

# FE-SEA HYBRIDIMENETELMÄ

**Jukka Tanttari**

VTT

PL 1300, 33101 Tampere

etunimi.sukunimi@vtt.fi

## 1 JOHDANTO

Laskentakapasiteetti rajoittaa mallinnus- ja simulointimenetelmien valintaa ja käyttöä yhä vähemmän. Tämän kehityksen myötä elementti- ja reunamenetelmien hyödyntämismahdollisuudet autojen, koneiden ja laitteiden akustisten ominaisuuksien ja äänensäteilyn simuloinnissa ovat kasvaneet. Menetelmät voidaan valita tarkasteltavan tehtävän kannalta aiempaa tarkoituksenmukaisemmin. Laskentatehon riittävyuden lisäksi on olemassa muita rajoitteita. Nämä liittyvät tehtävän luonteeseen.

Vibroakustisiin järjestelmiin liittyvien mallinnustehtävien luonteen mukainen pääjako on deterministinen vs. tilastollinen (Random). Deterministisessä tehtävässä sekä heräte että järjestelmä ovat täsmällisesti tunnettuja. Tilastollisessa tehtävässä sekä heräte että järjestelmä ovat tilastollisesti tunnettuja, so. niiden odotusarvot tunnetaan, mutta yksityiskohdat ovat epävarmoja.

Tilastolliset herätteet (satunnaisherätteet) ovat tuttu käsite. Tilastolliseen järjestelmäänkään ei liity erityistä mystiikkaa. Otetaan esimerkiksi teräslaatta, jonka nimellinen paksuus on 3 mm. Jos laatan paksuus on joka kohdassa 3 mm ja materiaalit, mitat ja muoto samoin kuin reunaehdot tunnetaan tarkasti, on laatan vibroakustinen käyttäytyminen erittäin tarkasti ennakoitavissa mm. elementtimenetelmillä. Jos laatan ominaisuuksilla on keskiarvo ja hajonta, vaikkapa paksuudella  $3 \pm 0,2$  mm, tulee laatan vibroakustisen käyttäytymisen ennakointi yksittäisillä taajuuksilla ja yksittäisissä kohdissa vääjäämättä epäluotettavaksi taajuuden kasvaessa riittävän suureksi. Taajuuden ja paikan suhteen keskimääräinen käyttäytyminen on suurilla taajuuksilla ennakoitavissa hyvällä tarkkuudella käyttäen tilastollisia menetelmiä kuten SEA.

Herätteiden ja osajärjestelmien moninaisuuden sekä taajuusalueen laajuuden vuoksi käytännön vibroakustiset tehtävät sisältävät hyvin usein sekä deterministisiä että tilastollisia piirteitä. Menetelmät on tähän saakka jouduttu valitsemaan vain yhdestä näkökulmasta, mikä johtanut epätarkoituksenmukaisiin malleihin tai tehtävän liialliseen rajaamiseen.

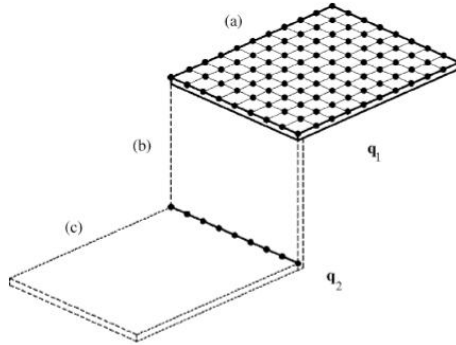
Deterministisen ja tilastollisen mallin luontevaa kytkemistä on haettu pitkään. Erilaisia elementtimallien tilastollistamis- ja jälkikäsitteilytekniikoita on sovellettu pitkään, samoin SEAmallien tarkentamista FE-laskennan avulla. R.S. Langley ja P. Bremner formuloivat determinististen ”globaalien” ja tilastollisten ”lokaalien” moodien pohjalta erään kytketyn ratkaisun [1], jota ei kuitenkaan saatu toimimaan tyydyttävästi. Läpimurto julkaistiin vuonna 2005 P. Shorterin ja R.S. Langleyn kahdessa artikkelissa [2,3]. Niissä kuvataan aaltotarkasteluun, tehotasapainoon sekä suoran kentän säteilyn ja kaiuntaisen diffuusin kentän herätekuormituksen väliseen yhteyteen perustuva kytketty FE-SEA -menetelmä. Menetelmää alettiin FE-SEA hybridimenetelmän nimikkeellä hyödyntää kaupallisessa ohjelmistossa [4].

