



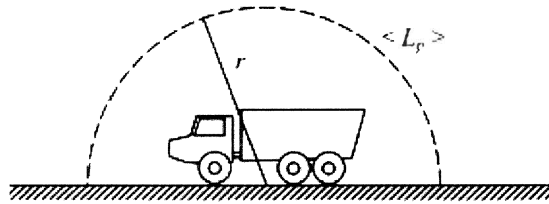
MEC-3281 Meluntorjunta

Tentti 6.3.2012

Kaavakokoelman käyttö on sallittu (jaetaan). Funktiolaskimet on sallittu.

Jos tehtävässä ei ole muuta mainittu, käytä ilmalle $c = 343$ m/s ja $\rho_0 = 1,19$ kg/m³.

1. Kuorma-auton äänitehomittaukset tehdään ulkona suuren ja kovan pinnan ympärillä puolipallon muotoiselta pinnalta (vastaava tapaus kuin puolikaiuton huone).



Kuorma-auton moottoriteho on $P = 430$ kW. Mittauksissa saatiin seuraavat keskimääräiset äänenpainetasot neljällä oktaavikaistalla etäisyydellä $r = 10$ m.

f [Hz]	63	125	250	500
$\langle L_p \rangle$ [dB]	81	57	50	44

EU:n konedirektiivin mukaan tämäntyyppisellä ajoneuvolla A-painotettu kokonaisäänitehotaso ei saa ylittää arvoa $L_{W,A} = 55 + 11 \cdot \log(P)$ dB(A), missä P on koneen moottoriteho kilowatteina. Täyttääkö kuorma-auto direktiivin vaatimukset? A-painotettu äänitehotaso saadaan samalla tavalla kuin äänitasokin lisäämällä painottamattomaan arvoon korjaustermi ΔA_n .

2. Epätasapaino koneen komponenteissa tuottaa harmonisesti vaihtelevan voiman $\hat{F}e^{i\omega t}$ ja äänensäteilyn ympäröivään ilmaan.

a) Jos ääni ei heijastu mistään pinnasta, määritä koneen synnyttämä äänenpaine kaukokentässä etäisyydellä r .

b) Kone on kovalla lattialla ja voiman keskipiste on etäisyydellä L ($kL \ll 1$) lattiasta. Voima vaikuttaa lattian suuntaisesti. Laske äänenpaine kaukokentässä etäisyydellä r . (Vihje: säteilee puolipallon pinnalle)

c) Voima vaikuttaa kohtisuoraan lattiaa vastaan. Laske äänenpaine kaukokentässä etäisyydellä r . (Vihje: peililähde)

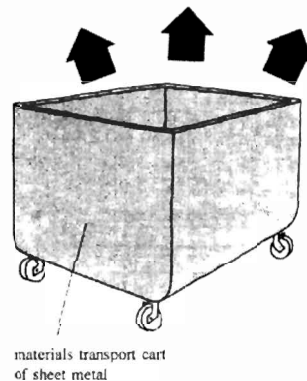
d) Missä tapauksessa äänenpaine on suurin?

3. Jäykkäseinäisessä putkessa (ympyräpoikkileikkaus), jonka halkaisija on 0,15 m, on äänilähde keskiakselilla kohdassa $z = 0$, joka säteilee taajuudella 500 Hz. Äänilähde voi herättää useita aaltomuotoja, mutta vain tietyt aallot etenevät kauas lähteestä ja loput vaimenevat lähellä lähdettä, kun tarkastellaan aksiaalisuuntaa (z – koordinaatti).

a) Minkä rajataajuuden (cut-on) alapuolella vain tasoallot etenevät?

b) Mikrofoni asetetaan keskiakselille etäisyyden L päähän äänilähteestä. Millä etäisyydellä tasoalto on vähintään 20 dB voimakkaampi kuin muut aaltomuodot, jos kaikki herätetyt muodot ovat lähteen kohdalla yhtä voimakkaita? Riittää, kun tarkastelee vain alinta ei-tasoaltomuotoa. Vihje: Tarkastele painetta z – suunnassa ja sovelle aaltoluvulle suorakulmiopoikkileikkauksen kaavoja, jolloin on voimassa $\alpha_{mn} = k_{mn}$.

