

RAZUMLJIVOST GOVORA V UČILNICAH IN PREDAVALNICAH

534.84
1.02 pregl. znanstveni članek
15.3.2007

INTELLIGIBILITY OF SPEECH IN CLASSROOMS AND LECTURE THEATRES

izvleček

Prispevek obravnava razumljivost govora v učilnicah in predavalnicah. Podrobno so opisani vsi vplivni parametri na razumljivost govora. V petih predavalnicah Fakultete za strojništvo v Ljubljani smo merili objektivno in subjektivno razumljivost govora in jih ocenili glede na izmerjene odmevne čase in razmerja jakosti govora ter hrupa ozadja. Rezultati meritev so pokazali, da so razumljivosti govora relativno slabe in da so odvisne tudi od geometrije predavalnic in načina predvajanja govora. Pričujoča študija lahko koristi arhitektom pri snovanju novih predavalnic, šolskih učilnic, dvoran in avditorijev za govorno komunikacijo.

abstract

The article deals with intelligibility of speech in classrooms and lecture theatres. A detailed description of all speech intelligibility parameters is given. Objectively and subjectively we measured speech intelligibility in five lecture theatres at the Faculty of mechanical engineering and graded them according to measured reverberation time and the relation between speech volume and background noise. The results showed that speech intelligibility is fairly poor and that it depends on the room's geometry, as well as lecture delivery method. The study can be useful for architects in the design of new lecture theatres, classrooms, halls and auditoriums intended for spoken communication.

ključne besede:

Akustika prostora, odmevni čas, razumljivost govora.

key words:

Spatial acoustics, reverberation time, speech intelligibility.

Študenti Fakultete za strojništvo (FS) se pogosto pritožujejo, da je predavanjem v večini predavalnic zaradi slabe razumljivosti govora težko slediti. Praksa kaže, da je tudi v številnih drugih predavalnicah in šolskih učilnicah pri nas razumljivost govora slabša od 75 %. To pomeni, da v testih razumljivosti govora poslušalci z normalnim sluhom razumejo manj kot 75% naključnih besed. Slaba razumljivost je lahko posledica slabe razumljivosti predavatelja in/ali slabe akustike prostora. Slaba razumljivost predavatelja je lahko posledica njegove slabe pripravljenosti in/ali slabe razumljivosti izgovorjenih besed (hitra, tiha ali narečna govornica). Slaba akustika prostora povzroči odmev in popačenje govora, v delih prostora pa lahko nastanejo stojna valovanja in "govorne sence". Slaba razumljivost govora zmanjša razumljivost predavane snovi, vpliva na kakovost zapiskov in posledično tudi na učni uspeh. Ta problem ima lahko dolgoročne posledice tudi za predavatelja, saj slabo akustiko prostora kot objektivnega faktorja lahko pripišemo subjektivnim lastnostim predavatelja. Zato se s slabo akustiko predavalnic ne bi smeli sprijazniti, saj rešitve niso drage. Najboljši način reševanja akustičnih problemov je, da jih predvidimo vnaprej, to je v fazi snovanja in projektiranja, ne pa šele, ko se po izgradnji pojavijo težave. Obnovitvena dela, z namenom izboljšanja akustičnih lastnosti prostorov, so ponavadi dražja, čeprav še vedno cenejša od škode, ki jo dolgoročno povzroči slabo akustično načrtovanje predavalnic na poslušalce (dijake in študente) in njihove predavatelje.

Osnovni parameter za ocenjevanje akustike prostora je odmevni čas (T60). T60 je čas v s, ki preteče po prenehanju delovanja zvočnega vira in zmanjšanju njegovega zvočnega tlaka (v Pa)

na milijonti del njegove začetne vrednosti oziroma da raven zvočnega tlaka pade za 60 dB (od tod indeks T60).

Razumljivost govora v prostoru je odvisna od T60 in razmerja signala (govora) ter hrupa ozadja (šuma) (RG/Š), to je od razlike med ravno govora in ravno hrupa ozadja v dB. Večje kot je to razmerje, boljša je razumljivost govora. Ker se raven govora in hrup ozadja pogosto spreminjata po prostoru, v ozadju predavalnice oziroma daleč od predavatelja se raven govora znižuje, se tudi RG/Š spreminja po prostoru. To pomeni, da je razumljivost govora odvisna tudi od položaja poslušalca v predavalnici. Za dobro razumljivost govora in za poslušalce s povprečnim sluhom je potrebna razlika med ravno govora in hrupa ozadja vsaj 10 dB in za poslušalce s slabšim sluhom tudi do 15 dB.

Da bi ugotovili vzroke za slabo razumljivost govora v nekaterih predavalnicah na FS, smo merili objektivno in subjektivno razumljivost govora v petih najbolj izpostavljenih predavalnicah pri različnih RG/Š.

Določanje razumljivosti govora

Za dobro razumljivost govora mora biti interval (pavza) med enozložnimi besedami zadosti dolg, da lahko slišimo začetek in konec vsake besede. V času pavz mora biti raven hrupa ozadja zadosti nizka. Slika 1a kaže signal govora, zapisan v gluhi komori (brez odmevov). Sliki 1b in c kažeta primerjavo med signalom govora brez odmevov (temno) in istim signalom govora, zapisanim v prostoru z odmevnim časom $T60 = 0,8$ s in 2 s (sivo). Na sliki 1c ni pravih pavz med posameznimi besedami,

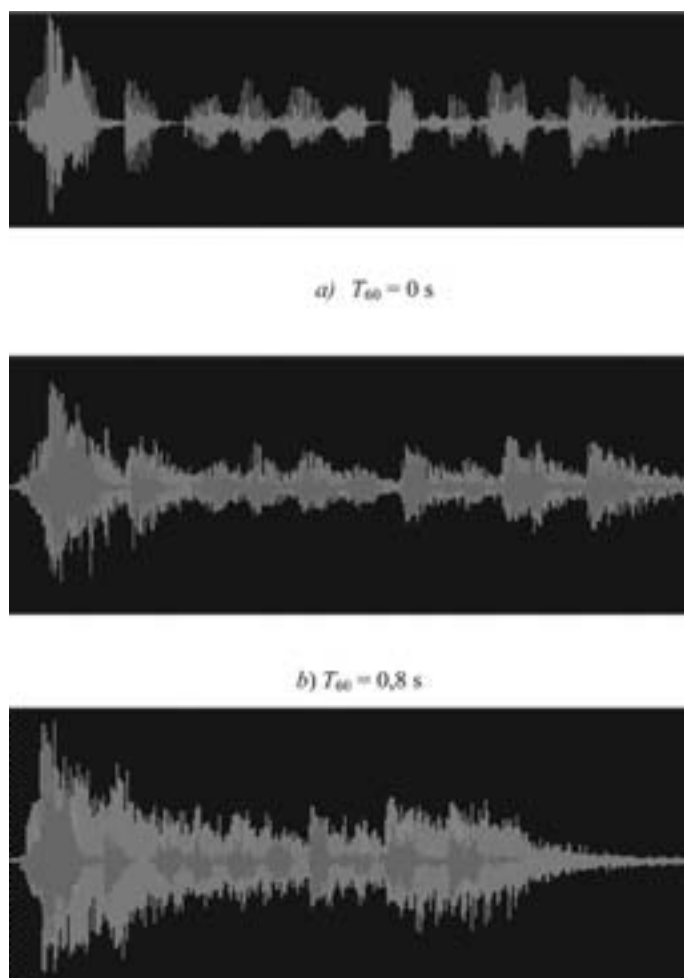
tako da ne moremo določiti začetka in konca besede, zato je takšen govor zelo težko razumeti. Amplitude signala so ostale v vseh treh primerih enake, le raven hrupa ozadja se je zaradi odmevnosti prostora povečala. To pomeni, da se je zmanjšalo RG/Š.

