

Dr. sc. MIRKO ČUDINA
Fakulteta za strojništvo
Ljubljana, Aškerčeva 6

Prometna tehnika - Traffic Engineering
Prethodno priopćenje - Preliminary Communication
U. D. C. 628.854:534.1:62-533
Priljeno - Accepted: 20 Jul. 1996
Prihvaćeno - Approved: 4 Sep. 1996

UTJECAJ RADIJALNOG I AKSIJALNOG RAZMAKA NA EMITIRANU BUKU I PERFORMANCE VENTILATORA

SAŽETAK

Kod zračno hlađenih dizelskih motora ventilator za dovod zraka jedan je od većih izvora buke. Jedan od mehanizama generiranja buke kod ventilatora je interakcija rotorskih lopatica s vrtlozima koji nastaju u radijalnom i aksijalnom razmaku između rotora i statora kao posljedica razlike tlaka između tlačne i usisne strane lopatice rotora. Taj mehanizam generiranja buke ventilatora osobito je izrazit pri višim opterećenjima ventilatora, tj. kod djelomičnih protoka, kada su razlike tlaka veće.

U okviru ovog rada bit će prikazan utjecaj promjene radijalnog i aksijalnog razmaka između rotora i statora na razinu emitirane buke i performance ventilatora. Rezultati eksperimentalnih istraživanja su pokazali da i za radijalni i za aksijalni razmak postoji neki optimum, koji je definiran za najbolje vrijednosti emitirane buke, performanci, gabarita i tehnologije izradbe ventilatora.

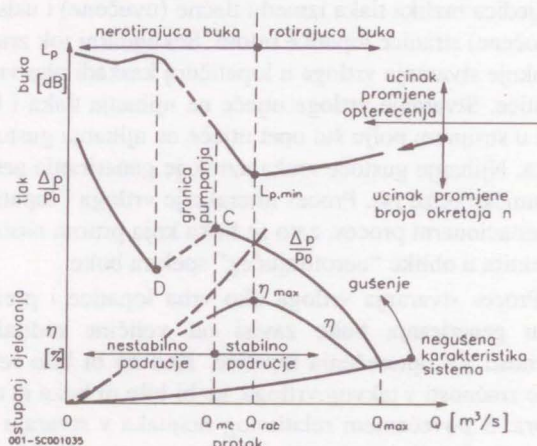
1. UVOD

Među pomoćnim strojevima motora, ventilator za hlađenje motora je najbučniji. Kod zračno hlađenih motora ventilator mora svladavati veće protočne otpore i zato se on po pravilu vrti brže i ima veći broj kraćih lopatica (riječ je o visokotlačnom ventilatoru). Kod visokotlačnih ventilatora na performance i emitiranu buku ventilatora utječu, osim geometrije rotora, i položaj i geometrija statora (pretkola ili zakola). Jedan od važnih parametara je i relativni razmak između rotora i statora, kako u radijalnom tako i u aksijalnom smjeru.

Buka aksijalnog ventilatora za hlađenje automobilskih motora ima širokotračni spektar s izrazitim tonovima pri diskretnim frekvencijama. Ovisno o opterećenju, pojavljuju se dva tipa širokotračnog spektra buke ventilatora, poznati i kao "rotirajući" i "nerotirajući" spektar [1].

Mehanizam generiranja rotirajuće buke ima u širokotračnom spektru izrazite tonove pri diskretnim frekvencijama, koje su u svezi s frekvencijom rotacije rotora (FRR) odnosno rotorskih lopatica (FRRL) i njihovih viših harmonika. Mehanizam generiranja nerotirajuće

buke ima u širokotračnom spektru izrazit vrh pri frekvenciji koja nije u svezi s frekvencijama FRR ili FRRL. Taj oblik spektra prevladava kod viših opterećenja lopatice, tj. kod manjih protoka ($Q < Q_{opt}$), posebno u blizini granice pumpanja i lijevo od nje. Općenito ima nerotirajuća buka višu razinu. Udio nerotirajuće buke u ukupnoj razini buke ventilatora ovisan je o geometriji ventilatora i položaju radne točke (sl. 1) [1-3].