4. Lattian epätasaisuudet aiheuttavat voimakasta melua kuljetuskärryn pohja- ja sivulevyistä työnnettäessä sitä. Melua syntyy myös, kun tavaraa heitetään kärryn pohjalle. Miten muuttaisit kärryn konstruktiota, jotta sen meluntuotto vähenisi. Piirrä kuva! Selitä myös mihin akustisiin ilmiöihin uuden konstruktion melutason aleneminen perustuu.



5. Jos kaupungin keskustan nopeusrajoitusta alennetaan nopeudesta 40 km/h nopeuteen 30 km/h, niin kuinka tämä nopeuden muutos vaikuttaa alueen melutasoon? Mieti asiaa auton eri melunlähteiden näkökulmasta eli miten ajonopeuden pudotus vaikuttaa niihin.

KSU-3281 Meluntorjunta

Kaavakokoelma tenttiin

Complex number computations

$$z = \alpha + i\beta \quad y = \gamma + i\delta \quad y^* = \gamma - i\delta$$

$$\frac{z}{y} = \frac{zy^*}{yy^*} \quad |z|^2 = zz^*$$

Euler's formula $\chi e^{i\eta\psi} = \chi(\cos \eta\psi + i \sin \eta\psi)$

Angular frequency $\omega = 2\pi f$

Wavelength $\lambda = \frac{c}{f}$

Wavenumber $k = \frac{\omega}{c}$ rms pressure $\tilde{p} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}$ $\tilde{p} = \hat{p} / \sqrt{2}$

Sound power $W = \int_S p(\vec{r}, t) u(\vec{r}, t) \cdot \vec{n} dS$, plane wave $\bar{W} = \frac{\tilde{p}^2 S}{\rho_0 c}$

Intensity $I = \frac{dW}{dS}$, plane wave $\bar{I}_s = \frac{\bar{W}}{S} = \frac{\tilde{p}^2}{\rho_0 c}$, spherical wave $\bar{I}_r = \frac{\bar{W}}{4\pi r^2}$, cylindrical wave $\bar{I}_r = \frac{\bar{W}}{2\pi r}$

Particle velocity of plane wave $u = \frac{\hat{p}}{\rho_0 c} e^{i(\omega t - kx)}$

Sound pressure level $L_p = 20 \log \frac{\tilde{p}}{p_{ref}}$, sound power level $L_W = 10 \log \frac{\bar{W}}{W_{ref}}$, $p_{ref} = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa, $W_{ref} = 1 \cdot 10^{-12}$ W

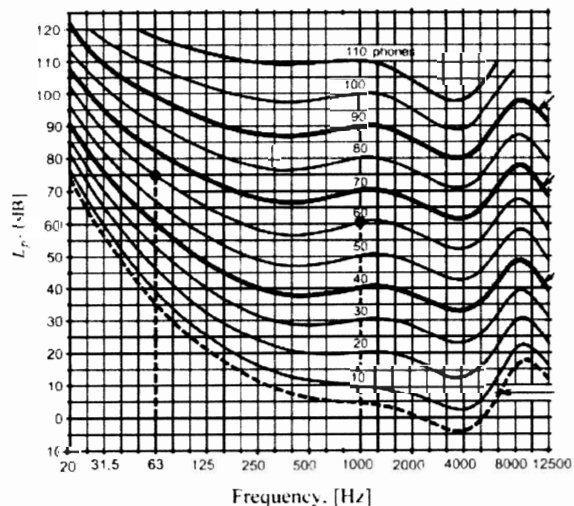
Combining of different sources or frequency components, uncorrelated sources $\tilde{p}_{tot}^2 = \sum_{n=1}^N \tilde{p}_n^2$

A-weighted sound level $L_A = 10 \log \sum_{n=1}^N 10^{(L_{pn} + \Delta A_n) / 10}$

Correction terms for A-weighting ΔA_n

Frequency [Hz]	A-weighting [dB]	Frequency [Hz]	A-weighting [dB]
20	-51.0	800	-0.8
25	-44.7	1000	0
31.5	-39.4	1250	-0.6
40	-34.6	1600	-1.0
50	-30.2	2000	+1.2
63	-26.2	2500	-1.3
80	-22.5	3150	-1.2
100	-19.1	4000	+1.0
125	-16.1	5000	-0.5
160	-13.4	6300	-0.1
200	-10.9	8000	-1.1
250	-8.6	10000	-2.5
315	-6.6	12500	-4.3
400	-4.8	16000	-6.6
500	-3.2	20000	-9.3
630	-1.9		

