85 i projekta broj TR 14046.

Literatura

- [1] **Benišek, M., M. Nedeljković, R. Kilibarda, D. Gerasimović** (2006), *Tehnika merenja* – Zbirka zadataka iz strujno-tehničkih merenja, treće izdanje, Mašinski fakultet, Beograd.
- [2] **Bendelius, A. G.** (1999), *Tunnel Ventilation* in ‘Tunnel Engineering Handbook’, ed. Bickel, J. O., Kuesel, T. R and King, E. H., 2nd edition, Chapman & Hall.
- [3] **Varga, Lj. Đ.** (2002), *Senzori pritiska*, diplomski rad, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd.
- [4] **Zeljковиć, V., S. Maksimović** (2007), *Upravljanje vanrednim situacijama u tunelu*, zbornik radova sa skupa „Upravljanje vanrednim situacijama”, Niš, str. 407–411.
- [5] *** Izveštaj za inovacione projekte Ministarstva nauke i zaštite životne sredine Republike Srbije finansirane po javnom pozivu od 12.10.2006. god. pod nazivom „Reverzibilni mlazni aksijalni ventilator za održavanje ekoloških uslova u auto tunelima“ i pod rednim brojem 451-01-2960/2006-85, rukov. projekta: prof. dr Miroslav Benišek, trajanje: 01.07.2007–30.06.2008. god.
- [6] **Jacques, E., P. Wauters** (1999), *Improving the ventilation efficiency of jetfans in longitudinally ventilated rectangular ducts*, Proceedings of the 8th US Mine Ventilation Symposium, ISBN 1-887009-04-3, University of Missouri-Rolla, pp. 503–507.
- [7] **Ognjanović, M.** (2003), *Mašinski elementi sa rešenim primerima, podacima i zadacima za vežbu*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd.
- [8] **Pavlović, T. B.** (1995), *Numeričko eksperimentalne simulacije asimetrične ventilacije tunela mlazom separatnog ventilatora*, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd.
- [9] **Protić, Z., M. Nedeljković** (2006), *Pumpe i ventilatori: problemi, rešenja, teorija*, V izdanje, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd.
- [10] **Tarada, F., R. Brandt** (2009), *Impulse Ventilation for Tunnels – A State of the Art View*, 13th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, New Brunswick, New Jersey, USA.
- [11] *** The AA Motoring Trust (2002), Eurotest 2002 Tunnel Tests, Safety of Road Tunnels in Europe, Results of the 2002 Pan-European Tunnel Testing Programme.

kgg