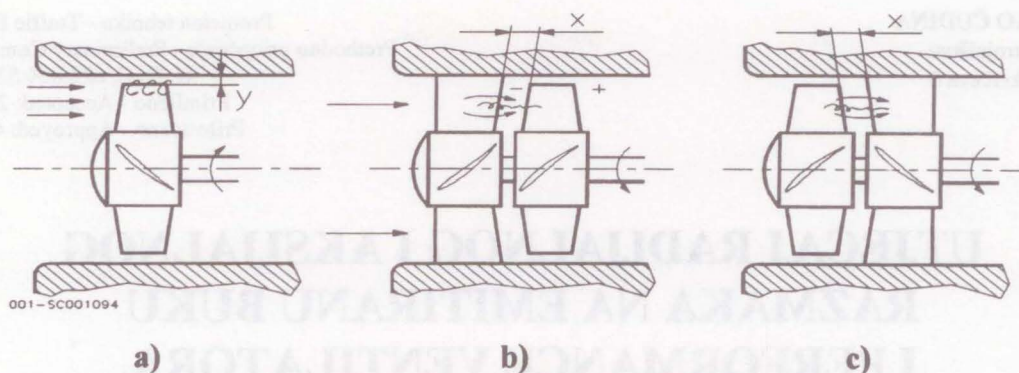


Slika 1 - Značajke ventilatora

Relativni razmak između rotora i statora utječe na rotirajući i nerotirajući spektar buke. U ovom je članku prikazan utjecaj promjene radijalnog i aksijalnog razmaka između rotora i statora i utvrđene su optimalne vrijednosti na osnovi analize emitirane buke, performanci, dimenzija i tehnologije izradbe ventilatora.

2. MEHANIZAM GENERIRANJA BUKU ZBOG RADIJALNOG I AKSIJALNOG RAZMAKA IZMEĐU ROTORA I STATORA VENTILATORA

Kod ventilatora postoje dvije relativne zračnosti između rotora i statora: u radijalnom smjeru (razmak y na slici 2,a) i u aksijalnom smjeru (razmak x na slici 2,b. kod ventilatora s pretkolom odnosno 2,c. kod ventilatora



Slika 2 - Radijalni i aksijalni razmak između rotora i statora

sa zakolom). Njihov učinak nije jednoznačan, nego zavisi prije svega od relativnog odnosa između relativne zračnosti y odnosno x i dimenzija rotora i statora, međusobnog položaja rotora i statora te od opterećenja ventilatora.

A. *Mehanizam generiranja buke zbog radijalnog razmaka između rotora i statora ventilatora.* U razmaku između vrha rotorske lopatice i cijevi u kojoj se te lopatice vrte (y na slici 5,a) dolazi do sekundarnog toka zraka u suprotnom smjeru od smjera rotacije lopatice kao posljedica razlika tlaka između tlačne (uvučene) i usisne (izbočene) stranice lopatice rotora. Sekundarni tok zraka uzrokuje stvaranje vrtloga u lopatičnoj kaskadi oko vrha lopatice. Stvaranje vrtloga utječe na njihanja tlaka i brzine u strujnom polju što opet utječe na njihanja gustoće zraka. Njihanje gustoće zraka uzrok je generiranja aerodinamičke buke [4]. Proces interakcije vrtloga i lopatice je nestacionarni proces, zato se buka koja pritom nastaje reflektira u obliku "nerotirajućeg" spektra buke.

Proces stvaranja vrtloga oko vrha lopatice i prema tomu generiranja buke zavisi od veličine radijalne zračnosti y i opterećenja lopatice. Kad ne bi bilo relativne zračnosti y takvog vrtloga, ne bi bilo ni buke iz tog izvora. S povećanjem relativnog razmaka y stvaraju se oko vrha lopatice sve veći vrtlozi i s većim obujmom. Budući da je nastanak vrtloga vezan s generiranjem buke, emitirana je buka ventilatora to veća što je relativna zračnost y veća. Buka iz tog izvora se s povećanjem relativne zračnosti postupno širi prema višim protocima (manjim opterećenjima), dok ne postane predominantan izvor buke u cijelom području rada ventilatora. Pri istom opterećenju lopatice buka se iz tog izvora po pravilu povećava linearno s povećanjem relativne zračnosti y . Međutim, pri malim razmacima y , dolaze do izražaja viskozne sile laminarnoga graničnog sloja, koje uzrokuju veću buku zbog trenja. Posljedica toga je da je optimum relativne zračnosti y više od minimalno moguće. Ta je obično u dobroj korelaciji s tehnologijom izradbe i montaže.

