

Buka klimatizacionih postrojenja (II)

Husnija Kurtović *

8. NIVO ZVUKA U PROSTORIJI

Polazeći od akustičke snage, može se naći nivo zvuka u prostoriji. Zvučno polje formiraju dva zvuka: jedan je tzv. direktan zvuk, koji se najkraćim putem prostire od rešetke do ugroženog mesta, a drugi je tzv. reflektovan zvuk, koji obrazuju zvučni talasi koji su od rešetke do ugroženog mesta išli najrazličitijim putevima kroz prostoriju, odbijajući se manje ili više puta od zidova i drugih prepreka, i, naravno, gubeći prilikom svakog odbijanja svoju akustičku energiju. Direktan zvuk zavisi samo od karakteristike usmerenosti izvora i od rastojanja između rešetke i ugroženog mesta u prostoriji. (Ovo drugo zato što akustička energija, uzeta po jedinici površine, dakle što intenzitet zvuka opada sa kvadratom rastojanja). Direktan zvuk prema tome ne zavisi ni od oblika prostorije, ni od vrste materijala kojim su zidovi prostorije obloženi.

Što se tiče reflektovanog zvuka, situacija je upravo suprotna. Reflektovani zvučni talasi idu u svim mogućim pravcima, nailaze usput na razne materijale koji jače ili slabije apsorbuju zvuk, i zbog toga je intenzitet zvuka koji od njih potiče, po zakonima statistike, jednak na svim mestima u prostoriji. Na njegov iznos utiče samo veličina prostorije i vrsta materijala zidova. Očigledno, intenzitet reflektovanog zvuka je manji ukoliko je prostorija veća i ukoliko materijali kojima je obložena jače apsorbuju zvuk.

Da bi se našao nivo direktnog zvuka (L_D), polazi se od nivoa snage za jednu rešetku (L_{p1}) i primenjuje obrazac:

$$L_D = L_{p1} + 10 \log \gamma - 10 \log 4 \pi r^2 [m^2] \quad (4)$$

gde je γ tzv. stepen usmerenosti rešetke (kao izvora zvuka), a r rastojanje ugroženog mesta od najbliže rešetke (pod pretpostavkom da se ono nalazi u pravcu normale na rešetku, što je i najnepovoljniji slučaj).

U izrazu (4), kako je već rečeno, L_{p1} je nivo akustičke snage jedne rešetke. To znači da snagu (za datu oktavu) treba podeliti brojem rešetaka; neka to bude n . To se svodi na to da od nivoa snage L_p , izračunatog prema prethodnom poglavlju, treba oduzeti $10 \log n$ [dB] i dobiće se L_{p1} .

Stepen usmerenosti γ zavisi od veličine rešetke, od njenog položaja na zidu (u ravni, na ivici ili u ćošku) i od frekvencije. Na sl. 15 mogu se

naći odgovarajuće vrednosti γ za navedene slučajeve. Razlika nivoa:

$$(L_p - L_D) [dB] = 10 \log n - 10 \log \gamma + 10 \log 4 \pi r^2 [m^2] \quad (5)$$

predstavlja slabljenje koje unosi prostorija za direktan zvuk.

Za reflektovan zvuk polazi se od nivoa ukupne akustičke snage L_p za jednu oktavu i nalazi nivo reflektovanog zvuka po obrascu:

$$L_R = L_p + 10 \log T [s] - 10 \log \frac{1}{1 - \bar{\alpha}} - 10 \log V [m^3] + 14$$

gde je V zapremina prostorije, $\bar{\alpha}$ srednji koeficijent apsorpcije zvuka za sve zidove, a T tzv. vreme reverberacije ili jeke.

Vrlo se malo greši, međutim, ako se uzme približan obrazac:

$$L_R = L_p + 10 \log \frac{1}{\alpha} - \log V^{2/3} [m^2] - 2 \quad (6)$$

Koeficijent α može se tačno znati samo ako se poznaju akustičke karakteristike prostorije. Onda koristi formula:

$$\bar{\alpha} = \frac{0,16 V [m^3]}{T [s] S [m^2]}$$

gde je sada S površina cele prostorije. Ako ove veličine nisu poznate, onda se može po slobodnoj oceni zaključiti da li je prostorija akustički normalna, prigušena ili zvonka. U prvom slučaju se uzima $\alpha = 0,15$, a drugom $\alpha = 0,3$, a u trećem $\alpha = 0,05$. To daje:

$$10 \log \frac{1}{\alpha} = 8 \text{ dB} \quad \begin{aligned} &\text{za normalne prostorije,} \\ &= 5 \text{ dB za prigušene prostorije} \\ &= 13 \text{ dB za zvonke prostorije.} \end{aligned}$$

iz obrasca (6) vidimo da povećanje koeficijenta apsorpcije zidova, dakle oblaganje prostorije apsorpcionim materijalom, znači smanjenje nivoa reflektovanog zvuka i samim tim nivoa zvuka uopšte. Pogrešno je, međutim, misliti da se ovim naročito mnogo dobija. Uzimanjem, na primer, materijala sa dva puta većim koeficijentom apsorpcije, a to nije jeftina intervencija, dobija se samo 3 dB. S druge strane to opet ne znači da ne

* Dr Husnija Kurtović, dipl. ing., profesor Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, Bulevar revolucije 75.

treba koristiti apsorpcione materijale za oblaganje zidova. Oni često koštaju koliko i »tvrda« neapsorbirajuća obrada, a onda dobijanje nivoa zvuka nižeg za nekoliko decibela nije neznatno. Razlika nivoa:

$$(L_r - L_k) [\text{dB}] = 10 \log V^{2/3} [\text{m}^2] - 10 \log \frac{1}{\alpha} + 2 \quad (7)$$

predstavlja slabljenje koje unosi prostorija za reflektovan zvuk.

