

SOUND ABSORPTION QUALITIES OF A CYLINDER-SHAPED ISOLATED ACOUSTIC RESONATOR

V. Stauskis

To cite this article: V. Stauskis (1995) SOUND ABSORPTION QUALITIES OF A CYLINDER-SHAPED ISOLATED ACOUSTIC RESONATOR, *Statyba*, 1:1, 83-92, DOI: [10.1080/13921525.1995.10531504](https://doi.org/10.1080/13921525.1995.10531504)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/13921525.1995.10531504>



Published online: 26 Jul 2012.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 66

CILINDRINĖS FORMOS VIENETINIO AKUSTINIO REZONATORIAUS GARSO ABSORBCINĖS SAVYBĖS

V. Stauskis

1. Įvadas

Praktikoje plačiai naudojamos rezonansinės garsą absorbuojančios konstrukcijos susideda iš plonos kelių milimetrų storio plokštės, kurioje yra išdėstomos cilindrinės formos skylės. Jų diametras ir atstumas tarp skylių yra nedideli ir siekia kelis milimetrus. Plokščių perforacijos procentas yra kintamas ir gali būti iki 20-25. Už plokštės visada yra paliekamas 5-20 cm. storio oro tarpas, kuris visas arba dalinai būna užpildomas garsą absorbuojančia medžiaga iš mineralinės arba stiklo vatos. Tokia konstrukcija paprastai gerai absorbuoja garsą esant vidutiniams ir aukštiems dažniams. Jos absorbcinėms charakteristikoms labai didelę įtaką turi garsą absorbuojančios medžiagos akustinės savybės.

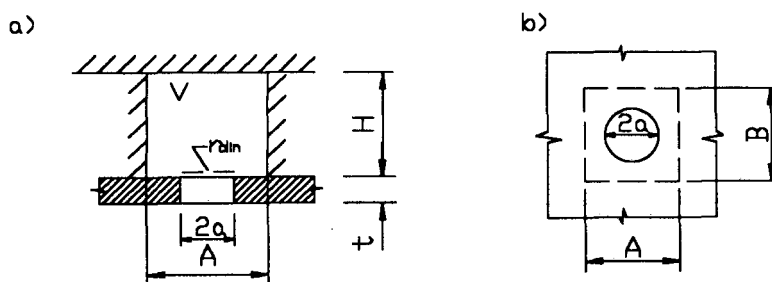
Projektuojant žiūrovų sales - dažniausiai lubų, o kai kada ir sienų plokštumose yra numatomos įvairaus diametro skylės, reikalingos technologiniams tikslams. Tokių skylių diametras ir atstumas iki standaus paviršiaus gali būti labai skirtingas. Jų diametras gali siekti jau ne kelis centimetrus, bet kelias dešimtis centimetrų ir daugiau. Atstumas iki standaus paviršiaus taip pat gali svyruoti iki kelių metrų. Taigi tokia konstrukcija - akustinis rezonatorius labai skiriasi nuo minėtos, plačiai naudojamos rezonansinės konstrukcijos. Todėl reikia žinoti kaip toks akustinis rezonatorius absorbuos garso energiją.

Darbo tikslas - nustatyti įvairaus vienetinio akustinio rezonatoriaus su didelio ir įvairaus diametro cilindre skylė garso absorbcijos savybes plačiame dažnių diapazone. Nustatyti absorbcijos priklausomybę nuo rezonatoriaus diametro, jo atstumo iki standaus paviršiaus ir garso bangos kritimo kampo. Rasti priklausomybę tarp rezonatoriaus absorbcijos ir realaus bei menamo spinduliavimo impedansų. Nustatyti medžiagos, charakterizuojamos aerodinamine varža įtaką garso absorbcijai.

2. Teorija

Akustiniame rezonatoriuje, susidedančiame iš cilindrinės formos skylės sužadinsime ne tik pagrindinį rezonansą, bet ir obertonus, t.y. visus nelyginius harmonikus ir pridėtinę oro masę, kuri svyruoja kartu su rezonatoriaus mase. Šie faktoriai turi įtakos garso absorbcijai.

Nagrinėsime atvejį, kai akustinį rezonatorių sudaro cilindrinė skylė, kurios spindulys "a". Rezonatoriaus geometriniai parametrai yra charakterizuojami jo ilgiu "A", pločiu "B", aukščiu "H" ir tūriu "V". Visi šie parametrai yra kintantys ir skaičiavimuose pasirenkami laisvai. Pačios plokštės storis "t" skaičiavimuose taip pat gali būti pasirenkamas. Tokių rezonatorių skaičiuojamoji schema pavaizduota 1 pav.