Pri malim opterećenjima lopatica rotora, kod Q_{max} intenzitet je sekundarnog toka i nastalog vrtloga mali, dolazi do interakcije samo između vrtloga i repa lopatice. Buka iz tog izvora je najniža, jer je razlika u tlaku iz-

među usisne i tlačne stranice lopatice rotora najmanja [1]. S povećanjem opterećenja lopatice, odnosno s gušanjem ventilatora, povećava se razlika tlaka između usisne i tlačne stranice lopatice što rezultira u povećanom relativnom udjelu sekundarnog toka zraka koji recirkulira oko vrha lopatice. Obujam vrtloga se povećava i zato dolazi do interakcije vrtloga ne samo s repom lopatice nego i s čelom susjedne - sljedeće lopatice, što je onda vezano s većom bukom. Buka koja nastaje iz toga izvora je to veća što je opterećenje veće odnosno što je protok Q manji. Kod određenog stupnja gušenja vrtlozi se povećaju do stanja kada ispune cijeli prostor između lopatica rotora i blokiraju protok zraka. To je primjer kada nastane tzv. pumpanje (znano u praksi kao granica pumpanja ventilatora) i kada nastane drugi mehanizam generiranja buke kao posljedica nestacionarne blokade toka od vrtloga u kaskadi rotorskih lopatica [5].

Buka, kao posljedica interakcije lopatice s vrtlozima oko njezinog vrha, povećava se dakle s povećanjem opterećenja lopatice i s povećanjem radijalnog razmaka y . Kod relativne zračnosti $y = 3\div 4\%$ duljine tetive lopatice može dosegnuti vrijednosti i do 15 dB(A) i više u ukupnoj razini buke u cijelom području rada ventilatora [6].

B. *Mehanizam generiranja buke zbog aksijalnog razmaka između rotora i statora ventilatora.* U razmaku između rotorskih i statorskih lopatica ventilatora stvara se potencijalno strujno polje kojega značenje zavisi od udaljenosti aksijalne zračnosti x i konfiguracije ventilatora, s pretkolom ili zakolom (sl. 5,b. i 5,c). U primjeru ventilatora s pretkolom apsolutna brzina toka zraka na izlazu iz statorskih lopatica periodično varira uzduž ravnine usporedno k lopatičnoj kaskadi zbog potencijalnog polja statorske kaskade i zbog vrtloga, koji se stvaraju oko svake lopatice. To se odražava na promjenu smjera brzine toka zraka na ulazu u rotorske lopatice. Slična situacija se pojavi kod ventilatora sa zakolom zbog promjena u polju brzine relativno na kaskadu rotorskih lopatica. Lopatice pretkola ili zakola predstavljaju dakle smetnju toku zraka na ulazu u rotor ili na izlazu iz rotora. Ta smetnja, kao posljedica interakcije susjednog niza lopatica, uzrokuje nestacionarno opterećenje lopatica rotora što se odražava na generiranje diskretnih frekvencija kod FRRL i njezinih viših harmonika. Taj mehanizam

generiranja buke, koji se odražava u obliku "rotirajućeg" spektra buke, najviše pridonose porastu razine buke viših harmonika FRRL [7].

Promjenom aksijalne zračnosti x mijenja se značenje vrtloga koji dolaze od lopatica pretkola odnosno značenje vrtloga koji dolazi od rotorskih lopatica do lopatica zakola, što se odrazi na promjeni lokalne turbulentne brzine i njihovu silu uzgona na rotorskim lopaticama. Posljedica toga je neuniformno stacionarno polje toka zraka koje je učinkovit izvor buke. Ako su lopatice rotora i statora vrlo blizu, učinak potencijalnog polja obiju kaskada i nastajućih vrtloga je mali. Moguće je i pojačano generiranje buke kao posljedica njihova uzgona na susjednom nizu lopatica, koji onda djeluje kao akustični glušnik [8]. Eksperimenti Sharlanda [8] pokazali su da buka ventilatora strmo raste ako se aksijalni razmak smanji pod određeni minimum. Povećanjem aksijalnog razmaka između lopatica rotora i statora smanji se tako interakcija između njihovih potencijalnih polja kao i učinak udaranja vrtloga (nastalih u lopatičnoj kaskadi) o rotorske lopatice. Međutim, povećanjem aksijalnog razmaka smanjuje se i učinak lopatica kao akustičnoga glušnika, tako da se buka s povećanjem aksijalne zračnosti može povećati ili smanjiti. Do povećanja buke dođe ako je obodna valna duljina smetnje toka jednakog reda veličine kao što je udaljenost između lopatica [7, 9, 10]. Učinak aksijalnog razmaka na oblik valovanja u polju brzina i time na buku koja nastane kao posljedica interakcije među lopatičnim kaskadama zavisi i od oblika lopatica i njihova opterećenja. Optimalna vrijednost aksijalnog razmaka x tako nije pri što višim vrijednostima nego je funkcija i spomenute valne duljine smetnje (pretkola ili zakola) λ i iznosi po nekim autorima od 0,3 do 0,4 promjera ventilatora [7].

