

# TEHNIČNA AKUSTIKA

## 3. VAJA - MERJENJE AKUSTIČNE MOČI ZVOČNEGA VIRA

### UVOD

Zvočni tlak je fizikalna količina s katero opisujemo zvok oziroma jakost zvočnega polja. Raven zvočnega tlaka je veličina s katero opisujemo človeško zaznavanje zvoka. Za opisovanje karakteristike emisije zvočnega vira pa ni primerna, saj je odvisna od transmisije, to je od razdalje vira do opazovalca in od merilne okolice.

Zvočni tlak je najpogosteje merjena veličina v akustiki, a je precej neekzaktna, saj je zvočni tlak na danem mestu v nekem prostoru odvisen od akustične okolice. Dosedaj smo definirali:

1. Prosto in difuzno zvočno polje
2. Aktivno in reaktivno zvočno polje
3. Bližnje in daljno zvočno polje.

Isti zvočni vir bo v različnih akustičnih okolich povzročal različna zvočna polja, zato je v akustiki osnova za primerjavo karakteristika zvočnega vira. Zvočni vir je določen z naslednjimi parametri:

1. Zvočna moč
2. Usmerjenost
3. Frekventna karakteristika
4. Časovna karakteristika.

Moč zvočnega vira je edini praktični način za kvantificiranje zvočnega vira. Zvočna moč vira je neodvisna od okolice in od razdalje opazovalca. Zato tudi mednarodni standardi (ISO 3740 - 3747) predpisujejo dovoljene ravni zvočne moči za posamezne naprave. Zvočna moč je torej veličina ki je primerljiva za posamezne zvočne vire, prav tako pa je uporabna pri:

1. Izračunu ravni zvočnega tlaka na poljubni oddaljenosti od zvočnega vira in v odvisnosti od akustične okolice.

$$L_p = L_w + 10 \log_{10} \left( \frac{Q}{4r^2 \pi} + \frac{4}{R} \right)$$

Q je faktor usmerjenost zvočnega vira na določenem prostorskem kotu  $\theta$ . Usmerjenost ni odvisna od radija. Če je na radiju  $r_1=5\text{m}$  raven zvočnega tlaka pri prostorskem kotu  $\theta_1$  za 3dB večja kot pri kotu  $\theta_2$ , potem mora biti tudi pri radiju  $r_2=10\text{m}$  raven zvočnega tlaka pri kotu  $\theta_1$  za 3dB večja kot pri kotu  $\theta_2$ .

$$Q(\theta) = \frac{p_{\text{RMS,usmerjeni}}^2(\theta, r, W)}{p_{\text{RMS,omnidirekcijski}}^2(r, W)}$$

R je konstanta določena z zvočno absorpcijo sten akustične okolice - prostora :  $R = \frac{S\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$

Pri tem je S površina sten prostora, pa je koeficient absorpcije energije

V praksi se konstanta R določa s pomočjo reverberacijskega časa prostora T. T je čas v katerem pade raven zvočnega tlaka za 60 dB. Reverberacijski čas je veličina ki se jo lahko izmeri. Iz te izmerjene veličine pa lahko izračunamo konstanto R po enačbi:

$$R = \frac{V}{0,16 T} \text{ S}$$

2. Primerjava med hrupom ki ga sevajo različni zvočni viri.
3. Določitev ali stroj oziroma naprava ustreza predpisanim standardom za sevanje hrupa

4. v načrtovanju pri določevanju koločine transmisijskih izgub, oziroma pri kontroli hrupa.
5. v inženirskem delu, pri razvoju tihih napra. (Hrup stroja se lahko tudi ujema z njegovim izkoristkom)

Če merimo v akustični okolici, ki ima prisoten znaten hrup ozadja moramo izmerjene vrednosti zvočnega vira korigirati s faktorjem k. Pri tem je  $\Delta L_p$  razlika med ravno zvočnega tlaka pri vklopljenem zvočnem viru in med ravno zvočnega tlaka, ko je zvočni vir izklopljen

$\Delta L_p$ [ dB ]	$\Delta L_p > 10$	8 -10	6-8	4,5-6	4-4,5	3,5	3
k	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3

$$\Delta L_p = L_{p,vira} - L_{p,ozadja}$$

Izmerjeno raven zvočnega tlaka moramo korigirati, da dobimo dejansko raven zvočnega tlaka, ki jo seva merjeni zvočni vir

$$L_{p,vira,dejanski} = L_{p,vira} + \Delta L_p$$

## MERJENJE ZVOČNE MOČI VIRA

### A: PRIMERJALNA METODA

Ta metoda temelji na primerjavi zvočnega tlaka, ki ga seva referenčni zvočni vir, katerega zvočno moč poznamo, z zvočnim tlakom, ki ga seva neznan merjeni zvočni vir. Pri teh meritvah moramo paziti, da so pogoji pri obeh meritvah enaki.

