

DIESELMOOTTORIN VIBROAKUSTINEN MALLINNUS

Kari Saarinen, Lasse Lamula, Matias Aura ja Hannu Tienhaara

VTT
PL 1300, 33101 TAMPERE
kari.p.saarinen@vtt.fi
lasse.lamula@vtt.fi

WÄRTSILÄ FINLAND Oy
PL 244, 65101 VAASA
matias.aura@wartsila.fi
hannu.tienhaara@wartsila.fi

1 JOHDANTO

Koneen tai laitteen tuotekehityksessä apuna käytettävä malli voi olla analyttinen tai kokemusperäinen yksinkertainen kaava, usean miljoonan vapausasteen yksityiskohtainen FE-malli tai mittaustulosten ja numeerisen mallin yhdistelmä. Myös mallin käyttömotiivit ovat moninaiset mm. lujuustekniikka, materiaalin valinta, valmistustekniikka, osarakenteen kuten laakerin toiminnan tarkastelu, prosessin hyötysuhde, päästöt, turvallisuus sekä melu ja värähtely. Mallinnuksella ja simuloinnilla saavutettavat kustannussäästöt perustuvat vähäisempiin prototyypivaiheen testaustarpeisiin, lisääntyneisiin kokonaisuuksien optimointimahdollisuuksiin, toimivampiin ja luotettavampiin rakenteisiin, tehokkaaseen materiaalien ominaisuuksien hyödyntämiseen sekä tuotannon vaatimusten ja mahdollisuuksien huomiointiin. Koko tuotekehityksen ja tuotannon tarpeita palveleva mallinnus on siis hyvin monipuolinen ja monimutkainen, useiden osaamisalueiden vuorovaikutteinen yhdistelmä. Osa työstä ja työkaluista lokeroituu omaksi, jopa irralliseksi kokonaisuudekseen, mutta monilla osa-alueilla voidaan hyödyntää samoja lähtökohtia. Esimerkkinä mainittakoon CAD-malli, jota pystytään suoraan, jopa automaattisesti käyttämään numeerisissa lujuusanalyseissä.

Virtuaalinen malli tarjoaa siis monipuoliset mahdollisuudet koneiden ominaisuuksien suunnitteluun, mitoitukseen sekä rakennevariaatioiden vertailuun ja optimointiin. Malli syventää myös ymmärrystä simuloitavaan tapahtumaan liittyvistä fysikaalisista ilmiöistä.

