

6. KONSTRUKCE ZVUKOVODŮ A AKUSTICKÝCH

Č O Č E K

Konstrukce exponenciálního zvukovodu

Obvykle máme dán vstupní průřez zvukovodu S_1 s dolní meznou frekvencí $f_{\min}$, pro kterou je zvukovod určen.

Při výpočtu zvukovodu postupujeme takto:

1) Nejprve zvolíme poměr:

$$\alpha = \frac{f_{\min}}{f_0}$$

podle účelu, kterému má zvukovod vyhovovat. Poměr α zvolíme tím větší, čím kvalitnější zvukovod chceme mít; dbáme ovšem i důvodů ekonomických. Při příliš malém α (tj. když se α blíží 1), bychom při f blízkých $f_{\min}$ měli reálnou složku redukované akustické impedance zvukovodu A malou (při $\alpha = 1$ a $f = f_{\min}$ by bylo $A = 0$).

Faktor α volíme v praxi podle této tabulky:

Použití zvukovodu.	α
Vysokotónový reproduktor pro kina	$2 \div 4$
Hlubokotónový reproduktor pro kina	$1,2 \div 1,8$
Vysokotónová část koaxiálních reproduktorů a v přijímačích	2
Tlakové reproduktory pro místní rozhlas	1,4

Ze zvoleného α a daného $f_{\min}$ stanovíme kritickou frekvenci f_0 :

$$f_0 = \frac{f_{\min}}{\alpha}$$

Z f_0 můžeme stanovit kritickou vlnovou délku:

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f_0}$$

2) Vypočteme exponent g z rovnice

$$g = \frac{4\pi f_0}{c_0} = \frac{4\pi}{\lambda_0} \quad (117)$$

Rovnice

$$S = S_1 e^{gx} \quad (118)$$

definuje průřez zvukovodu S jako funkci x (x = vzdálenost průřezu S od vstupu zvukovodu měřená na ose), je-li S_1 vstupní průřez. Funkci (118) si můžeme výhodně znázornit graficky v log-lin soustavě, neboť vynásobíme-li x lineárně a S v logaritmické stupnici, obdržíme jako obraz funkce přímku. Uvedeného grafu je možno použít pro určení rozměrů (okotování) zvukovodu.

3) Stanovíme poloměr výstupního otvoru R_2 podle rov. (viz TZE)

$$R_2 = \frac{2}{g} . \quad (119)$$

Zavedeme-li za g výraz (163), dostaneme

$$R_2 = \frac{\lambda_0}{2\pi} . \quad (120)$$

Z toho plyne velikost výstupního průřezu $S_2 = \pi R_2^2$.

(I když konstruujeme zvukovod s jiným výstupním průřezem než kruhovým, vypočteme S_2 jak bylo právě naznačeno).

4) Vypočteme délku zvukovodu (v ose) l z této úvahy:

Podle rov. (164) platí:

$$S_2 = S_1 e^{gl} , \quad (121)$$

neboť pro $x = 1$ je $S = S_2$.

Z rovnice (167) plyne

$$1 = \frac{1}{g} \ln \frac{S_2}{S_1} = \frac{1}{g} \ln \frac{R_2^2}{R_1^2} = \frac{2}{g} \ln \frac{R_2}{R_1} . \quad (122)$$

Poslední výraz lze vzhledem k rovnici (119) a (120) psát

$$1 = R_2 \ln \frac{R_2}{R_1} = \frac{\lambda_0}{2\pi} \ln \frac{\lambda_0}{2\pi R_1} . \quad (123)$$

Má-li zvukovod průřez jiný než kruhový (např. obdélníkový nebo čtvercový), vypočítáme nejprve zvukovod jako kruhový a pak přeměníme průřez tak, aby plocha pro určité x zůstala zachována. Dbáme toho, aby přechody byly plynulé, tak, aby nevznikly nikde ve zvukovodu víry. Někdy děláme zvukovody s osou zakřivenou. I zde počítáme podle teorie, platné pro kruhový přímý zvukovod. Dbáme však toho, aby poloměr křivosti byl vždy velký oproti průměru. Stěny zvukovodu musí být buď ze silného materiálu (např. u hlubokotónového reproduktoru 2-3 cm silná překližka) nebo musí být zabezpečeny jinak proti kmitání (asfaltový nátěr u plechových zvukovodů, výztuhy a pod.). Vnitřní stěny musí být hladké. Drsné stěny, nebo stěny s výstupky způsobují ztráty.

Exponenciální zvukovod s "kulovou vlnou"

Při odvozování Websterovy vlnové rovnice se předpokládá, většinou oprávněně, že se zvukovodem šíří rovinná vlna. To lze s postačující přesností předpokládat pouze pro ty průřezy, pro které se rozdíl délky l' zvukového paprsku při stěně zvukovodu liší o malou hodnotu od l . To však obvykle nebývá splněno, zvláště při frekvencích $f \gg f_0$ na výstupu zvukovodů řešených podle rovnice (119).

