

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

Izvorni znanstveni članak - Original scientific paper
UDK: 621.175:62-533
Primljeno - Accepted: 23.05.1995.
Prihvaćeno - Approved: 19.06.1995.

MEHANIZMI GENERIRANJA BUKE KOD VENTILATORA ZA HLAĐENJE MOTORA S UNUTARNJIM IZGARANJEM

SAŽETAK

Među svim pomoćnim strojevima motora s unutarnjim izgaranjem ventilator emitira buku najviše razine. Mehanizmi koji generiraju buku kod ventilatora dijele se na rotirajuće i nerotirajuće, a ovise o geometriji ventilatora i režimu rada. Rotirajuću buku obilježuje širokotračni spektar s izrazitim tonovima pri diskretnim frekvencijama, koje su u svezi s frekvencijom rotacije rotorskih lopatica i njenih viših harmonika. Pri višim opterećenjima ventilatora (kod malih protoka) dominira takozvana "nerotirajuća buka", koju obilježuje širokotračni spektar s izrazitim vrhom pri frekvenciji koja nije u svezi s frekvencijom rotacije rotora i rotorskih lopatica. Rotirajuća buka je posljedica fluktuirajućih sila na lopaticama rotora i njihove interakcije sa susjednim stacionarnim objektima. Nerotirajuća buka kod aksijalnog ventilatora je posljedica: a) raspada vrtloga u laminarnom graničnom sloju, b) interakcije rotorskih lopatica s vrtlozima oko vrha lopatice i c) induciranih vrtloga u kaskadi. Cilj ovog članka je da rasvijetli svaki od navedenih mehanizama generiranja buke kod aksijalnih ventilatora za hlađenje automobilskih motora.

1. UVOD

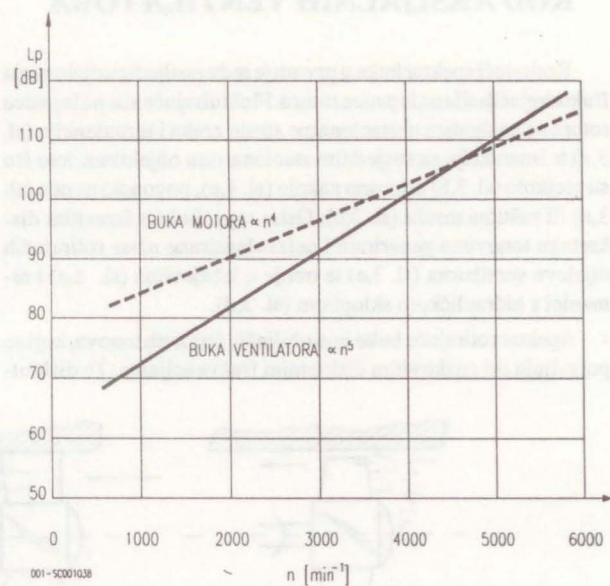
Buku vozila stvaraju pogonski agregat, transmisija, gume i otpor vjetra. Buka pogonskog agregata sastoji se od buke motora i buke pomoćnih strojeva. Među pomoćnim strojevima najbučniji je ventilator za hlađenje motora odnosno hladnjaka, što posebno vrijedi za zračno hlađene motore, kod kojih ventilator mora svladavati veće protočne otpore. Kod zračno hlađenih motora se zato ventilatori u pravilu vrte brže i imaju veći broj lopatica. Veći broj okretaja i lopatica ima za posljedicu veću emitiranu buku, koja može biti i veća od buke motora, posebno kod viših okretaja i opterećenja lopatice (kod $Q < Q_{opt}$).

Poznato je da buka ventilatora raste približno s petom potencijom broja okretaja, dok buka motora raste s približno četvrtom potencijom broja okretaja (sl. 1), što znači da buka ventilatora raste s brojem okretaja brže od buke motora [1].

Stoga je, pri pokušaju smanjenja buke, pored motora potrebno uzeti u obzir i ventilator, kao jednog od dominantnih izvora buke, kojim se može utjecati na smanjenje ukupne buke vozila.

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.

Rotirajući mehanizam generiranja 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. Taj oblik spektra ne ovisi o opterećenju i zato prevladava kod neopterećene lopatice, tj. kod viših i najviših protoka ($Q \geq Q_{opt}$).