1 pav. Vienetinio akustinio rezonatoriaus su cilindrine skylė skaičiuojamoji schema
a - vaizdas iš šono; b - vaizdas iš apačios

Rezonanso metu rezonatoriaus garso absorbcijos plotas randamas pagal formulę [1]

$$A = 4\rho_0 C_0 \frac{R_{\text{nuost}}}{|\text{Re } Z + \text{Re } Z_r|^2} S_r \quad (1)$$

Ne rezonanso metu garso absorbcijos plotas yra randamas pagal formulę

$$A = 4\rho_0 C_0 \frac{\text{Re } Z}{|Z + Z_r|^2} S_r \quad (2)$$

čia: ρ_0 - oro tankis; C_0 - garso greitis; S - rezonatoriaus plotas; Z_r - rezonatoriaus spinduliavimo impedansas; Z - skylės impedansas.

Skylės impedansas susideda iš pačios skylės impedanso ir oro stangrumo impedanso ir yra išreiškiamas:

$$Z = Z_m + Z_s \quad (3)$$

Savo ruožtu skylės impedansas susideda ir pačios skylės impedanso, iš impedanso skylės išorėje, iš impedanso skylės viduje bei iš nuostolių impedanso ir yra išreiškiamas [2]

$$Z_m = Z_{m0} + Z_{ma} + Z_{mi} + Z_{\text{nuost}} \quad (4)$$

Cilindrinė skylė gali būti uždengta įvairaus tankio ir aerodinaminio pasipriešinimo medžiaga. Tada nuostolių impedansas yra išreiškiamas

$$Z_{\text{nuost}} = R_{\text{nuost}} + jY_{\text{nuost}} \quad (5)$$

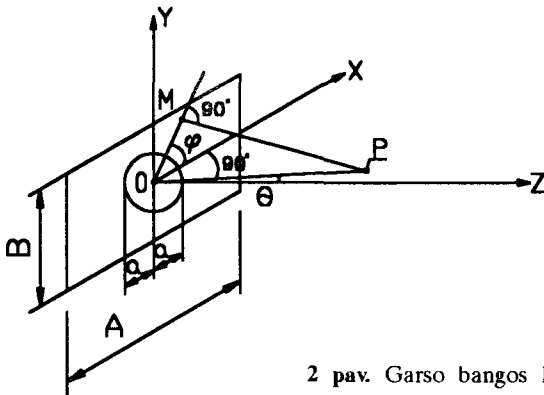
čia R_{nuost} - reali nuostolių varža; Y_{nuost} - menama nuostolių dalis. Reali nuostolių varža yra lygi

$$R_{\text{nuost}} = \rho_0 C_0 \left[1 + \left(\frac{\rho_0 f}{r_{\text{din}}} \right)^{-0,754} \cdot 0,0571 \right]. \quad (6)$$

Menama nuostolių dalis yra išreiškiamas

$$Y_{\text{nuost}} = \rho_0 C_0 \cdot 0,087 \left(\frac{\rho_0 f}{r_{\text{din}}} \right)^{-0,732} \quad (7)$$

čia $r_{\text{din}} = r_{0\text{din}} \sqrt{f/f_{\text{rez}}}$ - aerodinaminė varža. Ji charakterizuojama žemiausiu dažniu, nuo kurio nuostolių varža didėja kaip \sqrt{f} .



2 pav. Garso bangos kritimo kampų nustatymo schema

Rezonatoriaus spinduliavimo impedansas yra randamas

$$Z_r = \rho_0 c_0 \frac{k^2 S^2 \langle V \rangle^2}{4\pi^2 V_0^2} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2 + j\infty} |D(\Theta, \varphi)|^2 \sin \Theta d\Theta \quad (8)$$

čia: $D(\Theta, \varphi)$ - spinduliavimo kryptingumo diagrama.

Kampai Θ ir φ randami pagal 2 pav. schemą.

Jeigu vidutinis svyravimo greitis visame svyravimo plote yra vienodas, tai vidutinis greitis sutampa su kiekvieno judančio taško greičiu ir tada $\langle V \rangle^2 = V_0^2$.