Oba zvočna vira naj bi oddajala isto frekventno območje.

Če imamo zelo nizke frekvence moramo določiti velikost odmevnice (po moje to ni treba)

Položaj vira in mikrofona mora biti isti.

Raven moči merjenega zvočnega vira določimo po naslednji formuli:

$$L_w = L_w' + (\overline{L_p} - \overline{L_p}')$$

$L_w'$  = raven zvočne moči referenčnega vira

$\overline{L_p}$  = povprečna raven zvočnega tlaka testiranega vira

$\overline{L_p}'$  = povprečna raven zvočnega tlaka referenčnega vira

### B: DOLOČANJE ZVOČNE MOČI V CEVI

Merjeni zvočni vir postavimo v cev, ki je na koncu terminirana z nereflektirajočim glušnikom. Po cevi se teoetično širi ravno valovanje, intenzivnost pa je po preseku cevi enaka. Zvočni tlak merimo malo izven osi cevi ki ima presek S. Raven zvočne moči ki potuje po cevi je določena z enostavno enačbo:

$$L_w = L_p + 10 \log S$$

S to metodo lahko merimo samo nizke frekvence, saj se že pri frekvenci katere valovna dolžina je manjša od prečne dimenzije cevi. Imamo večmodalno širjenje (Analogija z laserji TEM00, TEM01..)

### C: DOLOČITEV ZVOČNE MOČI VIRA Z MERJENJEM ZVOČNEGA TLAKA V ODMEVNICI MERJENJE MOČI V DIFUZNEM ZVOČNEM POLJU

Zvočno polje v odmevnici je prav tako dobro definirano kot v gluhi sobi. Difuzivnost zvočnega polja direktno vpliva na natančnost merjenja moči zvočnega vira.

Problem pri nizkih frekvencah -> velik volumen sobe, in če vir seva čiste tone.

V odmevnici je gostota zvočne energije konstantna. Zvočno polje je popolnoma difuzno. Intenzivnost v dani točki je približno nič. **V vsaki točki idealne odmevnice v kateri je idealno difuzno zvočno polje je zvočni tlak enak. Zaradi natančnosti pa moramo zvočni tlak povprečiti po prostoru odbojnice tudi do 50 krat.**

Gostota zvočne energije v odmevnici je v direktni zvezi z zvočnim tlakom, in s tem tudi z močjo zvočnega vira.

$$L_w = \bar{L}_p + 10 \log V - 10 \log T_{60} + 10 \log \left( 1 + \frac{S\lambda}{8V} \right) - 13,5$$

$\bar{L}_p$  = povprečna vrednost ravni zvočnega tlaka, po potrebi korigirana za hrup ozadja

V = volumen odmevnice od katere odštejemo volumen vira

S = površina sten odmevnice

T = reverberacijski čas odmevnice

$\lambda$  = valovna dolžina centralne frekvence merjenega frekventnega območja

### D: MERJENJE ZVOČNE MOČI V PROSTEM ZVOČNEM POLJU (GLUHA SOBA, NA PROSTEM)

Ena od glavnih lastnosti prostega zvočnega polja je ta da ima hitrost delcev pri nihanju enako smer kot je smer širjenja zvoka. Druga pomembna lastnost prostega zvočnega polja je, da raven zvočnega tlaka pade za 6 dB vsakič ko se podvoji razdalja od vira do opazovalca. (zvok se širi sferično).