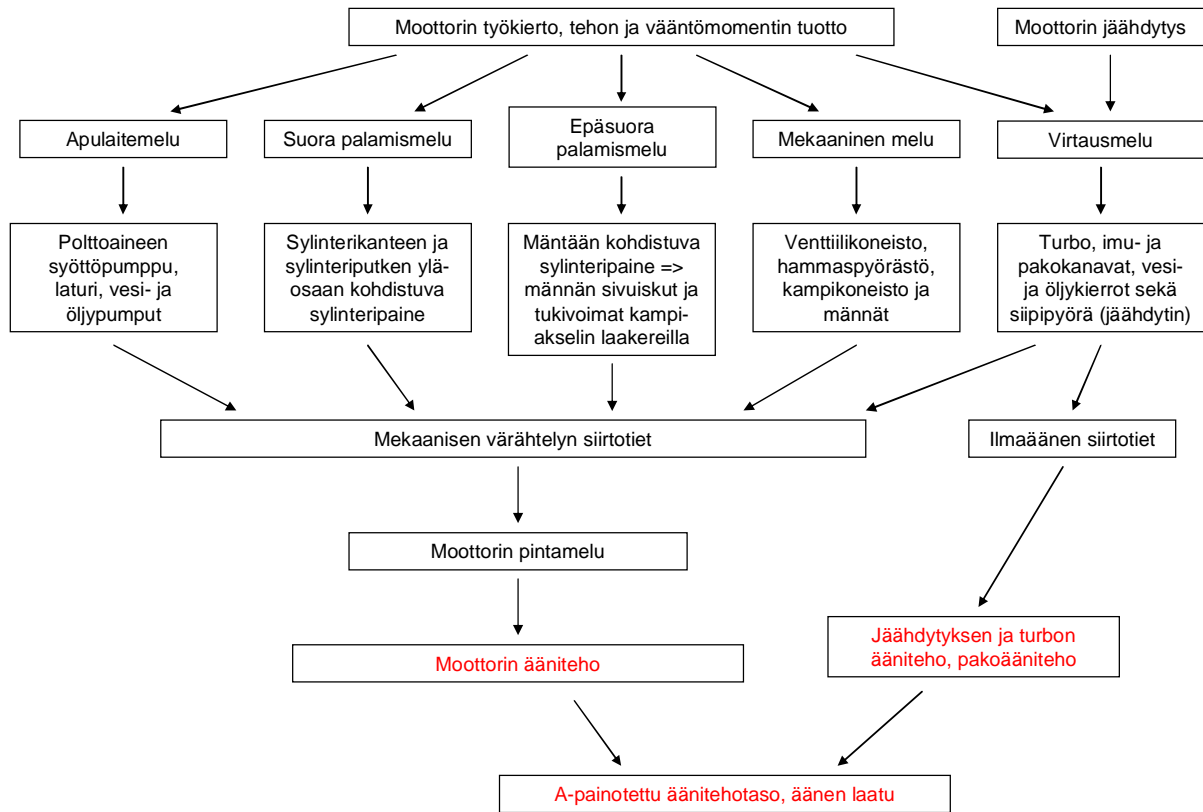
Vibroakustinen malli on melun ja värähtelyn hallinnan tarpeisiin soveltuva moottorin virtuaalinen malli, jota voidaan käyttää myös mm. värähtelyongelmien ratkaisussa ja lujuusteknisissä tarkasteluissa. Mallinnuksen tavoitteet voivat olla monimuotoiset, esimerkiksi osarakenteen äänensäätelyn laskenta, runkoäänien siirtoteihin vaikuttaminen tai rakennevariaatioiden vaikutus tietyn mekanismin generoiman herätevoiman suuruuteen. Täydellinen moottorin vibroakustinen malli sisältää todelliset herätteet, rakenteen värähtelyn ja äänen säteilyä.

Tämä esitys keskittyy moottorin pintamelun virtuaaliseen mallintamiseen. Kyseessä on siis vibroakustinen malli, joka sisältää moottorin rakenteisiin mekaanista värähtelyä generoivat herätteet ja runkoäänien. Osa herätteistä on dynaamisia voimia, osa fluidin painejakaumia. Runkoäänellä tarkoitetaan moottorin rakenteiden ja pinnan audiotaajuista mekaanista värähtelyä ja moottorin pinnan äänen säteilyä.

2 DIESELMOOTTORIN ÄÄNENSYNTYMEKANISMIT

Dieselmoottorin äänensyntymekanismit voidaan jaotella monella eri tavalla. Kuvassa 1 on eräs esitys, jossa moottorin pintameluun (pinnan värähtely ja äänensäätely) vaikuttavat tekijät sekä virtausmelu erottuvat pääosin erillisiksi kokonaisuuksiksi. Esitetty jaottelu soveltuu yleisesti polttomoottoreille. Moottorin koon ja käyttökohteen vaikutus näkyy lähinnä jäähdytyksen toteutuksessa. Työkoneiden ja autojen moottoreissa jäähdytys on lähes aina toteutettu sii-

pipyyörällä ja neste-ilma lämmönsiirtimellä. Laivakäytössä dieselmoottoreissa jäähdytykseen käytetään pelkkää vesikiertoa.