Apvaliai skylėi, kurios spindulys "a", spinduliavimo kryptingumo diagrama yra išreiškiamas per Beselio funkciją:

$$D(\Theta, \varphi) = \frac{2J_1(k \cdot a \sin \Theta)}{ka \sin \Theta}. \quad (9)$$

Tada spinduliavimo impedansas

$$Z_r = \rho_0 c_0 \frac{k^2 S}{4\pi^2} S \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2} + j\infty} \left| \frac{2J_1(ka \sin \Theta)}{ka \sin \Theta} \right|^2 \sin \Theta d\Theta . \quad (10)$$

Suintegrudami pagal φ gausime, kad

$$Z_r = \rho_0 c_0 \frac{k^2 (\pi a^2)}{4\pi^2} \cdot \pi a^2 \cdot 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2} + j\infty} \left| \frac{2J_1(ka \sin \Theta)}{ka \sin \Theta} \right|^2 \sin \Theta d\Theta . \quad (11)$$

Tam, kad galima būtų integruoti išskleisime šios formulės integralą į tik realų ir tik menamą integralus. Tada

$$\int_0^{\frac{\pi}{2} + j\infty} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} + \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2} + j\infty} \quad (12)$$

Čia pirmas integralas yra tik realus, o antras tik menamas.

Kiti integralai yra suintegruojami ir išreiškiami per Beselio ir Struvės funkcijas. Tada:

$$2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{J_1^2(ka \sin \Theta)}{\sin^2 \Theta} \sin \Theta d\Theta = 1 - \frac{J_1(2ka)}{ka} \quad (13)$$

ir

$$\frac{2}{j} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2} + j\infty} \frac{J_1^2(ka \sin \Theta)}{\sin^2 \Theta} \sin \Theta d\Theta = \frac{H_1(2ka)}{ka} \quad (14)$$

Taigi cilindrinio rezonatoriaus spinduliavimo impedansas yra lygus

$$Z_r = \operatorname{Re} Z_r + j J_m Z_r = \rho \cdot c \cdot \pi a^2 \left(1 - \frac{J_1(2ka)}{ka} \right) + j \rho c \pi a^2 \frac{H_1(2ka)}{ka} \quad (15)$$

3. Teorinių skaičiavimų rezultatai

Skaičiavimams buvo pasirinktas akustinis rezonatorius, kurio $A = B = 200$ cm. Buvo nustatyta tokio rezonatoriaus garso absorbcijos dažninė priklausomybė nuo cilindrinės skylės diametro, nuo rezonatoriaus atstumo iki standžios plokštumos ir garso bangos kritimo kampo. Skaičiavimams pasirinktos 5 kintamos parametų reikšmės. Didėjant skylės diametru rezonatoriaus plotas irgi didėja, tuo tarpu atstumas iki standaus paviršiaus lieka pastovus. Taip pat buvo apskaičiuota, kaip kinta cilindrinės skylės realios ir menamos impedansų dalys, bei spiduliavimo impedanso reali ir menama dalys, kintant skylės diametru, jos atstumui iki standaus paviršiaus ir garso bangos kritimo kampui. Kompiuterinė skaičiavimų programa buvo sudaryta taip, kad viename brėžinyje būtų pavaizduotos skylės impedanso reali dalis ir kartu spinduliavimo impedanso reali dalis, o kitame - tos pačios skylės ir spinduliavimo impedansų menamos dalys. Tai leidžia aiškiai matyti kada vyksta rezonansas ir kokią įtaką garso absorbcijos kitimui turi realiosios ir menamosios impedansų dalys.

Skaičiavimuose plokštės storis imamas 2 cm, nuostolių koeficientas, atsirandantis dėl aštrių briaunų aptekėjimo imamas lygus 50, o medžiagos dinaminis nuostolių koeficientas - minimalus ir lygus 50. Standaus lubų paviršiaus garso absorbcijos koeficientai pasirenkami taip pat minimalūs ir lygūs 0.02 - 0.04. Kiekvienos kreivės apskaičiavimui buvo priimta po 100 taškų.

3 pav. pavaizduota garso absorbcijos dažninė priklausomybė nuo skylės diametro, kai atstumas iki standaus paviršiaus yra pastovus ir lygus 20 cm., o garso banga krenta normaliniu kampu.