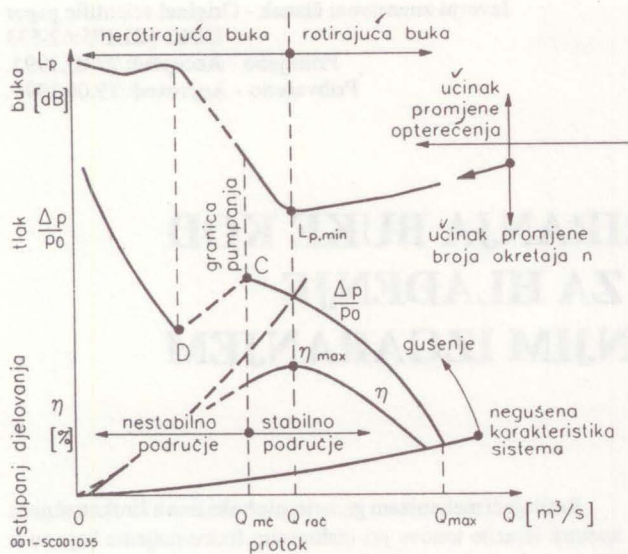


Slika 1. Ovisnost buke ventilatora i motora o broju okretaja

Nerotirajući mehanizam generiranja buke ima u širokotračnom spektru izraziti vrh pri frekvenciji koja nije u svezi s frekvencijama FRR ili FRRL. Taj oblik spektra prevladava pri višim opterećenjima lopatice, tj. kod manjih protoka ($Q < Q_{opt}$), posebno u blizini granice pumpanja i lijevo od nje (sl. 2) [2].

Nerotirajući spektar buke ima utjecaja i kod viših protoka, kod $Q > Q_{opt}$, mada mnogo manjeg intenziteta od onoga lijevo od granice pumpanja.

Budući da rotirajući spektar buke prevladava pri višim a nerotirajući pri nižim protocima, ukupna razina buke ovisi o njihovom relativnom udjelu. Minimalna razina buke pojavljuje se negdje u blizini optimalne točke rada, tj. u blizini maksimalnog stupnja djelovanja. Trenutačna razina buke ovisna je o radnoj točki odnosno o broju okretaja i opterećenju (sl. 2).



Slika 2. Značajke ventilatora

2. MEHANIZMI GENERIRANJA ROTIRAJUĆE I NEROTIRAJUĆE BUKE KOD AKSIJALNIH VENTILATORA

Rotirajući spektar buke u prvom je redu posljedica djelovanja fluktuirajućih sila na lopatice rotora. Fluktuirajuće sile na lopatice rotora su posljedica nestacionarne struje zraka i turbulencije (sl. 3,a) te interakcije sa susjednim stacionarnim objektima, kao što su pretkolo (sl. 3,b) odnosno zakolo (sl. 3,c), pogonski remen (sl. 3,d) ili zaštitna mreža (sl. 3,e). Osim toga, buku s izrazitim diskretnim tonovima generiraju i neizbalansirane mase rotirajućih dijelova ventilatora (sl. 3,e) te trenje u ležajevima (sl. 3,e) i remenici s hidrauličkom sklopkom (sl. 3,d).

Spektar rotirajuće buke ima obilježje izrazitih tonova, koji se pojavljuju pri znakovitim diskretnim frekvencijama. Te diskret-

ne frekvencije su multiplikatori FRR i/ili FRRL i njihovih viših harmonika. Diskretne frekvencije tonova računaju se pomoću jednadžbi:

$$FRR = \frac{n}{60} \cdot i \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