Zvočno intenzivnost smo definirali kot energijo, ki gre skozi enoto površine v enoti časa, zato lahko zvočno moč definiramo kot vsoto, po zaključeni površini okoli vira, produkta intenzivnosti  $I_S$  in površine  $dS$  skozi katero teče intenzivnost  $I_S$ .

$$W = \oint_S I_S dS$$

Zaradi naštetega velja enostavna povezava med ravno zvočnega tlaka in močjo zvočnega vira. Predpostavimo lahko sferično širjenje zvočnega valovanja. Za sferično valovanje zvočnega polja velja enostavna povezava med zvočnim tlakom in intenzivnostjo, (hitrostjo delcev).

$$I = \frac{p_{RMS}^2}{\rho c}$$

Za sferično valovanje kjer je površina okoli vira na razdalji r kroglja z radijem r, velja tudi povezava med intenzivnostjo in močjo zvočnega vira.

$$I = \frac{W}{S} = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p_{RMS}^2}{\rho c}$$

Za povezavo med ravno zvočne intenzivnosti in ravno zvočnega tlaka velja :

$$L_1 = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{p_{RMS}^2}{\rho c I_0} = 10 \log \frac{p^2}{\rho_0^2} + 10 \log \frac{p_0^2}{\rho c I_0} \Rightarrow$$

$$L_1 = L_p - 10 \log K$$

Faktor K je odvisen od atmosferskih pogojev, in znaša pri normalnih pogojih okoli 1,03, in če to logaritmiramo dobimo da je  $10\log K = 0,13$  dB, kar lahko v večini primerov zanemarimo, tako da lahko za sferično valovanje zapišemo:

$$L_I \approx L_p$$

Za povezavo med ravno zvočne moči in ravno zvočne intenzivnosti velja :

$$L_w = 10\log \frac{W}{W_0} = 10\log \frac{IS}{W_0} = 10\log \frac{I}{10^{-12}} + 10\log \frac{S}{S_0} = L_I + 10\log S = L_I + 10\log r^2 + 10\log 4\pi \Rightarrow$$

$$L_w = L_p - 10\log K + 20\log r + 11$$

Določanje moči zvočnega vira v prostem zvočnem polju, s pomočjo merjenja ravni zvočnega tlaka je najnatančnejša možna metoda.

Toda nekateri zvočni viri so pretežki, da bi jih lahko merili v gluhi sobi, zato se uporabljajo takoimenovane polgluhe sobe, ki imajo toga, trdna tla s koeficientom absorpcije, ki mora biti manjši od 0,06. Pri teh meritvah prihaja do napake zaradi prostorske nepravilnosti zvočnega polja, ki je posledica superpozicije zvočnega polja vira in njegove imaginarne slike (odboj od tal). Pri polgluhih sobah je pomembno, da so tla vibracijsko izolirana, tako da ne vibrirajo in ne povzročajo dodatnega hrupa.

Meritve moči zvočnega vira v gluhi sobi tako dejansko temeljijo na predpostavki, da je na stenah popolna absorpcija, tako da lahko odbiti zvok zanemarimo, in da dobimo moč z integriranjem zvočne intenzivnosti po hipotetični testni polkrogli.

#### POSTOPEK MERITVE

Okoli zvočnega vira postavimo virtualno polkroglo. Vir mora biti v sredini te polkrogle. Radij polkrogle mora biti vsaj dvakrat večji od največje dimenzije vira, oziroma od valovne dolžine najnižje frekvence, ki jo bomo merili. Večji mora biti tudi od štirikratne višine vira od tal. V vsakem primeru pa mora biti radij krogle večji od enega metra.

Število merilnih točk je odvisno od usmerjenosti vira. Če imamo popolnoma neusmerjen vir, potem praktično zadošča ena sama merilna točka, če pa je vir močno usmerjen, moramo vzeti večje število točk.