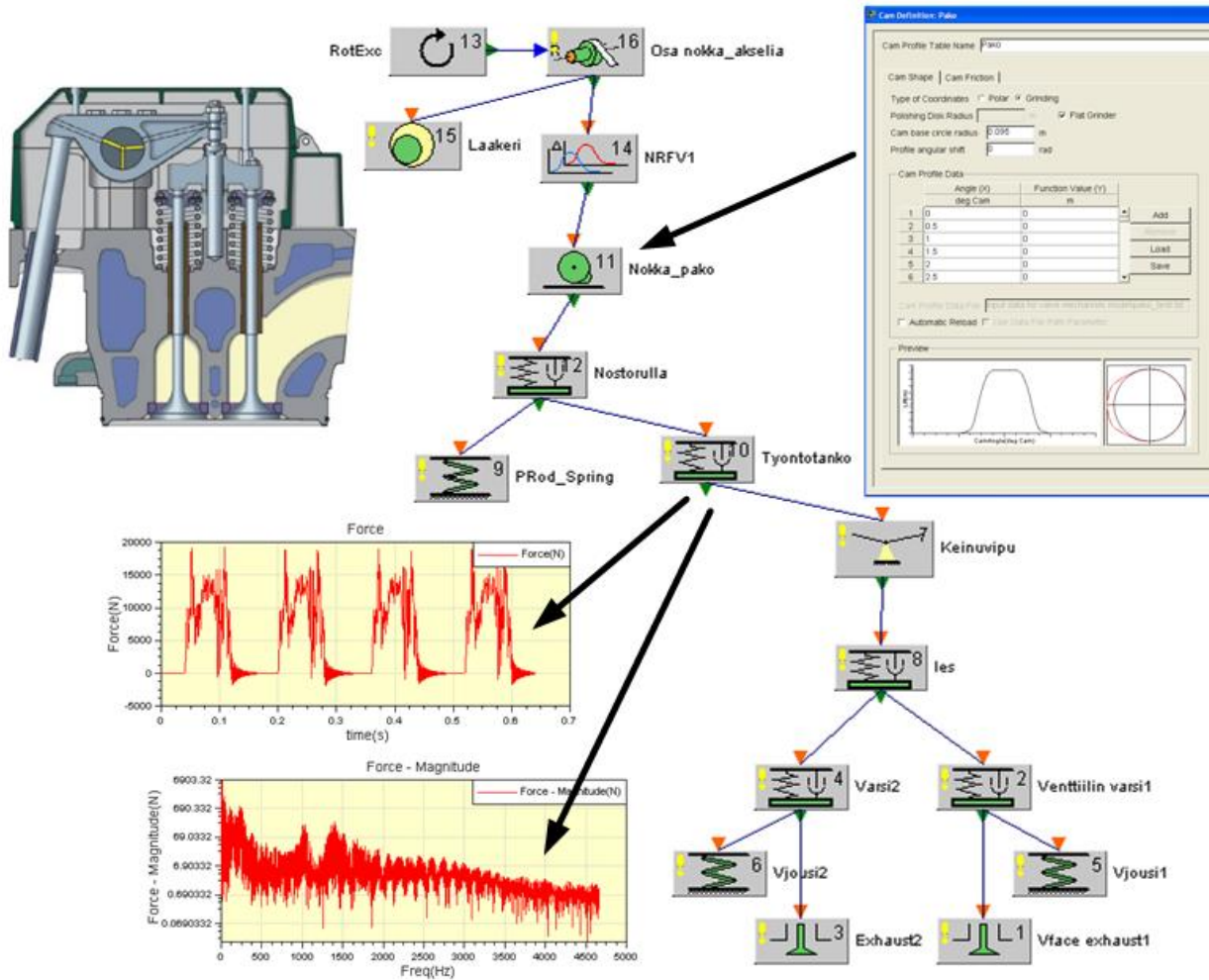
Kuva 1. Moottorin äänensyntymekanismien jaottelu.

3 HERÄTTEIDEN KUVAAMINEN

Kampikoneiston eli mäntien, kiertokankien ja kampiakselin liikkeen generoimat massavoimat voidaan ratkaista analyttisesti. Pienille taajuuksille kaavat on esitetty mm. viitteessä [1]. Tuloksena saatavat herätteet kohdistuvat kampiakselin laakereiden välityksellä moottorin lohkon rakenteisiin.

