

UDK 534.83

Razpoznavanje in zmanjševanje hrupa turbostrojev

MIRKO ČUDINA

1. UVOD

Hrup je ena od oblik zvoka. Zvok oziroma zvočno valovanje je eno od učinkovitih sredstev za prenos informacij. Informacija je lahko koristna ali nekoristna. Nekoristne informacije imenujemo motnje. Če je koristna informacija glede na motnje razumljiva, je to zaželena informacija ali signal, če pa ni razumljiva, je to nezaželena informacija ali hrup. Hrup je torej nezaželena oblika zvoka. Pri ocenjevanju, kaj je zaželena in kaj nezaželena informacija, je pomembna vloga poslušalca (subjekta), ki jo ocenjuje, in ni v neposredni odvisnosti od energije zvoka. Ocena je odvisna od starosti in sprejemljivosti poslušalca, od kraja in časa ter drugih dejavnikov. Hrup slabo vpliva na počutje in zdravje ljudi, lahko se pojavijo psihofizične motnje, motnje v krvnem obtoku, koncentraciji za delo itd. Daljša izpostavljenost hrupu nad 80 do 90 dB* navadno povzroča izgubo sluha. Zaradi tega si moramo prizadevati, da bo emitirani hrup manjši, od dovoljenega, ki je za določene čase in kraje predpisan z zakoni. Za učinkovito zmanjšanje hrupa so potrebni naslednji postopki: razpoznavanje in določitev mesta virov hrupa, b) analiza vira in narave hrupa in c) analiza načinov za zmanjšanje hrupa z mogočimi posledicami, [1, 2, 3].

Popolna odprava hrupa ni zaželena, kajti polje tišine tudi lahko deluje moreče. Človeško uho se je prilagodilo določeni ravni hrupa, ki deluje ugodno na delovni učinek. Najnižja še sprejemljiva raven hrupa ni definirana, ker polje tišine še ni raziskano.

2. METODE ZA RAZPOZNAVANJE VIROV HRUPA

Pri razpoznavanju virov hrupa poznamo različne analitične in eksperimentalne metode. Pri tem lahko uporabimo samo analitično ali samo eksperimentalno metodo, pogosto pa kombinacijo obeh. Pri kombinirani metodi analitično izdelamo matematični model, katerega veljavnost potrdimo še s preizkusi.

Pri uporabi analitičnih metod je potrebno zadovoljivo teoretično znanje in znanje uporabe računalnikov. Najpomembnejše analitične metode so:

1. metoda končnih elementov (MKE),
2. metoda robnih elementov (MRE),
3. statistična energijska analiza (SEA) in
4. modalna analiza (MA).

Pri eksperimentalnih metodah je potrebna ustrezna eksperimentalna oprema. Glede na uporabljen merilno opremo poznamo eksperimentalne metode z že uveljavljeno in sodobnejšo tehniko, [4].

* Decibel [dB] je enota za raven zvočnega tlaka, za raven zvočne intenzivnosti in za raven zvočne moči. Pomeni pa logaritemsko razmerje poljubne veličine (tlaka, intenzivnosti, moči) in njene referenčne veličine (referenčni zvočni tlak $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa, referenčna zvočna intenzivnost $I_0 = 10^{-12}$ W/m², referenčna zvočna moč $W_0 = 10^{-12}$ W). Število decibelov je 10-kratna vrednost logaritma.

Zaradi pomanjkljive predstave enote decibel obstaja predlog, da se razveljavi, saj velja zmotno mnenje, da je hrup s 50 dB za polovico nižji od tistega s 100 dB ali, da je zmanjšanje hrupa od 90 dB na 81 dB samo za 10%. Zvočna moč pa se dejansko pri 1 dB poveča za 26%, pri 3 dB pa že za 200%.

Uveljavljena tehnika temelji na načelu merjenja ravni zvočnega tlaka pri ustreznem frekvenčnem pasu. V to skupino štejemo naslednje metode:

1. Metoda subjektivne ocene poslušalca z normalnim poslušanjem zvočnega vira in ocenjevanja;
2. Metoda selektivnega pokrivanja (maskiranja) posameznih elementov, npr. s pregradnimi stenami, izolacijskimi materiali ali glušniki, akustičnimi kabinami, gluhi ali odmevnimi sobami itd.;
3. Metoda selektivnega delovanja posameznih elementov, ki temelji na načelu izločanja nekaterih povzročiteljev hrupa, npr. izločanje iz obratovanja ali demontaža posameznih elementov postroja;
4. Metoda risanja zvočnih ravni s krivuljami enakega zvočnega tlaka (topografski diagram);
5. Metoda merjenja ravni zvočnega tlaka v neposredni bližini vira hrupa, znana pod imenom akustična holografija. Sodobnejša tehnika temelji na uporabi analizatorjev FFT*.

