

VOIMAHERÄTTEISEN TASOLAATAN ÄÄNENSÄTEILY

Marko Kuivamäki, Kari Saarinen ja Lasse Lamula

VTT Tuotteet ja tuotanto
PL 1307, 33101 Tampere
marko.kuivamaki@vtt.fi, kari.p.saarinen@vtt.fi, lasse.lamula@vtt.fi

1 JOHDANTO

Useissa koneissa mekaanisen värähtelyn äänensäteily on yksi merkittävimmistä äänensyntymekanismeista. Ohut tasomainen tai kaareva pinta on tyypillinen ääntä säteilevä koneenosa. Rakenteen säteilemään äänitehoon vaikuttavat pinnan normaalin suuntainen värähtelynopeusjakauma, säteilysuhde, värähtelevän pinnan ala ja ympäröivän fluidin ominaisuudet.

Numeerisella mallinnuksella voidaan havainnollistaa eri tekijöiden vaikutusta rakenteen säteilemään äänitehoon. Elementtimenetelmällä saadaan tarkempaa tietoa rakenteen resonoivasta käyttäytymisestä kuin tilastollisilla menetelmillä. Yksinkertaisilla rakenteilla elementtimenetelmälläkin voidaan tarkastella laajaa taajuusalueta. Käytännön rakenteilla ongelmallisia seikkoja ovat hankalasti kuvattavat rakenteen reunaehdot ja todellisten herätevoimajakaumien selvittäminen. Tästä johtuen absoluuttisten tulosten saavuttaminen on vaikeaa, mutta toisaalta ratkaisuvaihtoehtojen kvalitatiivinen vertailu on helppoa.

Tässä paperissa tarkastellaan eri tekijöiden vaikutusta tasorakenteen säteilemään äänitehoon, kun herätteenä on pistevoima. Varioituja tekijöitä olivat kappaleen dimensiot, materiaali-parametrit, vaimennus ja voiman kohdistuspiste. Lisäksi tarkasteltiin jäykisteiden vaikutusta. Eri tekijöiden vaikutus äänitehon taajuusjakaumaan selittyy pääosin säteilysuhteen ja värähtelynopeuden taajuusriippuvilla muutoksilla. Käytetyt laskentamenetelmät olivat elementtimenetelmä (FEM), reunaelementtimenetelmä (BEM) ja tilastollinen energia-analyysi (SEA).

Mallinnustuloksia verifioitiin mittaamalla pistevoimalla herätetyn tasolevyn ääniteho ja värähtelynopeusjakauma, joiden avulla määritettiin säteilysuhde. Lisäksi testikappaleesta mitattiin vaimennussuhde.

Tuloksena esitetään rakennemuutosten taajuusriippuvat vaikutukset laatan säteilemään äänitehoon. Rakennemuutosten valinta simulointitulosten perusteella on tehokasta, kun koneen herätevoimien taajuusjakaumat ja amplitudisuhteet sekä vaimennus tunnetaan. Pelkän laatan tarkastelu antaa hyvän lähtökohdan, joskin laatan liittäminen koneen rakenteisiin voi muuttaa tilannetta oleellisesti.

2 LAATAN ÄÄNENSÄTEILY

Lähteessä [1] laattaa määriteltäessä tehdään muun muassa seuraavat oletukset: laatta on tasomainen, tasapaksu, homogeeninen, isotrooppinen, lineaarisesti kimmoinen, paksuus on pienempi kuin 1/10 pienimmän sivun pituudesta, muodonmuutos tapahtuu taivutusdeformaationa, muodonmuutokset ovat pieniä verrattuna paksuuteen, keskipinnan normaalit pysyvät deformaatioissa suorina ja kohtisuorassa keskipintaan nähden, rotaatiohitaus ja leikkaus muodonmuutos jätetään huomiotta (ohut laatta) sekä tason suuntainen kuormitus on nolla.

Yksinkertaisimmillaan laatan äänensäteilyä voidaan alentaa siten, että mitoitetaan laatan ominaistajuudet herätetaajuuksista poikkeaviksi. Jos esimerkiksi kotelon sivu idealisoidaan reunoiltaan niveltuetuksi laataksi, sivun ominaistajuudet voidaan laskea analyttisesti [1], mutta käytännön rakenteiden reunaehdot, koneyksilöiden väliset erot ja usein luonteeltaan laajakaisaiset herättemekanismit tekevät tarkastelusta ongelmallisen.