Za dobro razumljivost govora morajo biti T60 kratki, RG/Š zadosti veliki (>10 dB), volumen prostora (V) mali in njegove dimenzije x/y/z pravilne, v nasprotnem primeru je lahko RG problematična. Vendar v praksi moramo računati še s tako imenovanim Hassovim in "Cocktail-party" efektom, ki lahko izboljšata razumljivost govora, [Bradley, 2002: 27–29, Hass, 1972: 45–159].

Po Hassu [Hass, 1972: 145–159] je razumljivost govora odvisna tudi od časovne zakasnitve odbojev glede na direktni zvok. Če je čas zakasnitve odbitega zvoka manjši od 30 ms, človeški možgani integrirajo oba signala in zaznavajo sprejeti zvok kot en sam ojačan signal. Če je zakasnitev med 30 in 50 ms, pa odbiti zvok možgani zaznavajo kot dva signala, primarni

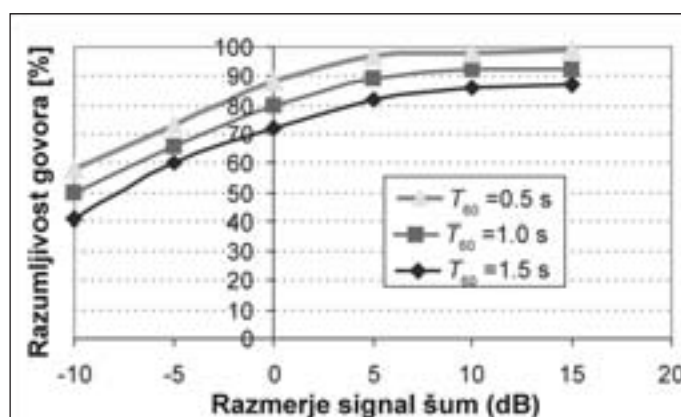
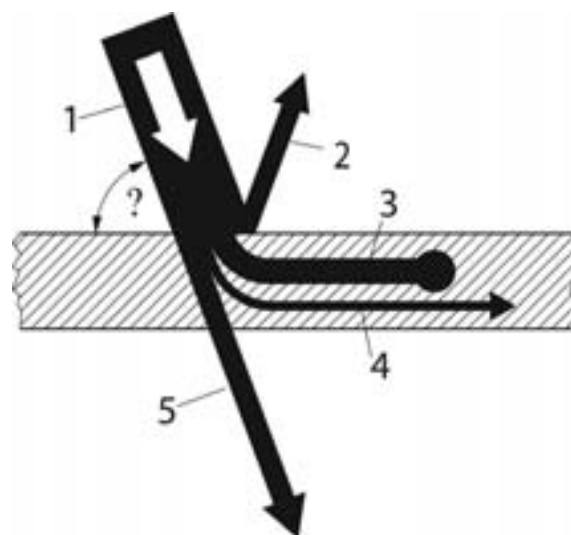
direktni in odbiti signal zvoka. Če je ta zakasnitev večja od 50 ms, potem uho zaznava odbiti zvok kot sekundarni vir zvoka. To pomeni, da razdalje med stenami prostora, ki povzročijo odboje znotraj 50 ms, povečajo celotno raven govora in s tem RGs in obratno. Zgodnje odboje lahko dosežemo z zmanjšanjem razdalje med stenami ali s približevanjem vira zvoka (govora) oziroma poslušalca k steni prostora. Pri tem moramo upoštevati, da je učinek odbitega zvoka zanemarljiv, če je njegova raven za 10 do 15 dB nižja od direktnega zvoka. Če je ta razlika manjša od 10 dB, potem lahko še računamo s Cocktail-party efektom. Cocktail-party efekt imenujemo sposobnost človeškega ušesa in možganov, da med večjim številom zvočnih virov, ki delujejo istočasno, razloči želenega [Bradley, 2002: 27–29].

V praksi razlikujemo objektivno in subjektivno RG. Objektivno razumljivost govora (RGo) določamo z meritvami fizikalnih parametrov signala (govora) v zaprtem prostoru, to je z meritvami T60 in RG/Š, medtem ko subjektivno razumljivost govora (RGs) določamo s pomočjo govornih testov. Subjektivna razumljivost



Slika 1: a) Zvočni signal govora zapisan v gluhi komori, $T_{60} = 0$ s, b) in c) primerjava med signalom govora brez odmevov (temno) in signala govora zapisanega v prostoru z odmevnim časom $T_{60} = 0,8$ s in 2 s (sivo).

Figure 1: a) Sound signal of speech recorded in an anechoic chamber, $T_{60} = 0$ s, b) and c) comparison between sound of speech without reverberation (dark) and signal of speech recorded in a space with reverberation time $T_{60} = 0,8$ s and 2 s (grey).



Slika 2: Odbiti (2), absorbirani (3), prenešeni po steni (4) in prepuščeni (5) del vpadlega zvočnega valovanja (1).

Slika 3: Subjektivna razumljivost govora v odvisnosti od RG/Š za tri odmevne čase: $T_{60} = 0,5$, 1 in 1,5 s.

Figure 3: Subjective speech intelligibility versus signal to noise ratio (S/NR) for three reverberation times: $T_{60} = 0,5$, 1 and 1,5 s.

govora poleg T60 in RG/Š upošteva tudi dimenzije prostora ($x/y/z$) in položaj poslušalca in predavatelja v prostoru, vidljivost predavatelja, zdravstveno stanje in izobrazbo poslušalca itn., zato je boljše merilo za oceno RG.

Določanje objektivne razumljivosti govora (RGo)

Za objektivno ocenjevanje razumljivosti govora sta Houtgast in Steeneken vpeljala indeks prenosa govora (IPG) (angl. Speech Transmission Index - STI) [Houtgast, 1980: 60–72].