VTT on soveltanut menetelmää sen julkistamisesta saakka sekä osallistunut menetelmää arvioivan kansainvälisen teollisen konsortion [5] toimintaan. Tässä paperissa kuvataan menetelmän pääpiirteitä sekä havainnollistetaan sen toimintaa yksinkertaisilla esimerkeillä.

## 2 FE-SEA HYBRIDIMENETELMÄ

Alla on tiivistelmä FE-SEA -hybridimenetelmän pääkohdista. Perusteellinen, tutustumisen arvoinen esitys löytyy viitteistä [2] ja [3]. Analyysissa voidaan erottaa seuraavat vaiheet:

1) Luodaan FE-malli järjestelmän deterministisestä, yksityiskohtia myöten tarkasti tunnetusta osasta. Luodaan vastaavasti tilastollisista osista SEA-osajärjestelmät. FE-osajärjestelmän vapausteet  $q$  voivat liittyä sekä laajaan osarakenteeseen ( $q_1$ ) että kahden SEA-osajärjestelmän väliseen liitokseen ( $q_2$ ), kuva 1.



Kuva 1. FE-SEA -malli [2]. (a) on FE- osajärjestelmä, (b) ja (c) SEA-osajärjestelmiä.

2) Kytetään FE- ja SEA -osajärjestelmät. Kytetyn FE-osajärjestelmän liikeyhtälö on

$$D_{tot} q = f_{ext} + \sum f_{rev} \quad (1)$$

$f_{ext}$  on ulkoinen herätevoima ja  $f_{rev}$  SEA-osajärjestelmän vasteesta aiheutuva diffuusi kaiuntainen herätevoima. Dynaaminen jäykkyyssmatriisi  $D_{tot}$  koostuu FE-osajärjestelmän osuudesta  $D_d$  ja SEA-osajärjestelmien suoran kentän osuudesta  $D_{dir}$ :

$$D_{tot} = D_d + \sum_k D_{dir}^{(k)} \quad (2)$$

Suoran kentän jäykkyyssmatriisia  $D_{dir}$  käytetään SEA -osajärjestelmiin siirtyvän tehon laskennassa.

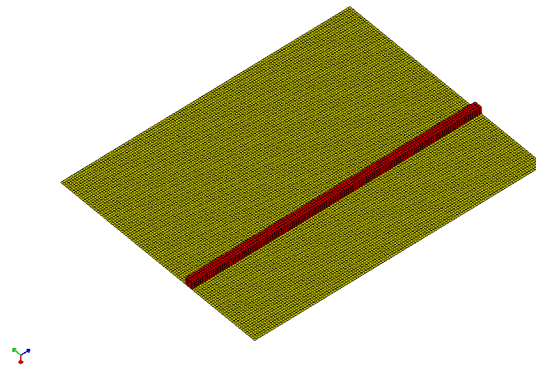
3) SEA-osajärjestelmän  $j$  tehotasapainoyhtälö on

$$\omega \eta_j E_j + \omega \eta_{d,j} E_j + \sum_k \omega \eta_{jk} n_j \left[ \frac{E_j}{n_j} - \frac{E_k}{n_k} \right] = P_{in,j} \quad (3)$$