Kad se znaju oba slabljenja, data obrascem (5) i (7), ukupno slabljenje se ne može naći kao njihov zbir, jer se u prostoriji intenziteti direktnog i reflektovanog zvuka sabiraju, a to znači da je ukupno slabljenje čak manje od pojedinačnih slabljenja. Da bi se izbegao komplikovani račun sa antilogaritmovanjem, na sl. 16 je dat dijagram za dobijanje rezultujućeg slabljenja koje unosi prostorija. Vidi se da rezultujuće slabljenje može biti najviše za 3 dB manje od pojedinačnog slabljenja, i to u slučaju kad su oba pojedinačna slabljenja jednaka.

9. DODATNO PRIGUŠENJE ZVUKA

Znajući nivo zvuka na ugroženom mestu, ostaje da se ispita (opet za svaku oktavu) da li je taj nivo viši ili niži od onog koji određuje odabrana normirana linija buke. Ako je niži, sve je u redu. Ako je viši, onda za onoliko decibela koliko je viši, treba povećati slabljenje zvuka u ventilacionom kanalu.

To se najčešće ostvaruje dodatnim prigušivačem zvuka. Prigušivač je element sa većim brojem lamela od poroznog apsorpcionog materijala (presovana mineralna vuna, na primer) koje deluju kao obložen kanal, ali sa višestruko povećanim obimom. Posebnu analizu prigušivača zvuka nećemo ovde dati, zato što oni mogu biti vrlo različite konstrukcije. Važno je za korisnika da zna da će po pravilu imati na raspolaganju fabričke podatke o slabljenju (u decibelima) koje unosi prigušivač u sistemu, i da će ne osnovu toga moći da odabere odgovarajući tip prigušivača.

Pri izboru prigušivača mora se voditi računa još o dva faktora, koji zavise od slobodne površine preseka i brzine strujanja vazduha. Prvi faktor je buka koju sam prigušivač stvara zbog vazdušnih vrtloženja koja se u njemu javljaju. O tome ćemo govoriti u narednom poglavlju. Drugi faktor je pad statičkog pritiska izazvanog prigušivačem, što utiče na izbor snage ventilatora. O ovome postoje podaci u stručnoj literaturi.

Prigušivač se po mogućnosti postavlja odmah iza ventilatora. To je povoljno iz dva razloga. Prvo, buka koju stvara sam prigušivač je maksimalno oslabljena jer i ona prolazi celim putem, kao i buka ventilatora. Drugo, vibracije zidova kanala, koje prenose buku obilaznim putem (oznaka 4 na sl. 4) smanjene su na taj način odmah u početku. Ipak, takav položaj prigušivača nije uvek moguć. Kad se iz istog glavnog kanala snabdeva više prostorija, prigušivači se moraju nalaziti u svakoj grani da bi se sprečilo tzv. preslušavanje.

Pored prigušivača, jedan od elemenata koji unose dodatno slabljenje je već pomenuta komora, poznata pod imenom »plenum«. Plenum je često neophodan, na primer da se preko njega snabdeva veći broj izlaznih otvora. Ali i kad nije neophodan, treba pokušati da se izvede jer je to jedan od jeftinih načina slabljenja zvuka. Mesto za plenum se obično može naći negde u neiskorišćenom delu prostorija.

Ako su zidovi plenuma obloženi apsorpcionim materijalom, i ako se ulazni i izlazni otvor ne nalaze jedan nasuprot drugom (ovo je važno zbog usmernog zračenja zvuka na visokim frekvencijama), onda se pomoću plenuma može ostvariti slabljenje od 15 do 20 dB.

Koristeći obrazac:

$$10 \log \left[\frac{1}{S_0 \left(\frac{1}{\alpha S_p} + \frac{1}{2\pi d^2} \right)} \right] [\text{dB}]$$

možemo biti sigurni da smo dobili iznos od koga je realno slabljenje čak nešto veće. U obrascu S_0 predstavlja površinu izlaznog otvora (ili više njih) plenuma, S_p površinu cele komore plenuma, i rastojanje između ulaznog i izlaznog otvora, a α prosečan koeficijent apsorpcije materijala kojim je obložena komora. Njega nalazimo u dokumentaciji proizvođača. Kako α zavisi od frekvencije, ukupno slabljenje plenuma, kao i sva ostala slabljenja biće različita za razne oktave. Ako upotrebimo plenum golih zidova (malter ili opeka), onda možemo kao orijentaciju uzeti da je $\alpha = 0,02$ na najnižim frekvencijama i da postepeno raste prema najvišim frekvencijama do 0,05.