$$FRRL = \frac{z \cdot n}{60} \cdot i \quad [\text{Hz}] \quad (2)$$

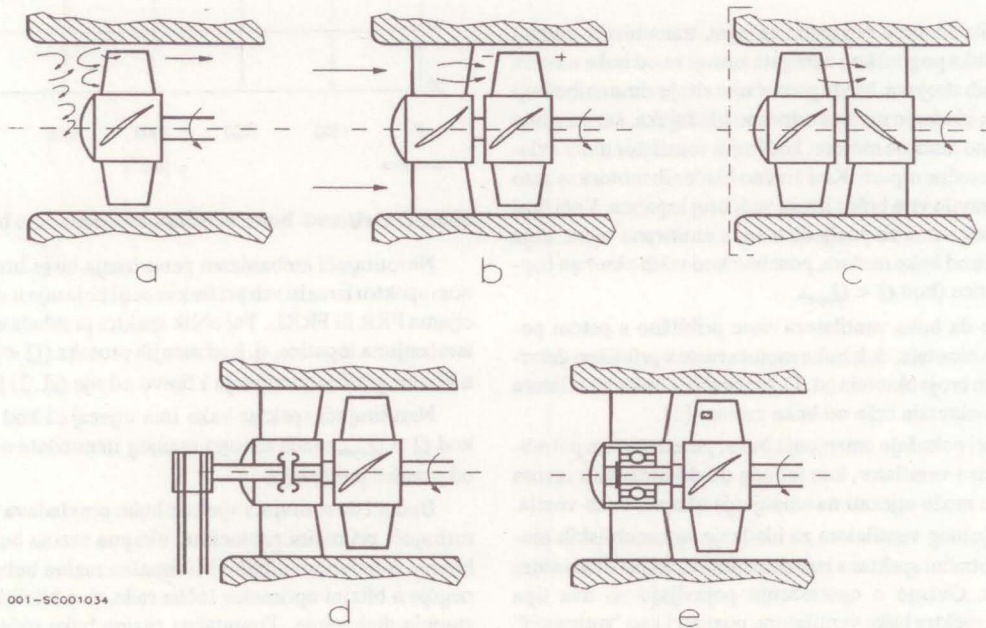
gdje je n broj okretaja u $[\text{min}^{-1}]$, z broj lopatica i i red harmonika ($i = 1, 2, \dots$).

Trenje u ležajevima i neizbalansirane mase rotirajućih dijelova ventilatora generiraju tonalnu buku kod diskretnih frekvencija, koje su u vezi s FRR i njenim višim harmonicima. Kod kliznih ležajeva i pri kvalitetnoj izvedbi ventilatora, izraziti su tonovi kod FRR zanemarivi. FRR imaju malo značenje i zato što se buka kod frekvencija ispod 1000 Hz, tj. frekvencijski opseg gdje se uglavnom pojavljuju FRR, smanjuje zbog relativne neosjetljivosti uha. U tom području vrijedi A ponderacija, koja oduzima znatan iznos buke od izmjerenih vrijednosti na mikrofoni i prilagođuje ih osjetljivosti uha (s oznakom dB(A)).

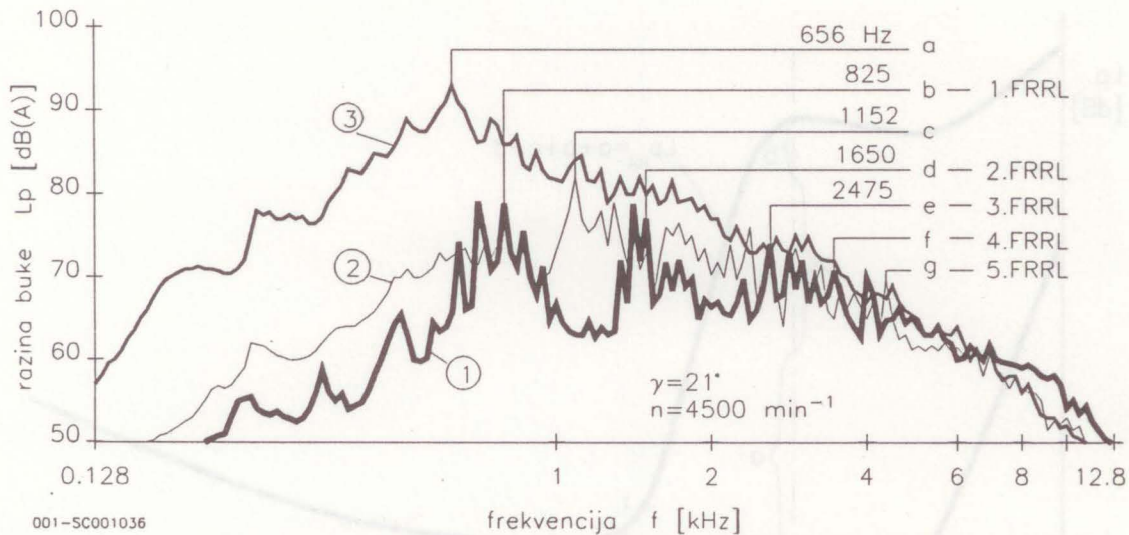
Fluktuirajuće sile na lopaticama rotora i njihova interakcija sa susjednim stacionarnim objektima u svezi su s FRRL i njenim višim harmonicima. Ako korak među lopaticama nije jednak, diskretne frekvencija tonova rotirajuće buke nisu multiplikator FRRL, nego se rasprše na više vrhova manjih amplituda oko neke središnje FRRL. U tom primjeru, kod više vrhova manjih diskretnih frekvencija, osjećaj je glasnosti za uho manji dok je ukupna zvučna snaga jednaka onoj jednoga tona kod FRRL, koji vrijedi za jednakomjerni korak lopatica.