V to skupino spadajo naslednje metode:

1. Metoda koherentne funkcije in tehnike povprečne korelacije, s katero analiziramo vzrok in posledico informacij oz. hrupa;
2. Metoda merjenja površinske intenzivnosti z merilnikom pospeška, postavljenega na vibrirajočo površino in mikrofonom v njegovi bližini;
3. Metoda merjenja akustične intenzivnosti z dvema fazno prilagojenima mikrofonom v bližini zvočnega vira;
4. Metoda analize zapisa spektra hrupa pri delovanju stroja z različnimi vrtljaji. Metoda je primerna pri turbostrojih (turbinah, črpalkah, kompresorjih in ventilatorjih).

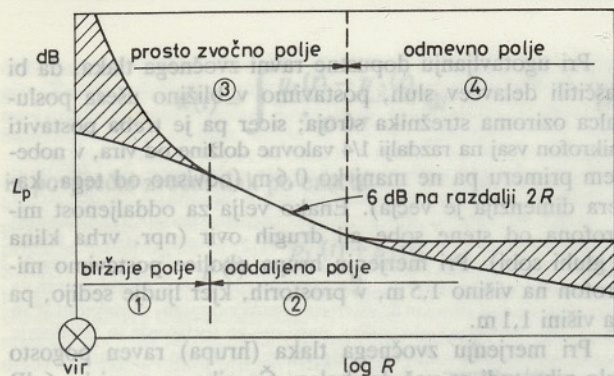
Izbira metode je odvisna od znanja, izkušenj, merilne opreme, razpoložljivih finančnih sredstev in zahtevane natančnosti. Teoretične metode se uporabljajo pretežno pri snovanju izdelkov in pri analizi kompleksnejših virov hrupa. Eksperimentalno metodo uporabimo vedno, tudi pri uporabi teoretičnih metod, zato ker je vseh drugotnih vplivov na nastajanje hrupa teoretično nemogoče popisati. Najpogosteje uporabljani eksperimentalni metodi sta merjenje ravni zvočnega tlaka pri selektivnem delovanju posameznih zvočnih virov in merjenje zvočne intenzivnosti z dvema fazno prilagojenima mikrofonom. Metodi se razlikujeta poleg uporabljenega instrumentarija in merjene fizikalne veličine še v izvedbi testnega polja.

2.1. Vrsta akustične okolice (testnega polja)

Za kakovostne laboratorijske preizkuse mora biti na voljo ustrezna akustična okolica oziroma testno polje. Testno polje mora imeti takšne lastnosti, da omogoča ponovljivost rezultatov in izloči drugotne vplive, kakršna sta refleksija sten in motilni učinek virov hrupa okolice, [5].

Da bi lahko definirali potrebne lastnosti testnega polja, pogledimo najprej lastnosti sevalnega polja okrog zvočnega vira. Polje sevanja značilnega zvočnega vira se spreminja z razdaljo od vira. V bližini vira niha zvočni tlak do določene

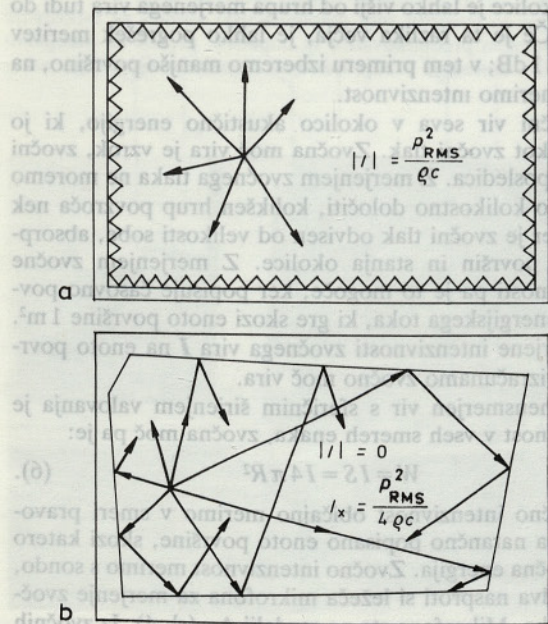
* Fast Fourier Transform (= hitra Fourierjeva transformacija) (14).