Ne zaboravimo još da slabljenju samog plenuma dodamo slabljenje na ulaznom otvoru (na dovodnom kanalu u plenum) zbog naglog širenja preseka. To je približno isto ono slabljenje (usled refleksije) koje imamo i na izlaznoj rešetki sistema. Koristićemo, dakle, sl. 12.

10. SEKUNDARNI IZVORI ZVUKA U SISTEMU VENTILACIJE

Već smo pomenuli dva najvažnija izvora buke pored ventilatora: prigušivač i izlaznu rešetku. Oni, međutim, nisu jedini. Izvor buke može biti sve što uzrokuje vrtloženje vazduha ili što predstavlja prepreku za struju vazduha u kojoj već postoje kolebanja brzine. To znači da buku mogu stvoriti i kolena, i grananja kanala, i uopšte sva skretanja vazdušne struje. Buka koja se pri tome javlja ima relativno ravan, ujednačen spektar, bez suviše naglašenog područja niskih frekvencija, koje smo imali kod ventilatora. Zato ovu buku subjektivno ocenjujemo kao šum.

Vrlo je teško unapred odrediti jačinu šuma svih elemenata sistema, ali ona u svakom slučaju raste sa brzinom strujanja vazduha. Smatra se da po pravilu brzine ispod 3 m/s u ograncima glavnog kanala nisu opasne.

I kod prigušivača nivo sopstvenog šuma zavisi od brzine strujanja vazduha. Obično proizvođač daje nivo akustične snage šuma L_p u decibelima (za svaku oktavu), kao i kod ventilatora. Pri proceni da li je ova snaga opasna ili nije, polazimo od činjenice da buka glavnog izvora — ventilatora — mora zadovoljiti usvojeni kriterijum. Šum prigušivača mora u tom slučaju biti znatno ispod normirane linije kriterijuma, tako da njegov udeo u opštoj buci bude beznačajan. Koliko to »znatno« iznosi, zaključujemo iz slike 16. Vidimo da se, ako je razlika dva nivoa 10 dB, ukupni nivo povećava za manje od 0,5 dB, što zaista možemo smatrati beznačajnim. Prema tome, šum prigušivača mora biti bar 10 dB ispod usvojenog kriterijuma.

Pri proveru da li prigušivač ispunjava ove uslove, ide se unazad. Uzmu se vrednosti nivoa zvuka za usvojeni kriterijum, pa se na njih dodaje slabljenje zvuka koje unose najpre prostorija, a zatim redom svi elementi ventilacionog kanala od izlazne rešetke do prigušivača. Rezultat koji se dobije predstavlja dozvoljeni nivo snage buke na mestu odmah iza prigušivača. Nivo snage šuma prigušivača mora biti 10 dB manji od ovog dozvoljenog nivoa u svakoj oktavi.

Treba još napomenuti da neki proizvođači daju nivo akustičke snage prigušivača odmah korigovan za 10 dB naviše. U tom slučaju uslov glasi da korigovana snaga prigušivača ne sme biti veća ni u jednoj oktavi, od vrednosti dobijene napred opisanim postupkom na izlazu prigušivača.

Ovakav postupak, koji preporučuju neki autori, daje preterano veliku sigurnost. Ti autori,

naime, prećutno pretpostavljaju da će već ventilator stvoriti buku koja će biti upravo na normiranoj liniji. Ali ako ventilator u nekim oktavama, a to je uvek slučaj, daje buku znatno ispod dozvoljene, onda je šum prigušivača taj koji se može popeti do vrednosti koju dozvoljava usvojeni kriterijum, umesto da bude za 10 dB niži od njega. Najekonomičnije je zato, pošto se odabere prigušivač, sabrati (koristeći sl. 16) nivo snage ventilatora i prigušivača na izlazu prigušivača, i videti da li oba zajedno, bez obzira koji je u kojoj oktavi jači, daju nivo snage ispod onog koji je na tom mestu dozvoljen. Takav postupak sprovedemo u primeru proračuna.

Što se tiče izlazne rešetke (ili difuzora), situacija je znatno komplikovanija. Posle rešetke ne može se dodati više nikakvo slabljenje osim uticaja same prostorije i zato se nivo šuma koji ona stvara na ugroženom mestu mora prosto sabrati sa nivoom buke ventilatora. Pri sabiranju se opet koristi sl. 16 i, naravno, i ovde se može odustati od sabiranja, ako je nivo buke ventilatora veći bar za 10 dB, ili ako je nivo šuma rešetke za 10 dB ispod nivoa koji propisuje usvojeni kriterijum. Cilj je prema tome da rešetka (ili difuzor) stvara dovoljno malu buku.

Namerno nije rečeno »što manju buku« jer ne treba preterivati. Ne isplati se skupo plaćati skoro bešumnu rešetku, ako se već toleriše određena buka koju stvara ventilator. Dovoljno je, kao što je već rečeno, da oba nivoa zajedno budu ispod dozvoljene vrednosti.