V praksi vzamemo za rahlo usmerjen zvočni vir 10 merilnih točk (v tabeli od 1 do 10), za bolj usmerjene zvočne vire pa merimo še na dodatnih merilnih mestih (v tabeli od 11 do 20)

Tabela 2: Položaj merilnih točk

točka	x/R	y/R	z/R	$L_p$
1	-0,99	0	0,15	
2	0,5	-0,86	0,15	
3	0,5	0,86	0,15	
4	-0,45	0,77	0,45	
5	0,45	-0,77	0,45	
6	0,89	0	0,45	
7	0,33	0,57	0,75	
8	-0,66	0	0,75	
9	0,33	-0,57	0,75	
10	0	0	1	
11	0,99	0	0,15	
12	-0,5	0,86	0,15	
13	-0,5	-0,86	0,15	
14	0,45	0,77	0,45	
15	-0,45	0	0,45	
16	0,89	-0,77	0,45	
17	0,33	0	0,75	
18	-0,66	0,57	0,75	
19	-0,33	-0,57	0,75	
20	0	0	1	

Povprečno vrednost ravni zvočnega tlaka izračunamo po enačbi:

$$L_{p,a} = 10 \log \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{p,i}}{10}} \right)$$

N = število merilnih mest

$L_{p,i}$  = Raven zvočnega tlaka v i-ti merilni točki

Dejansko povprečimo kvadrat zvočnega tlaka, čeprav bi po moje morali povprečiti RMS zvočnega tlaka v danih točkah, in šele nato povprečni zvočni tlak logaritmirati na raven zvočnega tlaka.

Tabela 3: Prikaz razlike pri povprečenju Ravni zvočnega tlaka, Kvadrata RMS zvočnega tlaka in samega zvočnega tlaka

	$L_p$	$p_{RMS}^2$	$p_{RMS}$
1	87	0,20	0,44
2	88	0,25	0,50
3	90	0,40	0,63
4	92	0,63	0,79
5	89	0,31	0,56
6	87	0,20	0,44
7	87	0,20	0,44
8	84	0,10	0,31
povprečje	88	0,28	0,51
Raven zvočnega tlaka	88	<b>88,57</b>	88,29

V primeru da imamo močan hrup ozadja, moramo povprečni vrednosti ravni zvočnega tlaka odšteti še korekcijski faktor K, ki predstavlja prispevek motilnega hrupa k meritvi, po tabeli 4.

$$L_{p,m} = L_{p,a} - k$$

Tabela 4: korekcijski faktor k

Razlika med ravno hrupa ozadja, in izmerjeno ravno zaradi merjenega izvora	10-8	8-6	6-4,5	4,5-4	4-3,5	3,5-3
Korekcijski faktor k	0,5	1	1,5	2	2,5	3

Končno izračunamo raven zvočne moči z upoštevanjem merilne površine polkrogle:

$$L_w = L_{p,m} + 10 \log \left( \frac{S}{S_0} \right) = L_{p,m} + 20 \log r + 10 \log 2\pi$$

$$L_w = L_{p,m} + 20 \log r + 8$$

Pri tem je  $S_0$  referenčna površina  $1\text{m}^2$ ,  $S$  pa površina polkrogle

Če merimo v popolnoma gluhi sobi, so zvočni viri ponavadi manjši in okoli njih tvorimo merilno površino v obliki krogle, kjer je  $S=4\pi r^2$ . Merilna mesta vzamemo enaka kot zgoraj, samo prezrcalimo jih še na spodnjo stran. Zaradi krogle se enačba rahlo spremeni:

$$L_w = \bar{L}_{p,m} + 20 \log r + 10 \log 4\pi$$

$$L_w = L_{p,m} + 20 \log r + 11$$

Zaradi merilne negotovosti se ponavadi raven zvočne moči zaokroži na  $\pm 0,5\text{dB}$ , kar predstavlja 12% napako zvočne moči v watih.

## E: DOLOČITEV ZVOČNE MOČI VIRA Z MERJENJEM ZVOČNE INTENZIVNOSTI

Zvočno intenzivnost smo definirali kot energijo, ki gre skozi enoto površine v enoti časa, zato lahko zvočno moč definiramo kot vsoto, po zaključeni površini okoli vira, produkta intenzivnosti  $I_S$  in površine  $dS$  skozi katero teče intenzivnost  $I_S$ .

$$W = \int_S I_S dS$$

Zgornjo enačbo lahko poenostavimo in zapišemo

$$W = \sum_{i=1}^N I_i \Delta S_i$$

Površina, ki oklepa zvočni vir je lahko poljubna (krogla, pravokotnik). Površino razdelimo na parcialne površine  $\Delta S_i$ . Velikost teh parcialnih površin je prav tako poljubna. Mreža je ponavadi bolj gosta tam kjer nas bolj natančno zanima slika sevanja.