Sl. 1. Potek zvočnega tlaka v odvisnosti od razdalje vira

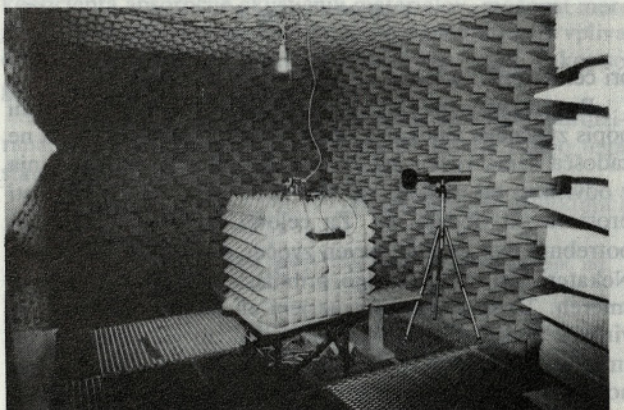
razdalje, tudi če je vir v prostem zvočnem polju; na sliki 1 je to bližnje polje ①. Obseg bližnjega polja ① okrog vira hrupa je odvisen od frekvence, od značilne dimenzije vira in od faze sevalnega dela površine. Ta obseg določamo s preizkusi. Zunaj tega območja je oddaljeno polje ②. V območju ② do ③ se raven zvočnega tlaka zniža za 6 dB za vsako dvojno razdaljo od središča akustičnega vira pod pogojem, da je vir zvoka v prostem zvočnem polju (ali gluhi sobi z zadostno stopnjo absorpcije zvoka), tako da se ne pojavi odmevno polje ④. V območju oddaljenega in prostega zvočnega polja ② do ③ ima hitrost delcev smer širjenja zvočnega vala.

Če zvočni vir seva v zaprtem prostoru, pride do nihanja zvočnega tlaka tudi v bližini stene prostora. To območje imenujemo odmevno polje ④ (sl. 1). Če so stene prostora blizu zvočnega vira, je lahko odmevno polje v celotnem prostoru. V tem primeru govorimo o odmevnem ali difuznem polju. V difuznem zvočnem polju se veliko število reflektirajočih valovanj seka iz vseh mogočih smeri tako, da je gostota zvočne energije precej izenačena po vsem prostoru (sl. 2b). Glede na sliko 1 obstajata dva posebna tipa akustične okolice, v kateri merimo zvočne vire, to sta **gluha soba** in **odmevna soba** (sl. 2).



Sl. 2. Gluha soba – prosto polje (a), odmevna soba – difuzno polje (b)

Gluha soba (sl. 2a) simulira prosto zvočno polje (območje ③ na sliki 1). Vsaka gluha komora ima dve omejitvi, in sicer: največjo prostornino zvočnega vira, ki po standardu ISO 3745 ne sme preseči 0,5% prostornine gluhe sobe in spodnjo mejno frekvenco, ki je določena z dimenzijami gluhe sobe. Pri spodnji mejni frekvenci in pri višjih frekvencah je koeficient absorpcije sten gluhe sobe $\geq 0,99$. Najmanjša prostornina gluhe sobe mora biti $V_{\min} \geq 4\lambda^3$. Najmanjša dimenzija gluhe sobe mora biti večja od največje valovne dolžine λ , npr. pri frekvenci 1 Hz mora biti najmanjša dimenzija gluhe sobe 340 m, medtem ko je pri 1000 Hz samo 0,34 m. Problem je torej pri nižjih frekvencah, zato se navadno iz gospodarnih in prostorskih razlogov omejimo na določeno najmanjšo frekvenco, pri kateri je gluha soba uporabna. Gluha soba je primerna za merjenje nestacionarnih virov hrupa z močnimi toni diskretnih frekvenc, npr. osnovni toni lopatic in njihovi harmoniki pri ventilatorjih in drugih turbostrojih. Gluha soba je primerna tudi pri ugotavljanju porazdelitve usmerjenosti zvoka okrog vira in razne slušne preiskave. Primer izvedene gluhe sobe prikazuje slika 3, [5].



Sl. 3. Gluha soba v Laboratoriju za delovne stroje na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani

Odmevna soba ima vse stene toge in gladke; reflektirajoče polje se širi po notranjosti, razen v neposredni bližini samega vira (sl. 2b).