Nivo akustičke snage na izlazu rešetke (ili difuzora) obično daje proizvođač. Očekuje se da i taj nivo bude dat po oktavama. Na taj nivo se onda primenjuje samo slabljenje koje unosi prostorija. Da bi se mogli koristiti nepromenjeni obrasci (5) i (7), potrebno je sabrati akustičku snagu svih rešetki, tj. dodati $10 \log n$ (gde je n broj rešetki) na nivo L_p koji daje proizvođač za jednu rešetku. Jedino što se menja u obrascu (5), to je što se iznos za γ , bez obzira na frekvenciju, uzima onako kako se na sl. 15 očitava za najniže frekvencije. Šum rešetke, naime, ne pokazuje osobine usmerenosti sa porastom frekvencije, jer nastaje kao posledica vrtloženja na samoj rešetki, a vrtlozi su nekoherentni izvori zvuka, bez grupnog usmerenog dejstva, pa je prostorni ugao zračenja zvuka uvek onoliki, koliko dopuštaju okolni zidovi.

Kad se na izloženi način primeni slabljenje prostorije na nivo snage L_p , dolazi se do nivoa šuma rešetke (rešetki) u prostoriji koji se sabira sa nivoom buke ventilatora.

Na jačinu šuma koji stvara rešetka utiče ne samo brzina strujanja vazduha, nego i oblik rešetke, uglovi i veličine lamela na zastoru i drugi konstrukcioni elementi. Ipak, brzina je glavni faktor jer je akustička snaga približno srazmerna šestom stepenu brzine. Drugim rečima, nivo snage rešetke (L_p) raste za 18 dB pri svako udvostručenju brzine. Iz toga se vidi značaj malih brzina vazduha na izlazu iz ventilacionog kanala.

U slučaju da nivo snage rešetke nije poznat, daćemo neke podatke koji mogu da posluže kao orijentacija. Za ravnu, perforisanu rešetku bez lamela, površine $0,1 \text{ m}^2$, nivo snage u jednoj od srednjih oktava (250 Hz ili 500 Hz), za brzinu vazduha 5 m/s iznosi oko $L_p = 35 \text{ dB}$. Na višim oktavama nivo snage uvek opada, mada sve sporije ukoliko je brzina vazduha veća.

Za drugu površinu rešetke $S_r \text{ (m}^2\text{)}$ ovoj vrednosti se dodaje:

$$10 \log S_r / 0,1 \text{ [dB]} \quad (8)$$

Za drugu brzinu strujanja $V \text{ (m/s)}$ ovoj vrednosti se dodaje:

$$60 \log V / 5 \text{ [dB]} \quad (9)$$

Za rešetke sa lamelama (prosečan položaj lamela) L_p se povećava još za 12 do 15 dB.

I, najzad, na sve ovo treba dodati $10 \log n$ (gde je n , kao i ranije, broj izlaznih rešetki), pa će se dobiti nivo akustičke snage za sve rešetke.

Kao poseban sekundarni izvor buke, navedimo zvuk koji preko ventilacionog kanala prodire iz neke druge prostorije. To nije buka u pravom smislu reči, jer se obično radi o govoru ili muzici, nego je to neželjen zvuk.

I ovde se polazi od nivoa zvuka u jednoj prostoriji. Neka to bude prostorija izvora sa nivoom zvuka L_1 (u jednoj oktavi), pa se onda, uzimajući u obzir sva slabljenja, nalazi nivo zvuka L_2 u drugoj, ugroženoj prostoriji.

Uprostićemo ceo problem, da bismo došli bar do orijentacionih podataka. Nivo akustičke snage L_p koja ulazi iz prve prostorije u njene izlazne otvore (kroz rešetku) iznosi:

$$L_r = L_1 - 10 \log \frac{1}{n S_r \text{ [m}^2\text{]}} - 6$$

gde je S_r efektivna površina rešetke, a n broj rešetki. Znači da je slabljenje koje unosi prva prostorija:

$$(L_1 - L_r) \text{ [dB]} = 6 + 10 \log \frac{1}{n S_r} \quad (10)$$

Dalje se redom dodaju sva slabljenja na putu do druge prostorije, onako kao i kod buke ventilatora. Najpre dolazi slabljenje duž ogranka kanala, od prve prostorije do glavnog kanala, uzimajući u obzir i kolena, ako ih ima. Sledeće slabljenje nastaje zbog naglog proširenja na ulazu u glavni kanal. Zatim dolazi slabljenje zbog račvanja u glavnom kanalu — ka ventilatoru i ka suprotnom kraju. Od ulaza u ogranak kanala za drugu prostoriju, ide sve kao i kod buke ventilatora. Tu imamo još jedno račvanje (grananje), zatim slabljenje duž ogranka kanala, refleksiju na izlaznoj rešetki i slabljenje druge prostorije. Sva ova slabljenja, sa onim datim pod (10), oduzeta od nivoa L_1 , daće nivo zvuka L_2 u ugroženoj prostoriji. Ako je ovaj nivo manji od onog koji se može tolerisati, sve je u redu. Ako nije, onda se mora dodati neka vrsta prigušivača, i to tako da se pola slabljenja unese u jedan ogranak kanala, a pola u drugi, jer se time postiže deo izolacije zvuka i prema ostalim prostorijama.