IPG popisuje popačenje signala na poti od mesta emisije do mesta imisije zaradi akustike prostora oziroma zaradi hrupa ozadja (ventilacije, pisarniške opreme, gibanja, konverzacije itn.) in zaradi obstoja zgodnjih in poznih odmevov ter reverberacije. IPG je število med 0 (nerazumljivo) in 1 (zelo razumljivo). Procedura za določanje IPG temelji na prirejenem signalu, ki je oblikovan tako, da približno ustreza spektralni karakteristiki daljšega tekočega govora. Signal je moduliran hrup v obliki nizkofrekvenčnega sinusnega valovanja po ANSI S3.42-1992 ali moduliranega belega šuma.

IPG določamo z meritvami T60 v višini ušes poslušalcev pri danem RG/Š v vseh oktavah najbolj slišnega dela spektra. IPG se potem izračuna s pomočjo modulatorske prenosne funkcije (MPF) (angl. Modulation Transfer Function - MTF) [Houtgast, 1980: 60–72], ki je merilo za popačenje testnega signala zaradi prispevka hrupa in časovne ali nelinearne motnje. Številne študije, ki sta jih izvedla Houtgast in Steeneken, so pokazale, da obstaja direktna zveza med IPG ter RGo, ki jo lahko zapišemo s pomočjo naslednje enačbe: (1)

$$RGo = - 270,9 IPG4 + 817,4 IPG3 - 923,3 IPG2 + 476,8 IPG - 0,009$$

Povprečno raven RGo določimo iz povprečne vrednosti IPG po prostoru.

Zgornji postopek za določanje IPG je relativno zamuden, zato so pozneje (1985) vpeljali hitrejši postopek za določanje indeksa prenosa govora (HIPG) (angl. RAPid Speech Transfer Index - RASTI), [Carvalho, 1999: 33–49]. HIPG se meri samo pri dveh

oktavah, s centralno frekvenco 500 in 2000 Hz.

Izkušnje so pokazale, da obe metodi povzročata določene težave, zato je 2001 Mapp [Mapp, 2001: 18–30] vpeljal novo metodo, imenovano STIPA (iz angl. Speech Transmission Index for Public Address), ki temelji na vzbujanju moduliranega signala s spektrom, kot ga vzbuja normalni govor.

Določanje subjektivne razumljivosti govora (RGs)

Da bi poleg T60 in RG/Š, ki predstavljajo objektivne parametre, zajeli še vse druge parametre, ki tudi vplivajo na RG, kot so oblika prostora, difuzivnost površin, učinek zgodnjih in poznih odbojev (Hassov efekt), "Cocktail-party" efekt, obstoj resonanc in stojnega valovanja v prostoru itn., se meri subjektivna razumljivost govora (RGs). Pri subjektivni razumljivosti govora s testi ugotavljamo razmerje med številom pravilno zapisanih besed (N) in številom vseh prebranih enozložnih besed (B) pri danem RG/Š: (2)

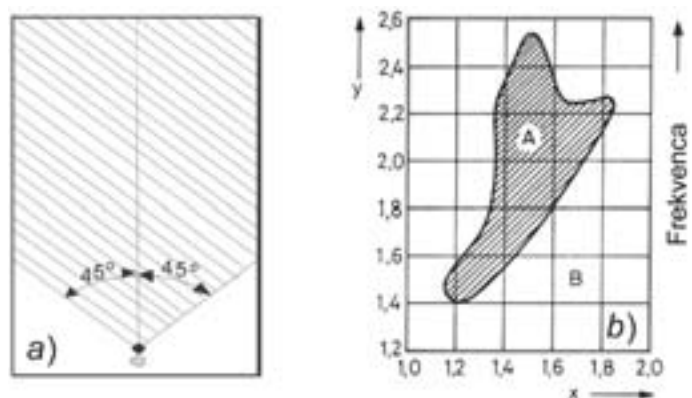
$$RGs = 100 \cdot N/B [\%]$$

RGs je med 0 in 1 ali med nič in 100 % razumljenih besed. Če je RGs pod 65 %, je akustika prostora zelo slaba, če je med 65 in 75 %, je slaba, če je med 75 in 85 %, je dobra, če je nad 85 % je razumljivost govora zelo dobra. Za doseg 85 % RG mora biti raven govora vsaj 25 dB nad ravnjo hrupa ozadja.

Učinek fizikalnih parametrov na razumljivost govora

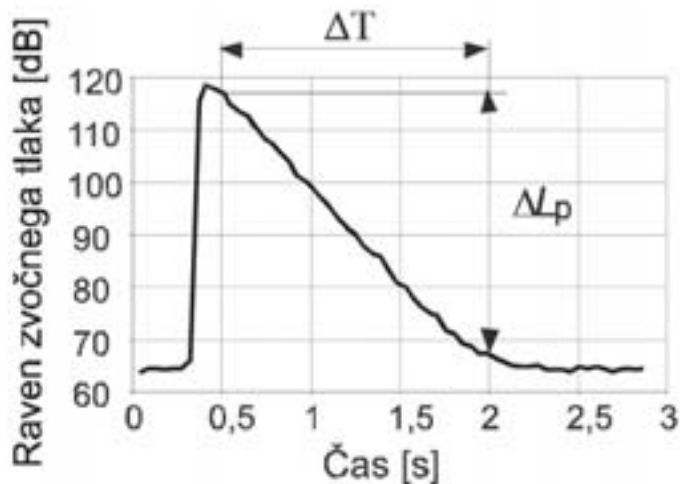
Vpliv odmevnega časa (T60) na razumljivost govora (RG)

Zvočno valovanje se od zvočnega vira širi na vse strani, v obliki žarkov, kot pri svetlobi. Če valovanje (1) na sliki 2 zadene ob oviro (steno), se to spremeni v več pojavnih oblik; del zvoka (2) se odbije (refleksija) oz. razprši (difuzija), del zvoka se v steni vpije (3) (absorpcija) ali prenaša po steni naprej (4), del (5) pa ga gre skozi steno (transmisija). Pri akustiki prostora ločimo refleksijo in difuzijo od absorpcije in transmisije. Delež odbitega in absorbiranega zvoka je odvisen od frekvence oziroma valovne



Slika 4: a) Poslušalci morajo biti znotraj kota 45°, b) razmerje stranic mora biti v zlatem rezu.

Figure 4: a) Listeners must be within angle 45°, b) dimension ratio must be in the golden cut.



Slika 5: Subjektivna razumljivost govora v odvisnosti od RG/Š za tri odmevne čase: T60 = 0,5, 1 in 1,5 s.

Figure 5: Subjective speech intelligibility versus signal to noise ratio (S/NR) for three reverberation times: T60 = 0.5, 1 and 1.5 s.

dolžine zvoka. Pod približno 1000 Hz se večina zvočnega valovanja odbije, nad pa večina absorbira.

