

KAPSELIKUORMAMENETELMÄ MOOTTORIN AKUSTISTEN LÄHDEOMINAISUUKSIEN MÄÄRITTÄMISEEN

Antti Hynninen^{1,a}, Jukka Tanttari^{1,b}, Heikki Isoimoisio^{1,b}, Virpi Hankaniemi², Mikko Matalamäki²

¹ Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

^a PL 1000, 02044 VTT ; ^b PL 1300, 33101 Tampere
etunimi.sukunimi@vtt.fi

² Wärtsilä Finland Oy, Energy Solutions

PL 252, 65101 Vaasa
etunimi.sukunimi@wartsila.com

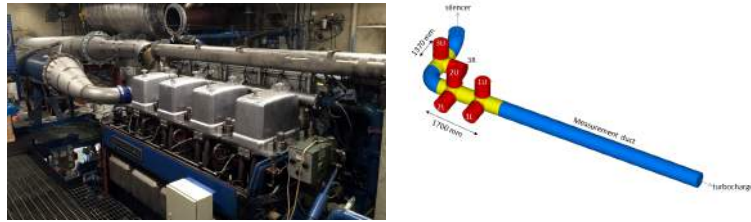
Tiivistelmä

Pakoääni on yksi mäntämoottorivoimalaitoksen merkittävimmistä melukomponenteista. Mäntämoottorivoimalaitoksen meluoptimoinnissa pakoäänenvaimentimen suorituskyky on kyettävä ennakoimaan riittävän hyvin ennen tuotantoversion valmistamista. Ennakoinnissa hyödynnetään koko äänensyntyketjun simulointia. Simuloinnissa tarvitaan moottorin akustiset lähteominaisuudet, eli lähdevoimakkuus ja lähdeimpedanssi. Tasoaltoalueen lähteominaisuudet voidaan määrittää kokeellisesti monikuormamenetelmällä. Laboratorio-olosuhteissa akustista kuormaa muunnellaan tyypillisesti asentamalla pääakanavaan eripituisia sivuhaaroja. Perinteisen sivuhaaroihin perustuvan monikuormamenetelmän soveltaminen keskinopean mäntämoottorin pakomelun määrittämiseen on erittäin työlästä ellei mahdotonta. Tässä työssä esitellään uusi, niin sanottu kapselikuormamenetelmä keskinopean mäntämoottorin pakopuolen akustisten lähteominaisuuksien kokeelliseen määrittämiseen vaikeissa olosuhteissa. Menetelmää sovelletaan VTT:n Wärtsilä Vasa 4L32DF koemoottorin pakopuolen lähteominaisuuksien määrittämiseen.

1 JOHDANTO

Mäntämoottorivoimalaitoksen aiheuttaman ympäristömelun kannalta moottorin pakomelu on merkittävä melun lähde [1]. Heräte on voimakkain moottorin pyörimisnopeuden kerrannaisilla. Melua voidaan torjua tehokkaasti pakomeluvaimentimen oikealla mitoituksella. Äänenvaimentimen suunnittelussa tarvitaan moottorin lähteominaisuudet (lähdevoimakkuus ja lähdeimpedanssi), mikäli pyritään ennakoimaan vaimentimen lisäsvaimennus (insertion loss, IL) tai päästön absoluuttitaso. Usein myös muu putkisto on tuntematon tai eri paikoissa erilainen, jolloin suunnittelu voi olla läpäisyvaimennus (transmission loss, TL) -perusteista [2].

Tasoaltoalueen lähteominaisuudet voidaan määrittää kokeellisesti monikuormamenetelmällä. Monikuormamenetelmissä äänenpaine kanavassa ja akustinen impedanssi mitataan usealle akustiselle kuormalle. Impedanssin määrittämiseksi alavirran ja ylävirran suuntaiset aallot erotellaan kaksimikrofonimenetelmällä [3]. Laboratorio-olosuhteissa akustista



Kuva 1: Vasemmalla: Wärtsilä Vasa 4L32DF koemoottori ja lähdeominaisuuksien määrittämiseen suunniteltu pakoputkisto. Oikealla: Kapselikuormaputkisto keskinopean mäntämoottorin akustisten lähdeominaisuuksien kokeelliseen määrittämiseen vaikeissa olosuhteissa.

kuormaa muunnellaan esimerkiksi asentamalla pääkanavaan eripituisia sivuhaaroja. Kokeellisesti määritettyjä lähdeominaisuuksia käytetään simuloinneissa herätteenä tai monikuormasimulointimallin validointiin. Perinteisen sivuhaaroihin perustuvan monikuormamenetelmän soveltaminen keskinopean mäntämoottorin pakomelun määrittämiseen on suurten dimensioiden (putken halkaisija jopa 1800 mm) ja mittausepävarmuuksien vuoksi erittäin työlästä ellei mahdotonta.