Z obr. 54 je patrné, že $l' > l$. Proto v řezu S_2 není vlnoplocha rovinná, ale blíží se ve skutečnosti spíše kulové vlnoploše. Západoněmecká firma Klangfilm zavedla nový způsob konstrukce exponenciálních zvukovodů. Podle tohoto způsobu se tedy předpokládá, že vlnoplocha zvukové vlny ve zvukovodu má tvar kulového vrchlíku a pro zjednodušení se uvažuje, že poloměr vlnoplochy je stálý, a to

$$R_2 = \frac{2}{g} . \quad (124)$$

Tento předpoklad vyhovuje dobře v ústí zvukovodu, je však teoreticky nesprávný v hrdle a v počáteční části zvukovodu, kde by spíše vyhovoval předpoklad vlny rovinné. Je však z obrázku patrné, že chyby takto vzniklé jsou značně menší, než když jsme dříve předpokládali rovinnou vlnu v celém zvukovodu. (Při malém průřezu S_1 je poloměr vrchlíku vytčeného z koule o poloměru R_2 stěnami zvukovodu velmi malý oproti R_2 , a proto tato část kulové plochy se příliš od roviny neliší).

Pro plochu vrchlíku s výškou h z koule o poloměru R_2 platí

$$S = 2\pi R_2 h . \quad (125)$$

Výraz (125) znamená průřez zvukovodu v obecném místě.

Obdobně pro vstupní průřez S_1 lze psát

$$S_1 = 2\pi R_2 h_1 , \quad (126)$$

je-li h_1 výška vrchlíku předpokládané kulové vlnoplochy v hrdle zvukovodu. Když dosadíme výrazy S a S_1 z rov. (125) a (126) do rovnice exponenciálního zvukovodu (118) dostaneme:

$$2\pi R_2 h = 2\pi R_2 h_1 e^{gx} .$$

Z toho plyne, že

$$h = h_1 e^{gx} . \quad (127)$$

Výšku h_1 můžeme stanovit z podmínky (126). Platí

$$h_1 = \frac{S_1}{2\pi R_2} \quad (128)$$

Použitím rov. (120) lze rov. (128) upravit na

$$h_1 = \frac{S_1}{\lambda_0} = \frac{\pi R_1^2}{\lambda_0} , \quad (129)$$

kde R_1 je poloměr vstupního průřezu zvukovodu; h z rovnice (127) a poloměr R_2 určují tvar zvukovodu. (Viz obr. 55). Je zajímavé si všimnout, že u takto určeného zvukovodu se stěny rozvírají tak, že v určité vzdálenosti x_2 je tečná rovina k vnitřní stěně zvukovodu kolmá na osu.

Pro $x > x_2$ by se stěny ohýbaly dokonce zpět. V praxi se pro $x = x_2$ zvukovod ukončí. (Viz obr. 55).

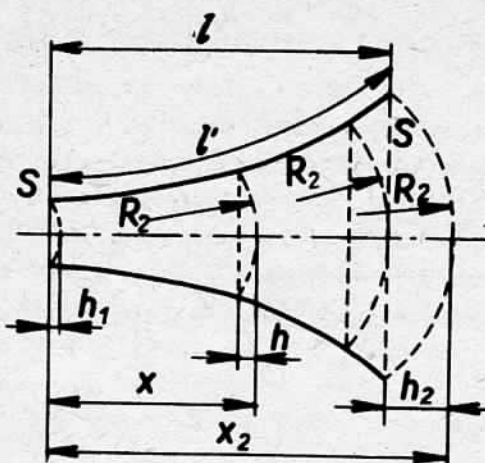
Pro x_2 je $h = h_2$, které je podle rov. (127)

$$h_2 = h_1 e^{gx_2} . \quad (130)$$

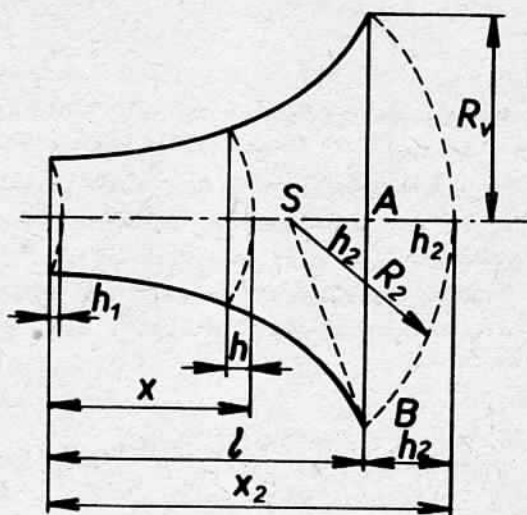
Podmínka pro x_2 , resp. h_2 vyplyne z rovnice

$$\frac{dh}{dx} = 1 , \quad (131)$$

neboť pro $dh > dx$ se stěny zvukovodu obrací zpět, ke vstupu. Stanovme proto derivaci h podle x z rovnice (127):



Obr. 54.