V zaprtem prostoru samo del zvočnega valovanja (govora) direktno pride do poslušalca, večji del pa indirektno po odboju od sten prostora. Del valovanja se absorbira v stenah in spremeni po iznihavanju v toploto ter nikoli ne pride do poslušalca. Število odbojev (ŠO) se lahko izračuna iz odmevnega časa (T60) in dimenzij prostora: (3)

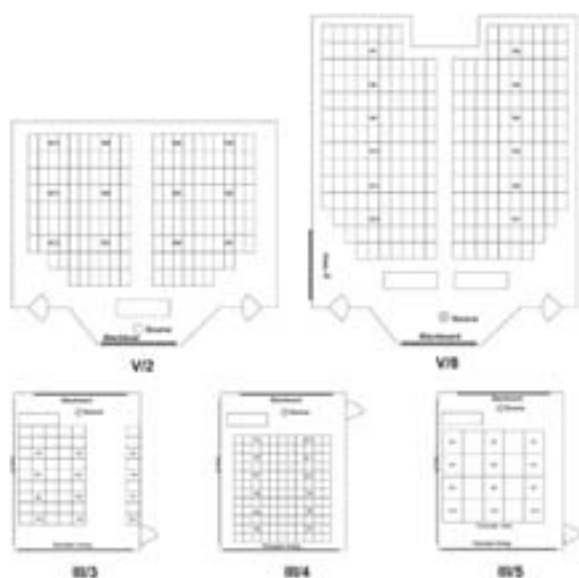
$$\text{ŠO} = cT_{60}S/(4V)$$

pri tem je c hitrost zvoka (343 m/s pri 20°C), S celotna površina prostora v m² in V volumen prostora v m³. V predavalnici z dimenzijami 15 x 10 x 3,5 m s T60 = 0,6 s je ŠO = 47 odbojev. V majhnem studiu z dimenzijami 5 x 4 x 3 m s T60 = 0,25 s je ŠO = 34 odbojev. V enakem studiu z odmevnim časom T60 = 0,6 s je ŠO = 81 odbojev. Karakteristika odbitega zvoka je odvisna od akustičnih lastnosti sten prostora. Vsakič ko se zvok odbije od absorpcijskega materiala, se njegova zvočna energija zmanjša. Za koliko se zmanjša, pa je odvisno od koeficienta absorpcije α materiala stene. Če je $\Delta = 0,5$, se zvočna energija zvoka zmanjša za dvakrat, njegova raven pa za 3 dB, če je $\Delta = 0,7$, se zmanjša raven zvoka za 5,1 dB in za $\Delta = 0,9$ se raven zvoka zmanjša za 10 dB itn.

Rezultat odboja zvoka od sten zaprtega prostora je ta, da slišimo zvok še nekaj časa po tem, ko je zvočni vir prenehal delovati. Ta čas imenujemo odmevni čas (T60), ki tako predstavlja tudi razmerje med zvočno energijo, ki prihaja do poslušalca direktno od zvočnega vira, in zvočno energijo, ki prihaja do poslušalca indirektno po odboju od sosednjih površin.

T60 je enkratna vrednost in se ne spreminja po prostoru, odvisna pa je od dimenzij prostora in od akustičnih lastnosti materialov, s katerimi so obdelane vse površine v prostoru, to je od absorpcije vseh sten, stropa in tal. Izračunamo ga s pomočjo Sabineove formule: (4)

$$T60 = 0,161 \cdot V/A$$



Slika 6: Opazovane predavalnice na FS.

Figure 6: Lecture rooms at the Faculty of Mech. Eng.

pri čemer je V volumen prostora v m³ in A ekvivalentna absorpcijska površina v m², ki jo lahko izračunamo s pomočjo enačbe Sabinea: (5)

$$A = S \cdot \bar{\alpha}_{Sab} = \sum_{i=1}^n [S_i \cdot (\alpha_{Sab})_i]$$

pri tem je S_i parcialna površina prostora, α_{Sab} , α_{Sab1} , α_{Sab2} , ..., α_{Sabn} pa skupni oziroma parcialni koeficient absorpcije posameznega elementa površine n po Sabineu.

To pomeni, da imajo veliki prostori s togimi, trdimi in gladkimi stenami večje T60 kot mali prostori s stenami, ki so prekrivane z absorpcijskimi materiali. Kadar je volumen prostora večji od 500 m³ in če je koncentracija absorptivnih elementov le na enem delu prostora, je za izračun odmevnega časa bolj kot ta uporabna Eyringa ali Fitzroya metoda [Beranek, 2006: 1399–1410].

T60 se spreminja od nič v gluhi sobi do približno 14 s v odmevnici s prostornino 200 m³. Vse ostale sobe, hale in dvorane so nekje vmes. Optimalne vrednosti T60 so odvisne od volumna in namena prostora. Predavalnice imajo T60,opt od 0,4 do 0,9 s (izvedene dosega tudi do 1,5 s in več). Dolgi odmevni časi povzročijo difuzivnost zvočnega polja in zmanjšajo razumljivost govora. Po Knudsenu [Knudsen, 1950] je pri T60 = 3 s RG = 85 %, pri T60 = 6 s RG = 60 % in pri T60 = 9 s je RG le še 50 %.

Naš pravilnik o zvočni zaščiti stavb, UL RS 14/1999, predpisuje dovoljene vrednosti T60 glede na volumen predavalnice, in sicer od 0,7 s za prostornine do 200 m³, do 0,8 s za prostornine od 200 do 500 m³ in 0,9 s za prostornine nad 500 m³.

Vpliv razmerja govora in šuma (RG/Š) na subjektivno razumljivost govora (RGs)

Na razmerje jakosti govora in šuma (RG/Š) je najbolj vpliven parameter za razumljivost govora. Slika 3 kaže odvisnost subjektivne razumljivosti govora (RGs) od RG/Š za tri odmevne čase: T60 = 0,5, 1 in 1,5 s [Lasso, 2004: 599–606], za primerjavo.