Värähtelevän kappaleen säteilemä ääniteho (P) esitetään säteilysuhteen (σ), kappaleen pinnan alan (S), pinta-ala keskiarvotetun pinnan normaalin suuntaisen nopeuden neliöllisen keskiarvon $\langle \bar{v}_n^2 \rangle$, sekä ympäröivän fluidin tiheyden (ρ) ja äänen nopeuden (c) avulla [2].

$$P = \sigma \rho c S \langle \bar{v}_n^2 \rangle = \sigma \rho c \int_S \left[\frac{1}{T} \int_0^T v_n^2(x, y, t) dt \right] dS = \sigma \rho c \int_S |v_{RMS}|^2 dS \quad (1)$$

Säteilysuhteesta käytetään logaritmisoina nimitystä säteilyindeksi ($L_\sigma = 10 \log_{10} \sigma$). Se ilmaisee miten tehokkaasti värähtelevä rakenne muuntaa mekaanisen liikkeen äänienergiaksi verrattuna samankokoiseen mäntäsäteilijään. Säteilysuhde voidaan määrittää kaavasta (1) mittaamalla ääniteho ja keskimääräinen neliöllinen värähtelyn nopeus. Numeerisesti säteilysuhde lasketaan seuraavasti [3]

$$\sigma = \frac{\text{Re } W_o}{W_i} = \frac{\frac{1}{2} \int_S \text{Re}(p v_n^*) dS}{\rho c S \langle \bar{v}_n^2 \rangle} = \frac{\int_S \text{Re}(p v_n^*) dS}{\rho c \int_S v_n^2 dS}, \quad (2)$$

missä W_o on kappaleen säteilemä teho, W_i on syöttöteho ja p on äänenpaine. Säteilysuhde on taajuuden funktio ja riippuu muun muassa rakenteiden dimensioista, materiaalista, herätteen kohdistuspisteestä, herätetyypistä, vaimennuksesta ja reunaehdoista. Säteilysuhteen määritelmästä johtuen sen arvo voi olla suurempi kuin 1 [2]. Säteilysuhde on herätevoiman suuruudesta, mutta ei herätevoimajakaumasta riippumaton.

Kirjallisuudessa on esitetty yksinkertaisia nyrkkikaavoja [4], joilla voidaan nopeasti arvioida muun muassa dimensioiden ja materiaalin vaikutusta tasolaatan värähtelyn nopeusjakaumaan, säteilysuhteeseen ja äänitehoon. Yleisessä tapauksessa analyttistä ratkaisua laatan värähtelyn nopeusjakauman ja sen säteilemän äänitehon laskentaan ei ole olemassa, joten numeerisen mallinnuksen käyttö on hyvin perusteltua.

3 MALLINNUS

3.1 Käytetyt ohjelmistot

Käytössä olivat kaupalliset ohjelmistot I-DEAS, SYSNOISE ja AutoSEA. I-DEAS on elementtimenetelmäohjelmisto, jolla voidaan laskea myös akustisia ongelmia. SYSNOISE-ohjelma on kehitetty erityisesti vibroakustisten ongelmien laskentaan elementti- ja reunaelementtimenetelmällä. AutoSEA perustuu tilastolliseen energia-analyysiin.

3.2 Mallinnusmenetelmien soveltuvuusalue

Reunaelementtimenetelmässä suurin haluttu laskentataajuus määrää mallissa käytettävän elementin koon yleisesti käytetyn nyrkkisäännön mukaan: 6 lineaarista tai 3 isoparametrasta elementtiä/aallonpituus. Näin ollen suurilla laskentataajuuksilla halutun geometria kuvaamiseen tarvitaan enemmän elementtejä. Vastaava sääntö soveltuu myös elementtimenetelmään: kolme elementtiä ominaismuodon yhtä kupukohtaa kohti. Dimensioiltaan pienet mallit voidaan siis ratkaista elementtimenetelmällä myös suuriin taajuuksiin, koska tällöin halutun geometrian kuvaamisessa tarvittava elementtimäärä on kohtuullinen. Käytännössä elementtimenetelmien soveltamista suuriin taajuuksiin akustisessa laskennassa rajoittaa reunaelementtimenetelmän vaatima tietokonekapasiteetti. Käyttökelpoinen taajuusalue riippuu siis tarkasteltavan kohteen dimensioista.