Tässä työssä esitellään uusi, niin sanottu kapselikuormamenetelmä keskinopean mäntämoottorin pakopuolen akustisten lähdeominaisuuksien kokeelliseen määrittämiseen vaikeissa olosuhteissa. Menetelmää sovelletaan VTT:n Wärtsilä Vasa 4L32DF moottorin pakopuolen lähdeominaisuuksien määrittämiseen.

2 MENETELMÄT

Monikuormamenetelmät perustuvat putkien haaroittamiseen. Ideaalitalanteessa pääputki on äärettömän pitkä ja sivuhaara päästään suljettu. Tällöin pääputken impedanssi on reaalinen ja sivuhaaran imaginaarinen. Tällaisen perinteisen sivuhaaramenetelmän käyttö mäntämoottorivoimalaitosolosuhteissa on mahdotonta hyvin reaktiivisten äänenvaimentimien vuoksi. Mäntämoottorivoimalaitosolosuhteissa käytettävien sivuhaarojen on kyettävä vaihtelevaan pakoputkiston kokonaisimpedanssin sekä reaali- että imaginaariosaa. Kapselikuormamenetelmässä [4] pakoputkistoon asennetaan erilaisia kombinaatioita koostuen tyhjiä ja villoitetuista kapseleista. Tällä järjestelyllä hyvin reaktiivisen putkiston päädyn vaikutusta impedanssiin saadaan eliminoitua.

Tässä työssä kapselikuormamenetelmää sovellettiin VTT:n Wärtsilä Vasa 4L32DF koemoottoriin, ks. kuva 1. Koemoottori on nelisynterinen, nelitahtinen rivimoottori, jonka pyörimisnopeus on 750 rpm ja teho 1640 kW. Sylinterin halkaisija on 320 mm ja iskunpituus 350 mm. Moottori painaa 20,3 tonnia. Moottoriin asennettiin kapselikuormaputkisto (kuva 1).

Impedanssit mitattiin käyttäen standardin ISO 10534-2 mukaista kaksimikrofonimenetelmää [5]. Mittausjärjestely on kuvattu tarkemmin lähteessä [6].

Akustiset lähdeominaisuudet määritettiin useille kuormapareille käyttäen kaksikuormamenetelmää. Mitattujen kuormaimpedanssien $\hat{\zeta}_{Ln}$ ja äänenpaineiden \hat{p}_{0Ln} avulla ratkaistaan lähdevoimakkuus \hat{p}_s ja lähdeimpedanssi $\hat{\zeta}_s$ kaavasta

$$\begin{bmatrix} \hat{\zeta}_{L1} & -\hat{p}_{0L1} \\ \hat{\zeta}_{L2} & -\hat{p}_{0L2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{p}_s \\ \hat{\zeta}_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \hat{p}_{0L1}\hat{\zeta}_{L1} \\ \hat{p}_{0L2}\hat{\zeta}_{L2} \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

Valittujen kuormien määrä (N) vaihtelee taajuudesta riippuen kuudesta yhteentoista. Vastaavien kuormaparien määrä (M) on 15-55. Kuormapareista riippuen lähdeominaisuustulokset vaihtelevat tuntemattomasta syystä. Olettamalla saatujen lähdeominaisuuksien noudattavan normaalijakaumaa vierashavainnot voidaan poistaa tuloksista tilastollisin menetelmin. Yksi tunnetuimmista menetelmistä on Chauvenetin menetelmä [7]. Chauvenetin mukaan datapiste elimoidaan, mikäli datapisteiden määrä kerrottuna datapisteen keskiarvopoikkeaman todennäköisyydellä on pienempi kuin 0.5, eli

$$\begin{cases} P(X > |\hat{p}_{sm} - \hat{\mu}_p|/\hat{\sigma}_p) < \frac{1}{2M} \\ P(X > |\hat{\zeta}_{sm} - \hat{\mu}_z|/\hat{\sigma}_z) < \frac{1}{2M} \end{cases}, \quad (2)$$

missä X noudattaa normaalijakaumaa, $\hat{\mu}$ on lähdevoimakkuuden (alaindeksi p) tai lähdeimpedanssin (alaindeksi z) keskiarvoestimaatti ja $\hat{\sigma}$ on vastaava standardipoikkeaman estimaatti.