2.2. Metoda merjenja zvočnega tlaka

S to metodo merimo raven zvočnega tlaka L_p v dB, ki je definiran z enačbo

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (1),$$

pri čemer pomeni p efektivno vrednost zvočnega tlaka, izražena tudi kot koren iz povprečne vrednosti kvadratov zvočnega tlaka p_{RMS} v Pa

$$p = p_{RMS} = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T [p(t)^2] dt \right\}^{1/2} \quad (2).$$

V enačbi pomenita T – čas vzorčenja in $p(t)$ zvočni tlak kot funkcija časa. (Indeks RMS so začetnice angleških besed Root Mean Square).

Na podlagi ravni zvočnega tlaka izračunamo raven zvočne intenzivnosti L_1 v dB po enačbi:

$$L_1 = L_p - 10 \log K \quad (3)$$

in raven zvočne moči L_w v dB:

$$L_w = L_1 + 10 \log S \quad (4),$$

pri tem pomenijo $K = I_0 \cdot \rho \cdot c / p_0^2 = \rho \cdot c / 400 = \text{konst.}$, $\rho \cdot c$ specifično akustično impedanco (pri $t_{ok} = 20^\circ\text{C}$ in $p_{ok} = 1 \text{ bar}$ je $\rho \cdot c = 406 \text{ Ns/m}^3$), $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ je referenčna intenzivnost, $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ referenčni zvočni tlak in $S \text{ m}^2$ površino, ki obdaja vir, na katero se postavi mikrofona.

Zveza med ravni zvočne moči, ravni zvočne intenzivnosti in ravni zvočnega tlaka je pri enakomernem širjenju zvoka od vira v vseh smereh v prostem polju, to je za točkasti vir s $S = 4\pi R^2$, podana z izrazom

$$L_w = L_1 + 10 \log R^2 + 10 \log 4\pi = L_p + 20 \log R + 10,99 - 10 \log K \quad (5),$$

pri čemer je R razdalja od vira zvoka v m.

Raven zvočnega tlaka je fizikalna veličina za kolikostni popis zvočnega valovanja. Za popis moči zvočnega vira ne zadošča sama raven zvočnega tlaka, ker se ta spreminja v odvisnost od razdalje od vira in od akustične značilnosti prostora, ki obdaja vir. Za celotni popis moči vira sta potrebni dve veličini: raven zvočne moči in usmerjenost. Nekateri viri zvoka sevajo približno enakomerno v vseh smereh. To so t. im. neusmerjeni ali točkasti viri. Večina virov v praksi so nekoliko usmerjeni, to je, sevajo v eno smer več zvoka kakor v drugo. Na zvočno moč in usmerjenost vpliva učinek tal in sten okrog vira. Zato je potrebno pri merjenju ravni zvočnega tlaka ustrezno testno polje, kakršni sta gluha oziroma odmevna soba. Testno polje je lahko tudi drugi prostor, če je raven hrupa drugotnih virov vsaj 10 do 15 dB nižja od merjene ravni hrupa in če lahko zanemarimo učinek refleksije sten prostora.

Oddaljenost mikrofona od vira zvoka ni poljubna. Za laboratorijske preizkuse sta lega in število mikrofona zvočnega vira določena po standardih; za preizkuse v gluhi sobi in za usmerjen zvočni vir po ISO 3745, za preizkuse v odmevni sobi po ISO 3741. Po standardu ISO 3745 se meri zvočni tlak z več mikrofoni, porazdeljenimi po krogli ali po polkrogli. Polmer krogle oz. polkrogle je določen z lego prostega polja ③ na sliki 1. Za večino virov v praksi se prosto zvočno polje začne na razdalji, ki je enaka dvakratni vrednosti največje dimenzije vira. Zato je po omenjenem standardu razdalja od vira do mikrofona enaka tej ali večji dimenziji, **ne sme pa biti manjša od 1 m**. Število mikrofona ali pozicij na krogli v prostem zvočnem polju je predpisano vsaj 20, na polkrogli pa vsaj deset. Pri neusmerjenem – točkastem zvočnem viru in v prostem polju je zvočni tlak enak v vsaki točki krogle, zato zadošča en položaj mikrofona. Pri tem je treba biti previden, ker je vsak vir rahlo usmerjen zaradi različnih vplivov (njegove dimenzije, okolice, stene, merilnega instrumenta itd.).