Na sliki 3 vidimo, da če poznamo T60 in RG/Š, lahko napovemo razumljivost govora v neki predavalnici. Pri enakem T60 se s porastom RG/Š od 0 do 10 dB, RGs poveča v povprečju za 17 % ali pri T60 = 0,5 s in RG/Š = 10 dB je RGs = 98 %, medtem ko je pri RG/Š = 0 dB, RG le še 85 %. Podobno bo RG padla na približno 85 %, če pri RG/Š = 10 dB T60 naraste od 0,5 na 1,5 s. To pomeni, da v predavalnici z znano akustiko lahko RGs izboljšamo s povečanjem RG/Š oz. s povečanjem ravni govora ali zmanjšanjem hrupa ozadja in T60. Z oddaljevanjem od govorca se RGs praviloma zmanjšuje, ker se zmanjšuje RG/Š zaradi zmanjšanja ravni govora, medtem ko hrup ozadja praviloma ostane enak [Bradley, 2002: 27–29]. Za dobro razumljivost govora mora torej biti RG/Š čim večje, minimalno vsaj 10 dB, praviloma pa večje od 15 dB. To velja za vsa merilna mesta v prostoru, kar je pogosto težko doseči, saj se raven govora z oddaljenostjo zmanjšuje, in sicer s kvadratom razdalje. Tako se na primer raven govora s 65 dB(A) zmanjša na razdalji 10 m na 45 dB(A). V tem primeru je pri hrupu ozadja npr. 40 dB(A) RG/Š le še 5 dB, kar je daleč pod minimalno potrebnih 10 dB. RG/Š je torej odvisen od glasnosti govora predavatelja in hrupa ozadja in je lahko od 0 do 45 dB in več, lahko je tudi negativen, če je hrup ozadja glasnejši od govora.

Vpliv oblike in volumna prostora na razumljivost govora

Med dvema paralelnima in odbojnima stenama prostora se pojavi stojno valovanje. Stojna valovanja se pojavijo pri frekvencah, pri katerih so valovne dolžine večkratnik razdalje med dvema nasprotnima stenama. Te frekvence imenujemo resonančne frekvence ali lastne oblike. Ker se zvok širi od vira sferično, v prostoru oblike paralelepipeda nastane serija treh stojnih valovanj, v smeri x , y in z . Resonančne frekvence so lahko aksialne, tangencialne in poljubne. Resonančne frekvence dodatno popačijo akustiko prostora, ker povzročijo neenakomerno porazdelitev zvočnega tlaka po prostoru; v določenih delih zaprtega prostora imajo določeni toni višjo raven kot v drugih. Resonančne frekvence so problematične v manjših prostorih in pri nizkih frekvencah. Najslabši primer nastopi v primerih, ko so vse dimenzije prostora (x , y in z) enake. Pravilno razmerje dimenzij je odvisno od namena prostora. Za predavalnice velja pravilo, da naj bodo dimenzije $x/y/z$ takšne, da so njihove stranice daljše kot širše oziroma take, da je poslušalec znotraj kota 45° glede na predavatelja, tako da zvok prihaja do poslušalca po najkrajši poti, slika 4a. Zato v literaturi srečujemo različna priporočila za razmerja stranic prostora x , y glede na višino $z = 1$, vendar večina temelji na tako imenovanem zlatem rezu, šrafirano na sliki 4b. Nekaj takih priporočil je prikazanih tudi v tabeli 1.

Volumen prostora ima velik vpliv tudi na T_{60} , zato mora za dobro razumljivost govora po Hudgsonu (2004) T_{60} naraščati z volumnom predavalnice V , od približno 0 do 1 s in celo do 2 s ali po naslednji enačbi: (6)

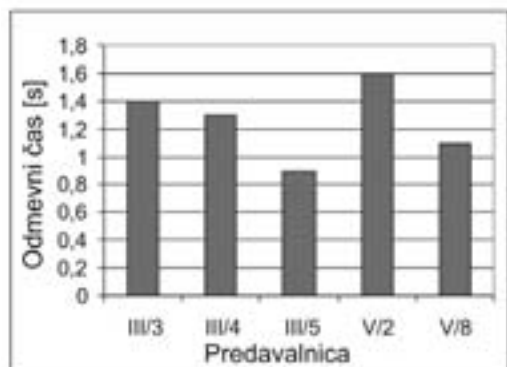
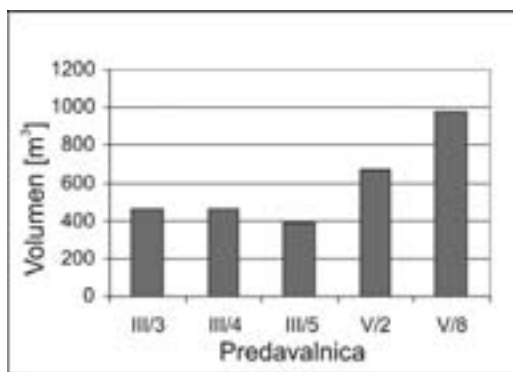
$$T_{60,opr} = 0,04V^{0,4}$$

Od volumna prostora je tako odvisna tudi RG. Če volumen prostora povečamo od 700 na 45000 m³ ali za 6,5-krat, se RG, pri enakem $T_{60} \sim 1$ s in $RG/\bar{S} = 25$ dB, zmanjša za več kot 13 % [Knudsen, 1950].

Merjenje odmevnega časa (T_{60}) in razumljivosti govora (RG)

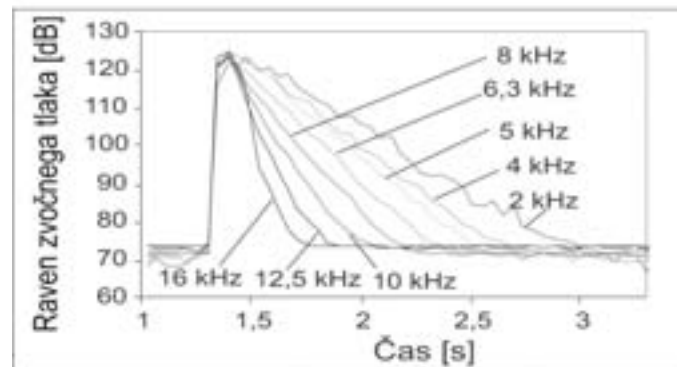
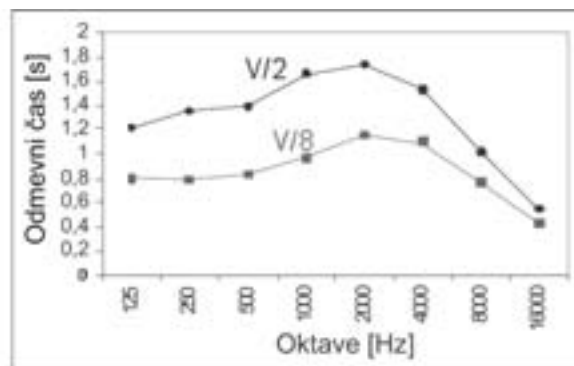
Merjenje odmevnega časa (T_{60})

Enačbi (4) in (5) lahko uporabimo za izračun T_{60} , vendar je to možno le, če poznamo vse parcialne površine v prostoru in njihove koeficiente absorpcije. Dejanske parcialne površine in pripadajočih koeficientov absorpcije ter celotnega volumna prostora praviloma ne poznamo, saj se gradbeniki, kot izvajalci del, skoraj nikoli ne držijo podrobnosti, ki jih arhitekti podajajo v projektni dokumentaciji. Zato se omenjeni enačbi uporabljata le pri zasnovi in projektiranju novih prostorov. Pri izvedenih prostorih T_{60} praviloma določimo na podlagi meritev. Postopek merjenja je predpisan z EN ISO 3382 standardom. T_{60} določimo tako, da vzamemo nek zvočni vir in merimo raven zvočnega tlaka po njegovem izklopu. Zvočni vir mora biti vsaj 40 dB glasnejši od hrupa ozadja v celotnem slišnem delu spektra. Takšnim pogojem najbolje ustrezajo referenčni zvočni vir, pok iz (štartne) pištole ali pok napihnjene PVC balona. Iz zapisa merilnega signala



Slika 7: Primerjava med volumni predavalnic in izmerjenimi T_{60} za vseh 5 predavalnic.