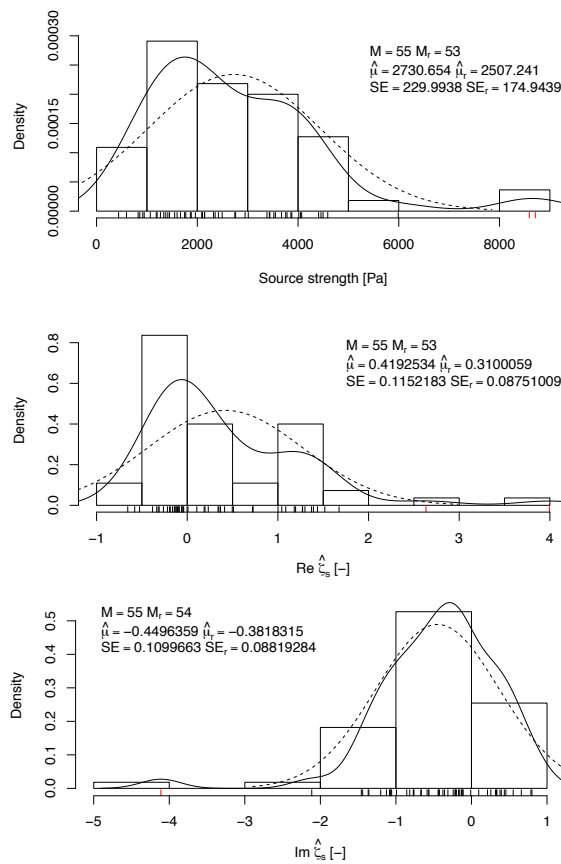
3 TULOKSET

Lähdeominaisuuksille laskettiin histogrammit kaikilla tarkasteltavilla taajuuksilla. Esimerkki lähdeominaisuuksien histogrammeista taajuudella 25 Hz on esitetty kuvassa 2. Pylvään korkeus histogrammissa on yhtä kuin havaintojen määrä osa-alueella jaettuna havaintojen kokoinaismäärällä kerrottuna osa-alueen leveydellä. Pylvään ala on suhteellinen havaintojen määrä. Tiheysfunktion estimaatti on piirretty yhtenäisellä viivalla ja normaalijakauman tiheysfunktio katkoviivalla. Havainnot on merkitty kuvaan pienillä pystyviivoilla, joista vierashavainnot ovat väriltään punaisia. Tässä työssä Chauvenetin kriteerin mukaisesti vierashavainnoiksi luettiin arvoja standardipoikkeamavälillä 2.13-2.61.

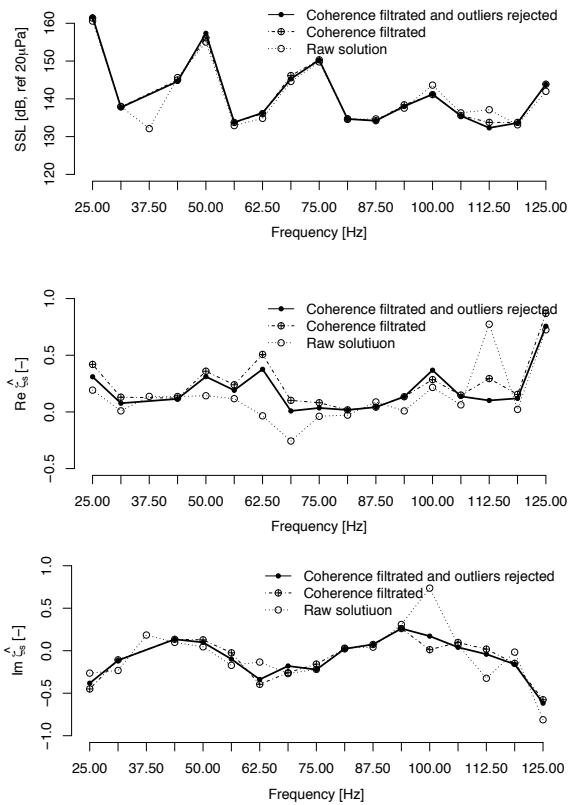
Tässä työssä kuvatulla menetelmällä saadut Wärtsilä Vasa 4L32DF pakupuolen akustiset lähdeominaisuudet on esitetty kuvassa 3 yhtenäisillä viivoilla ja palloilla. Suodattamaton raakaratkaisu ja vain koherenssilla suodatettu ratkaisu on vastaavasti esitetty pisteviivoin ja pistekatkoviivoin.

4 POHDINNAT JA YHTEENVETO

Kuvista 2 ja 3 nähdään, että raakadataa käytettäessä lähdeimpedanssin reaali-osa on negatiivinen, joka on fyysikaalisesti mahdotonta. Koherenssisuodatuksen lisäksi on suositeltavaa poistaa vierashavainnot tuloksista esimerkiksi tässä työssä esitetyllä menetelmällä.



