VÄRÄHTELYN ETENEMINEN RAKENTEISSA JA ÄÄNEN SÄTEILY

Lasse Lamula[1], **Kari Saarinen**[2]

[1] Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
PL 1300
33101 TAMPERE
etunimi.sukunimi@vtt.fi

[2] Bofinksvägen 31
15157 Södertälje
Ruotsi
kps.tre@gmail.com

Tiivistelmä

Hiljaisen tuotteen suunnittelun lähtökohtana on usein jo tuotannossa olevan version meluominaisuuksien määritys eli äänilähteiden ja niiden keskinäisen merkittävyyden selvittäminen. Perusteellisempi äänen syntymekanismeihin perehtyminen ja hiljaisempien rakenneratkaisujen kehittely edellyttävät jotain enemmän. Tavoitteena tulee olla riittävän hiljainen kone, jolloin ei tarvita prototyypin päälle rakennettuja meluntorjuntavirityksiä, vaan ne on jo ”piilotettu” valmiin koneen rakenteisiin osana suunnitteluprosessia. Värähtelevän rakenteen äänensäteily on useissa koneissa merkittävä melun-syntymekanismi. Lisäinformaatiota siitä, mitä rakenteissa tapahtuu, saadaan numeerisella koneen tai koneen osan mallilla ja erilaisilla värähtely- ja äänimittauksilla.

Runkoäänen etenemistä koneen rakenteissa tarkastellaan usein koneen kahden eri osan liitoksessa. Herätemekanismit vaikuttavat rakenteeseen A (lähde) ja mekaaninen värähtely etenee osaan B (vastaanotin). Lähteen ja vastaanottimen dynaamiset ominaisuudet liitoksessa voidaan suunnitella sellaisiksi, että runkoäänen siirtyminen on tehotonta. Tällöin lähteen ja vastaanottimen liitoksiin luodaan mahdollisimman suuri mobiliteettiepäsovitus. Liitoskohtien mobiliteetit vaikuttavat myös rakenteiden äänensäteilyyn.

Koneen pinnan värähtelynopeus ja säteilysuhde määräävät syntyvän äänitehon. Säteilysuhde kuvaa kuinka tehokkaasti pinnan värähtely kytkeytyy ääneksi. Rakenteen mekaanisten ominaisuuksien lisäksi se on riippuvainen mm. myös herätteistä ja siirtoteistä. Tässä paperissa havainnollistetaan esimerkein mobiliteettisovituksen ja säteilysuhteen vaikutusta äänitehoon.

1 JOHDANTO

Värähtelevän rakenteen äänitehon määritys tehdään standardoiduilla menetelmillä äänenpaine tai äänenintensiteettimittauksin. Intensiteettimittaus ja poissulkemismenetelmä

© 2019 Lasse Lamula ja Kari Saarinen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

mahdollistavat värähtelevän rakenteen osien merkittävyysjärjestyksen selvittämisen, osalähteiden äänitehot. Varsinaiset äänensyntymekanismit jäävät tuntemattomiksi. Tässä paperissa havainnollistetaan esimerkein, mitä on tehtävissä syvällisemmän ymmärryksen hankkimiseksi.

2 HERÄTEVOIMA JA SEN SYNNYTTÄMÄ RUNKOÄÄNITEHO

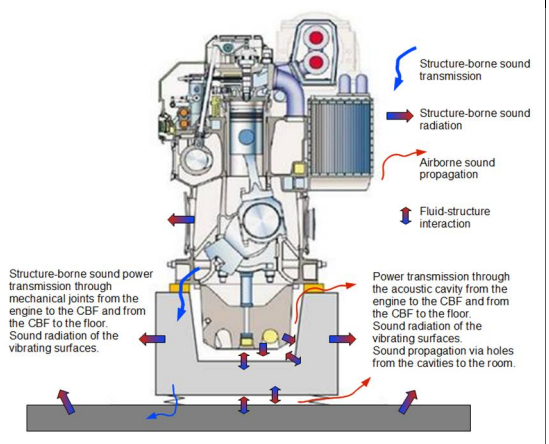
Perinteisesti koneen todellisia herätevoimia ei ole pystytty määrittämään. Laskelmissa rakenteiden vertailu on tehty vakiovoimilla halutulla taajuuskaistalla. Herätesuureina on voitu käyttää arvioituja tai jos mahdollista mitattuja pistevoimia, -momentteja, siirtymiä, nopeuksia, kiihtyvyyksiä tai tasan jakautunutta painetta. Monikappaledynamiikalla tai CFD-mallinnuksella voidaan päästä lähemmäs todellisia herätteitä.