Figure 7: Comparison between volumes of the assessed lecture room and measured T_{60} for all 5 lecture rooms.



Slika 8: a) T_{60} pri različnih tercah za predavalnico V/8, b) primerjava T_{60} za predavalnici V/2 in V/8 pri različnih oktavah.

Figure 8: a) T_{60} at different 1/3-octaves for lecture room V/8, b) comparison T_{60} for lecture rooms V/2 and V/8 at different octave bands.

odčitamo čas ΔT v s, ki je pretekel od izklopa zvočnega vira do padca ravnih zvočnega tlaka, ΔL_p , za 60 dB po sliki 5. T60 potem izračunamo po enačbi: (7)

$$T60 = 60 \Delta T / \Delta L \quad [s]$$

Meritve T60 smo opravili v 5 predavalnicah na FS po sliki 6, njihov volumen pa je podan na sliki 7a.

Meritve smo opravili v tercah od 125 do 12500 Hz. Kot zvočni vir smo uporabili pok iz štartne pištole, ki je v celotnem frekvenčnem območju zagotavljal zadostno razmerje signal – šum (RS/Š). Izmerjeni T60 za vse predavalnice so prikazani na sliki 7b. Na slikah 7a in b vidimo dobro ujemanje med volumni predavalnic in izmerjenim T60. Najmanjše vrednosti T60 ima predavalnica III/5, ker ima najmanjši volumen, pač pa predavalnica V/8 z največjim volumnom nima najdaljšega T60, ker je bila pred kratkim akustično obdelana, medtem ko so vse druge predavalnice imele stene iz betona.

Slika 8a kaže izmerjene T60 pri posameznih tercah za največjo predavalnico V/8. Vidimo, da se pri višjih frekvencah nad 2 kHz T60 zmanjšuje. Enako se zgodi pri nižjih frekvencah od 2 kHz, slika 8b. Slika 8b kaže primerjavo T60 za predavalnici V/2 in V/8 v oktavah.

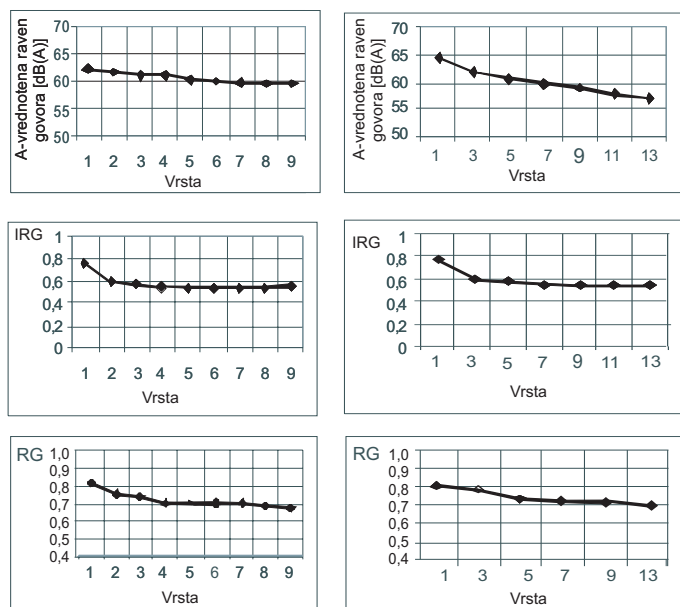
Po sliki 8b ima predavalnica V/2 daljše odmevne čase kot predavalnica V/8 v vseh oktavah. Obe predavalnici pa imata najdaljše odmevne čase pri oktavi 2 kHz. Rezultati na slikah 7 in 8 so izmerjeni v predavalnicah brez prisotnosti poslušalcev. Prisotnost poslušalcev poveča absorpcijo in zmanjša odmevni

čas. Telo povprečne osebe zmanjša odmevni čas kot nekaj več kot šest oblazinjenih sedežev. Učinek prisotnosti poslušalcev v manjših učilnicah (do 30 sedežev) je zanemarljiv, medtem ko je v večjih predavalnicah in avditorijih lahko opazen, tudi do 44 % in več, zlasti če niso akustično obdelane. Na vsakega študenta v predavalnici se absorpcija poveča, odvisno od frekvence, od 0,4 do 1,1 m², kar v povprečju ustreza povečanju površine za 0,8 m². Več o vplivu poslušalcev na razumljivost govora v naslednjem članku.

Merjenje indeksa prenosa govora (IPG) in izračun objektivne razumljivosti govora (RGo)

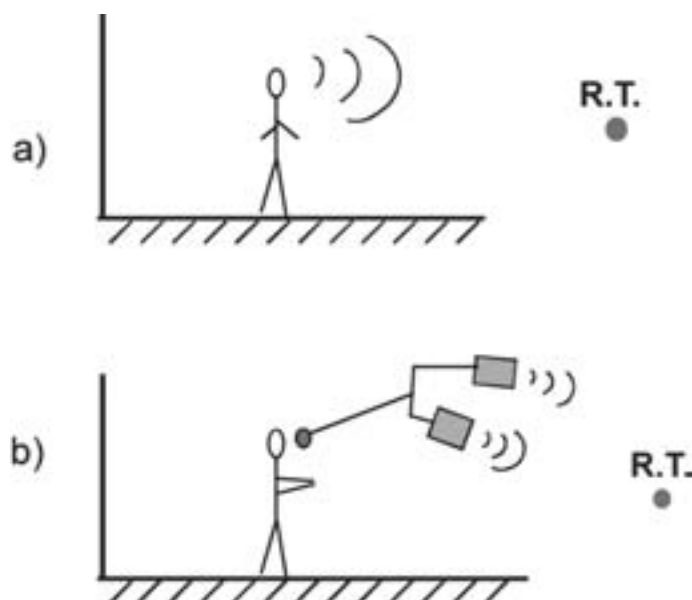
Objektivno razumljivost govora (RGo) smo merili v dveh največjih predavalnicah V/2 in V/8. Indeks prenosa govora (IPG) smo merili z LexSTI.exe (Lexington School of Deaf STI = Speech Transmission index), ki upošteva T60 pri vseh oktavah. Slika 9 (zgoraj) kaže povprečno vrednost A – vrednotene ravni govora v posamezni vrsti, slika 9 (v sredi) kaže povprečno vrednost IPG v vrsti in slika 9 (spodaj) kaže RGo, ki smo jih izračunali na podlagi izmerjenih IPG s pomočjo enačbe (1) v dani vrsti za predavalnico V/2 (a) in za predavalnico V/8 (b).