Kuva 2: Histogrammit ja tiheysfunktiot Wärtsilä Vasa 4L32DF pakopuolen akustisille lähdeomaisuuksille taajuudella 25 Hz. Ylhäällä: lähdevoimakkuus, keskellä: normalisoidun akustisen lähdeimpedanssin reaali-osa, alhaalla: normalisoidun akustisen lähdeimpedanssin imaginaari-osa. Normaalijakauman tiheysfunktio on piirretty katkoviivalla. Datapisteen on merkitty kuvaan pienillä pystyviivoilla, joista vierashavainnot ovat väriltään punaisia.



Kuva 3: Wärtsilä Vasa 4L32DF pakopuolen akustiset lähdeominaisuudet. Ylhäällä: lähdevoimakkuus, keskellä: normalisoidun akustisen lähdeimpedanssin reaali-osa, alhaalla: normalisoidun akustisen lähdeimpedanssin imaginaariosa. Tässä työssä kuvatulla menetelmällä saadut akustiset lähdeominaisuudet on esitetty yhtenäisillä viivoilla, suodatamaton raakaratkaisu ja vain koherenssilla suodatettu ratkaisu ovat vastaavasti esitetty pisteviivoin ja pistekatkoviivoin.

Monikuormamenetelmän käyttö sivuhaaroin on suhteellisen helppoa kontrolloiduissa laboratorio-olosuhteissa. Tällöin tarvittavien akustisten kuormien määrä voi olla vähäinen. Tässä työssä esiteltiin niin sanottu kapselikuormamenetelmä keskinopean mäntämootorin pakopuolen akustisten lähdeominaisuuksien kokeelliseen määrittämiseen vaikeissa olosuhteissa. Akustisten kuormien vaihtelu kapselikuormamenetelmällä näyttää toimivan halutusti. Menetelmää sovellettiin VTT:n Wärtsilä Vasa 4L32DF koemootorin pakopuolen lähdeominaisuuksien määrittämiseen. Tämän työn perusteella koemootorin akustinen lähde on voimakkain moottorin pyörimisnopeuden pääharmonisilla eli taajuuksilla 25 Hz, 50 Hz ja 75 Hz. Estimoitu lähderesistanssi on positiivinen kaikilla tarkastelluilla taajuuksilla, mikä on fysikaalisesti oikein. On myös huomattava, että lähdeimpedanssin kokeellinen määrittäminen on virheherkempää kuin lähdevoimakkuuden.

5 KIITOKSET JA TYÖNJAKO

Tätä työtä ovat tukeneet Virpi Hankaniemi, Mikko Matalamäki ja Esa Nousiainen Wärtsilän Sopeva-hankkeessa. Seppo Uosukainen VTT:ltä toimi tieteellisenä putkistoakustiikan neuvonantajana. VTT:n moottorilaboratorion henkilökunta Sami Nyssönen, Jarmo Kuusisto ja Jarno Martikainen mahdollistivat laajat mittaukset. Kapselikuormamenetelmän suunnitteli Jukka Tanttari, Heikki Isoimoisto vastasi mittauksista ja Antti Hynninen analysoi tulokset sekä laski lähdeominaisuudet.

VIITTEET

- [1] E. Nousiainen, V. Hankaniemi, V. Veijanen, J. Tanttari, H. Isoimoisto, S. Uosukainen, and J. Hyrynen. Mäntämootorivoimalaitoksen meluntorjunnan paras käytettävissä oleva tekniikka. Akustiikkapäivät Tampere, 2011.
- [2] J. Tanttari, H. Isoimoisto, S. Uosukainen, E. Hynninen, A. Nousiainen, V. Hankaniemi, and V. Veijanen. Pakoäänenvaimentimen kehitysprosessi. Akustiikkapäivät Turku, 2013.
- [3] J.Y. Chung and D.A. Blaser. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. theory. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 68:907–913, 1980.
- [4] J. Tanttari, H. Isoimoisto, and A. Hynninen. On power plant IC-engine source characterization in-situ. Proceedings of Baltic Nordic Acoustic Meeting- BNAM, 2016.
- [5] ISO-10534-2. Acoustics, determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes: Part 2, transfer-function method, 1998.
- [6] A. Hynninen, H. Isoimoisto, and J. Tanttari. IC-engine acoustic source characterization in-situ with capsule tube method. *Applied Acoustics*, 126:1–18, 2017. doi: 10.1016/j.apacoust.2017.05.006.
- [7] W. Chauvenet. A manual of spherical and practical astronomy-vol. 1: Spherical astronomy; vol. 2: Theory and use of astronomical instruments. method of least squares. *New York: Dover Publication, 1960, 5th ed., revised and corr.*, 1, 1960.