Pistevoiman (F) rakenteeseen synnyttämä runkoääniteho (P) on riippuvainen rakenteen dynaamisista ominaisuuksista eli kohdistuspisteen mobiliteetista (Y) [1].

$$P = \frac{1}{2}\mathrm{Re}(F v^*) = \frac{1}{2}|F|^2\,\mathrm{Re}(Y) \tag{1}$$

3 RUNKOÄÄNEN ETENEMINEN RAKENTEISSA

Värähtelyn etenemistä on hankalaa tarkastella koko rakenteessa. Usein tarkastellaan runkoäänitehon siirtymistä sopivasta paikasta valitun liitoksen yli. Kuvassa on havainnollistettu runkoäänitehon siirtymistä moottorista alustaan ja eri osien äänen säteilyä ja ilma-/nesteäänen ja rakenteen värähtelyn yhteisvaikutusta.



$$P = \tfrac{1}{2}|v_{sf}|^2\,\mathrm{Re}(Y_r)/\,|Y_r + Y_s|^2 \tag{2}$$

$$P = \tfrac{1}{2}|v_c|^2\,\mathrm{Re}(Y_r)/\,|Y_r|^2 \tag{3}$$

$$P = \tfrac{1}{2}\mathrm{Re}(\boldsymbol{v}_{sf}^T(\boldsymbol{Y}_s + \boldsymbol{Y}_r)^{-1}\boldsymbol{Y}_r^*((\boldsymbol{Y}_s + \boldsymbol{Y}_r)^{-1})\boldsymbol{v}_{sf}^*) \tag{4}$$

$$P = \tfrac{1}{2}\mathrm{Re}(\boldsymbol{v}_c^T\boldsymbol{Y}_r^{-1}\boldsymbol{v}_c^*) \tag{5}$$

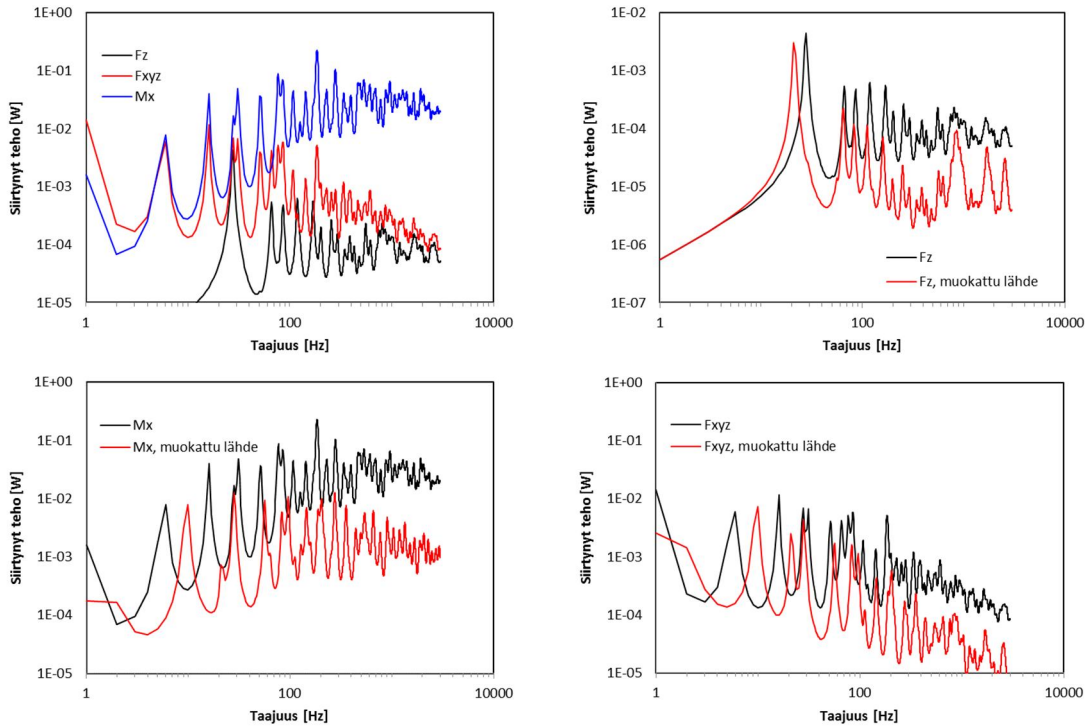
v_{sf} on lähteen vapaa nopeus
v_c on kytketty nopeus
Y_r on vastaanottimen mobiliteetti
Y_s on lähteen mobiliteetti