Rotirajuću buku obilježuje veliki broj harmonika od kojih su prva tri FRRL posebno izraziti i daju osjećaj glasnosti mnogo veći od njihove stvarne zvučne snage.

Rotirajuća buka neovisna je o opterećenju lopatice odnosno o otporu sustava pa stoga prevladava kod neopterećene lopatice, odnosno kod optimalnog (računskog) i viših protoka ($Q \geq Q_{opt}$). Spektar rotirajuće buke prikazan je krivuljom l na slici 4. koja



Slika 3. Izvori rotirajuće buke



Slika 4. Znakoviti oblici spektra buke aksijalnog ventilatora: (1) kod maksimalnog protoka, (2) kod protoka neposredno pred granicom pumpanja i (3) kod protoka koji odgovara granici pumpanja

predstavlja primjer ventilatora s promjenjivim korakom lopatica rotora [3, 4].

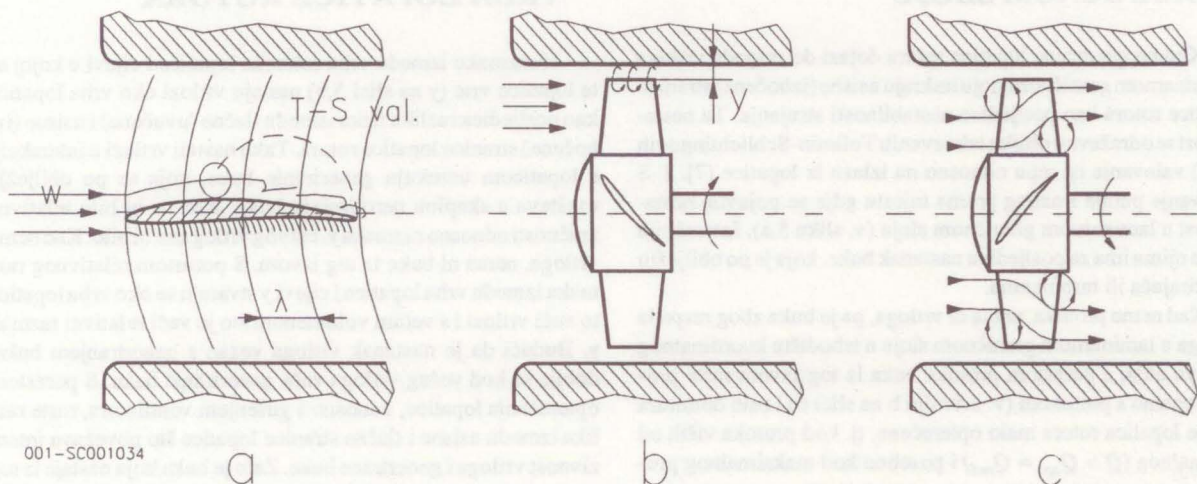
Iz krivulje 1 na slici 4. oko svake centralne FRRL uočava se više (po 5) vrhova, koji su posljedica pet različitih koraka rotorskih lopatica. Rotirajuća buke ovisna je samo o broju okretaja i ne mijenja se s opterećenjem pa je ukupna razina buke neovisna o protoku (v. crtu a na slici 6). S porastom broja okretaja a se pomakne usporedno prema višim vrijednostima. Rotirajuća buka u većini primjera raste s petom potencijom broja okretaja n [3].