SEA:n toiminnan kannalta tärkeää on riittävä ominaismuototiheys laskentakaistaa kohti, nyrkkikaavana laskentakaistalla ≥ 10 moodia. Tästä syystä SEA:lla voidaan laskea tyypillisesti suuriin taajuuksiin. Toisaalta tämä rajoittaa SEA:n käyttöä pienillä taajuuksilla ja massiivisilla rakenteilla. SEA-mallinnuksen etuja ovat lyhyt laskenta-aika ja se, että runko- ja ilmaääni saadaan laskettua samanaikaisesti. Yleisesti elementtimenetelmiä ja SEA:a pidetään toisiaan täydentävinä mallinnusmenetelminä.

3.4 FEM/BEM-mallinnus

Laatan värähtelykäyttäytyminen laskettiin elementtimenetelmällä. Laatan reunoille määritettiin niveltuenta ja pistevoimaherätteet sijoitettiin laatan neljännekseen sattumanvaraisesti. Tämän jälkeen tehtiin taajuusvasteanalyysi joko I-DEAS- tai Sysnoise-ohjelmistolla riippuen mallissa olevista elementtityypeistä (rakenteellisia palkki- ja solidielementtejä Sysnoise ei tunne). Kullakin laatalle suoritettiin kolme eri ajoa siten, että kussakin tapauksessa oli määritetty vain yksi herätevoima. Reunaelementtimenetelmällä simuloitiin laatan akustista käyttäytymistä äärettömälle tasolle asemoituna. Reunaehtoina käytettiin taajuusvasteanalyysistä saatuja laatan nopeusjakaumia. Näistä kolmesta analyysituloksesta laskettiin keskiarvo, koska herätepisteen sijainnin vaikutusta haluttiin vähentää.

3.5 SEA-malli

Voimaherätteen tasolevyn äänensäteilyn laskentaan SEA:lla tarvitaan yksi osajärjestelmä, johon kohdistetaan pintaa vastaan kohtisuora voima. Äänensäteily kuvataan erillisellä kytkennällä, jolla yhdistetään laatta-osajärjestelmä ja osajärjestelmä, jolla kuvataan ympäröivä fluidi. Muut tarvittavat lähtöarvot ovat materiaaliparametrit, dimensiot sekä herätevoiman ja vaimennuksen taajuusjakauma. Tuloksena saadaan muun muassa laatan keskimääräisen värähtelynopeuden, säteilysuhteen ja laatan säteilemän äänitehon taajuusjakaumat.

3.6 FEM/BEM simulointituloksia

Tarkasteltu laatta oli kooltaan 400 mm x 550 mm. Pitkän laskenta-ajan takia ylärajataajuus rajoitettiin 10 000 Hz:iin. Tässä kappaleessa kokonaisäänitehotason muutoksella tarkoitetaan A-painotettua kokonaisäänitehotason muutosta terssikaistoilla 20 Hz - 2 500 Hz.

Terssikaistat 20 Hz - 10 000 Hz jaettiin yhteensä noin 1 000 laskentataajuuteen siten, että esimerkiksi 31.5 Hz terssikaistalla taajuusresoluutioksi valittiin 0.5 Hz ja 4 000 Hz terssikaistalla

14.5 Hz. Lisäksi laskentataajuuksiksi valittiin mallinnetun rakenteen ominaistaajuuudet tarkastellulla taajuusalueella.

Herätevoima. Tulosten perusteella voidaan todeta säteilyindeksin, nopeustason ja näin ollen myös äänitehotason olevan herätteen taajuuden ja sijainnin funktio. Tämä selittyy värähtelymoodien erilaisella "heräämisellä". Herätteen sijainnin merkitys on suurempi pienillä kuin suurilla taajuuksilla.

Materiaali. Teräksen ja alumiinin ominaisjäykkyys eli kimmomodulin suhde tiheyteen on sama. Tästä syystä myös ominaistaajuuudet, ominaismuodot, herätteen synnyttämä nopeuskentän muoto ja säteilyindeksit ovat samat. Teräslaatan alhaisemmasta nopeustasosta johtuen sen säteilemä kokonaisäänitehotaso on pienempi kuin vastaavan alumiinilaatan.