Obr. 55.

$$\frac{dh}{dx} = gh_1 e^{gx} = gh. \quad (132)$$

Z podmínky (131) a rov. (132), resp. (130) plyne:

$$1 = gh_1 e^{gx_2} = gh_2. \quad (133)$$

Z toho dostaneme, že

$$h_2 = \frac{1}{g}, \quad (134)$$

a to lze vzhledem ke vzorci (117) psát

$$h_2 = \frac{\lambda_0}{4\pi}. \quad (135)$$

Pro délku x_2 plyne z rov. (133):

$$x_2 = \frac{1}{g} \ln \frac{h_2}{h_1}.$$

To lze psát, použijeme-li výraz (134) jako

$$x_2 = h_2 \ln \frac{h_2}{h_1}. \quad (136)$$

Délka zvukovodu l je podle obr. 55 rovna

$$l = x_2 - h_2,$$

což dá, dosadíme-li sem za x_2 výraz (136)

$$l = h_2 \left(\ln \frac{h_2}{h_1} - 1 \right). \quad (137)$$

Výraz (137) můžeme upravit zavedením h_2 z rov. (135) a h_1 z rov. (129) na

$$1 = -\frac{\lambda_0}{4\pi} \left(\ln \frac{\lambda_0^2}{4\pi^2 R_1^2} - 1 \right).$$

To lze upravit na

$$1 = \frac{\lambda_0}{4\pi} \left(2 \ln \frac{\lambda_0}{2\pi R_1} - 1 \right) = \frac{\lambda_0}{2\pi} \ln \frac{\lambda_0}{2\pi R_1} - \frac{\lambda_0}{4\pi}. \quad (138)$$

Průměr výstupního otvoru zvukovodu R_V dostaneme z obr. 55. Na výstupu platí vzhledem k vzorcům (124) a (134), že

$$2 h_2 = R_2.$$

Proto je z trojúhelníku SAB

$$R_V = \sqrt{R_2^2 - h_2^2}.$$

To lze zavedením rov. (135) a (120) upravit na

$$R_V = \sqrt{\left(\frac{\lambda_0}{2\pi} \right)^2 - \left(\frac{\lambda_0}{4\pi} \right)^2} = \frac{\lambda_0}{4\pi} \sqrt{3}. \quad (139)$$

Srovnáním R_V z rovnice (139) a R_2 z rovnice (120) pro normální exponenciální zvukovod je vidět, že uzukovodu řešeného kulovou vlnou má výstupní otvor pro tutéž kritickou frekvenci menší poloměr v poměru

$$\frac{R_V}{R_2} = \frac{\frac{\lambda_0}{4\pi} \sqrt{3}}{\frac{\lambda_0}{2\pi}} = \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Zvukovod je kromě toho kratší o délku $\frac{\lambda_0}{4\pi}$, což vyplývá ze srovnání vzorců (138) a (123). Je proto patrné, že tento typ zvukovodu je co do rozměrů výhodnější. Podle Reicharda dává kromě toho zvukovod takto vyřešený lepší průběh reálné složky redukováné akustické impedance na vstupu a má také lepší vyzařovací diagram na výstupu.

Postup při výpočtu exponenciálního zvukovodu s kulovou vlnou

Při výpočtu postupujeme takto:

- 1) Stanovíme α , f_0 , λ_0 a g jako v odst. I. (normální exponenciální zvukovod). Exponent g stanovíme ze vzorce (117). Dále určíme R_2 ze vzorce (119) nebo (120).
- 2) Ze vzorce (128) nebo (129) a z daného S_1 vypočteme h_1 . Vzorec (127) definuje $h = f(x)$. Průběh h vyneseme nejlépe jako funkci x na log-lin papír (přímková závislost).
- 3) Ze vzorce (138) vypočteme délku zvukovodu l , na osu x vynášíme na základě obr. 55 pro různá zvolená x výšku vrchlíku h a opsáním kružnice o poloměru R_2 omezíme koncové body průřezu (vnitřní stěny zvukovodu). Tím stanovíme stěny zvukovodu pro přímý zvukovod kruhového průřezu. Je-li třeba, zakřívíme příslušné osu a přeměníme průřez kruhový na jiný, podle zásad pro normální exponenciální zvukovod.