Sylinteripaine on melko helposti mitattavissa. Se generoi paineherätteen sylinteriputken yläosaan, sylinterikanteen alapintaan ja pakoventtiileihin. Lisäksi sylinteripaine synnyttää pysty- ja vaakavoimat männän välityksellä kampiakselin laakereihin [1] ja aiheuttaa männän sekundääriliikkeen eli nk. männän sivuiskut. Myös männän sekundääriliikkeen synnyttämille voimille on esitetty analyttiset laskentakaavat [2].

Edellä kuvatut herätteet yhdessä venttiilimekanismin ja hammaspyörästön (tai hihna-/ketjuvetojen) generoimien herätteiden kanssa muodostavat suurimman osan moottorin pintameluun vaikuttavista herätteistä. Koska kampikoneisto, hammaspyörästö ja venttiilikoneisto sekä kuorma ovat mekaanisesti kytketty toisiinsa, herätteet kuvaavan mallin tulisi sisältää kaikki edellä mainitut osat. Käytännössä tämä toteutetaan monikappaledynamiikkamallin (Multi-Body Dynamics, MBD) avulla. Kuvassa 2 on esimerkkinä yhden sylinterin pakopuolen venttiilikoneiston MBD-malli.



Kuva 2. AVL Excite ohjelmalla laadittu yhden sylinterin pakopuolen venttiilikoneiston monikappaledynamiikkamalli sekä esimerkit tarvittavista lähtöarvoista ja laskennan tuloksista.

Herätemallin antaman voiman kohdistaminen suoraan rakenteen värähtelyt kuvaavaan malliin ei ole paras menettelytapa, sillä herätemekanismien generoima runkoääniteho riippuu kohdistuspisteen syöttöpistemobiliteetista. Näin ollen herätemalli tulisi yhdistää rakenteen värähtelymalliin. Lisäksi osa herätteistä kohdistuu laakereihin, joiden käyttäytyminen on välysten ja voitelukalvon vaikutuksesta epälineaarista.

Markkinoilla on muutamia, edellä esitetyt ominaisuudet sisältäviä, valmiita ohjelmistoja, kuten AVL Excite, LMS Motion, GT Suite ja Adams Engine. Yhteistä näille ohjelmille on laskennan toteutus aikatasossa, monikappaledynamiikkamallin hyödyntäminen herätteiden kuvaamisessa ja rakenteen värähtelymallin mukaanotto elementtimenetelmällä (FEM) muodostettuna superelementtinä.

4 RAKENTEEN VÄRÄHTELY

Dieselmoottorin mekaanisen värähtelyn mallinnus tehdään nykyisin pääosin elementtimenetelmällä. Taajuustason vastelaskennassa on käytössä kaksi menetelmää: ominaismuotojen superponointiin perustuva vastelaskenta ja suora vastelaskenta. Suora vastelaskenta mahdollistaa vaimennuksen tarkemman kuvaamisen materiaaliominaisuutena, mutta on käytännössä raskaampaa laskentaa kuin ominaismuotojen superponointiin perustuva vastelaskenta.

Aikatason vastelaskennassa vaimennus voidaan antaa, laskentamenetelmästä riippuen, myös materiaaliominaisuutena. Epälineaarisesti käyttäytyvien laakereiden ja muiden kontaktien tarkka mallinnus edellyttää myös aikataason laskennan käyttöä.

Tarvittava aika-askel (Δt) määräytyy tarkasteltavan kaistan ylärajataajuuden (f_{\max}) perusteella

$$\Delta t = \frac{1}{10 \times f_{\max}}. \quad (1)$$

Esimerkiksi 5 kHz ylärajataajuudella aika-askel on luokkaa 20 mikrosekuntia. Minimitarve on laskea muutama kierros, joka moottorin pyörimisnopeudella 750 r/min tarkoittaa 4000 aika-askelta kierrosta kohti.