Povprečna vrednost RGo se zmanjšuje z razdaljo od predavatelja, od 0,82 do 0,7 v predavalnici V/2 in od 0,8 do 0,68 v predavalnici V/8. Po tretji vrsti v obeh predavalnicah RGo je okrog ali pod 0,7, kar je pod mejo dobre RG (75 %). Ekvivalentna raven govora se je proti koncu predavalnice zmanjšala za cca. 5 dB v predavalnici V/2 in za cca. 7 dB v predavalnici V/8, slika 9 (zgoraj).



Slika 9: Povprečna A – vrednotena raven govora v vrsti (zgoraj), povprečna vrednost IRG v vrsti (v sredi) in povprečna vrednost RGo v vrsti (spodaj): a) za predavalnico V/2 in b) za predavalnico V/8.

Figure 9: Mean value of A-weighted sound pressure level in row (above), mean value of STI in row (in middle) and mean value of SLO in row (below) for: a) lecture room No. V/2 and b) lecture room No. V/8.



Slika 10: Dva načina reprodukcije govora: a) direktni govor, b) govor po ozvočenju.

Figure 10: Two different ways of speech reproduction: a) direct speech, and b) speech over 4 loudspeakers.

Določanje subjektivne razumljivosti govora (RGs)

Subjektivno razumljivost govora (RGs) smo ugotavljali le v obeh največjih predavalnicah (V/2 in V/8), in sicer s pomočjo govornih testov. Govorne teste smo opravili tako, da smo brali zadostno število (ca. 40) standardnih enozložnih besed. Pri testih je v predavalnici V/2 sodelovalo 26 študentov med 18 in 23 letom starosti ali v povprečju starih 20,1 leta, v predavalnici V/8 pa je bilo 35 študentov med 20 in 24 letom starosti ali v povprečju starih 21,4 leta. Govor smo predvajali na dva načina: v prvem primeru smo brali enozložne besede pred tablo, na mestu, kjer se običajno zadržuje predavatelj, slika 10a, v drugem primeru smo predvajali branje po ozvočenju s štirimi zvočniki, ki so bili 4 m nad glavo predavatelja, slika 10b. Naloga testiranih je bila, da zapišejo besede, ki so jih slišali. Odstotek RGs smo izračunali s pomočjo enačbe (1).

Za nastavljanje ravni govora smo merili A – vrednoteno raven govora v referenčni točki (R.T.), ki je bila na sredini tretje vrste ali na razdalji 3 m pred predavateljem, slika 10. V R.T. smo vzdrževali približno enako referenčno raven predvajanega govora med vsemi testi, kar pomeni z enakim RG/Š. Povprečna izmerjena raven govora je bila 56 ± 3 dB(A).

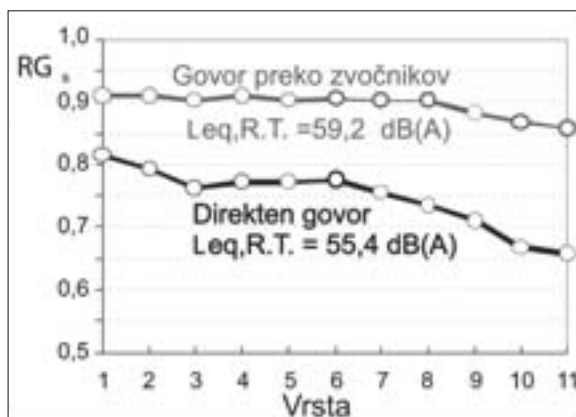
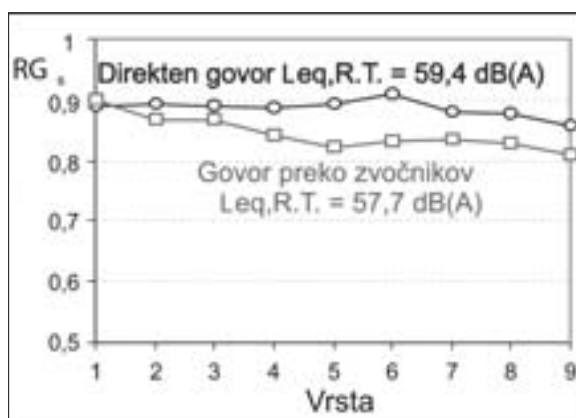
Slika 11a kaže povprečno vrednost RGs v odvisnosti od vrste v predavalnici V/2 za dva različna načina predvajanja govora in slika 11b kaže isto, le v predavalnici V/8.

Iz slike 11 vidimo, da je v obeh primerih RGs zadosti dobra, v

povprečju 90 %, če je A – vrednotena ekvivalentna raven govora v R.T. zadosti visoka (59,4 dB(A) na sliki 11a in 59,2 dB(A) na sliki 11b) oz. če je RG/Š veliko, RGs pa je slaba, če je RG/Š nizko, oziroma ko je Leq v R.T. relativno nizka (zlasti pri $Leq = 55,4$ dB(A) na sliki 11b). Če je vključeno ozvočenje, je RGs zadosti visoka le, če je RG/Š zadosti veliko. Sicer pa RG/Š v predavalnici V/8 pada z oddaljevanjem od predavatelja mnogo bolj kot v predavalnici V/2, zaradi njenega večjega volumna in večje dolžine, slika 9 (zgoraj). Na sliki 11b vidimo, da je v primeru direktnega govora z $Leq = 55,4$ dB(A) RGs do 8. vrste nad 0,75, kar na splošno pomeni mejo za dobro RG, po 8. vrsti je RGs pod 0,75, kar pomeni, da pri tem Leq v R.T. v predavalnici V/8 nujno potrebujemo ozvočenje.