Kuva 1. Periaatekuva tehonsiirtoreiteistä liitoksen ympäristössä. Liitoksen yli siirtyvän runkoäänitehon laskentakaavat vapaan ja kytketyn nopeuden avulla määritettynä (matriisit lihavoituina).

Käytettävissä on useita menetelmiä, joista yleisin perustuu liitospisteiden mobiliteettien ja nk. vapaan nopeuden avulla liitoksen yli siirtyvän runkoäänitehon analysointiin [2]. Vapaa nopeus (v_f) määritetään koneen (lähde) toimiessa normaalisti kaikki liitospisteet irrotettuna. Mallilla tämä on helppoa, mutta jos kyseessä on puhdas mittaus, parempi vaihtoehto on liitosten kytketyillä nopeuksilla tapahtuva analyysi [2]. Kytketty nopeus (v_c) määritetään koneen toimiessa normaalisti. Menetelmän valinta voidaan tehdä tapauskohtaisesti, riippuen siitä mitä analyysillä haetaan. Yleisessä tilanteessa analyysi

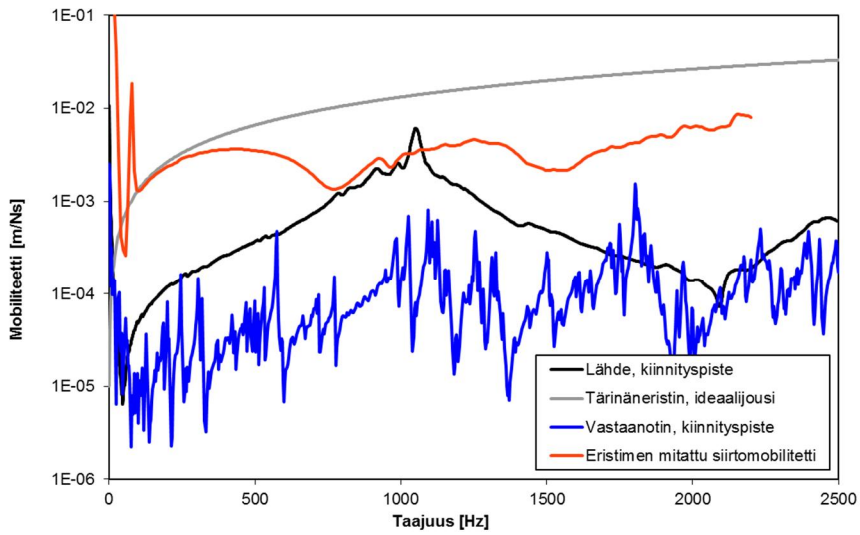
tehdään matriisilaskentana. Mallilla voidaan käyttää jopa täysiä matriiseja, mutta mitattaessa käytössä ovat käytännössä vain translaatiovapausasteet.