Utjecaj aksijalne zračnosti nije jednoznačan; jednom smanjenju buke slijedi porast performanci, drugi put pak njihovo smanjenje, i zato se u praksi, pri ocjenjivanju učinkovitosti neke promjene služimo dodatnim parametrom - tzv. specifičnom razinom buke, L_s , koja je definirana izrazom:

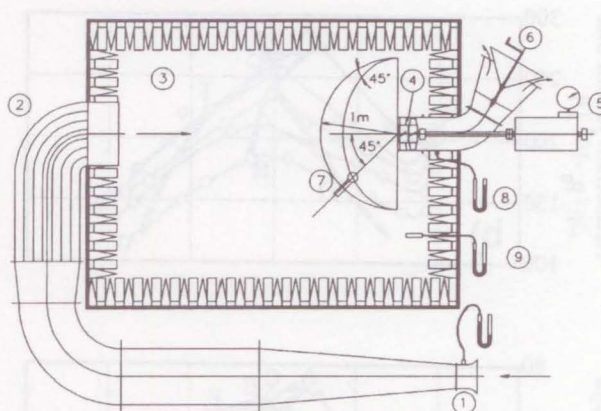
$$L_s = L_p - 10 \cdot \log_{10}(Q \cdot \Delta p_t^2) \text{ [dB]} \quad (1)$$

gdje su L_p izmjerena razina buke ventilatora u dB, Q protok zraka u m^3/s i Δp_t totalni porast tlaka u Pa. Specifična razina buke obilježuje akustičnu kvalitetu ventilatora jer uključuje performance i emitiranu buku ventilatora. Ta zavisi od tipa ventilatora, njegovih dimenzija i radne točke. Manje vrijednosti specifične razine buke označuju ventilator s boljim značajkama i zato njezin minimum odgovara optimalnoj geometriji ventilatora.

3. IZVEDBA EKSPERIMENTA

Da bismo utvrdili praktični učinak relativne zračnosti između rotora i statora ventilatora, izveli smo eksperimente na ventilatoru za hlađenje zračno hlađenih dizel-

skih motora s promjerom $\varnothing 360$ mm. Ventilator je imao 11 nejednako raspoređenih rotorskih lopatica i pretkolo s 18 jednakomjerno raspoređenih lopatica. Naklonski kut rotorske lopatice bio je na obodu $\gamma_D = 21^\circ$, konstrukcijska radijalna zračnost je bila $y_D = 0,75$ mm i aksijalna zračnost $x_D = 41$ mm. Radijalni razmak y mijenjali smo od 0,75 do 3,25 mm u koraku po 0,5 mm, dok je aksijalni razmak bio mijenjan od 31 do 77 mm u koraku po 5 odnosno 10 mm. Osim promjene opterećenja, mijenjali smo i broj okretaja ventilatora od 4000 do 5500 min^{-1} u koraku po 500 min^{-1} . Eksperimente smo izveli na ispitnoj postaji s gluhom komorom, koja omogućuje istodobno mjerenje emitirane buke i značajki ventilatora. Buku ventilatora izmjerili smo u gluhoj komori pomoću 1/2" mikrofona na udaljenosti 1 m od osi ventilatora i pod kutom 45° (sl. 3). Analizu buke izveli smo pomoću FFT analizatora B&K tip 2032.