Nerotirajući spektar buke posljedica je različitih mehanizama generiranja buke, među kojima su najvažnija sljedeća tri [3÷5]:

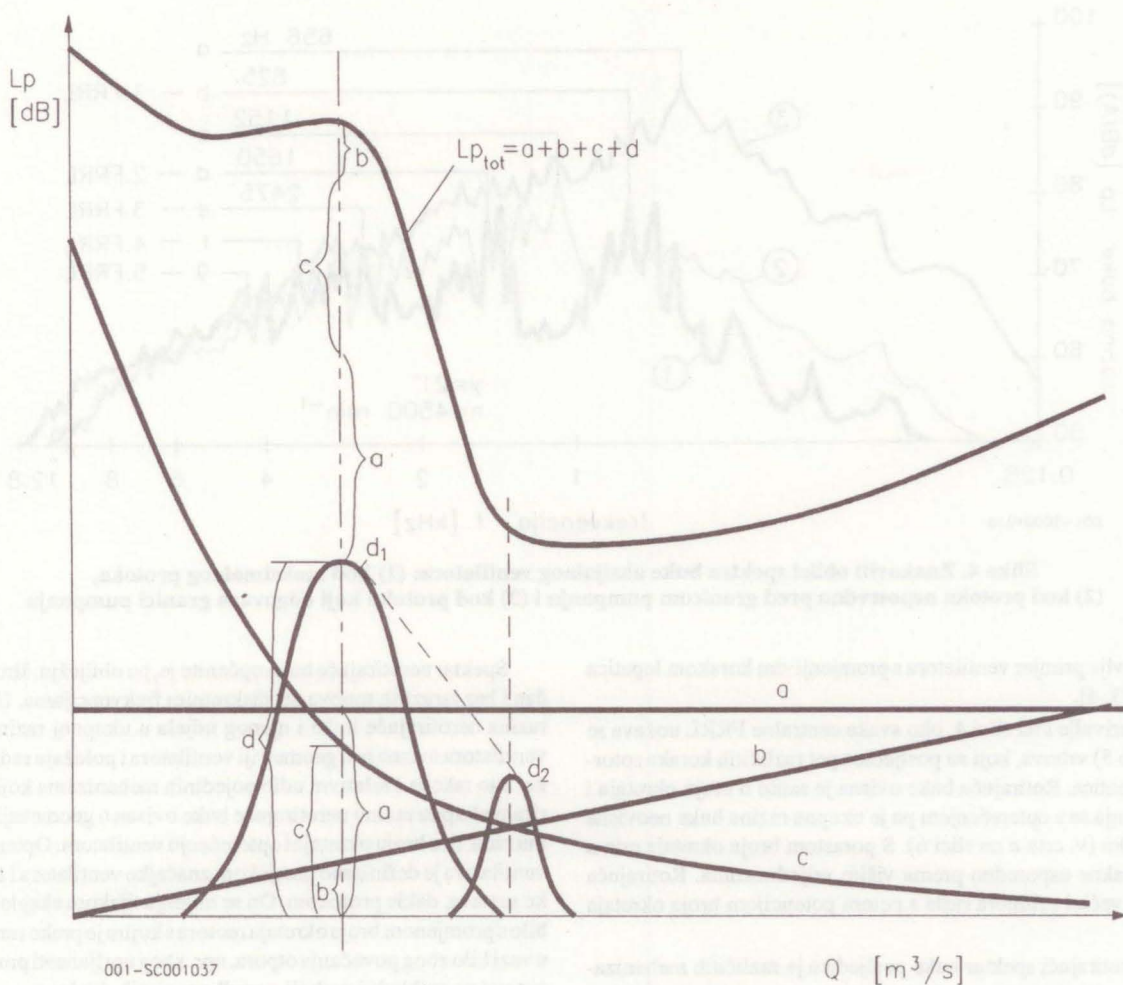
- raspadanje vrtloga u laminarnom graničnom sloju (sl. 5,a)
- interakcija lopatice s vrtlogom oko vrha lopatice rotora (sl. 5,b)
- nastanak vrtloga u kaskadi rotorskih lopatica i/ili lopatica pretkola odnosno zakola (sl. 5,c).