Matome, kad esant sąlyginai mažam skylės diametrai - 36 cm garso absorbcija beveik nepriklauso nuo dažnio ir ji vienam rezonatoriui siekia tik apie 0.4 kv.m. Šiuo atveju nėra rezonansinio garso absorbcijos charakterio. Tačiau didėjant rezonatoriaus atstumui iki standaus paviršiaus absorbcijos kitimo charakteris jau yra kitoks.

Didėjant skylės diametrai garso absorbcijos charakteris keičiasi - esant žemiems dažniams (apie 70 Hz.) atsiranda rezonansas ir absorbcija labai padidėja, ji siekia iki 2,5 kv. m. Didėjant dažniui absorbcija mažėja, o pradėdant vidutiniais dažniais - ji išlieka beveik pastovi.

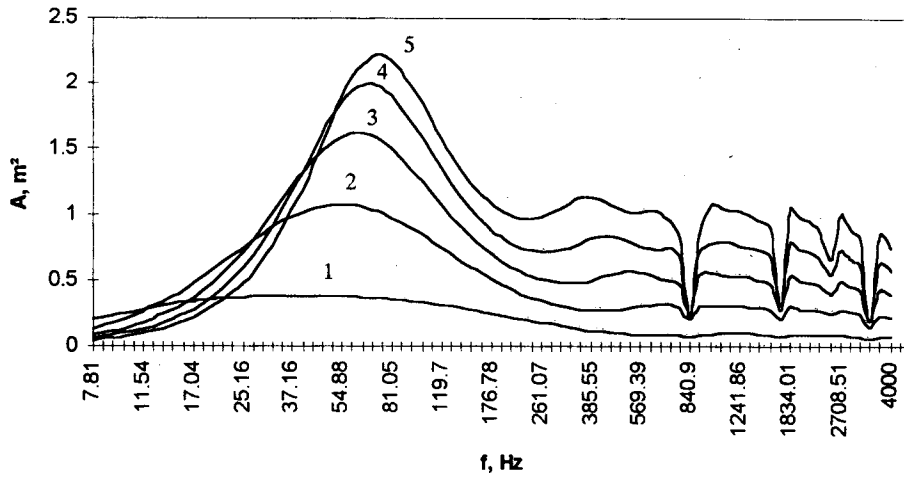
4 pav. pavaizduota akustinio rezonatoriaus skylės impedanso realiųjų dalių ir spinduliavimo impedanso realiųjų dalių dažninė priklausomybė kintant skylės diametrai.

Matome, kad didėjant skylės diametrai skylės impedanso reali dalis mažai priklauso nuo skylės diametro ir dažnio. Jos kitimas yra proporcingas $(2a/\lambda)^2$. Didėjant dažniui skylės impedanso reali dalis yra artima oro akustinei varžai, o esant dideliems dažniams su ja beveik sutampa. Tuo tarpu spinduliavimo impedanso reali dalis jau turi ryškią dažninę priklausomybę iki vidutinių dažnių, o toliau ji didėja nežymiai. Grafikuose Y ašis yra pavaizduota logaritminiam mastelyje. Skylės impedanso reali dalis kinta proporcingai f^2 , o spinduliavimo impedanso reali dalis kinta proporcingai \sqrt{f} . Esant žemiems ir vidutiniams dažniams spinduliavimo impedanso reali dalis kinta keičiantis skylės diametrai. Brėžinyje matome taškus, kuriuose kertasi skylės impedanso realios ir spinduliavimo impedanso realios dalys. Kai šie impedansai yra lygūs, tada ir gauname didžiausią garso absorbciją.

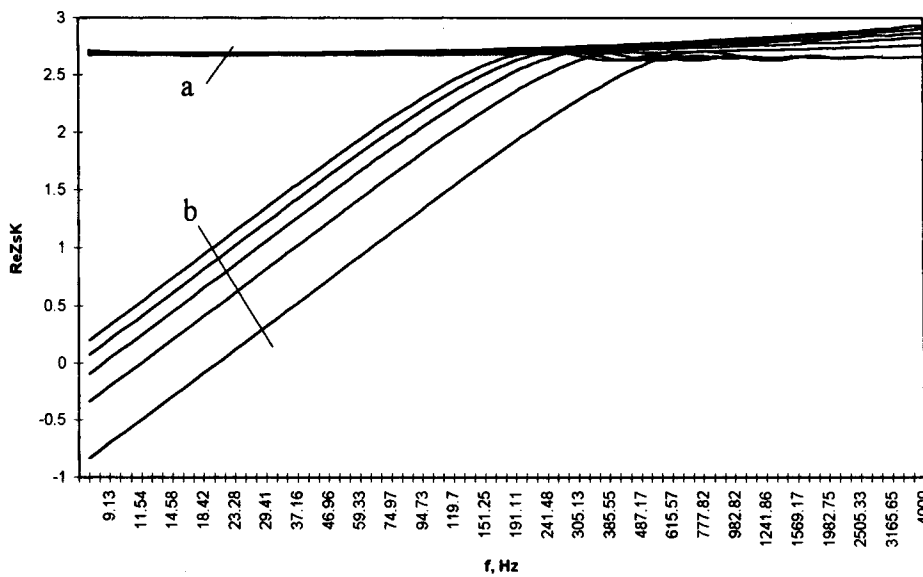
5 pav. pavaizduota rezonatoriaus skylės impedanso ir spinduliavimo impedanso menamų dalių dažninė priklausomybė nuo skylės diametro.