Loudness



Equivalent sound pressure level $L_{eq,t} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{L_r(t)/10} dt \right)$

Equivalent sound level with A-weighting $L_{Aeq,t} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{L_r(t)/10} dt \right)$

Equation of continuity $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \nabla \cdot \vec{u} = 0$

Equation of motion $\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \nabla p = 0$

Volume flow rate $Q = uS$

Mass flow rate $\dot{m} = \rho_0 uS$

Ideal gas equation $\frac{p}{\rho} = RT$ $R = R_t / M$ $R_t = 8314 \text{ J/kmolK}$

Speed of sound $c = \sqrt{\gamma RT}$

Wave equation $\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$. solution of d'Alembert in 1D $p(x,t) = f(t-x/c) + g(t+x/c)$. in harmonic case

$p(x,t) = p_+ e^{i(\omega t - kx)} + p_- e^{i(\omega t + kx)}$

Impedance $Z = \frac{p}{u}$. characteristic impedance $Z_0 = \rho_0 c$

Helmholtz equation $\nabla^2 p + k^2 p = 0$

$$\nabla^2 = \begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} & \text{cartesian coord} \\ \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} & \text{cylindrical} \\ \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} & \text{spherical} \end{cases}$$

Energy density $\bar{e} = \frac{2\bar{E}_{km}}{T}$

Solution of wave equation for spherical wave in harmonic case

$p(r,t) = \frac{A_1}{r} e^{i(\omega t - kr)} + \frac{A_2}{r} e^{i(\omega t + kr)}$

Intensity of spherical wave $\bar{I}_r(r) = \frac{\text{Re}(\vec{p} \cdot \vec{u}_r)}{2} = \frac{A_+^2}{2\rho_0 c r^2}$

Reflection coefficient at interface of two media $R = \frac{p_r}{p_i} = \frac{\rho_2 c_2 \cos \theta_i - \rho_1 c_1 \cos \theta_t}{\rho_2 c_2 \cos \theta_i + \rho_1 c_1 \cos \theta_t}$

Transmission coefficient at interface of two media $T = \frac{p_t}{p_i} = \frac{2\rho_2 c_2 \cos \theta_i}{\rho_2 c_2 \cos \theta_i + \rho_1 c_1 \cos \theta_t}$

Snell's law $\frac{c_1}{\sin \theta_i} = \frac{c_2}{\sin \theta_t}$

Reflection coefficient for locally reacting material $R = \frac{Z_2 \cos \theta_i - \rho_1 c}{Z_2 \cos \theta_i + \rho_1 c}$

Absorption coefficient $\alpha = 1 - |R|^2$

Resonance frequencies of parallelepiped (all walls rigid) $f(n_x, n_y, n_z) = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2}$

Pressure in parallelepiped $p(x, y, z, t) = \sum_i p_i \cos(k_x x) \cos(k_y y) \cos(k_z z) e^{i\omega t}$

Helmholtz number $He = kL$

Loss factor $\eta = \frac{\overline{W}_{diss}}{\omega \varepsilon_d I'} = \frac{c \langle \alpha_d \rangle S}{4\omega I'}$

Sabine's law $T_{60} = \frac{24 \ln 10 I'}{c \langle \alpha_d \rangle S}$

Sound pressure level in diffuse field $L_{p, tot} = L_{W, dir} + 10 \log \left[\frac{4}{A'} + \frac{\Gamma}{4\pi r^2} \right]$

Room constant $A' = \frac{\langle \alpha_d \rangle S}{1 - \langle \alpha_d \rangle} = \frac{.AS}{S - A}$

Equivalent absorption area $A = \langle \alpha_d \rangle S$

Sound reduction obtained with absorption $R = L_{p, before} - L_{p, after}$

Absorption coefficient for composite wall $\langle \alpha_d \rangle = \frac{\sum \alpha_{d,m} S_m}{S}$

Natural frequency of Helmholtz resonator $f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{LV}}$

Radiation impedance and end correction for circular pipes

flanged $\frac{Z_r}{\rho_0 c S} = \frac{1}{2} (ka)^2 + i \frac{8}{3\pi} ka \quad L' = L + \frac{8}{3\pi} a$ unflanged $\frac{Z_r}{\rho_0 c S} = \frac{1}{4} (ka)^2 + i 0.6 ka \quad L' = L + 0.6a$