Spektar nerotirajuće buke općenito je, po obilježju, širokotračan i bez izrazitih tonova pri diskretnim frekvencijama. Ukupna razina nerotirajuće buke i njenog udjela u ukupnoj razini buke ventilatora ovisna je o geometriji ventilatora i položaju radne točke. Isto tako je i relativni udio pojedinih mehanizama koji generiraju ukupnu razinu nerotirajuće buke ovisan o geometriji i režimu rada, tj. o broju okretaja i opterećenju ventilatora. Opterećenje ventilatora je definirano presjekom značajke ventilatora i značajke sustava, dakle protokom. On se mijenja tijekom eksploatacije bilo s promjenom broja okretaja motora s kojim je preko remenice u vezi bilo zbog povećanja otpora, npr. zbog uprljanosti protočnih putova za rashladni zrak ili ugradbom novih dijelova.

Ukupna nerotirajuća buka prevladava kod parcijalnih protoka tj. pri povećanom opterećenju lopatica, u blizini granice pumpanja i lijevo od nje (sl. 2). Nerotirajuća buka, u usporedbi s rotirajućom, može biti viša i do 15 DB. Nerotirajuća buka raste sa 6,5 potencijom broja okretaja [3], a ovisna je i o geometriji ventilatora, i posebno o tomu ima li pretkolo ili zakolo i kakva je njihova udaljenost od rotora [3, 5, 6].



Slika 5. Izvori nerotirajuće buke



Slika 6. Relativni utjecaj različitih mehanizama generiranja buke

3. UTJECAJ MEHANIZMA GENERIRANJA NEROTIRAJUĆE BUKE ZBOG RASPADANJA VRTLOGA U LAMINARNOM GRANIČNOM SLOJU

Kod neopterećene lopatice rotora dolazi do raspada vrtloga u laminarnom graničnom sloju na kraju usisne (izbočene) stranice lopatice rotora kao posljedica nestabilnosti strujanja. Ta nestabilnost se odražava u obliku takozvanih Tollmin-Schlichtingovih (T-S) valovanja na repu odnosno na izlazu iz lopatice [7]. T-S valovanje putuje i natrag prema mjestu gdje se pojavila nestabilnost u laminarnom graničnom sloju (v. sliku 5,a). Interakcija među njima ima za posljedicu nastanak buke, koja je po obilježju nerotirajuća ili turbulentna.

Kad nema protoka, nema ni vrtloga, pa je buka zbog raspada vrtloga u laminarnom graničnom sloju u ishodištu koordinatnog sustava nula; s porastom protoka buka iz tog izvora raste proporcionalno s protokom (v. krivulju b na slici 6) i zato dominira kad je lopatica rotora malo opterećena, tj. kod protoka viših od optimalnog ($Q > Q_{opt} = Q_{raz}$) i posebno kod maksimalnog protoka. Taj izvor buke može pridonijeti do 5 dB u ukupnoj razini buke i do 22 dB kod viših frekvencija (8÷4 kHz) [7].

4. UTJECAJ MEHANIZMA GENERIRANJA NEROTIRAJUĆE BUKE ZBOG INTERAKCIJA LOPATICE S VRTLOGOM OKO VRHA LOPATICE ROTORA

U razmaku između vrha rotorske lopatice i cijevi u kojoj se te lopatice vrte (y na slici 5,b) nastaju vrtlozi oko vrha lopatice kao posljedica razlika tlaka između tlačne (uvučene) i usisne (izbočene) stranice lopatice rotora. Tako nastali vrtlozi u interakciji s lopaticom uzrokuju generiranje buke, koja se po obilježju uvrštava u skupinu nerotirajuće buke. Kad ne bi bilo relativne zračnosti odnosno razmaka y, takvog vrtloga ne bi bilo. Kad nema vrtloga, nema ni buke iz tog izvora. S porastom relativnog razmaka između vrha lopatice i cijevi y stvaraju se oko vrha lopatice to veći vrtlozi i s većim volumenom što je veći relativni razmak y. Budući da je nastanak vrtloga vezan s generiranjem buke, dobije se kod većeg vrtloga veće generiranje buke. S porastom opterećenja lopatice, odnosno s gušenjem ventilatora, raste razlika između usisne i tlačne stranice lopatice što povećava intenzivnost vrtloga i generirane buke. Zato je buka koja nastaje iz tog izvora to veća što je protok Q manji, odnosno što su veći otpori u sustavu i što je veća relativna zračnost y. Za neku vrijednost razmaka y porast buke kao posljedica interakcije lopatice s vrtlogom