Šiuo atveju skylės impedanso menama dalis priklauso nuo skylės diametro ir dažnio, bet tik žemų ir vidutinių dažnių diapazone. Didėjant dažniui skylės menama impedanso dalis mažėja. Tuo tarpu spinduliavimo impedanso menama dalis beveik nepriklauso nuo skylės diametro ir ji didėja kartu su dažniu. Menamos dalies impedanso kitimas proporcingas $2a/\lambda$. Menama impedanso dalis apibūdina spinduliavimo energiją ir rezonanso metu lygi nuliui. Brėžinyje matome taškus, kuriuose kertasi skylės impedansų menamos dalys ir spinduliavimo impedansų menamos dalys, t. y. matome vietas, kuriose vyksta rezonansai.

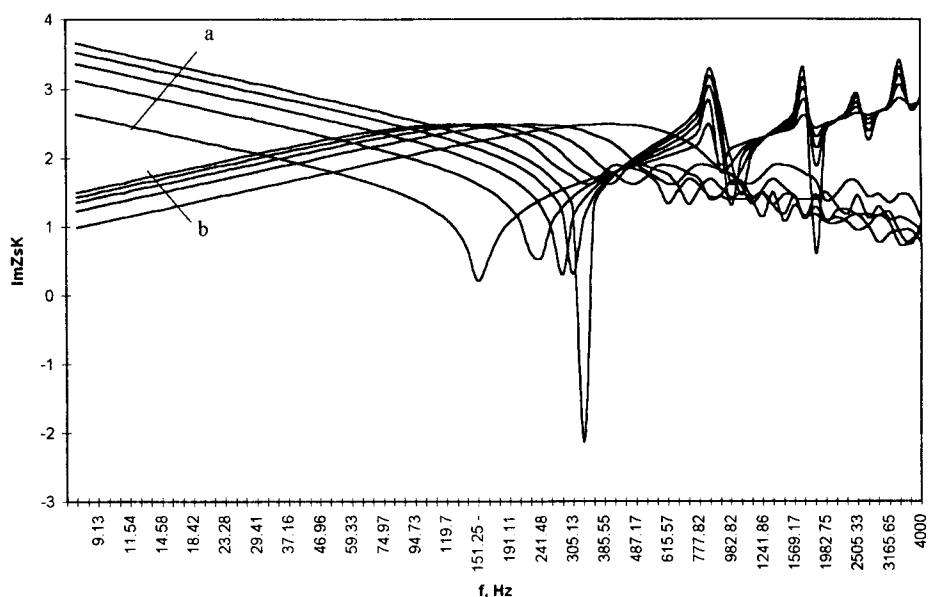
Iki šiol mes nagrinėjome rezonatoriaus garso absorbcines savybes, kai garso banga į jį krito normaliniu kampu. Garso bangos kritimo kampo įtaka garso absorbcijai pavaizduota 6 paveikslėlyje.