Kontrolni volumen lahko postavimo tako, da zvočni vir stoji poleg in ne v njem. (Acoustics noise measurements 161) Pri tem moramo samo paziti na to, da v kontrolnem volumnu ni absorbcije zvoka.

Meritve lahko izvajamo tako v bližnjem kot daljnem polju. V bližnjem polju je celo razmerje signal/šum boljše. V tem primeru je priporočljivo povečati število točk

Pri merjenju intenzitete skozi parcialno površino, moramo paziti samo na to da sondo držimo pravokotno na to površino.

Prednost te metode je tudi v tem, da nas prisotnost drugih stacionarnih virov ne moti (slika 4.14), ker vsa zvočna energija drugega vira, ki vstopi v kontrolni volumen tega tudi zapusti. Seveda v kontrolnem volumnu ne sme biti materialov ki absorbirajo zvok.

Pri izvajanju meritev moči vira s pomočjo intenzivnosti, moramo upoštevati štiri faktorje:

### 1. Stacionarnost zvočnega vira:

$$k_1 = \frac{1}{I_n} \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M (I_{nk} - \bar{I}_n)^2}$$

$k_1$  = RSD (Relativna standardna deviacija) je merilo za ponovljivost

$M$  = število meritev mora biti večje od 10

Vsaka meritev mora trajati med 8 in 12 sekundami. Če merimo hrup, ki niha za manj kot 3dB, potem časovno povprečimo 8 sec.

Iz  $M$  meritev iste parcialne površine izračunamo povprečno intenziteto:  $\bar{I}_n = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M I_{nk}$

Zvočni vir je stacionaren, če je:

$$k_1 < 0,67$$

### 2. Dinamično območje

$$k_2 = \bar{L}_p - \bar{L}_{|n|}$$

$$\bar{L}_p = 10 \log \left( \frac{1}{N} \sum_i^N 10^{0,1 L_{pi}} \right)$$

$$\bar{L}_{|n|} = 10 \log \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|I_{ni}|}{I_0} \right)$$

$L_d$  = dinamični odziv merilnega instrumenta, ki ga poda proizvajalec instrumenta

$\bar{L}_{|n|}$  = je raven površinske absolutne normalne zvočne intenzivnosti z enoto dB

$|I_{ni}|$  = absolutna normalna zvočna intenzivnost v merilni točki  $i$

$$k_2 < L_d$$

Ta koeficient opisuje reaktivnost zvočnega polja

### 3. Hrup ozadja (negativna intenziteta)

$$k_3 = \bar{L}_p - \bar{L}_n$$

$$\bar{L}_n = 10 \log \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{I_{ni}}{I_0} \right|$$

$$I_{ni} = I_0 10^{0,1 L_{ni}}$$

$$k_3 - k_2 < 3\text{dB}$$

#### 4. Faktor usmerjenosti

Ta faktor po eni strani opisuje usmerjenost zvočnega vira, po drugi strani pa določa potrebno število parcialnih površin in s tem gostoto mreže.

$$k_4 = \frac{1}{l_n} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (l_{ni} - \bar{l}_n)^2}$$

$$\bar{l}_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N l_{ni}$$

$\bar{l}_n$  = površinsko povprečena intenzivnost. V nasprotju ko imamo pri ocenjevanju  $k_1$  časovno povprečeno intenzivnost.

N = število merilnih točk (gostota mreže)

C = standardizirana vrednost glede na frekvenčno območje

Tabela 5: Standardizirane vrednosti C za različne natančnosti merjenja, v odvisnosti od frekventnega območja.

1/1 oktave	1/3 oktave	Precizijska natančnost	Inžinirska natančnost	Pregledno merjenje
63-125	50-160	15	11	8
250-500	200-600	29	19	8

Pogoj, da s številom parcialnih površin zadostimo popis usmerjenega zvočnega vira je:

$$N > Ck_4^2$$

Z drugimi besedami: Posameznim pogojem ni zadoščeno če:

1. je v kontrolnem volumnu absorpcija zvoka,
2. hrup okolice ni stacionaren,
3. je veter večji od 2m/s,
4. če je merilna površina tik ob sosednjem zvočnem viru ki seva za več kot 10dB močneje.

Če ni zadoščeno vsem štirim pogojem, meritve nimajo veljave.