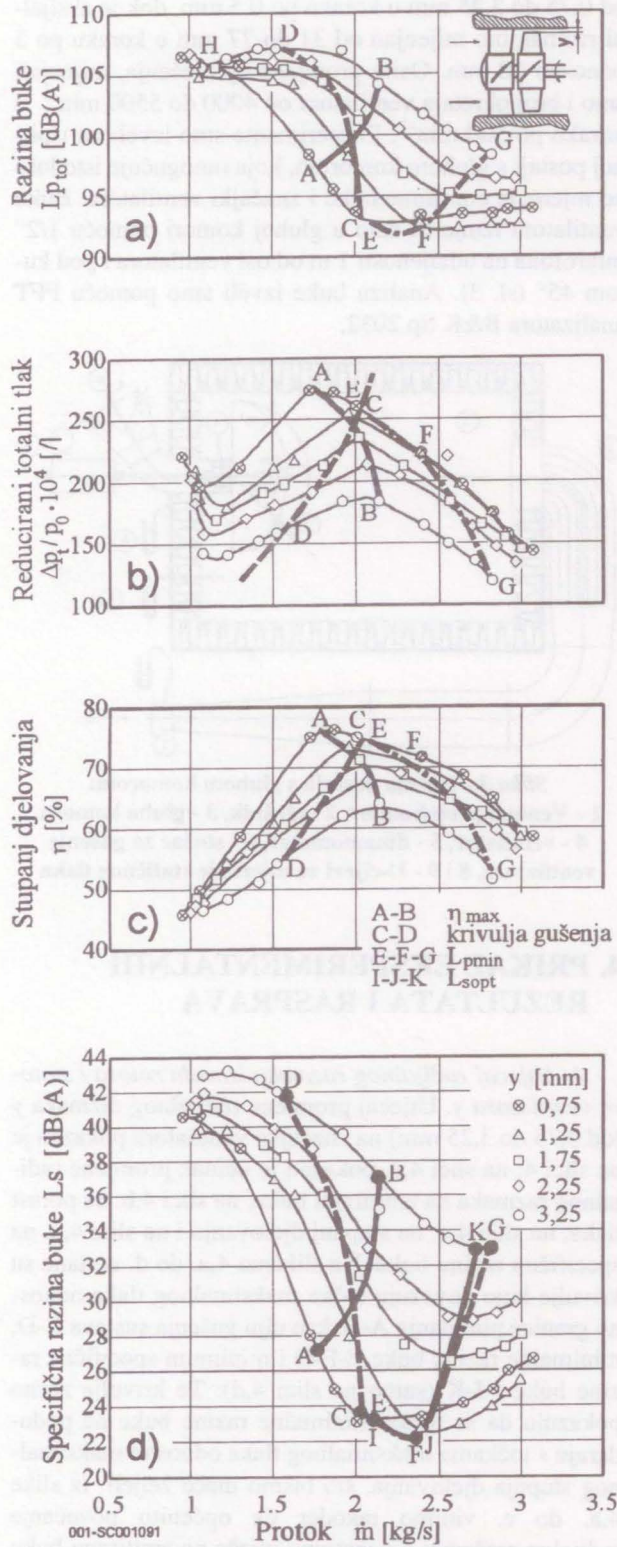
Slika 3 - Ispitna postaja s gluhom komorom:

- 1 - Venturi protokomjer, 2 - glušnik, 3 - gluha komora, 4 - ventilator, 5 - dinamoetar, 6 - stožac za gušenje ventilatora, 8 i 9 - U-cijevi za mjerenje statičnog tlaka

4. PRIKAZ EKSPERIMENTALNIH REZULTATA I RASPRAVA

A. Utjecaj radijalnog razmaka između rotora i statora ventilatora y . Utjecaj promjene radijalnog razmaka y (od 0,75 do 3,25 mm) na značajke ventilatora pokazan je na slici 4; na slici 4.a. pokazan je učinak promjene radijalnog razmaka na emitiranu buku, na slici 4.b. na porast tlaka, na slici 4.c. na stupanj djelovanja i na slici 4.d. na specifičnu razinu buke. Na slikama 4.a. do d. ucrtane su krivulje koje povezuju točke maksimalnog tlaka odnosno granice pumpanja A-B, krivulju gušenja sustava C-D, minimalne razine buke E-F-G i minimum specifične razine buke I-J-K (samo na slici 4.d). Te krivulje zorno pokazuju da se točke minimalne razine buke ne podudaraju s točkama maksimalnog tlaka odnosno maksimalnog stupnja djelovanja, što bismo inače željeli. Iz slike 4.a. do c. vidimo također da općenito povećanje radijalne zračnosti y negativno utječe na emitiranu buku i performance ventilatora. Osim kod vrijednosti