oko vrha lopatice prikazan je krivuljom c na slici 6. Vidi se da su kod malih opterećenja lopatica rotora, kod Q_{max} vrijednosti najniže, što je posljedica malih razlika u tlaku između usisne i tlačne stranice lopatice rotora. S porastom otpora u sustavu, odnosno s povećanim gušenjem ventilatora, razlike u tlaku na jednoj i drugoj strani lopatice rastu, što povoljno utječe na stvaranje većeg vrtloga oko vrha lopatice i do intenzivnijega generiranja buke. Ako se razmak y poveća, krivulja c na slici 6. pomakne se usporedno prema višim vrijednostima.

Buka kao posljedica interakcije lopatice s vrtlozima oko njenog vrha može, kod relativne zračnosti $y = 3 \pm 4\%$ duljine tetive lopatice, dosegnuti vrijednosti i do 15 dB i više u ukupnoj razini buke u cijelom području rada ventilatora [8]. Međutim, treba napomenuti da se kod prevelike vrijednosti relativne zračnosti y , osim što raste buka, smanjuje i stupanj djelovanja ventilatora.

5. UTJECAJ MEHANIZMA GENERIRANJA NEROTIRAJUĆE BUKE ZBOG NASTANKA VRTLOGA U LOPATIČNOJ KASKADI

U normalnim uvjetima rada, odnosno kod protoka viših od optimalnih ($Q \geq Q_{opt}$), nisu ispunjeni uvjeti za stvaranje vrtloga u kanalima između lopatica, pa i generiranje buke kao posljedica nastanka vrtloga u lopatičnoj kaskadi nema nikakvog utjecaja na ukupnu buku ventilatora. Kod viših opterećenja lopatice, odnosno s gušenjem ventilatora, nastanu vrtlozi u kanalima među rotorskim lopaticama i/ili lopaticama pretkola odnosno zakola (sl. 5,c). Ti vrtlozi pokrivaju, ovisno o stupnju gušenja ventilatora, veći ili manji presjek kanala između lopatica, tako da prouzrokuju smetnje za protok zraka. Te se smetnje odražavaju, osim na smanjenje protoka, i na smanjenje tlaka i stupnja djelovanja. Osim toga, nastali vrtlozi generiraju buku koja je proporcionalna intenzivnosti nastalih vrtloga. Kako se s gušenjem ventilatora povećava volumen i intenzivnost vrtloga, nastala buka raste prema manjim protočnim količinama.

Analiza nastanka vrtloga kod viših opterećenja lopatica kod $Q < Q_{opt}$ pokazala je da u početku nastanu dva neovisna vrtloga, i to jedan na izlazu uz korijen lopatice i drugi na ulazu uz vrh lopatice (sl. 5,c) [2]. Nastali vrtlozi rotiraju frekvencijom, koja je ovisna u prvom redu o broju vrtloga. Dok postoje dva vrtloga u lopatičnoj kaskadi, ta je frekvencija negdje na polovici između prvog i drugog harmonika FRRL [2-4]. Intenzivnost buke, koja nastaje rotacijom dvaju neovisnih vrtloga u kanalima među lopaticama, nije velika, a amplituda vrha tako nastale buke je malo viša od amplitude vrha prvog i drugog harmonika FRRL (v. krivulju 2 na slici 4, i vrh između I. i II. harmonika FRRL).

Daljnijim gušenjem ventilatora dva se neovisna vrtloga povećavaju tako da u određenom trenutku dođe do njihovog dodira i ujedinjenja u jedan vrtlog većih dimenzija. Nastaje tzv. kvazirezonantno stanje s vrlo intenzivnim generiranjem buke. Tako nastala buka ima vrh pri nekoj srednjoj frekvenciji, koja je niža od I. harmonika FRRL (v. krivulju 3 na slici 4). Frekvencija vrha spektra buke kao posljedica jednog vrtloga približno je polovična vrijednost frekvencije vrha buke kod dvaju vrtloga [2-4]. Obje frekvencije, koje obilježavaju vrh za dva i za jedan vrtlog, inače nešto variraju, međutim osnovna orijentacija ostaje nepromijenjena. Oba vrha buke (za dva i za jedan vrtlog) pojavljuju se kod različitih režima rada odnosno kod različitih protoka. Buka kao posljedica dvaju vrtloga pojavljuje se kod višeg protoka