Pri ugotavljanju dopustne ravni zvočnega tlaka, da bi zaščitili delavčev sluh, postavimo v bližino ušesa poslušalca oziroma strežnika stroja; sicer pa je treba postaviti mikrofona vsaj na razdalji 1/4 valovne dolžine od vira, v nobenem primeru pa ne manj ko 0,6 m (odvisno od tega, kakšna dimenzija je večja). Enako velja za oddaljenost mikrofona od stene sobe ali drugih ovir (npr. vrha klina v gluhi sobi). Pri merjenju hrupa okolice postavimo mikrofona na višino 1,5 m, v prostorih, kjer ljudje sedijo, pa na višini 1,1 m.

Pri merjenju zvočnega tlaka (hrupa) raven pogosto zelo niha tudi za več decibelov. Če niha za manj ko 6 dB vzamemo srednjo vrednost, če niha za več ko 6 dB, vzamemo, da je raven hrupa za 3 dB nižja od največje vrednosti.

2.3. Metoda merjenja zvočne intenzivnosti

Zvočni tlak merimo zato, da ugotovimo, ali je ogrožen delavčev sluh. Če potem želimo zmanjšati hrup, moramo vedeti, kolikšen je sevani hrup in od katerega stroja, ugotoviti moramo torej vir hrupa oziroma določiti položaj. V ta namen določimo zvočno moč posameznega stroja, ki jih nato razvrstimo po višini zvočne moči. Ko smo razvrstili stroje, ki povzročajo največ hrupa, se lotimo zmanjševanja hrupa. Vse to lahko naredimo z merjenjem intenzivnosti, ki daje informacijo o zvoku tako po smeri kakor po velikosti (vrednosti). Zvočna intenzivnost je vektorska veličina, saj je določena z vrednostjo in smerjo. Po drugi strani je tlak skalarna veličina, ker ima samo en parameter, vezan na vrednost. Medtem ko smo pri merjenju zvočnega tlaka uporabili specialno testno polje (gluho ali odmevno sobo), lahko merimo intenzivnost v kateremkoli zvočnem polju (razen v difuznem). Ta lastnost omogoča merjenje neposredno na kraju samem. Ena od velikih prednosti merjenja intenzivnosti za določanje zvočne moči je prav ta, da je visoka raven stacionarnega hrupa okolice nepomembna. Hrup okolice je lahko višji od hrupa merjenega vira tudi do 10 dB. Če je ta razlika večja, je lahko pogrešek meritev večji od 1 dB; v tem primeru izberemo manjšo površino, na kateri merimo intenzivnost.

Zvočni vir seva v okolico akustično energijo, ki jo slišimo kot zvočni tlak. Zvočna moč vira je vzrok, zvočni tlak pa posledica. Z merjenjem zvočnega tlaka ne moremo zagotovo kolikostno določiti, kolikšen hrup povzroča nek stroj, ker je zvočni tlak odvisen od velikosti sobe, absorptivnosti površin in stanja okolice. Z merjenjem zvočne intenzivnosti pa je to mogoče, ker popisuje časovno povprečje energijskega toka, ki gre skozi enoto površine 1 m^2 . Iz izmerjene intenzivnosti zvočnega vira I na enoto površine dS izračunamo zvočno moč vira.

Za neusmerjen vir s sferičnim širjenjem valovanja je intenzivnost v vseh smereh enaka, zvočna moč pa je:

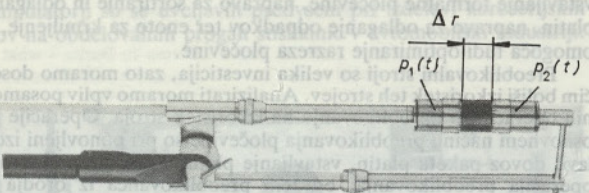
$$W = IS = I 4\pi R^2 \quad (6).$$

Zvočno intenzivnost običajno merimo v smeri pravokotno na natančno popisano enoto površine, skozi katero teče zvočna energija. Zvočno intenzivnost merimo s sondo, ki ima dva nasproti si ležeča mikrofona za merjenje zvočnega tlaka. Mikrofona sta na razdalji Δr (sl. 4). Iz zvočnih tlakov se lahko izračuna hitrost delcev v zraku (z gostoto ρ), ustrezno enačbi:

$$\bar{u}(t) = \int \frac{p_1(t) - p_2(t)}{\rho \Delta r} dt \tag{7}$$

in povprečni zvočni tlak po enačbi

$$\bar{p}(t) = \frac{p_1(t) + p_2(t)}{2} \tag{8}$$

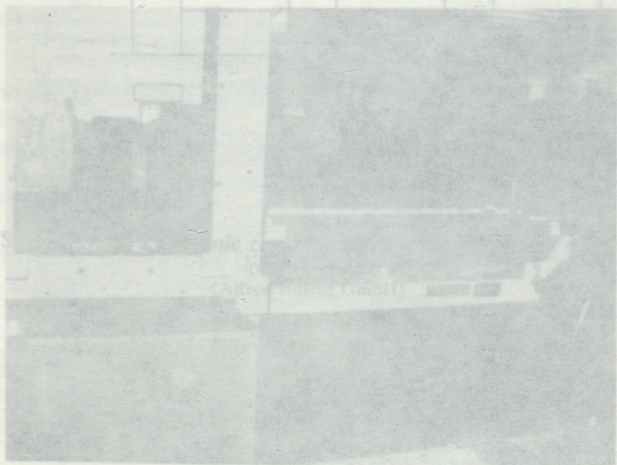


Sl. 4. Sonda za merjenje intenzivnosti

Če sta zvočni tlak *p* in hitrost delcev *u* prosto razširjajočega zvočnega valovanja v fazi, potem je povprečna intenzivnost v smeri širjenja valovanja časovno povprečje zmnožka zvočnega tlaka in hitrosti delcev:

$$I = \bar{p} \bar{u} = - \frac{p_1(t) + p_2(t)}{2} \int \frac{p_1(t) - p_2(t)}{\rho \Delta r} dt \tag{9}$$

Negativni predznak izhaja iz definicije Eulerjeve enačbe za povezavo med zvočnim tlakom in hitrostjo delcev $\partial u / \partial t = - (1/\rho)$ grad *p*.



Sl. 2. Vožiček z dvilčno in vrtljivo mizo za zamenjavo orodij (Rastec - Prema GmbH)

Raven zvočne intenzivnosti *L_I* v dB izračunamo po enačbi

$$L_I = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \tag{10}$$

raven zvočne moči pa po enačbi

$$L_W = 10 \log_{10} \frac{W}{W_0} \tag{11}$$

Meritev intenzivnosti je omejena s frekvenco, zato za različna frekvenčna območja vgrajujejo različne vmesnike med mikrofoni (sl. 4). Znale so že izvedbe sond za merjenje intenzivnosti, pri katerih ni nobenih vmesnikov. (Meritev zvočne intenzivnosti v prostem zvočnem polju ni potrebna, ker sta ravni zvočnega tlaka in intenzivnosti številčno enaka.)

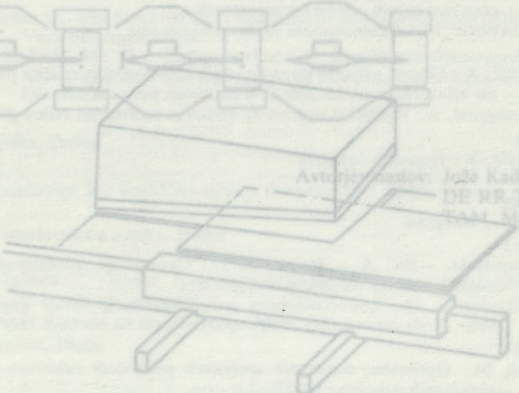
Če primerjamo meritvi zvočnega tlaka in zvočne intenzivnosti, ima slednja prednost: z vidom zaznaven zvočni vir, omejitev na prostor in razpoznavanje zvočnega vira, možnost za določanje prenosnih izgub v stenah, določanje koeficienta absorpcije akustičnih materialov, možnost merjenja na kraju samem oz. možnost zanemarjanja vpliva okolice, ne potrebuje specialnega testnega polja, kakor so gluha, polgluha ali odmevna soba itd.

Opisana metoda merjenja intenzivnosti ni standardizirana, tehnična komisija pri ISO pa pripravlja izdajo tega standarda.

(Nadaljevanje prihodnjič)

Avtorjev naslov: doc. dr. Mirko Čudina, dipl. inž.
Fakulteta za strojništvo,
Ljubljana

Na področju mehanskega razvoja pločevine je bil razvijen zanimiv sistem razreza formirane pločevine, in sicer kotne žarje podjetja Heinrich Kollschon GmbH - Maschinenfabrik (München, ZFR). Načelo razreza je prikazano na sliki 1. Z enim gibom rezila žarje odloži enovolnino rez, to je v enem gibu v smereh *x* in *y* razreže pločevino v obeh 3000 mm, razreza pločvina v oči je odvisna od zvočne sile, in je lahko 300, 1000 ali



Sl. 1. Načelo rezanja s kotnimi žarji (Heinrich Kollschon GmbH)