Tarkastellaan esimerkkinä teräspalkin (lähde 0.01 x 0.01 x 3 m) ja teräslaatan (vastaanotin 1.0 x 0.8 x 0.005 m) välistä pisteliitosta. Palkin pitkittäissuunta on laatan pintaa vastaan kohtisuorassa (z). Tutkitaan kolmea erilaista herätetapausta palkin vapaassa päässä: a. aksiaalisuunnassa $F_z(f)$= 1 N / per taajuus, b. kolmessa translaatio suunnassa $F_x(f)$ = $F_y(f)$ = $F_z(f)$ = 1 N ja c. momentti x-akselin ympäri $M_x(f)$ = 1 Nm. Herätteen vaikutusta liitospisteen yli siirtyvään runkoäänitehoon on havainnollistettu kuvassa 2 (vasen yläkuva).



Kuva 2. Kolmella eri herätteellä pisteliitoksen yli siirtynyt kokonaisrunkoääniteho (6 dof), sekä lähteen rakennemuutoksen (palkin poikkileikkaus nelinkertaistettu) vaikutus siirtyneeseen tehoon.

Seuraavassa kuvassa on esimerkki mobiliteettisovituksen haittavaikutuksista. Kyseessä on työkoneen ohjaamon tärinäneristys, joka synnytti meluongelman odottamattoman suurilla taajuuksilla (800 Hz….1 kHz). Kuvassa on rungon puolelta mitattu eristimen kiinnityspisteen syöttöpistemobiliteetti ja vastaava suure ohjaamon (vastaanotin) puolelta. Tärinäneristin on esitetty ideaalijousena ja mitattuna siirtomobiliteettina. Tilanne ei näytä pahalta, jos vertaillaan ideaalijousen ja lähteen (rungon) mobiliteetteja. Lähteen mobiliteetin huiput ovat tasoltaan huomattavasti alempia kuin ideaalijousen mobiliteetti. Eristimen mittaustulos sen sijaan paljastaa, että kyseisen eristimen ensimmäinen aksiaalinen ominaistaajuus on luokkaa 770 Hz, mikä näkyy kuoppana eristimen siirtomobiliteetissa ja tekee tilanteesta hyvin epätoivotun.



Kuva 3. Mobiliteettisovituksen aiheuttama melu- ja värähtelyongelma 1 kHz alapuolella.

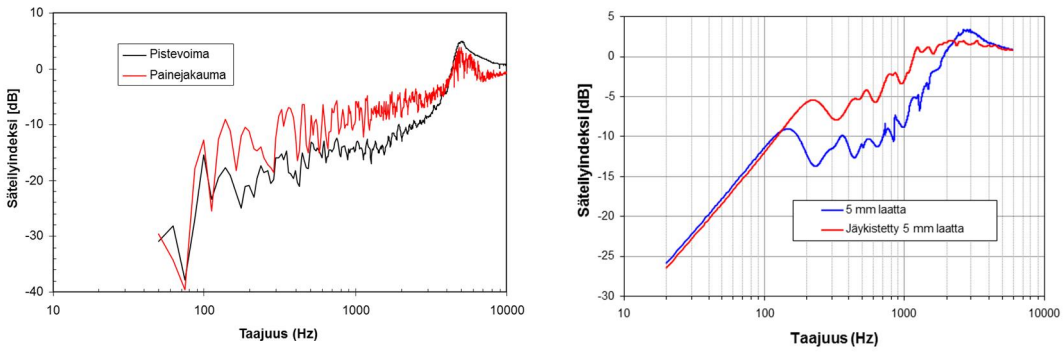
4 SÄTEILYSUHDE JA ÄÄNITEHO

Säteilysuhde on värähtelevän pinnan pinta-alayksikköä kohden säteilemän äänitehon suhde samalla tehollisella keskimääräisellä värähtelynopeudella värähtelevän männän pinta-alayksikköä kohden säteilemään äänitehoon (edellyttäen, että männän piiri on huomattavasti suurempi kuin aallonpituus: $ka >> 1$) [3].