Koska dieselmoottorin FE-malli on tyypillisesti kokoluokaltaan miljoonia vapausasteita, käytävissä oleva laskentateho ja levytila muodostuvat nopeasti rajoittaviksi tekijöiksi. FE-mallin dynaaminen tiivistys eli superelementin käyttö helpottaa tilannetta. Käytännössä tehdään erillinen ajo, jossa esimerkiksi moottorin rakennemalli (miljoonia vapausasteita) tiivistetään aktiivisiksi vapausasteiksi (satoja), joihin kytketään herätteet kuvaava MBD-malli. Superelementin käyttö nopeuttaa laskentaa, se kuvaa rakenteen dynaamiset ominaisuudet ja myös mahdollistaa äänitehon laskennassa tarvittavien moottorin rakennemallin pinnan solmujen värähtelynopeuksien takaisinlaskennan.

Tulevaisuudessa kehittyvät hybridimenetelmät, esimerkiksi elementtimenetelmän ja tilastollisen energia-analyysin (SEA) yhdistäminen, nopeuttanevat laskentaa ja tarjoavat vaihtoehtoisia mallinnusmenetelmiä. Moottorin FE-mallissa mm. öljypohja on suuren mooditiheyden omaavana (tiheä FE-verkko), sekä öljyn ja rakenteen vuorovaikutuksen huomioonvaatavana, SEA:lla kätevämmän mallinnettava osarakenne.

5 ÄÄNENSÄTEILY

Värähtelevän rakenteen säteilemän äänitehon laskennassa herätteenä käytetään FEM-laskennan tuloksena saatavaa rakenteen pintaa vasten kohtisuoraa värähtelynopeusjakaumaa (jos kytkettyä analyysia ei tarvita). Yleisimmät äänitehon laskentamenetelmät ovat reunaelementtimenetelmä (BEM) ja akustinen elementtimenetelmä (AFEM).

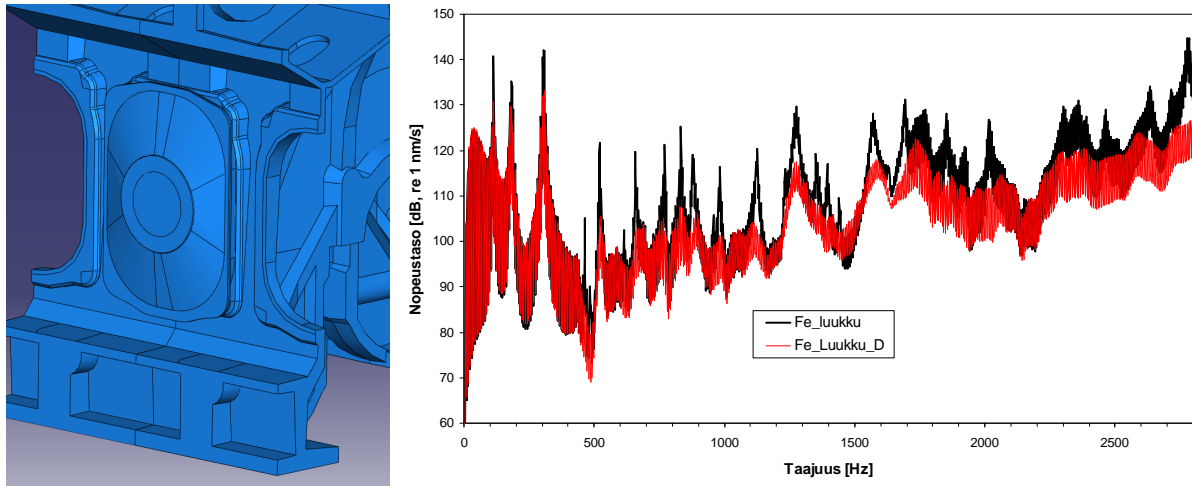
Reunaelementtimenetelmä käyttää rakenteen pinnan verkkoa, jota kaupallisissa ohjelmistoissa voidaan kätevästi haluttaessa harventaa. Tarvittava solmuresoluutio määritellään tyypillisesti kuudeksi solmuksi äänen aallonpituutta kohti. Yhdellä prosessorilla laskettaessa BE-mallin maksimikoko on käytännössä luokkaa 10000 vapausastetta (solmua), joten koko audiokaistan laskenta onnistuu vain pienillä lähteillä. Laskentatuloksena saadaan mm. ääniteho, säteilysuhte, rakenteen pinnan keskimääräinen neliöllinen värähtelynopeus sekä äänenpainejakauma halutulla pinnalla lähteen ympärillä.