Kimmomodulin vaikutusta tutkittiin valurautalaatan kimmomodulia muuttamalla. Nopeustason kuvaajia verrattiin logaritmisella asteikolla. Kuvaajat olivat lähes identtiset, hyvin pienten alustojen alentuminen ja ominaistaajuuksien kasvu oli havaittavissa suuremmasta kimmomodulista johtuen. Kimmomodulin suurentaminen 105 GPa:sta 140 GPa:iin kasvatti kokonaisäänitehotasoa 1.3 dB.

Tiheyden vaikutusta tutkittiin kaksinkertaistamalla teräksen tiheys, jonka seurauksena sekä säteilyindeksi että nopeustaso laskivat siten, että kokonaisäänitehotaso laski 8 dB.

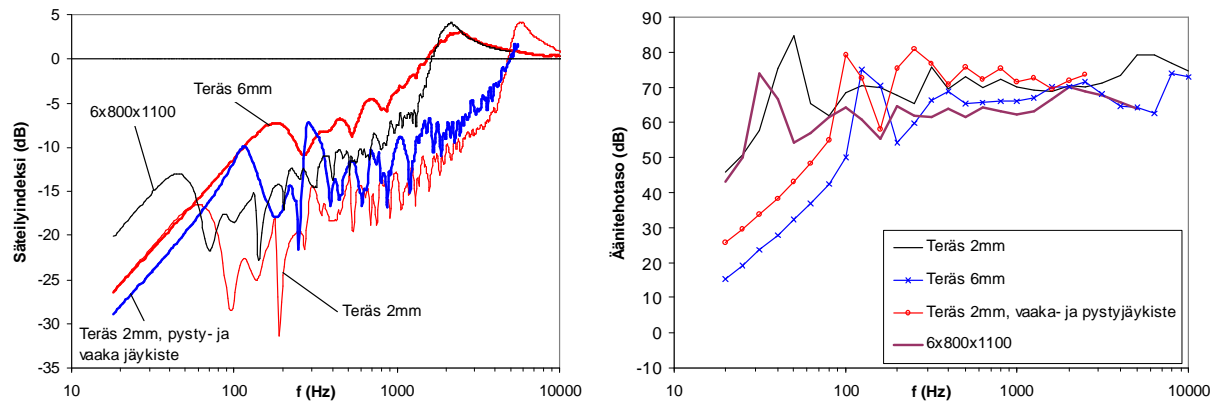
Vaimennus. Teräslaatan vaimennuksen kasvattaminen yhdestä prosentista kahteen prosenttiin laski äänitehotasoa alimpien ominaistaajuuksien kohdalla noin 6 dB. Ominaistaajuuksien väliin taajuusalueen äänitehotasoihin vaimennuksen lisäyksellä ei ollut vaikutusta. Korkeammilla taajuuksilla (> 4 kHz) vaikutus oli luokkaa 2 dB. Kokonaisäänitehotaso teräslaatalta laski 3.4 dB.

Paksuus. Säteilyindeksin vaihtelu taajuuden funktiona on sitä suurempi mitä ohuemmasta laatasta on kyse. Paksun laatan säteilyindeksi on suurempi, eli äänensäteily on tehokkaampaa kuin ohuen laatan. Toisaalta paksun laatan nopeustaso on pienempi kuin ohuen laatan. Näin ollen paksuuden lisäys laskee kokonaisäänitehotasoa. Esimerkiksi paksuuden lisäys 2 mm:stä 6 mm:iin laski alumiinilaatalta kokonaisäänitehotasoa 1.9 dB ja vastaavasti teräksellä 1.5 dB.

Koko. Laatan pienentäminen suurensi ominaistaajuuksia ja kasvatti keskimääräistä säteilyindeksiä. Kumpikin muutos vaikuttaa kokonaisäänitehotasoa nostavasti, mutta esimerkiksi 6 mm teräksellä pinta-alan pienentäminen neljäsosaan nosti kokonaisäänitehotasoa vain 1.2 dB.