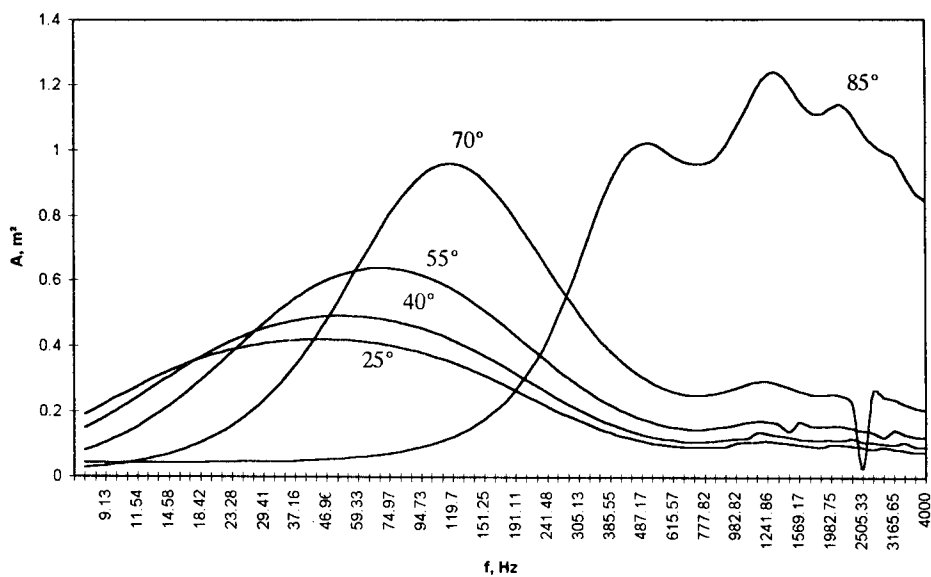
3 pav. Vienetinio akustinio rezonatoriaus garso absorbcijos priklausomybė nuo cilindrinės skylės diametro ir dažnio. Atstumas iki standžios plokštumos lygus 20 cm. Garso banga krenta normaliniu kampu. 1, 2, 3, 4 ir 5 - atitinkamai skylės diametras lygus 36, 64, 84, 102 ir 118 cm



4 pav. Vienetinio akustinio rezonatoriaus skylės impedanso realių dalių ir spinduliavimo impedanso realiųjų dalių priklausomybė nuo skylės diametro ir dažnio. Atstumas iki standžios plokštumos lygus 20 cm. Garso banga krenta normaliniu kampu. a - skylės impedanso realiosios dalys; b - spinduliavimo impedanso realiosios dalys



5 pav. Vienetinio akustinio rezonatoriaus skylės impedanso menamųjų dalių ir spinduliavimo impedansų menamųjų dalių priklausomybė nuo skylės diametro ir dažnio. Atstumas iki standžios plokštumos lygus 20 cm. Garso banga krenta normaliniu kampu. a - skylės impedansų menamos dalys; b - spinduliavimo impedansų menamos dalys



6 pav. Vienetinio akustinio rezonatoriaus garso absorbcijos priklausomybė nuo garso bangos kritimo kampo ir dažnio. Rezonatoriaus skylės diameteras 36 cm. Atstumas iki standžios plokštumos 20 cm. 1, 2, 3, 4 ir 5 - atitinkamai kritimo kampai lygūs 25°, 40°, 55°, 70° ir 85°

Didėjant garso bangos kritimo kampui didėja ir garso absorbcija, o rezonansinė absorbcijos kreivė darosi vis statesnė. Kada garso bangos kritimo kampas yra 85° , tai absorbcijos charakteris jau visai kitoks. Absorbcija pradeda didėti tik nuo vidutinių dažnių ir savo maksimumą pasiekia esant aukštiesiems dažniams. Plokštės kraštai skaičiavimuose imami nelygūs, todėl, kai į ją krenta garso banga pasikeičia absorbcija. Čia jau veikia kraštinis efektas, dėl kurio absorbcija tuo labiau didėja, kuo didesnis yra plokštės krašto perimetras. Didžiausią įtaką kraštiniam efektui ir absorbcijai duoda beveik šliaužianti jos paviršiumi garso banga. Skylės kraštuose gali atsirasti išsklaidymo bangos, kurios turi paviršinių bangų charakterį. Jos gerai slopsta ir padidina garso absorbciją.

7 pav. pavaizduota skylės ir spinduliavimo impedansų priklausomybė nuo dažnio ir garso bangos kritimo kampo.

Rezonatoriaus skylės impedanso menama dalis labai priklauso nuo skylės diametro ir dažnio. Didėjant bangos kritimo kampui, didėja ir skylės menamos impedanso dalys, o didėjant dažniui jos mažėja. Tuo tarpu spinduliavimo impedansų menamos dalys jau mažai priklauso nuo garso bangos kritimo kampo ir jos didėja kartu su dažniu. Brėžinyje aiškiai matomos šių impedansų skirtingos susikirtimo vietos, o ypač, kai garso banga krenta 85° kampu. Tai yra vietos, kur vyksta rezonansas.