$\omega$  on kulmataajuus,  $E$  värähtelyenergia,  $\eta_j$  ja  $\eta_{d,j}$  häviökertoimia,  $\eta_{jk}$  kytkentähäviökerroin,  $n_j$  ominaisuusominaisuudet ja  $P_{in}$  FE-osajärjestelmästä kohdistuva heräteteho. Tärkeät parametrit heräteteho ja kytkentähäviökerroin lasketaan FE-osajärjestelmän mallin avulla. Heräteteho lasketaan hybridiliitosten vapausasteet huomioiden yhtälöstä

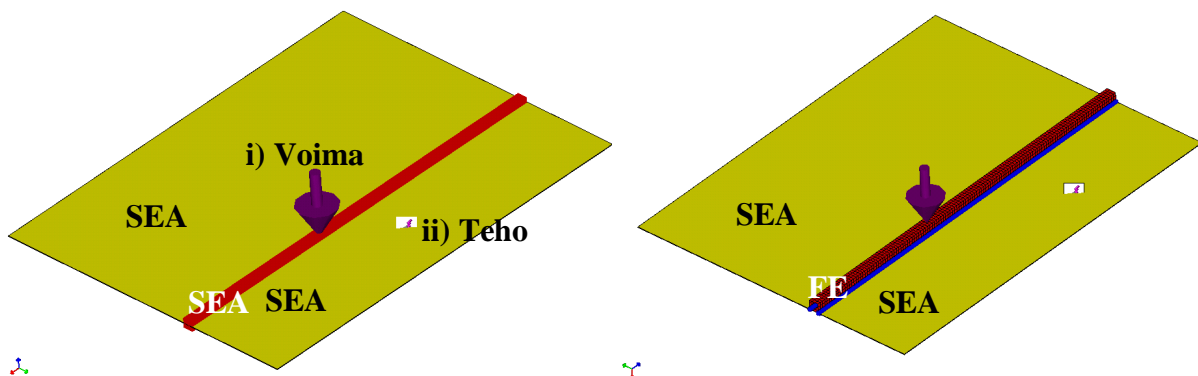
$$P_{in,j} = (\omega/2) \sum_{rs} \text{Im} \{ D_{dir,rs}^{(j)} \} (D_{tot}^{-1} S_{ff} D_{tot}^{-1*T})_{rs} \quad (4)$$