Najdelikatnije kod ovog problema preslušavanja je ocena šta se može tolerisati u ugroženoj prostoriji. Ako govor ili muziku shvatimo kao Duku, onda se treba ravnati prema usvojenom kriterijumu, kao i do sada. Ali ako se postavi uslov da govor bude potpuno nerazumljiv (u cilju očuvanja tajnosti), ili da se muzika uopšte ne čuje (problem kod muzičkih soba u školama), onda nivo L_2 mora biti za 10 do 15 dB niži od nivoa ostale buke u svim oktavama. Kad se uzme u obzir još i to da spektar zvuka L_1 zavisi ne samo od vrste izvora, nego i od akustičke obrade prve prostorije, onda postaje jasno da je u ovim problemima često potrebna saradnja akustičara — specijalista.

Da ipak dovršimo ono što će omogućiti orijentacione proračune. Dodajmo samo toliko, da nivo L_1 na 250 Hz kod jakog glasa iznosi oko 70 dB, a kod muzike oko 80 dB.

11. PRIMER PRORACUNA BUKE VENTILACIONOG SISTEMA

Uzmimo kao primer proračun ventilacionog sistema za jedan spikerski televizijski studio. Polazni podaci su: protok $q = 3000 \text{ m}^3/\text{h}$ i dozvoljen nivo zvuka u studiju 30 dB (A). Podaci o buci ventilatora ne postoje, pa će se ići preko prosečnih vrednosti iz literature. Uzmimo da je

dovoljan statički natpritisak $\Delta = 25$ mm vs. Za ovu vrednost Δp , i za poznato q , nalazi se (slika 7) da je nivo ukupne snage (u odnosu na 10^{-12} W):

$$L_p = 88 \text{ dB}$$

Spektar zavisi od vrste ventilatora i nagiba lopatica. Uzmimo da je u pitanju centrifugalni ventilator sa unazad zavrnutim lopaticama. Iz sl. 6 nalazimo nivo snage po oktavama:

Frekvencija							
(Hz)	62,5	125	250	500	1000	2000	4000
(dB)	79	80	81	76	71	66	62 (11)

Nećemo dalje navoditi srednju frekvenciju oktave. Niz od sedam brojeva odnosiće se uvek na isti redosled oktava.

Prigušivač će se nalaziti odmah iza ventilatora, tako da na putu do njega nema nikakvog slabljenja. Slabljenje iza prigušivača nalazimo redom prema izlaganju u prethodnim poglavljima.

Dužina kanala do najbliže izlazne rešetke je 4,5 m. Radi se o četvrtastom kanalu dimenzije preseka 0,3 m. Talasna dužina za 62,5 Hz iznosi $\lambda = 343/62,5 = 5,5$ m. Odnos $d/\lambda = 0,3/5,5 = 0,55$. Za ostale oktave redom ovaj odnos se stalno udvostručava. Slabljenje duž kanala prema sl. 8 iznosi:

$$(dB) \quad 2,5 \quad 2,5 \quad 2 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad (12)$$

Broj kolena iznosi dva. Slabljenje za oba kolena prema sl. 10 iznosi:

$$(dB) \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 15 \quad 12 \quad 6 \quad 6 \quad (13)$$

Grananja kanala nema, osim na četiri izlaza u istu prostoriju, za koje smo rekli da se ne uzima u obzir.

Refleksija na izlaznoj rešetki, koja ima površinu $S_r = 0,07 \text{ m}^2$, prema sl. 12, iznosi ($\sqrt{S}/\lambda = 0,05$ na 62,5 Hz):

$$(dB) \quad 13 \quad 9 \quad 5 \quad 2 \quad 0,5 \quad 0 \quad 0 \quad (14)$$

Za nalaženje slabljenja prostorije za disektan zvuk treba nam stepen usmerenosti γ . Njega nalazimo iz sl. 15. Dobija se, ako je rešetka na ravnom delu zida:

$$10 \log \gamma [dB] = 3 \quad 2,5 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \quad 6,5 \quad (15)$$

Ostala dva člana u izrazu (5) su jednaka za sve frekvencije. Broj rešetke je $n = 4$, a rastojanje najbližeg ugroženog mesta od rešetke je $r = 1,5$ m. Uzevši u obzir da je $10 \log n = 6 \text{ dB}$, a $10 \log 4 \pi r^2 = 14 \text{ dB}$, izlazi da je ukupno slabljenje direktnog zvuka po formuli (5), koristeći (15):

$$(dB) \quad 17 \quad 16 \quad 15 \quad 14 \quad 13 \quad 12 \quad 12 \quad (16)$$

Za slabljenje koje unosi prostorija za reflektovan zvuk potrebna nam je zapremina (ona iznosi 114 m^3), površina i vreme reverberacije za sve frekvencije. Ako to ne znamo, koristićemo približan obrazac (7), a koeficijent α ćemo oceniti. S obzirom da se radi o televizijskom studiju, možemo smatrati da je $\alpha = 0,3$ i to za sve frekvencije, jer se pri projektovanju studija upravo nastoji da tako bude. S tim podacima nalazimo slabljenje za reflektovani zvuk po obrascu (7):

$$(dB) \quad 11 \quad 11 \quad 11 \quad 11 \quad 11 \quad 11 \quad 11 \quad (17)$$

Ukupno slabljenje prostorije nalazi se koristeći sl. 16. Rezultat je:

$$(dB) \quad 10 \quad 10 \quad 9,5 \quad 9,5 \quad 9 \quad 8,5 \quad 8,5 \quad (18)$$

Sada treba sabrati sva četiri slabljenja (12), (13), (14) i (18) i dohiti ukupno slabljenje u ventilacionom sistemu. Rezultat je:

$$(dB) \quad 25,5 \quad 21,5 \quad 17,5 \quad 27,5 \quad 22,5 \quad 15,5 \quad 15,5 \quad (19)$$

Pošto sve vrednosti slučajno iznose 0,5 dB, zaokružićemo ih na nižu celu vrednost.