8 pav. pavaizduota skylės ir spinduliavimo impedansų realiųjų dalių priklausomybė nuo garso bangos kritimo kampo.

Skylės realios dalies impedansas beveik nepriklauso nuo garso bangos kritimo kampo, kai jis nėra didesnis už 75° . Tuo tarpu kai šis kampas yra 85° ir daugiau, t.y., kai garso banga beveik šliaužia rezonatoriaus paviršiumi, tai šis impedansas turi aiškiają mažėjimo tendenciją didėjant dažniui. Skirtingai nuo 4 pav. spinduliavimo impedanso realioji dalis jau nepriklauso nuo garso bangos kritimo kampo ir ji didėja augant dažniui.

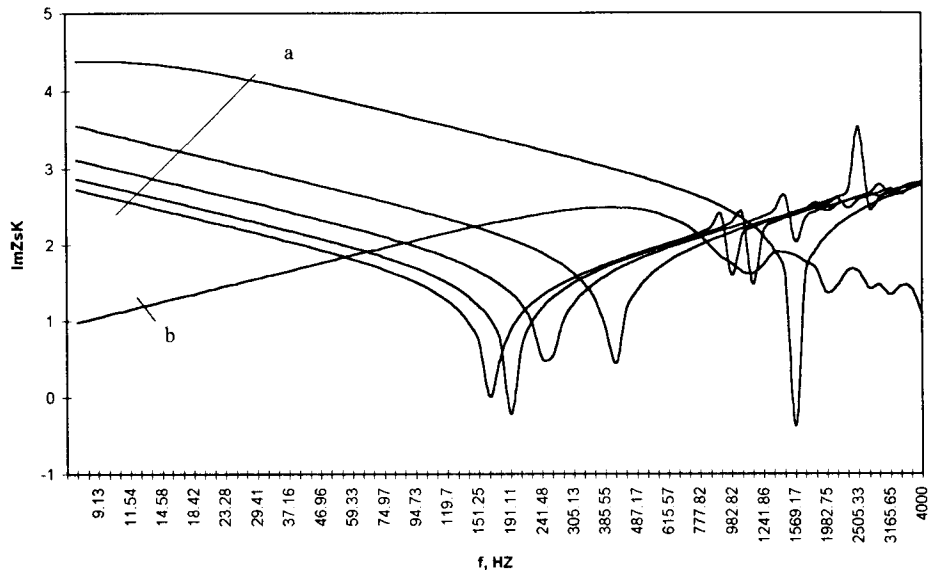
Rezonatoriaus garso absorbcija nepriklauso nuo jo atstumo iki standžios plokštumos, kai jo diameteras yra pastovus dydis. Keičiantis skylės diametru, keičiasi tik garso absorbcijos charakteris.

4. Išvados

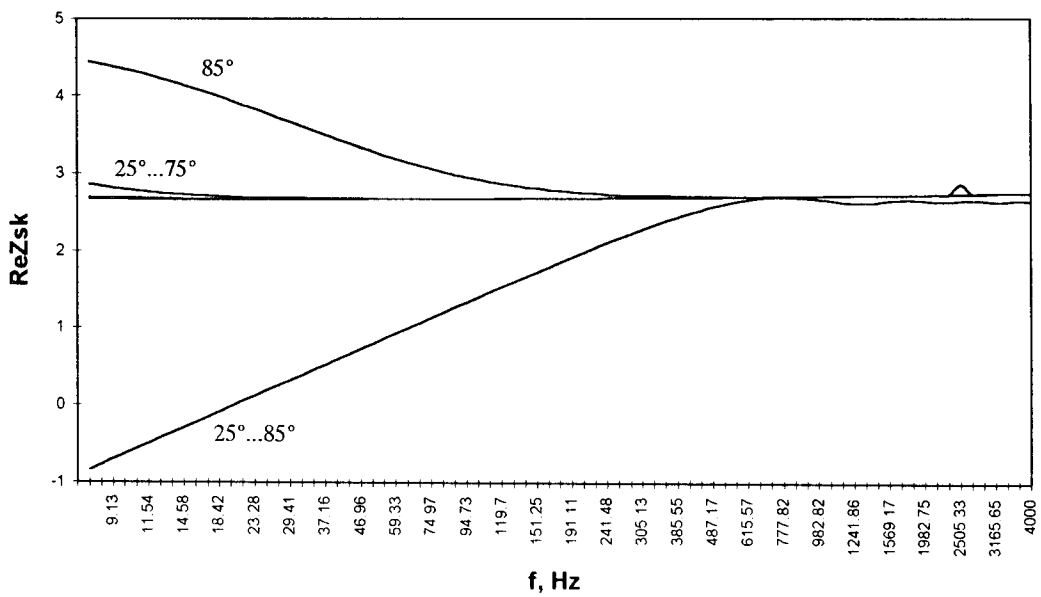
1. Vienetinis akustinis cilindrinės formos rezontorius, kurio matmenys 200×200 cm, gerai absorbuoja garso energiją esant labai žemiems dažniams siauroje juostoje, visai tam nenaudojant garsą absorbuojančių medžiagų.