$y = 1,25$ mm, emitirana se buka stalno povećava i performance ventilatora se stalno pogoršavaju, točke maksimalnog tlaka (granica pumpanja) i stupnja djelovanja te minimalne razine buke pomaknu se udesno k višim protocima. To ujedno znači da se stabilno područje rada

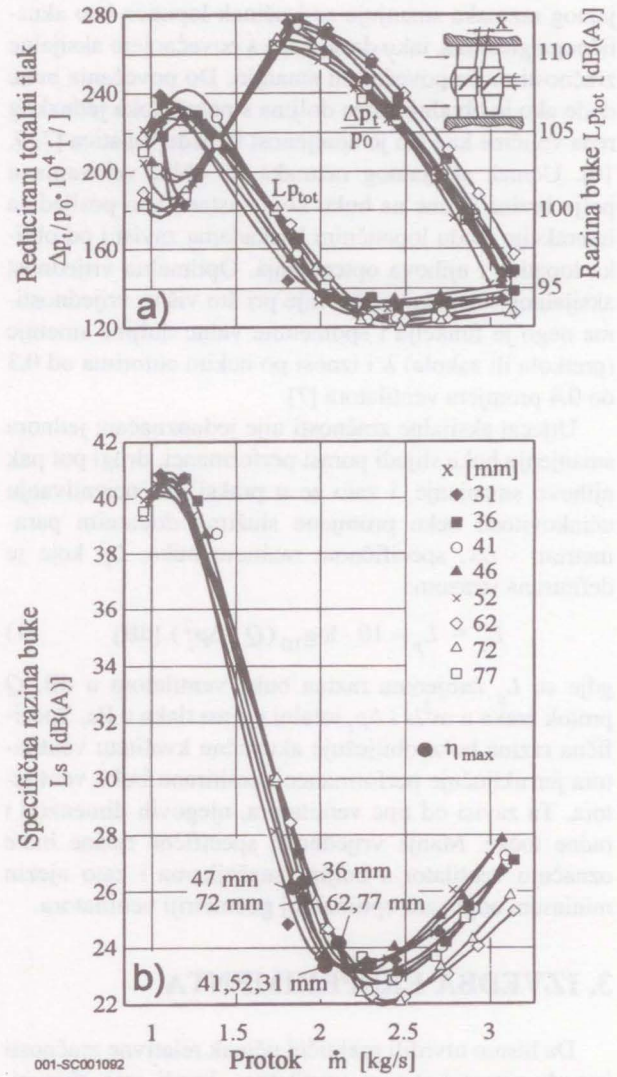


Slika 4 - Utjecaj radialne zračnosti na performanse i emitiranu buku ventilatora kod 5000 min^{-1}

ventilatora suzuje i da se za neku značajku sustava (C-D) vrlo brzo prijede u područje nestabilnog rada ventilatora već kod $y > 1,25$ mm.

Za objektivno ocjenjivanje najbolje geometrije ventilatora najprimjereniji je dijagram na slici 4,d. Točka F odnosno J na krivulji I-J-K odgovara minimalnoj vrijednosti specifične razine buke zato ona označuje optimalnu geometriju ventilatora. To znači da je optimalna vrijednost radialne zračnosti $y = 1,25$ mm. Ta vrijednost je veća od one u praksi, koja iznosi $0,75$ mm, što je mnogo ugodnije i glede izradbe kao i montaže. Međutim, kao što je vidljivo iz slike 4,b., u tom primjeru se pomakne granica pumpanja više udesno, prema većem protoku, što u mnogim primjerima nije poželjno, osobito pri većim otporima u sustavu.