Dozvoljen nivo buke je dB(A što odgovara kriterijumu br. 25. Dozvoljeni nivoi zvuka u prostoriji prema ovom kriterijumu iznose:

$$(dB) \quad 55 \quad 44 \quad 35 \quad 29 \quad 25 \quad 22 \quad 20 \quad (20)$$

Na ove vrednosti dodajmo slabljenje celog sistema (niz [19], zaokružene vrednosti) i dobićemo nivo akustičke snage koju smemo imati na izlazu prigušivača:

$$(dB) \quad 70 \quad 65 \quad 52 \quad 56 \quad 47 \quad 37 \quad 35 \quad (21)$$

A nivo snage koji stvarno imamo, ako nema prigušivača, dat je nizom (11). Slabljenje koje nedostaje daje razlika ovih vrednosti, koja iznosi:

$$(dB) \quad 9 \quad 15 \quad 29 \quad 20 \quad 24 \quad 29 \quad 27 \quad (22)$$

Sad treba izabrati prigušivač koji unosi u svakoj oktavi slabljenje veće ili jednako onom u nizu (22). Takav je, na primer, prigušivač TROX, tip R 10/50, čije slabljenje, ako je dužina prigušivača 1,5 m, iznosi:

$$(dB) \quad 10 \quad 22 \quad 29 \quad 38 \quad 64 \quad 81 \quad 73 \quad (23)$$

Vidimo da se samo sa 250 Hz nalazimo na granici dozvoljene akustičke snage. Za sve ostale frekvencije snaga će biti znatno manja od dozvoljene. U većini praktičnih slučajeva doći ćemo do

istog rezultata; naime, najteže je postići dovoljno slabljenje zvuka na 250 Hz. Zato se kratki orijentacioni proračuni rade samo na ovoj frekvenciji. Usvajajući prigušivač, možemo naći stvarni nivo akustičke snage na izlazu prigušivača. To je razlika nizova (11) i (23).

(dB) 69 58 52 38 7 —15 —11 (24)

Isto tako možemo naći stvarni nivo buke u prostoriji. Od nivoa (24) treba oduzeti ukupno slabljenje, dato nizom (19) i dobićemo:

(dB) 44 37 35 11 —15 —30 —26 (25)

Ostaje još da proverimo šum prigušivača i izlazne rešetke.

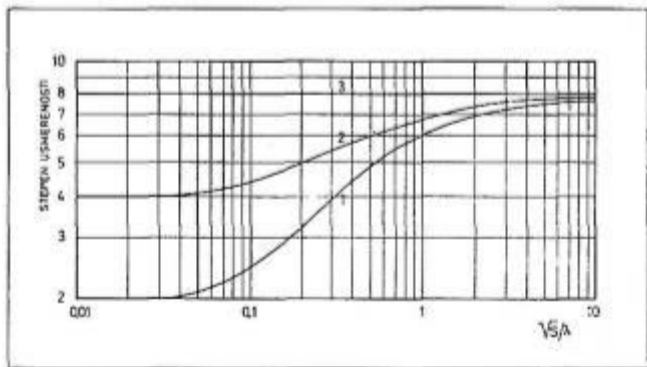
Za šum prigušivača najkritičnija je frekvencija 250 Hz. Tu sam ventilator ostvaruje nivo snage 52 dB, koliko je i dozvoljeno (videti niz [24] i [21]). šum prigušivača mora biti bar za 10 dB niži, dakle 42 dB. Proizvođač daje za brzinu strujanja $v = 3$ m/s sledeći nivo snage šuma prigušivača:

(dB) 55 48 41 39 38 28 20 (26)

Saberimo pomoću sl. 16 ove vrednosti sa stvarnim vrednostima nivoa buke ventilatora (niz [24]) i dobijamo:

Sl. 15 — Step en usmerenosti za razne položaje izlazne rešetke u funkciji proizvoda frekvencije (f) i površine rešetke (S)

1) rešetka u ravni zida ili plafona; 2) rešetka na ivici; 3) rešetka u uglu



(dB) 69 58 52 41,5 38 28 20

Uporedimo ove vrednosti sa dozvoljenim nivoom akustičke snage iza prigušivača (niz [21]) i videćemo da je sve u redu.

Za projektanta sistema važno je da još proveri. poznavajući brzinu ($v = 3$ m/s) i potrebnu količinu vazduha (ovde 3000 m³/h), koliki će imati pad statičkog pritiska na prigušivaču, i da prema tome uzme potrebnu površinu preseka prigušivača. Za $\Delta p = 5$ mm vs treba, na primer, presek da bude 0,25 m².