2. Didėjant skylės diametru didėja maksimali garso absorbcija esant rezonansui, o rezonansinis dažnis beveik nesikeičia. Aukštų dažnių diapazone absorbcija yra daug mažesnė, nei esant rezonansiniam dažniui ir nuo jo beveik nepriklauso.

3. Didėjant garso bangos kritimo kampui didėja ir garso absorbcija esant rezonansiniui dažniui. Kada garso bangos kritimo kampas yra didelis arba artimas 90° , absorbcijos charakteris



7 pav. Vienetinio akustinio rezonatoriaus skylės impedanso menamųjų dalių ir spinduliavimo impedanso menamųjų dalių priklausomybė nuo garso bangos kritimo kampo ir dažnio. Skylės diametras 36 cm. Atstumas iki standžios plokštumos 20 cm. a - skylės impedansų menamos dalys; b - spinduliavimo impedansų menamos dalys.



8 pav. Vienetinio akustinio rezonatoriaus skylės impedanso realiųjų dalių ir spinduliavimo impedanso realiųjų dalių priklausomybė nuo garso bangos kritimo kampo ir dažnio. Skylės diametras 36 cm. Atstumas nuo standžios plokštumos 20 cm.

labai pasikeičia - maksimali absorbcija yra tik esant aukštiems dažniams.

4. Rezonatoriaus skylės impedanso reali dalis beveik nepriklauso nuo dažnio, skylės diametro ir bangos kritimo kampo; o spinduliavimo impedanso reali dalis turi ryškią dažninę priklausomybę. Skylės impedanso menama dalis priklauso nuo jos diametro, bangos kritimo kampo ir dažnio; o spinduliavimo impedanso menama dalis mažai priklauso nuo skylės diametro ir nepriklauso nuo bangos kritimo kampo.

Literatūra

1. Лепендин Л.Ф. Акустика. М.: Высшая школа. 1978. 447 с.
2. Stauskis V. Pakabinamų lubų su tarpais įtaka salės absorbcijai // 4-oji tarptautinė konferencija "Naujos statybinės madžiagos, konstrukcijos ir technologijos", Straipsniai. I tomas. Vilnius, 1995. 154-160 p.

SOUND ABSORPTION QUALITIES OF A CYLINDER-SHAPED ISOLATED ACOUSTIC RESONATOR

V. Stauskis

S u m m a r y

In the article, an isolated acoustic resonator consisting of a cylinder-shaped hole of variable volume and with large and variable diameter is theoretically analyzed.

Theoretical formulae by which sound absorption of such resonator is computed are presented. The computations incorporate the influence exerted by overtones, i.e. odd harmonics, and supplementary resonator mass upon sound absorption. A change in the sound absorption depending on the resonator hole diameter, the angle of sound wave incidence and its volume, i.e. the distance to the rigid surface, has been established. Sound absorption reaches its maximum at low frequencies and it depends strongly on the hole diameter. Under constant hole diameter, sound absorption does not depend on the resonator volume, i.e. the distance to the rigid surface. Absorption notably depends on the angle of sound wave incidence. When this angle increases, absorption also increases at resonant frequency, while the frequency itself moves towards higher frequencies. When the sound wave incidence is 90 degrees with respect to resonator, maximum absorption is already observed at high frequencies.

Real and imaginary parts of the radiation impedance of cylindric hole and of the impedance of the hole itself, as well as their dependency on frequency are computed. In this case, hole impedance consists of the impedances of the hole and air resiliency. The influence exerted by the real and imaginary parts upon sound absorption has been established. The resonance takes place when the imaginary parts of radiation and hole impedances intersect.