Impedance tube

Phase angle	Reflection coefficient	Impedance
$\delta_j = (2N - 1)\pi - 2kx_{\min}$	$R = \frac{n-1}{n+1}$	$Z = \rho_0 c \frac{1 + Re^{i\delta_j}}{1 - Re^{i\delta_j}}$

Transmission factor $\tau = \frac{W_t}{W_i} = \left| \frac{p_t}{p_i} \right|^2$

Insulation $R = 10 \log \frac{1}{\tau}$

Bending stiffness $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$

Bending wave number $k_B = \sqrt{\frac{\rho_p h \omega^2}{D}}$

Mass law $R = 20 \log \left[\frac{\omega \rho_p h \cos \theta}{2\rho_0 c} \right]$

In diffuse field $R_d = R(0) - 3$

Coincidence frequency $f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_p h}{D}}$

Composite wall

- transmission factor $\tau = \sum_n \tau_n \frac{S_n}{S}$

- insulation $R = 10 \log \frac{S}{\sum_n S_n \cdot 10^{R_n/10}}$

Insulation between two rooms $L_{p,2} = L_{p,1} - R_d - 10 \log \left(\frac{A_2}{S} \right)$

Double wall

- insulation $R = 20 \log \frac{\omega^2 \rho_1 h_1 \rho_2 h_2}{4 \rho_0^2 c}$

- resonance frequency $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0 c^2 (\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2)}{h_{gap} \rho_1 h_1 \rho_2 h_2}}$

Monopole $u_r = \frac{A_+}{\rho_0 c r} \left(1 + \frac{1}{ikr} \right) e^{i(\omega t - kr)}$ $\hat{p}_m = \frac{i \rho_0 \omega \hat{Q}}{4\pi r} e^{-ikr}$ $\bar{W}_m = \frac{\rho_0 c k^2}{4\pi} \hat{Q}^2$

Dipole $\hat{p}_d = \frac{ik\hat{F} \cos \theta}{4\pi r} \left(1 + \frac{1}{ikr} \right) e^{-ikr}$ $\hat{F} = i \rho_0 \omega \hat{Q} L$ $\bar{W}_d = \frac{k^2 \hat{F}^2}{12\pi \rho_0 c}$

Quadrupole

- lateral $\hat{p}_q = \frac{-k^2 \hat{M} \cos \theta \sin \theta \cos \phi}{4\pi r} e^{-ikr} + \text{near field term}$ $\hat{M} = i \omega \rho_0 \hat{Q} L_x L_z$ $\bar{W}_q = \frac{k^4 \hat{M}^2}{60\pi \rho_0 c}$

- longitudinal $\hat{p}_q = \frac{-k^2 \hat{M} \cos^2 \theta}{4\pi r} e^{-ikr} + \text{near field term}$ $\hat{M} = i \omega \rho_0 \hat{Q} L_z^2$ $\bar{W}_q = \frac{k^4 \hat{M}^2}{20\pi \rho_0 c}$

Radiation from plane circular piston

$$p(r, \theta, t) = \frac{i \rho_0 c \hat{u}}{2} \frac{a}{r} k a e^{i(\omega t - kr)} \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right]$$

Radiation efficiency $s = \frac{\bar{W}}{\rho_0 c S \langle \hat{v}^2 \rangle}$

Bending wave number of plate $k_z = \sqrt{\left(\frac{\omega}{c} \right)^2 - k_B^2}$

Sound radiation intensity of plate $\bar{I}_z = \rho_0 \omega \hat{v}^2 \operatorname{Re} \left(\frac{1}{k_z} \right)$

Strouhal frequency $f_{st} = \frac{l}{d}$

Sound power for monopole, dipole and quadrupole as function of flow velocity

$$\bar{W}_m \propto \frac{\rho_0 d^2 l^4}{c}, \quad \bar{W}_d \propto \frac{\rho_0 d^2 l^6}{c^3}, \quad \bar{W}_q \propto \frac{\rho_0 d^2 l^8}{c^5}$$

Wave equation with mean flow $\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial}{\partial t} + l \cdot \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 p = 0$