Neka izlazna rešetka bude takođe firme TROX, tip G. Njen presek je 0,07 m², ali je potrebno još poznavati 1 brzinu strujanja. Brzina zavisi od načina razvođenja vazduha do rešetki. U ovom slučaju, s obzirom da postoje 4 rešetke, ona ne može biti veća od 3 m/s. Za tu brzinu, i za lamele zatvorene 50%, proizvođač daje sledeći nivo akustičke snage:

(dB) 34 34 34 33 26 15 — (27)

Ove vrednosti treba povećati za $10 \log 4 = 6$ dB, s obzirom na broj rešetki. Dobija se:

(dB) 40 40 40 39 32 21 — (28)

Slabljenje prostorije se sada delimično menja utoliko što je $\gamma = 2$ za sve frekvencije, pa su u nizu (16) sve vrednosti ravne 17 dB. Niz (17) ostaje nepromenjen i zato, umesto niza (18), imamo rezultujuće slabljenje prostorije 10 dB za sve frekvencije. To znači da ako nivoima u nizu (28) oduzmemo po 10 dB, dobijamo nivo šuma rešetke u prostoriji:

(dB) 30 30 30 29 22 11 —

Ove vrednosti nisu u svim oktavama za 10 dB manje od dozvoljenih vrednosti (niz [20]) i zato treba dalje proveravati. Saberimo ih (pomoću sl. 16) sa stvarnim nivoom buke (niz [25]) i dobićemo:

(dB) 44 38 36 29 22 11 —

Upoređujući ovaj rezultat sa usvojenim kriterijumom (niz [20]), videćemo da je praktično sve u redu. Tamo gde je buka ventilatora bila jaka (niske frekvencije), šum rešetke je bio slab, i obratno. Kritične vrednosti premašene su samo na 250 Hz za 1 dB. To nije mnogo, ali bi ipak trebalo proveriti da li smo, čineći razne pretpostavke (o brzini vazduha, na primer) uzimali niže ili više vrednosti. Ako smo uvek bili oprezni, onda ceo sistem sigurno zadovoljava.

Da nismo znali podatke o rešetki, mogli smo poći od toga da je za jednu normiranu rešetku $L_p = 35$ dB na 250 Hz (ili 500 Hz) — videti poglavlje 10. Izrazi (8) i (9) daju $10 \log 0,07/0,1 = 1,5$ dB i $601 \log 3/5 = -13$ dB. Dodajmo na ovo 13,5

dB za 50% otvorene lamele i imaćemo da je ukupna korekcija za jednu rešetku —1 dB. Oduzmimo od 35 dB ovaj jedan decibel i dobijamo da je $L_p = 34$ dB, što se baš slaže sa fabričkim podacima (niz [27]).

12. PRORAČUN SLABLJENJA ZVUKA U PLENUMU

Zamislimo da imamo plenum ispod jedne sale. Površina celog plenuma neka je 640 m^2 , a zidovi akustički neobrađeni. Neka dovodni otvor u plenum iznosi $0,5 \text{ m}^2$, a zbir svih izlaznih otvora (ima ih više) neka je 1 m^2 . Prosečna udaljenost izlaznog i ulaznog otvora neka je $d = 10 \text{ m}$. Proračunaćemo slabljenje samo na 250 Hz . Usvojimo da je $\alpha = 0,03$ i po odgovarajućoj formuli u poglavlju 9. naći:

$$10 \log \left[\frac{1}{1 \cdot \left(\frac{1}{0,03 \cdot 640} + \frac{1}{2 \pi \cdot 10^2} \right)} \right] = 13 \text{ dB}$$

Na ovo slabljenje treba još dodati gubitke akustičke energije, zbog refleksije na ulazu u plenum. Prema sl. 12, za $\sqrt{S_0}/\lambda \approx 0,5$ dobija se, međutim, samo 1 dB.

Važno je uočiti još i to da se gubici na izlaznoj rešetki u salu u ovom slučaju ne uzimaju u obzir, jer se zvuk ne prostire kanalom pre nailaska na rešetku. On u stvari samo prođe kroz otvor iz plenuma u salu, ne menjajući uslove prostiranja. Tek kad bi se od plenuma nastavljali kanali, javili bi se i ovi gubici.

13. PRORAČUN PRESLUŠAVANJA IZMEĐU DVE PROSTORIJE

Zamislimo da su dve prostorije povezane ograncima glavnog kanala, dužine po 3 m, koji imaju po jedno koleno, i delom glavnog kanala dužine 5 m. Neka je presek odvodnih kanala $0,1 \text{ m}^2$, a presek glavnog kanala $0,3 \text{ m}^2$. U svakoj prostoriji postoje po dve rešetke preseka $0,07 \text{ m}^2$.

U jednoj prostoriji se vodi razgovor, tako da nivo zvuka na 250 Hz može biti i 70 dB .