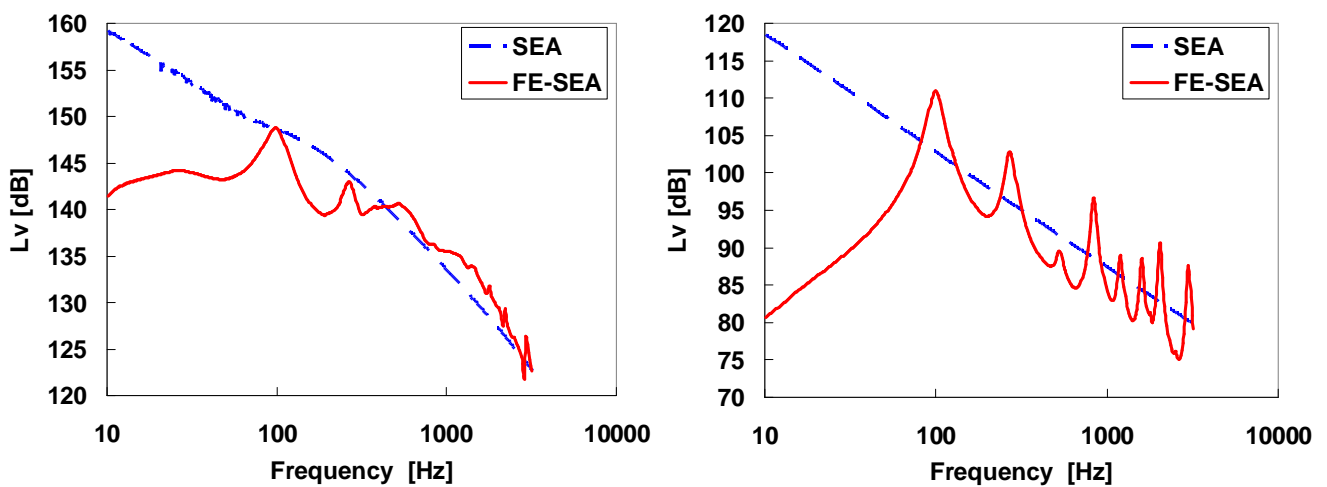


Kuva 3. Laatta-palkki-laatta teräsrakenne. Pienen laatan mitat [mm] ovat 2000x500x3 ja ison 2000x1000x3. Neliöputkipalkki on 50x50x2000x3. Palkki on päistään jäykästi kiinni.

Tarkastellaan kahta eri tapausta. Tapauksessa i) pieneen laattaan kohdistuu 1W/taajuuskaista heräteteho. Tapauksessa ii) palkkiin kohdistuu 1N/kaista pistevoimaheräte. Laskettava suure on ison laatan taivutusvärähtelyn keskimääräinen nopeustaso taajuusalueella 10...3200 Hz. Kuvassa 4 on SEA- ja FE-SEA -mallit. Laskentatulokset ovat kuvassa 5.

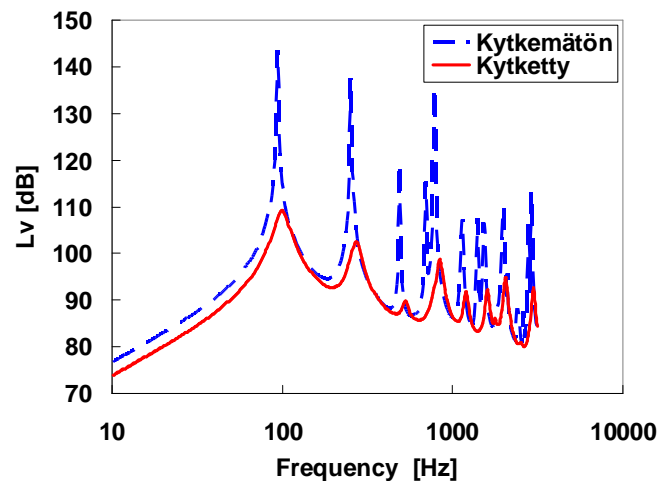


Kuva 4. Teräsrakenteen SEA-malli (oikealla) ja FE-SEA -malli (vasemmalla). Laattojen häviökerroin on 0,05 ja palkin 0,001.



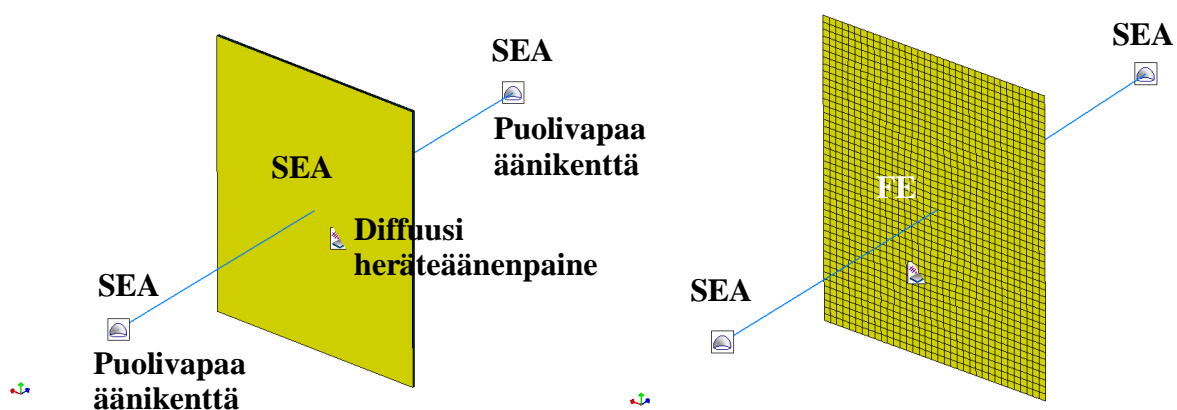
Kuva 5. Isomman laatan taivutusvärähtelyn nopeustaso SEA- ja FE-SEA -mallien mukaan. Vasen kuva: pienen laatan tehoheräte; oikea kuva: palkin pistevoimaheräte.