$$\sigma = P / P_0 \,, \tag{6}$$

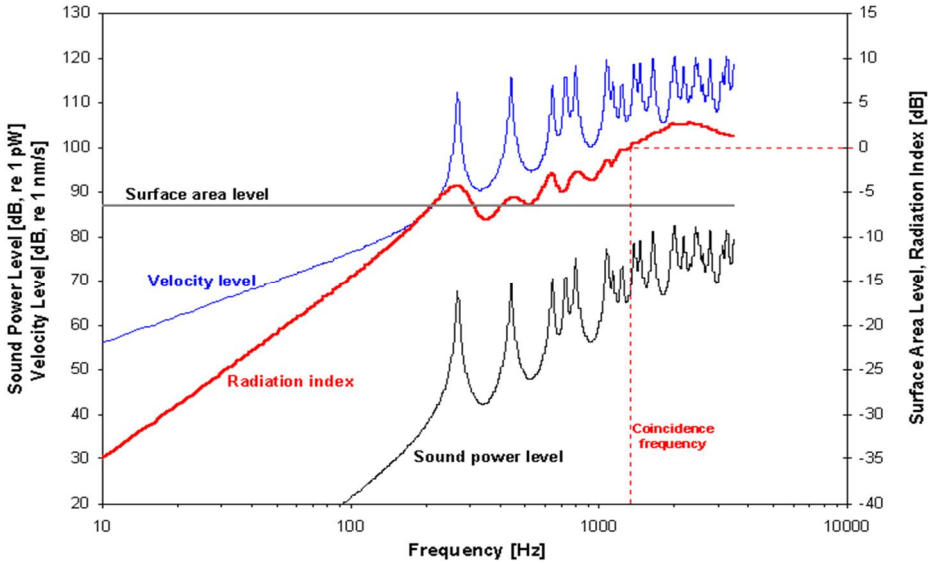
missä $P_0 = \rho\ c \int \langle v^2 \rangle\ dA$. Se kuvaa kuinka tehokkaasti lähde säteilee ääntä taajuuden funktiona. Säteilyindeksi on säteilysuhteen kymmenlogaritmi kerrottuna kymmenellä. Säteilysuhde on hankala määrittää. Mekaanisten ja materiaaliominaisuuksien lisäksi se on merkittävästi riippuvainen myös herätteestä.

Koinsidenssi on tilanne, jossa rakenteessa etenevän taivutusvärähtelyn aaltoluku ($k = 2\pi/\lambda$) on yhtä suuri kuin kohtaavan tai säteillyn ääniaallon aaltolukuvektorin projektio taivutusaallon etenemissuunnassa [4]. Koinsidenssin rajataajuus (kriittinen taajuus) määrittää rajataajuuden, jonka yläpuolella säteilysuhde lähestyy yhtä. Esimerkiksi teräksellä, alumiinilla ja lasilla kriittinen taajuus on 12 kHz jaettuna laatan paksuudella millimetreinä.



Kuva 4. Vasemmalla herätteen vaikutus säteilyindeksin taajuusjakaumaan. Pintaa vastaan kohtisuora pistevoima ja painejakauma (mittaustulos). Oikealla jäykisteen vaikutus säteilyindeksin taajuusjakaumaan (FEM + BEM).

Pistevoimaherätteellä kriittisen taajuuden alapuolella ominaismuodot määrittävät laatan värähtelynopeusjakauman. Ensimmäinen puolikasaalto säteilee ääntä tehokkaasti. Laatta värähtelee tällä ominaismuodolla (1,1), kunnes aallon pituuden lähestyessä toisen moodin dimensioita värähtelyjakauma muuntuu toisen ominaismuodon kaltaiseksi (2,1) tai (1,2) (ei neliölaatta). Näin määräytyy koko taajuuskaistan värähtelynopeusjakauma ominaismuotojen määrittäminä. Mitä suurempi taajuus sitä enemmän puolikasaaltoja laattaan syntyy. Koska värähtelymuotojen vierekkäiset kuvut ovat vastakkaisessa vaiheessa, niiden välille syntyy akustinen kytkentä, joka pienentää rakenteen säteilemää äänitehoa. Pistevoima herätteellä saadaan säteilysuhteen minimiarvot. Vastaavaa symmetristä värähtelynopeusjakaumaa ei saada muilla herätteillä.