Budući da točke E-F-G na slici 4,a. označuju minimalnu razinu buke i ujedno granicu između područja rada ventilatora gdje prevladava rotirajuća i nerotirajuća buka (v. sliku 1), možemo zaključiti da s povećavanjem relativne zračnosti y nerotirajuća buka preuzima sve šire



Slika 5 - Utjecaj aksijalne zračnosti na performanse i emitiranu buku ventilatora kod 5000 min^{-1}

područje rada ventilatora, dok pri određenoj vrijednosti relativne zračnosti ne prevlada u cijelom području rada ventilatora. Takav primjer je kod vrijednosti $y = 3,25$ mm, kada je minimalna razina buke pri maksimalnom protoku (točka G), dok je radna točka na krivulji značajke sustava u točki D u području maksimalne razine buke. Kod malih protoka, odnosno velikih opterećenja lopatica rotora, učinak radijalne zračnosti y postaje zanemariv zbog prevladavajućeg učinka drugog mehanizma generiranja buke, npr. zbog nestacionarnog stvaranja vrtloga u lopatičnoj kaskadi u blizini granice pumpanja i lijevo od nje (v. područje lijevo od točke D na slici 4,a).

B. Utjecaj aksijalne zračnosti između rotora i statora ventilatora x . Učinak promjene aksijalne zračnosti x (od 31 do 77 mm) na značajke ventilatora pokazan je na slici 5. pri 5000 okretaja u minuti; na slici 5,a. pokazan je učinak promjene aksijalne zračnosti na emitiranu buku L_p i povećanje tlaka Δp_t i na slici 5,b. na specifičnu razinu buke L_s . Na slici 5,b. punim su krugom označene točke maksimalnog stupnja djelovanja η_{max} .

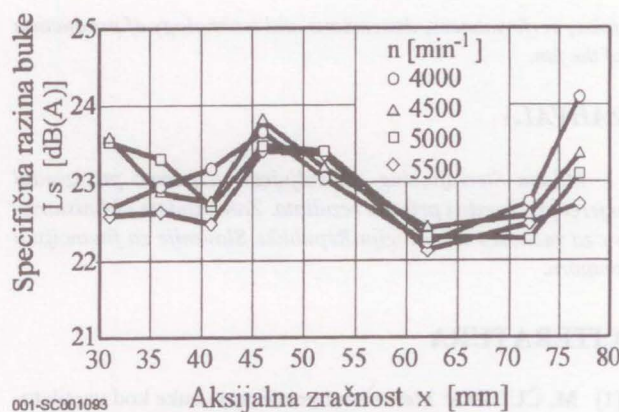
Iz slike 5,b. možemo zaključiti da ventilator radi s najboljim stupnjem djelovanja kod protoka približno $2 \text{ m}^3/\text{s}$, dok je minimum specifične razine buke kod nešto viših protoka, između $2,25$ i $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Utjecaj aksijalne zračnosti na značajke ventilatora relativno je mali, do 12% na povećanje tlaka i do 2 dB(A) na razinu buke. Detaljna analiza rezultata pokazuje da se minimalna razina buke, maksimalni stupanj djelovanja i maksimalno povećanje tlaka ne mijenjaju po nekoj zakonitosti; razlike su i pri različitim brojevima okretaja. Da bi se dobila optimalna vrijednost aksijalne zračnosti x , koristi se slika 5,b. za specifičnu razinu buke u funkciji protoka m kod 5000 min^{-1} , odnosno slika 6. za minimalnu razinu buke u funkciji aksijalne zračnosti x pri različitim brojevima okretaja n .

Iz slike 6. vidimo da je za različite brojeve okretaja specifična razina buke minimalna kod vrijednosti aksijalne zračnosti x između 60 i 70 mm i s neznatno višim vrijednostima između 30 i 40 mm. To su ujedno i optimalne vrijednosti aksijalne zračnosti x za danu izvedbu ventilatora.

Kao što vidimo iz slike 5,a, izborom optimalne aksijalne zračnosti x možemo reducirati buku za približno 2 dB(A). Na žalost, optimalni aksijalni razmak između rotora i statora ne možemo izvoditi slobodno jer time izravno utječemo i na dimenzije ventilatora koje su često ograničene, npr. zbog ograničenog prostora za ugradbu.