Akustista elementtimenetelmää käytettäessä lähde ympäröidään solidiverkolla, jolle annetaan fluidin materiaaliominaisuudet. Verkotettava alue määräytyy alarajataajuuden perusteella, siten että etäisyys rakenteen pinnasta fluidiverkon ulkopintaan on vähintään aallonpituus. Rakenteen pinnan solmuresoluutio on luokkaa kuusi solmua aallonpituutta kohti, mutta verkko saa harventua lähestyttäessä fluidiverkon ulkopintaa. Malli käyttää herätteenä rakenteen pinnan värähtelynopeuksia ja fluidiverkon ulkopintaan sijoitetaan puoliäärettömät elementit tai käytetään sopivaa reunaehto. Laskentatulokset ovat vastaavat kuin BEM:llä. Akustinen elementtimenetelmä soveltuu BEM:ää paremmin suurien mallien laskentaan.

Suurilla taajuuksilla, kun äänensäteilyn lähikenttäilmiöt ovat merkityksettömiä, rakenteen äänitehon laskenta on järkevintä tehdä neliöllisesti keskiarvotetun pintaa vasten kohtisuoran värähtelynopeuden avulla.

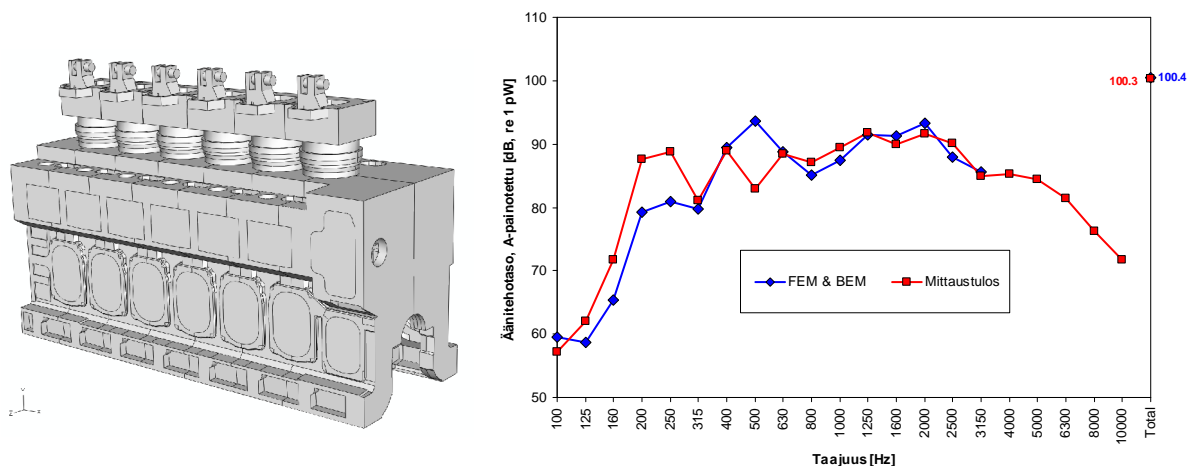
6 ESIMERKIT

Vibroakustisen osarakennemallin avulla on helppo vertailla eri rakennevaihtoehtojen värähtely- ja äänensäteilyominaisuuksia. Esimerkki tästä, dieselmoottorin kampikammion luukkuvariaatioiden vertailu, on kuvassa 3.