Tehoherätteen tapauksessa SEA-malli ja FE-SEA -malli antavat melko yhteneviä tuloksia palkin muutaman alimman ominaistaajuuden yläpuolella. Palkkiin kohdistuvan voimaherätteen tapauksessa tulosten trendi suurilla taajuuksilla on yhtenevä, mutta yksityiskohdat eroavat huomattavasti toisistaan. Suurempi ero johtuu herätetehon tarkemmasta laskennasta FE-SEA -mallissa. Ratkaisu on kytketty, eli laattojen jäykkyydet muuttavat palkin värähtelyominaisuuksia, näkyvät häviöinä ja niiden vaste vaikuttaa sen vasteeseen. Kuvassa 6 on palkin värähtelyvaste pistevoimaherätteelle kytkemättömänä (ilman laattoja) ja laattoihin kytkettynä.



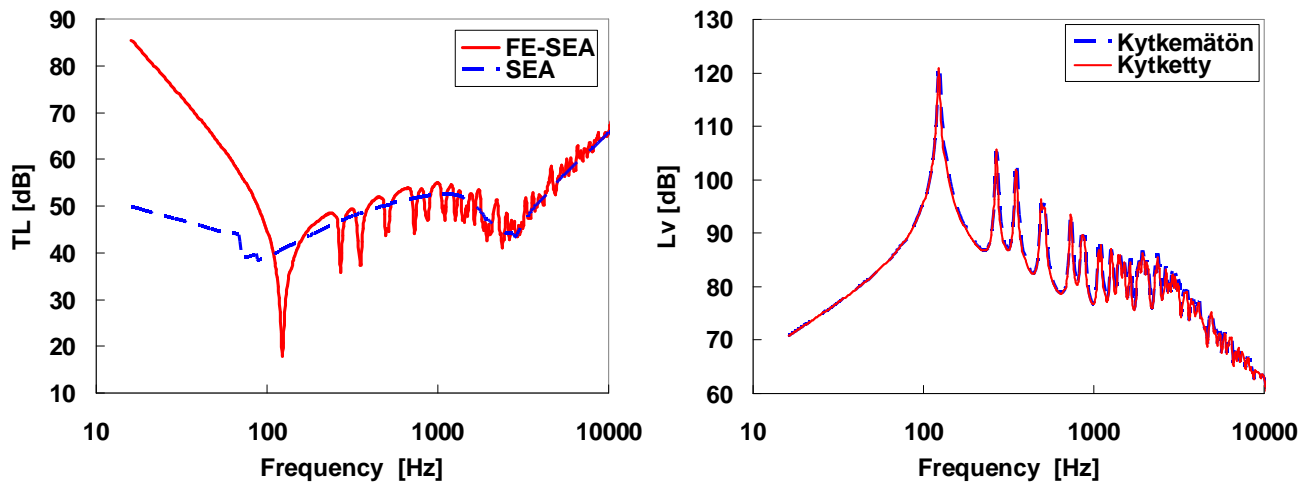
Kuva 6. Palkin kytkemätön ja kytketty vaste voimaherätteellä.