Jäykisteet. Jäykisteiden vaikutusta tutkittiin kahdella eri mallilla. Toisessa tapauksessa jäykiste lisättiin keskelle laattaa pitemmän sivun suuntaisesti ja toisessa oli vielä lisäksi poikittainen jäykiste. Herätevoima ei kohdistunut jäykisteisiin. Jäykisteiden todettiin kasvattavan säteilyindeksiä. Edellä todettiin, että dimensioita pienennettäessä laatan äänensäteily tehostui. Voidaan ajatella, että jäykisteet jakavat laatan useampaan dimensioiltaan pienempään laattaan kasvattaen näin kokonais-säteilyindeksiä [5]. Kokonaisäänitehotasot kasvoivat 6 mm alumiinilaatalta yhden jäykisteen tapauksessa 0.9 dB ja kahden jäykisteen tapauksessa 1.2 dB. Vastaavasti 2 mm:n teräslaatalta 1 dB ja 2.5 dB.

Edellä mainittujen tekijöiden vaikutusta säteilyindeksiin ja äänitehotasoon on havainnollistettu kuvassa 1. Äänitehotasot lasketuille laatoille on esitetty taulukossa 1.



Kuva 1. Eri tekijöiden vaikutus säteilyindeksiin ja äänitehotasoon.

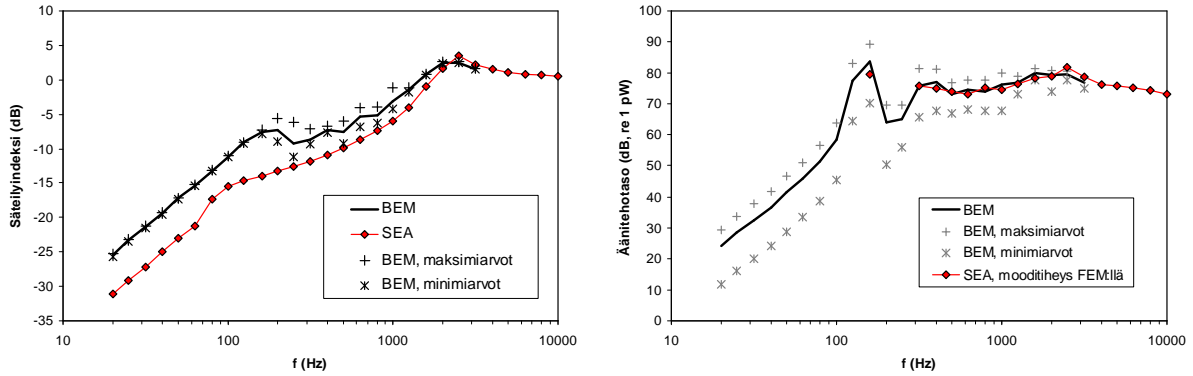
Taulukko 1. A-painotetut kokonaisäänitehotasot eri laatoilla 2 500 Hz terssikaistaan asti laskettuna. Laatan koko 400 mm x 550 mm ellei toisin mainita, h on laatan paksuus.

Rakenne	$h = 2$ mm	$h = 4$ mm	$h = 6$ mm
Alumiini	106.0	105.4	104.1
Teräs	96.7	95.8	95.2
Teräs, $\rho = 2\rho_{\text{teräs}}$			86.9
Teräs, $\zeta = 2\zeta_{\text{teräs}}$			91.8
Valurauta, $E = 105$ GPa			89.0
Valurauta, $E = 140$ GPa			90.3
Alumiini, pystyjäykiste			105.0
Teräs, pystyjäykiste	97.7		
Alumiini, X-jäykiste			105.3
Teräs, X-jäykiste	99.2		
Teräs, 800 mm x 1100 mm			94.0