Slabljenje koje unosi prva prostorija po obrascu (10) glasi:

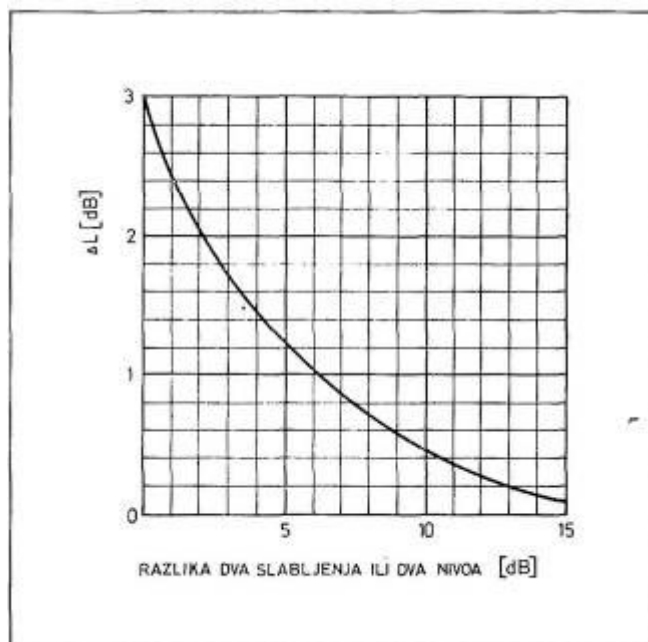
$$6 + 10 \log \frac{1}{2 \cdot 0,07} = 14,5 \text{ dB}$$

Duž kanala, kako glavnog, tako i odvodnih, slabljenje je vrlo malo. Prema sl. 8, videćemo da se jedva može dobiti 1 dB.

Slabljenje kolena prema sl. 10. iznosi $1,5 \text{ dB}$. Za oba odvodna kanala to je 3 dB .

Slabljenje na ulazu u glavni kanal može se tretirati i kao naglo povećanje preseka, ali i kao koleno, pogotovo ako odvodni kanal ulazi pod

Sl. 16 — Sabiranje slabljenja direktnog i reflektovanog zvuka. Ordinata pokazuje iznos koji treba oduzeti manjem slabljenju da se dobije rezultujuće slabljenje. (Dijagram se može koristiti za sabiranje dva nivoa. U tom slučaju na apscisi je razlika dva nivoa, a AL je vrednost koju treba dodati većem nivou da bi se dobio rezultujući nivo.)



90° . Ako uzmemo da je to širenje preseka, onda novi presek iznosi $0,6 \text{ m}^2$ (jer se zvuk odvaja levo i desno, u dva smera). Presek za dolazeći zvuk je bio $0,1 \text{ m}^2$. Odnos je, znači, $6 : 1$. Prema tabeli 2. to daje bar 3 dB , dakle više nego što bi dalo koleno, pa ćemo to i usvojiti. Osim toga, ovde se akustička energija deli na dva jednaka kanala, odlazeći levo i desno, pa se prema obrascu (3) dobija još 3 dB . Obrazac (3) treba, naime, sada shvatiti tako da S predstavlja ukupnu dolazeću akustičku snagu, a S_i njen deo koji odlazi u pravcu ugroženog mesta.

Na ulazu u drugi odvodni kanal imamo, opet po obrascu (3), slabljenje usled grananja koje iznosi:

$$10 \log 0,3/0,1 \approx 5 \text{ dB}$$

Ostaje još slabljenje zbog refleksije na mestu izlazne rešetke i slabljenje koje unosi druga prostorija. Neka oni budu isti kao u poglavlju 11, na 250 Hz, dakle 5 dB (niz [14]), i 9,5 dB (niz [8]).

Uzmimo sada u obzir sva slabljenja:

Prva prostorija	14,5 dB
Duž kanala	1 dB
Dva kolena	3 dB
Proširenje na ulazu u glavni kanal	3 dB
Grananje u glavnom kanalu	3 dB
Grananje na ulazu u sporedni kanal	5 dB
Izlazna rešetka	5 dB
Druga prostorija	9,5 dB

Ukupno 44 dB

Kad se od $L_1 = 70$ dB oduzme 44 dB, ostaje $L_2 = 36$ dB. To samo po sebi otprilike zadovoljava kriterijum br. 25 (videti sl. 3), ali kada bi se radilo o prostoriji koja već ima buku ventilacionog sistema na tako niskom nivou, kao što je slučaj u primeru u poglavlju 11, onda bi se govor

ne samo čuo, nego bi bio i razumljiv. Trebalo bi zato staviti u odvodne kanale neko prigušenje zvuka, u iznosu od 10 do 15 dB. Naravno, ako je kriterijum za tu prostoriju za desetak decibela viši od nivoa govora (neka je, na primer, u pitanju kancelarija), onda je sve u redu. S druge strane i ovde postoji opasnost da govor postane razumljiv, kad ventilacioni sistem prestane da radi. Neka ova analiza pokaže da se zaista radi o složenom problemu.

LITERATURA

- [1] Beranek, L. L.: Noise reduction, McGraw-Hill Book Comp. 1960.
- [2] Harris, C. M.: Handbook of noise control, McGraw-Hill Book Comp. 1957.
- [3] Acoustic Noise Measurements, Tehničke publikacije firme Bruel & Kjaer.
- [4] Sharland, I. j.: The Control of Noise in Ventilating Svstems, Tehničke publikacije firme Woods Ltd.
- [5] Pejović M.: Proračun buke u instalacijama sa kanalnim razvodom vazduha, KGH. br. 1/1973.
- [6] Tehnička uputstva i prospekti firme Trox.