5. ZAKLJUČAK

Ukupna razina buke ventilatora sastoji se od "rotirajućeg" i "nerotirajućeg" dijela spektra. Kod rada ventilatora izvan optimalne radne točke prevladava nerotirajuća buka. Jedan od izvora nerotirajuće buke ventilatora je i zbog postojanja radijalne i aksijalne zračnosti između



Slika 6 - Minimalna specifična razina buke u zavisnosti od aksijalne zračnosti x

rotora i statora. Radijalna i aksijalna zračnost utječu i na emitiranu buku i na performance ventilatora. S povećanjem radijalne zračnosti općenito generirana buka ventilatora raste dok se performance ventilatora pogoršavaju. Optimalna radijalna zračnost nije kod minimalno moguće, nego malo više, u našem primjeru kod $y = 1,25$ mm. Optimalna aksijalna zračnost bila bi suprotno pri što višim vrijednostima kada bi pretkolo odnosno zakolo izgubilo svoje značenje smetnje i kada bi nestao problem interakcije dvaju susjednih potencijalnih strujnih polja. Za ventilator na kojemu su bila obavljena istraživanja optimalna je vrijednost aksijalne zračnosti x između 60 i 70 mm i nešto manje između 30 i 40 mm. Dvije različite optimalne vrijednosti potvrđuju teoriju po kojoj je generirana buka, kao posljedica promjene aksijalne zračnosti x , u funkciji obodne valne duljine smetnje toka pred ili za rotorom ventilatora. Budući da su u praksi vrijednosti aksijalne zračnosti ograničene maksimalno prihvatljivim dimenzijama ventilatora i ograničenim prostorom za ugradbu i da su minimalne vrijednosti radijalne zračnosti ograničene tehnologijom izradbe i montaže, imaju dobivene optimalne vrijednosti praktično značenje.

SUMMARY

EFFECTS OF RADIAL AND AXIAL CLEARANCES ON THE FAN EMITTED NOISE AND ITS PERFORMANCES

Among all auxiliary units of the air cooled diesel engine a cooling fan is the noisiest. One of the noise generation mechanisms is the blade interaction with the vortices occurring in the radial and axial clearances of the fan due to the pressure difference between the pressure and suction side of the rotor blade. This mechanism of noise generation is especially distinct if the fan is operating in a heavily loaded condition, i.e., at partial flow rate, when the pressure differences are greater. In this paper the effects of radial and axial clearances between the rotor and stator of the fan on the emitted noise and performances of the fan will be presented and discussed. The experimental results have shown that the radial and axial clearance have its optimum with regard to the best value of emitted

noise, performances, dimensions and technology of production of the fan.

ZAHVALA

Milanu Steržaju, ing. zahvaljujem za pomoč pri izvedbi mjenja, obrade i prikaza rezultata. Zahvaljujem i Ministarstvu za znanost i tehnologiju Republike Slovenije za finacijsku potporu.

LITERATURA

[1] M. ČUDINA: Mehanizmi generiranja buke kod ventilatora za hlađenje motora s unutarnjim izgaranjem. *Promet*, vol. 7, 1995, br. 4, str. 89-93.

[2] M. ČUDINA: Flow Instabilities and Noise Generation in Vane Axial Fans due to Rotating Stall and Surge. *SAE International Off-Highway Powerplant Congress & Exposition*, Milwaukee, USA, September 1995, Paper No. 952104.

[3] M. ČUDINA: Noise Generated by a Vane-Axial Fan with Inlet Guide Vanes. *Noise Control Engineering Journal*, Vol. 39/1, 7-8, 1992, pp. 21-30.

[4] M. J. LIGHTHILL: On Sound Generated Aerodynamically, *General Theory*. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1952, Vol. A211, pp. 564-587.

[5] R. E. LONGHOUSE: Control of Tip-Vortex Noise of Axial Flow Fans by Rotating Shrouds. *Journal of Sound and Vibration* (1978) 58 (2), pp. 201-214.

[6] R. E. LONGHOUSE: Noise Mechanism Separation and Design Considerations for Low Tip-Speed, Axial-Flow Fans. *Journal of Sound and Vibration* (1976) 48 (4), pp. 461-474.

[7] K. B. WASHBURN, G. C. LAUCHLE: Inlet Flow Conditions and Tonal Sound Radiation from a Subsonic Fan. *Noise Control Engineering Journal* (1988) 31 (2), pp. 101-110.

[8] I. J. SHARLAND: Sources of Noise in Axial Flow Fans. *Journal of Sound and Vibration* (1964) I (3), pp. 302-322.

[9] W. NEISE: Fan Noise - Generation Mechanisms and Control Methods. *Proceedings of the INTER NOISE 88*, Avignon, France, 1988, pp. 767-776.

[10] L. M. GRAY: A Review of the Physics and Aerodynamics with a View Toward Noise Control. *Proceedings of the NOISE-CON 83*, Cambridge Massachusetts, 1983, pp. 187-196.