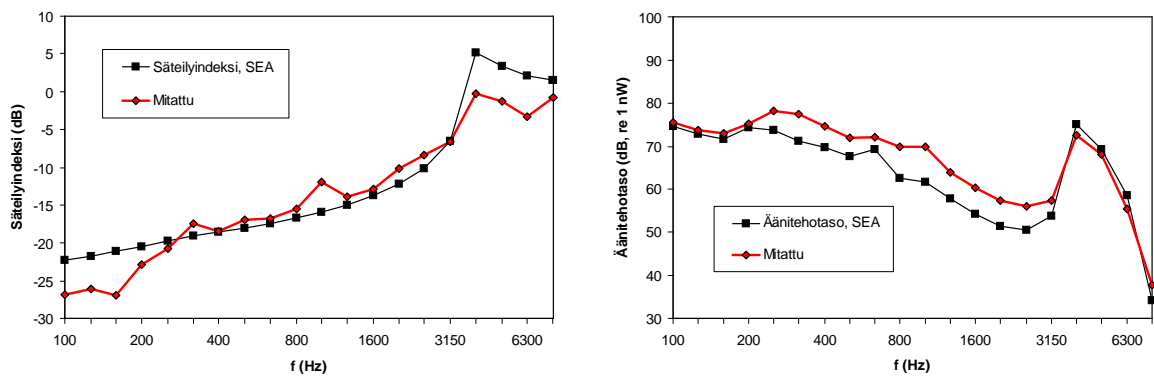
4 TULOSTEN VERTAILU

FEM/BEM ja SEA tuloksia vertailtiin 6 mm paksulla alumiinilaatalla. SEA laskennassa mallissa käytettiin elementtimenetelmällä laskettuja ominaistajuustiheyksiä. Kuvassa 2 on säteilyindeksin ja äänitehotason mallinnustulokset terssikaistoittain. Lisäksi BEM tuloksista on esitetty kymmenen eri herätepisteen sijainnin aiheuttama hajonta. Alimman ominaistajuuden yläpuolisella taajuusalueella korrelaatio on melko hyvä kun lisäksi otetaan huomioon, että SEA-tarkastelussa laatta ei ole asennettu äärettömälle tasolle.

Mallinnustulosten verifioimiseksi mitattiin ääniteho ja keskimääräinen värähtelynopeus kahden huoneen väliseen aukkoon asennetusta 3 mm paksusta teräslevystä. Aukon mitat olivat 1 m x 1 m. Levy herätettiin sähködynaamisella tärstimellä. Vaste mitattiin vastakkaiselta puolelta intensiteettisondilla sekä kiihtyvyyssantureilla. Herätepisteitä oli kolme ja värähtely mitattiin kahdestatoista satunnaisesti valitusta pisteestä. Kuvassa 3 on mittaustulokset yhdessä SEA-tulosten kanssa.



Kuva 2. FEM/BEM ja SEA tulosten vertailu, säteilyindeksit (vasen) ja äänitehotasot.



Kuva 3. Neliömetrin kokoisen, 3 mm paksun teräslevyn mitattu ja SEA:lla laskettu säteilyindeksit (vasen) ja äänitehotasot.

5 YHTEENVETO

Värähtelevän tasomaisen tai kaarevan osapinnan äänensäteily on useissa koneissa yksi merkittävä melusyntymekanismi. Syntyvään äänitehoon vaikuttavat useat tekijät taajuusriippuvasti. Rakennemuutosten vaikutusten karkeaa arviointia voidaan tehdä nyrkkikaavoilla. Tarkempi analysointi pystytään helposti tekemään koko audioalueella käyttäen numeerisia mallinnusmenetelmiä. Numeerisen mallinnuksen ongelmat liittyvät reunaehtoihin, koneyksilöiden ominaisuuksien hajontaan ja todellisten häätteen tarkkaan kuvaamiseen. Pelkän osajärjestelmän mallinnus voi myös vaikuttaa tuloksiin, ääniteho joko kasvaa tai pienentyy. Suurten koneiden mallinnuksessa dimensiot voivat tuottaa ongelmia ja alentaa analyysin ylärajataajuutta.

LÄHTEET

1. BLEVINS R, Formulas for natural frequency and mode shape. Krieger Publishing Company, Florida, 1995.
2. FAHY F, Sound and Structural Vibration. Academic Press Inc. (London) Ltd, 1985.
3. SYSNOISE manual, Revision 5.6.
4. STORM R, Das Geräuschverhalten typischer Maschinenstrukturen, Heft 84, FFM e.V., Frankfurt 1980.
5. S. Le MOYNE, J-L. TÉBEC, J-C KRAEMER, Source Effect of Ribs in Sound Radiation of Stiffened Plates. *ACUSTICA*, Vol. 86(2000), 457-464.