Kuva 5. Värähtelevän rakenteen äänensäteilyyn vaikuttavat tekijät taajuusjakaumina.

Värähtelevän rakenteen säteilemä ääniteho (W) saadaan yhtälöstä

$$W = \rho\, c\, \sigma\, A \langle v^2 \rangle, \tag{7}$$

missä ρ on väliaineen tiheys, c äänennopeus väliaineessa, A pinta-ala ja $\langle v^2 \rangle$ neliöllisesti keskiarvotettu värähtelynopeus. Kaava esitetään usein logaritmisena dB-asteikolla:

$$L_W = L_\sigma + L_v + L_A - 33.9 \text{ dB} \tag{8}$$

Äänitehotaso on $L_W = 10\log(P/10^{-12})$ W, säteilyindeksi $L_\sigma = 10\log(\sigma)$, neliöllisesti keskiarvoitettu pintaa vastaan kohtisuora värähtelynopeustaso $L_v = 10\log(\langle v^2 \rangle / (10^{-9}\,\text{m/s})^2)$ ja pinta-alataso $L_A = 10\log(A/1\text{m}^2)$. Kun väliaineena on ilma vakio –33.9 dB saadaan ilman tiheyden (ρ_i = 1.188 kg/m^3, 20 °C ja 1 x 10^5 Pa), äänen nopeuden ilmassa (c_i = 343.3 m/s, 20 °C) ja standardoitujen vertailulukujen avulla.

$$10\log_{10}\left(\frac{\rho_i\, c_i \left(10^{-9}\,\text{m/s}\right)^2}{10^{-12}\ \text{W}}\right) = -33.9 \text{ dB} \tag{9}$$

Reunaelementtimenetelmä määrittää pinnan äänenpaine jakauman käyttämällä herätteenä pinnan värähtelynopeusjakaumaa. Ja kappaleen säteilemä ääniteho saadaan kaavalla 10. Säteilysuhde voidaan määrittää erikseen.

$$P = \frac{1}{2} \oint \mathrm{Re}\left(p^{*} v\right) \, dA. \tag{10}$$

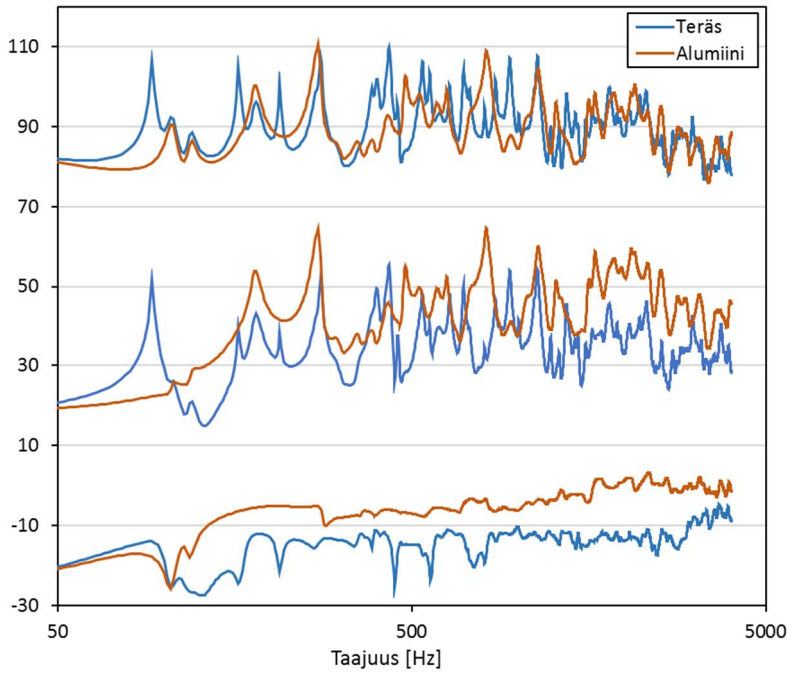
Kolmas tapa määrittää ääniteho on käyttää ISO 3744 kaukokentän pisteiden äänenpaineita ja mittauspinnan pinta-alatasoa (Kaava 11). Periaatteessa myös äänenintensiteetti menetelmällä voidaan määrittää kappaleen ääniteho. Sitä on käytetty lähinnä vain mittauksissa.