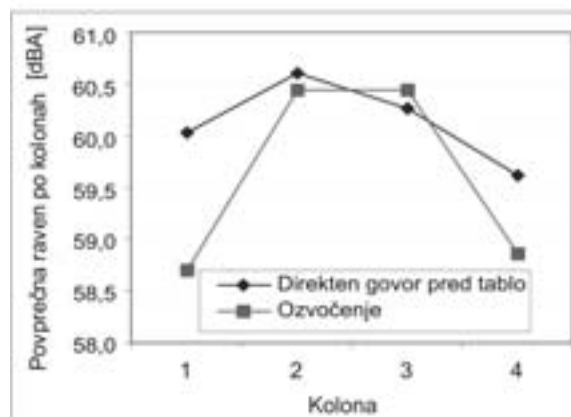
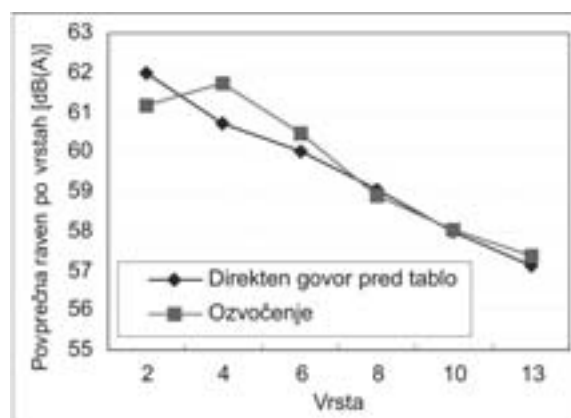
Primerjava rezultatov RGs na sliki 11, s tistimi za RGo na sliki 9, kaže, da so rezultati govornih testov, ki upoštevajo tudi subjektivne vplivne parametre, mnogo boljši od objektivnih meritev, in sicer pri isti ravni govora za cca. 20 %. Boljši rezultati subjektivnih testov so tudi posledica povečane absorpcije zaradi prisotnosti testirancev v prostoru, ki jih med objektivnimi meritvami v predavalnici ni bilo.

S slike 11 lahko ugotovimo, da je RGs odvisna predvsem od ravni govora, večja ko je, boljše je RG. To velja tako za direkten kakor za indirektno govor, predvajan po zvočnikih. RGs je odvisna tudi od razdalje do poslušalca in vizualne prisotnosti predavatelja. S porastom ravni govora dejansko povečamo RG/Š in posledično RG. To pomeni, da ozvočenje avtomatično ne



Slika 11: RGs v odvisnosti od vrste za dva različna načina predvajanja govora: a) v predavalnici V/2 in b) v predavalnici V/8.

Figure 11: SIs versus row for two different ways of speech reproduction: a) in lecture room No. V/2 and b) in lecture room No. V/8.



Slika 12: Ravni govora v predavalnici V/8: a) v odvisnosti od vrste in b) v odvisnosti od kolone.

Figure 12: Level of speech in lecture room No. V/8: a) versus row and b) versus column.

pomeni izboljšanja RG, če je ekvivalentna raven govora v R.T. nižja od ravni direktnega govora, to je, če je nastavljeno ojačanje prenizko. Ozvočenje je neučinkovito tudi, če je to nepravilno instalirano oz. usmerjeno v določen del predavalnice. Tak primer kaže slika 12.

Na sliki 12a je ozvočenje usmerjeno v višini 4. vrste, na sliki 12b pa po sredini predavalnice. Ozvočenje je torej smiselno le, če z njim pripomoremo k boljši porazdelitvi ravni govora po vsej predavalnici in če je na mestu poslušalca razlika med govorom po ozvočenju in direktnim govorom brez ozvočenja vsaj 6 dB. Če je raven govora enaka tisti po ozvočenju, potem je RGs boljša v primeru direktnega govora, ker med poslušanjem poslušalci tudi gledajo predavatelja in berejo pomen besed iz njegovih ust in gestikulacije z rokami in ostalimi deli telesa.

Zaključek

Razumljivost govora (RG) v predavalnicah je odvisna od akustike prostora in razmerja signal (govor) šum ozadja (RG/Š). Akustika prostora je določena z odmevnim časom (T60) in razmerjem dimenzij (x/y/z) glede na predavatelja in poslušalce. Da bi preverili vzroke za slabo razumljivost govora v predavalnicah na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani, smo opravili meritve RG v petih predavalnicah, in sicer po objektivni in subjektivni metodi. Pri objektivni metodi smo merili T60, RG/Š ter indeks prenosa govora (IPG). Na podlagi teh smo izračunali objektivno razumljivost govora (RGo). Poleg tega smo merili še subjektivno razumljivost govora (RGs), in sicer tako, da smo opravili govorne teste na večjem številu poslušalcev pri znani ekvivalentni ravni govora (Leq) in RG/Š. Teste smo izvajali pri dveh različnih vrstah predvajanja govora, in sicer pri direktnem govoru in po ozvočenju. Rezultati meritev so pokazali, da je RGs odvisna predvsem od T60 in RG/Š; čim manjši je T60 in čim večje je RG/Š, večja je RG. Ugotovili smo še, da je usmerjenost ozvočenja zelo pomembna in da je uvajanje ozvočenja upravičeno le, če ta lahko zagotovi zadostno ojačitev govora (vsaj za 6 dB) in če z ozvočenjem lahko zagotovimo enakomerno razporeditev govora po vsej predavalnici. Meritve in govorni testi so pokazali, da je v večini predavalnic ali njihovem večjem delu RG pod zadovoljivih 75 % in da so predavalnice potrebne akustične obdelave. O tem, kako izboljšati razumljivost govora v učilnicah in predavalnicah, več v naslednjem prispevku.

Literatura in viri

- Beranek L. L., (2006): Analysis of Sabine and Eyring equations and their application to concert hall audience and chair absorption. *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 120, No. 3, 1399–1410.
- Bradley J. S., (2002): Relating Speech Intelligibility to Useful-to-Detrimental Sound Ratios (L), *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 112, No. 1, 27–29.
- Carvalho A. P. O., (1999): Relations Between Rapid Speech Transmission Index (RASTI) and Other Acoustical and Architectural Measures in Churches, *Applied Acoustics* 58, 33–49.
- Haas H., (1972): The Influence of a Single Echo on the Audibility of Speech, *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 20 (1972), 145–159.
- Hodgson M., (2004): Case-study Evaluations of the Acoustical Designs of Renovated University Classrooms, *Applied Acoustics* 65, 69–89.
- Houtgast T., Steenekens H. J. M., Plomp R., (1980): Predicting speech intelligibility in rooms from the modulation transfer function, I. General room acoustics, *Acustica*, 46, 60–72.
- Knudsen V. O., Harrys C. M., (1950): *Acoustical Designing in Architecture*. Wiley, New York.
- Lasso M., Viveiros E., (2004): Acoustical Quality in Educational Buildings: Measurements in Brazilian Public Schools, 11th ICAV St. Petersburg, 599–606.
- Mapp, P. (2005): Is STIPA a robust measure of speech intelligibility performance? *Acoustics bulletin* Vol 30 No, 3, 18–30.
- Hodgson M., (1999): Experimental investigation of the acoustical characteristics of university classrooms. *J. Acoust. Soc. Am.* 106 (4), 1810–1818.