Mach number $M = \frac{l}{c}$

Wave number in duct $k_v = \frac{1}{1-M^2} \left(kM \pm \sqrt{k^2 - (1-M^2) \alpha_{nm}^2} \right)$ $\alpha_{nm}^2 = k_{x,n}^2 + k_{z,m}^2$

Pressure in duct with rigid walls

$$p(x, y, z) = e^{i\omega t} \sum_m \sum_n \hat{A}_{mn} e^{-ik_{mn}x} \cos(n\pi y/b) \cos(m\pi z/h)$$

$$\hat{A}_{mn} = \frac{2\omega\rho_0 \hat{Q} \cos(m\pi z_0/h) \cos(n\pi y_0/b)}{k_{mn} \varepsilon_{mn} b h}$$

$$\varepsilon_{mn} = 4, m = n = 0$$

$$\varepsilon_{mn} = 2, m \text{ or } n = 0, m \neq n$$

$$\varepsilon_{mn} = 1, m \neq 0, n \neq 0$$

Pressure in cylindrical duct

$$\hat{p}_{mn} = \hat{A}_{mn} J_m(k_{mn}r) \cos(m\theta) e^{-ik_{mn}z}$$

$$\chi_{mn} = k_{mn} a$$

m ↓ n →	0	1	2	3
0	0	3.83	7.02	10.17
1	1.84	5.33	8.54	11.71
2	3.05	6.71	9.97	13.17
3	4.20	8.02	11.35	14.59

Inhomogenous wave equation

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = \mathcal{F}(\mathbf{x}, t)$$

volume point source (monopole) $\mathcal{F}(\mathbf{x}, t) = \rho_0 \partial q / \partial t$

compact body force (dipole) $\mathcal{F}(\mathbf{x}, t) = -\nabla \cdot \bar{\mathbf{F}}$

general quadropole $\mathcal{F}(\mathbf{x}, t) = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}(\mathbf{x}, t)$

Lighthill's equation

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) c^2(\rho - \rho_0) = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$$

Lighthill stress tensor

$$T_{ij} = \rho v_i v_j + [(p - p_0) - c^2(\rho - \rho_0)] \delta_{ij} - \sigma_{ij}$$

Transmission loss $D_{Tl} = 10 \log \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}'_1}$

Insertion loss $D_{Il} = 20 \log \frac{P_B}{P_1}$

Transmission loss of area change $D_{Tl} = 10 \log \frac{(S_1 + S_2)^2}{4S_1 S_2}$

Transmission loss of expansion chamber $D_{Tl} = 10 \log \left[\cos^2 kL + \frac{1}{4} \left(\frac{S_1}{S_2} + \frac{S_2}{S_1} \right)^2 \sin^2 kL \right]$

Transmission loss of quarter-wave resonator $D_{Tl} = 10 \log \left(1 + \frac{S_q^2}{4S^2} \tan^2 kL \right)$

Transmission loss of Helmholtz resonator $D_{Tl} = 10 \log \left| 1 + \frac{S_{hr} \rho_0 c}{2SZ_{hr}} \right|^2$

Transmission loss of resistive mufflers $D_{TL} = 1.05 \frac{LP}{S} \alpha^{1.4}$

4-pole theory

$$\begin{bmatrix} p \\ Q \end{bmatrix}_{in} = [\mathbf{T}] \begin{bmatrix} p \\ Q \end{bmatrix}_{out}$$

$$[\mathbf{T}] = [\mathbf{T}]_1 [\mathbf{T}]_2 \dots [\mathbf{T}]_{N-1} [\mathbf{T}]_N$$

$$D_{TL} = 10 \log \left(\frac{Z_{out}}{4Z_{in}} \left| \mathbf{t}_{11} + \frac{\mathbf{t}_{12}}{Z_{out}} + Z_{in} \mathbf{t}_{21} + \frac{Z_{in} \mathbf{t}_{22}}{Z_{out}} \right|^2 \right)$$

4-pole matrix of straight duct

$$[\mathbf{T}] = \begin{bmatrix} \cos kL & iZ \sin kL \\ i/Z \sin kL & \cos kL \end{bmatrix} \quad Z = \rho_0 c/S$$

Fourier series $F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^l F(t) \cos n\omega t dt \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^l F(t) \sin n\omega t dt$$

Complex Fourier series $F(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{in\omega t} \quad A_n = \frac{1}{T} \int_{l/2}^{l/2+T} F(t) e^{-in\omega t} dt$