(v. krivulju d_2 na slici 6) i neposredno pred granicom pumpanja. Ta buka još nije tako velika a i rad ventilatora je još stabilan. Buka kao posljedica jednog vrtloga, koja nastaje s daljnjim gušenjem sustava, odnosno ventila iza ventilatora, pojavljuje se na samoj granici pumpanja (v. krivulju d_1 na slici 6). Ta buka je vrlo velika i opasna jer se pojavljuje i nestabilnost u radu, koja je znakovita za rad na granici pumpanja ventilatora. Kako se može mijenjati položaj granice pumpanja (npr. nekim konstrukcijskim rješenjima), tako se može utjecati i na pojavu toga kvazirezonantnog stanja. Bukakojase pojavi s nastankom kvazirezonantnog stanja ima oblik krivulje d_1 na slici 6.

Daljnijim gušenjem protoka, lijevo od granice pumpanja, volumen se vrtloga u kanalima između rotorskih lopatica stalno povećava a generiranje buke ipak malo smanjuje, jer se rad ventilatora, kad prođe preko granice pumpanja, stabilizira ali sad pri nižem tlaku i protoku (v. zbirnu krivulju $L_{p,tot}$ na slici 6) [2]. Do ponovnog porasta totalne buke $L_{p,tot}$, prema $Q=0$ na slici 6, dolazi zbog interakcije lopatice s vrtlogom oko njenog vrha (v. krivulju c na slici 6).

SUMMARY

NOISE GENERATING MECHANISMS BY FANS IN IC ENGINES COOLING APPLICATION

Among all engine auxiliary units a cooling fan is the noisiest. There are two mechanisms that generate the overall noise of the fan: the rotational and non-rotational one. These mechanisms depend on the fan's geometry and operation conditions. The rotational noise is characterized by a broadband noise and superimposed discrete frequency tones. The superimposed tones are linked with the blade passage frequency and its higher harmonics. In heavily loaded conditions (at the lower flow rate) non-rotational noise is found to be prevailing. The non-rotational noise spectrum has a peak at frequency that is not related to the rotational speed or blade passage frequency. Rotational noise is mainly the consequence of the fluctuating forces on the rotor blades and is provoked by the interaction of the rotor blades with the nearby stationary objects. Non-rotational noise is caused by: a) laminar boundary layer vortex shedding, b) blade interaction with the tip clearance vortex and c) blade stall. The goal of this paper is highlight all these noise generating mechanisms caused by axial fans in IC engines cooling applications.

LITERATURA

- [1] R.G. WHITE, J.G. WALKER: Noise and Vibration. John Wiley and Sons, New York, 1986.
- [2] M. ČUDINA: Flow Instabilities and Noise Generation in Vane Axial Fans due to Rotating Stall and Surge. Proceedings of the SAE International Off-Highway Powerplant Congress & Exposition, Milwaukee, USA, September 1995.
- [3] M. ČUDINA: Noise Generated by a Vane- Axial Fan with Inlet Guide Vanes. Noise Control Engineering Journal. Vol. 39/1, July-August 1992, p. 21-30.
- [4] M. ČUDINA et al.: Noise Analysis of the Engine Cooling Fan. Proceedings of the INTER-NOISE '90 Conference, Gothenburg, Sweden, August 1990.
- [5] M. ČUDINA: Noise Prediction by Axial Flow Fans. Proceedings of the INTER-NOISE '94 Conference, Yokohama-Japan, August 1994.
- [6] R.E. LONGHOUSE: Noise Mechanism Separation and Design Considerations for Low Tip-Speed, Axial-Flow Fans. Journal of Sound and Vibration, 48, 1976, 4, p. 461-474.
- [7] R.E. LONGHOUSE: Vortex Shedding Noise of Low Tip Speed, Axial Flow Fans. Journal of Sound and Vibration, 53, 1977, 1, p. 25-46.
- [8] R.E. LONGHOUSE: Control of Tip-Vortex Noise of Axial Flow Fans by Rotating Shrouds. Journal of Sound and Vibration, 58, 1978, 2, p. 201-214.