Ääneneristävyystehtävissä kiinnostavat taajuudet ovat usein pieniä ja keskisuuria. Eristävä rakenne on usein detaljikas. Toisaalta lähetys- ja vastaanottopuolen tilat ovat suuria ja niiden suhteen kiinnostaa ensisijaisesti ääniteho, ei äänikenttien yksityiskohdat. Tällöin FE-SEA malli on varsin luonteva työkalu. Kuvassa 7 vasemmalla yksikertaisen 400x500mm laatan ääneneristävyyden SEA- ja FE-SEA laskentamallit. Laskentatulokset nivelöidylle 5 mm teräslaatalle taajuusalueella 16...10000 Hz ovat kuvassa 8. Laatan häviökerroin on 0,02.



Kuva 7. Laatan ääneneristävyyden laskentamallit. SEA vasemmalla ja FE-SEA oikealla.

Kaksipuolinen kytkentä ilmaan ei juuri vaikuta 5 mm paksun teräsrakenteen värähtelyominaisuuksiin tai vasteeseen, kuva 8 oikea puoli. Kevytrakenteiden akustiikkaa samoin kuin rakenteiden äänensäteilyä veteen laskettaessa on kuormituksen vaikutus välttämätöntä huomioida.



Kuva 8. Laatan ääneneristävyys SEA- ja FE-SEA -mallien mukaan, vasen kuva; laatan kytkemätön ja kytkeyty vaste diffuusilla 1Pa herätteellä, oikea kuva.

#### 4 YHTEENVETO

FE-SEA -menetelmä tarjoaa uuden tehokkaan vibroakustisen mallinnustyökalun. Laajat mallit koostuvat pitkälti yllä esitetyistä yksinkertaisista perustapauksista. Vibroakustinen järjestelmä jaetaan käyttäjän päättämällä tavalla deterministiseen (pitkäaaltoiseen, globaalit muodot käsittelevään) ja tilastolliseen (lyhytaaltoiseen, lokalisoituneet moodit käsittelevään) osaan. Rakenteelliset ja akustiset osajärjestelmät käsitellään yhtäläisin periaattein.

Hybridimenetelmää on validoitu varsin laajasti esim. [6]. Suuren mittakaavan sovelluksia on julkaistu auto-, ilmailu- ja avaruussektorien tuotteista, [7], [8], [9]. VTT:llä menetelmää sovelletaan tuotantokäytössä erilaisiin koneakustiikan tehtäviin sekä mm. rakenteiden vedenalaisen äänensäätelyn laskentaan.

#### VIITTEET

1. LANGLEY, R.S. & BREMNER, P. A hybrid method for the vibration analysis of complex structural-acoustic systems. *J. Acoust. Soc. Am.* 105(1999)1, 1657-1671.
2. SHORTER, P. & LANGLEY, R.S. Vibro-acoustic analysis of complex systems. *J. Sound Vib.* 288(2005), 669-699.
3. SHORTER, P. & LANGLEY, R.S. On the reciprocity relationship between direct field radiation and diffuse reverberant loading. *J. Acoust. Soc. Am.* 117(2005)1, 85-95.
4. <http://www.esi-group.com/products/vibro-acoustics/va-one> 22.4.2009.
5. <http://www.esi-group.com/corporate/news-media/press-releases/2008-english-pr/esi-group-successfully-concludes-the-mari-consortium> 22.4.2009.
6. COTONI, V., SHORTER, P. & LANGLEY, R.S. Numerical and experimental validation of a hybrid finite element-statistical energy analysis method. *J. Acoust. Soc. Am.* 122(2007)1, 259-270.
7. LARKO, J. M. & COTONI, V., Vibroacoustic response of the NASA ACTS spacecraft antenna to launch acoustic excitation. *Proceedings ICSV 14*, Cairns, Australia 9-12 July 2007.
8. COTONI, V. et al. Advanced Modeling of Aircraft Interior Noise using the Hybrid FE-SEA method. *SAE Paper 2008-36-0575*.
9. CHARPENTIER, A., SREEDHAR, P. & FUKUI, K., Using the Hybrid FE-SEA method to predict structure-borne noise transmission in a trimmed automotive vehicle. *SAE Paper 2007-01-2181*.