Kuva 3. Kampikammion luukkurakenteiden vertailussa käytetty osarakennemalli ja esimerkki tuloksista.

Kuvassa 4 on venttiilikoneiston generoiman moottorin sivun äänitehotason laskentatulokset, jota on verrattu mittaustulokseen. Taajuusjakaumien erot 200 Hz ja 250 Hz terssikaistoilla johtuvat herätekuvauksen puutteista. Suuremmilla taajuuksilla luukkujen yksinkertaistettu malli osoittautui puutteelliseksi. Vaikka tämä malli vaatii pientä parantelua, niin virtuaalisella mallilla on ehdottomasti helpompi tehdä mm. dieselmoottorin herätemekanismien merkittävyysskartoitus kuin mittaamalla.



Kuva 4. Venttiilikoneiston synnyttämän melun laskennassa käytetty malli ja esimerkki tuloksista, joita on verrattu testimoottorin mittaustuloksiin.

7 YHTEENVETO

Dieselmoottorin vibroakustinen mallinnus sisältää herätteiden kuvauksen, rakenteiden värähtelyn ja äänen säteilyn laskennan. Monikappaledynamiikkamalli soveltuu useimpien moottorin pintameluun vaikuttavien herätteiden määrittämiseen. Kyseisiä herätmekanismeja ovat mm. sylinteripaine, kampikoneisto, jakopyörästö sekä venttiilikoneisto. Moottorin rakenteiden värähtelylaskentaan käytetään yleensä elementtimenetelmää. Suurilla malleilla tiivistäminen, superelementtien käyttö, lyhentää laskenta-aikoja.

Koko moottorin mallinnus on järkevintä tehdä yhdistämällä MBD-malliin tiivistetty FE-malli, jolloin herätmekanismit toimivat asiallisesti. Peruslaskenta tehdään aikatasossa mm. siksi että laakerit käyttäytyvät epälineaarisesti. Äänensäätelyn laskentaa varten tarvittavat moottorin pinnan värähtelynopeudet ovat määritettävissä aikatason laskentatulosten perusteella. Äänen säteilyn laskentaan käytetään joko reunaelementtimenetelmää tai akustista elementtimenetelmää. Suurilla taajuuksilla, koinsidenssialueen yläpuolella, ääniteho saadaan laskettua neliöllisesti keskiarvotetun pintaa vastaan kohtisuoran värähtelynopeuden avulla.

Polttomoottorien vibroakustiseen mallinnukseen on käytettävissä muutamia kaupallisia ohjelmistoja. Niitä on käytetty paljon työkoneiden ja autojen moottoreiden tuotekehityksessä. Wärtsilän moottorit ovat kooltaan selvästi suurempia, mutta tarkasteltavassa taajuuskaistassa ei ole merkittäviä eroja. Täten mallien koot tekevät analyysistä vaativampia, erityisesti äänen säteilyn laskenta on ongelmallista. Huonosti tunnettuja seikkoja ovat mm. kooltaan isompien rakenteiden vaikutus kontakteihin ja herätemallien komponenttien kuvaukseen.

Dieselmoottorin vibroakustisen mallin kehittäminen on helposti perusteltavissa mm. prototyypivaiheen testaustarpeen vähenemisenä, rakenteiden optimointimahdollisuuksien lisääntymisenä ja yleisenä moottorin laadun paranemisena. Lisäksi toimiva malli syventää simuloitavaan tapahtumaan liittyvien fysikaalisten ilmiöiden ymmärrystä.

VIITTEET

1. KATAJAMÄKI, K., Mäntämoottorin herätteiden huomioiminen vastelaskennassa. *VTT:n Raportti VALB408*. Espoo 1999. 26 sivua.
2. HADDAD, S., D., Theoretical Treatment of Piston Motion in I.C. Piston Engine for the Prediction of Piston Slap Excitation. *Mech. Mach. Theory*, Vol. 30 No. 2, pp. 253 - 269, 1995.