$$L_W = L_p + L_A \tag{11}$$

5 ESIMERKKI

Massiiviseen värähtelevään kappaleeseen kiinnitetyn laatan äänitehoon vaikuttavat tekijät ovat: Laattaan siirtyvä runkoääniteho sekä laattaan syntyvän taivutusvärähtelyn säteilysuhde. Tarkastellaan 400 mm x 500 mm laattoja. Teräslaatan paksuus on 2 mm ja alumiinilaatan 6 mm.

Kappaleen värähtely synnytetään vakiovoimalla, jonka kohdistuspisteestä syntyvä värähtely etenee useita siirtoteitä pitkin laattaan kappaleiden välisen viivaliitoksen kautta. Vakiovoiman synnyttämä runkoääniteho lasketaan kaavalla 1. Syöttöteho on likimäärin yhtä suuri molemmilla laatoilla, koko taajuuskaistalla. Laatoilla ei siis ole juurikaan vaikutusta voiman syöttöpisteen mobiliteettiin eikä kappaleeseen siirtyvään runkoäänitehoon. Koska laatalla ei ole muita herätteitä, siihen syntyvä taivutusvärähtely on verrannollinen viivaliitoksen yli siirtyvään runkoäänitehoon. Eli laattojen ja massiivisen kappaleen välisen liitoksen vertailu tehdään laatan pinnan neliöllisen värähtelynopeuden avulla (kuva 6). Vastaavasti laattojen säteilemän äänitehon määrää säteilysuhde (kuva 7).



Kuva 8. Laattojen värähtelynopeustaso, äänitehotaso ja säiteilyindeksi.

Analyysin tuloksena saadaan paljon enemmän informaatiota kuin esimerkiksi laatan intensiteettimittauksella.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Koneen tai laitteen validoitu vibro-akustinen malli mahdollistaa melu- ja värähtelyominaisuuksien tehokkaan suunnittelun. Värähtelevien rakenteiden äänensäteily on useimmissa koneissa yksi merkittävistä äänen syntymekanismeista. Nykyisin koneen meluominaisuudet ilmoitetaan kokonaisäänitehotasona ja/tai käyttäjänpaikan emissioäänenpainetasona. Äänitehotaso on käyttökelpoinen lähdekuvaus, jota voidaan hyödyntää koneen sijoittelupaikan valinnassa ja suunnittelussa.

Mutta miten ääni syntyy koneessa? Klassinen, heräte - siirtotie - vaste, vastaa kysymykseen melko abstraktisti. Käytännössä tämän ketjun avaaminen ja perusteellisempi äänen syntymekanismeihin perehtyminen mahdollistavat hiljaisempien rakenneratkaisujen integroimisen koneen rakenteisiin osana suunnitteluprosessia. Tällöin ei tarvita prototyypin päälle rakennettuja meluntorjuntavirityksiä.

VIITTEET

[1] L. Cremer and M. Heckl, *Structure-Borne Sound*, 2nd ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1988.

[2] S. Aatola, A. Kinnunen, P. Klinge, and K. Saarinen, “Mechanical vibration: Source strength and power transmission estimate - Methods and guidelines for measurements and modelling,” Espoo, VTT-R-01354-08, 2008.

[3] F. Fahy, *Sound and Structural Vibration*. London: Academic Press, 1985.

[4] K. Saarinen and J. Tanttari, *Työkoneiden melun vähentäminen : perusteet*. Helsinki: Metalliteollisuuden kustannus, 1995.