

HELMHOLTZ-RESONAATTORIT ÄÄNENVAIMENTIMINA KANAVASOVELLUKSISSA

Jukka Tanttari¹⁾, Heikki Isomoisio¹⁾, Esa Nousiainen²⁾, Ville Veijanen²⁾

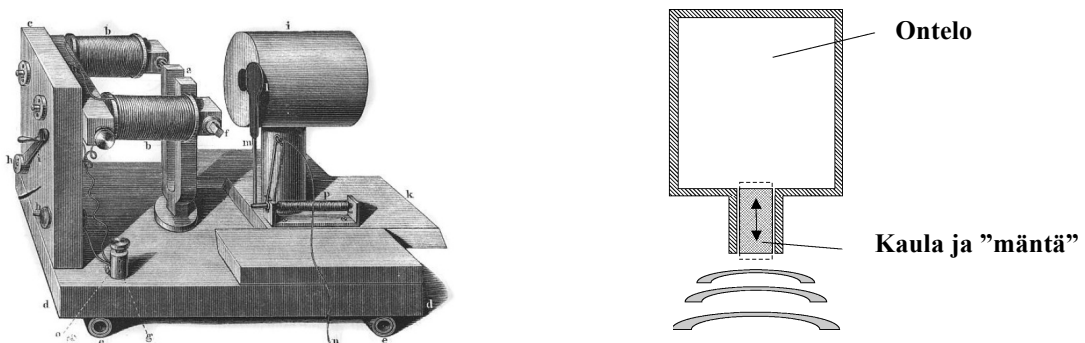
¹⁾ VTT, Älykkäät Koneet
PL 1300, 33101 TAMPERE
etunimi.sukunimi@vtt.fi

²⁾ Wärtsilä Finland Oy Power Plants
PL 252, 65101 Vaasa
etunimi.sukunimi@wartsila.com

1 JOHDANTO

Wärtsilän ja VTT:n yhteisen E-Power -hankkeen [1] yksi painoalue on äänen vaimentaminen voimaloiden pakokanavissa erittäin pienillä (alle 40 Hz) taajuuksilla. Tavanomaiset kammiovaimentimet eivät ole tarkoituksenmukaisia kyseisellä taajuusalueella. Erilaiset resonaattoriratkaisut tarjoavat mahdollisuuden yksittäisten taajuuksien tehokkaaseen vaimentamiseen. Tässä esitelmässä käsitellään Helmholtz-resonaattorin (HR) akustista toimintaa, mitoituskysymyksiä ja sivuvaikutuksia. Viitekehyksenä on todellinen skaala, jossa kanavakoko on Ø600... Ø1800 mm ja äänen nopeus luokkaa 500 m/s. Akustiikka on lineaarista ja kanavan tasoalto-alueella.

HR on kaasutilavuuden (ontelon) ja siihen liitetyn aukon tai putken (kaulan) muodostama akustinen värähtelyjärjestelmä. HR:n hyödyntämisen keskeinen edistäjä oli Hermann von Helmholtz. Hän käytti koejärjestelyissään resonaattoreita tutkiessaan äänien ja musiikin taajuusjakaumia, äänen aistimista ja akustiikan ilmiöitä 1800-luvun puolivälissä [2]. Välineenä HR on nähtävästi ollut tunnettu jo tuhansia vuosia [3]. Kuvassa 1 on Helmholtzin käyttämä koelaite sekä arkkityyppinen HR.



Kuva 1: Helmholtzin käyttämä HR [2] sekä HR:n arkkityyppi "Tatti".

HR:n sovelluksista mainittakoon äänen absorptio, äänentoisto (bassorefleksikotelot), polttomoottorien imutoiminnon tehostaminen sekä erilaiset ratkaisut äänen vaimentamiseen reaktiivisella periaatteella putkissa ja muissa suljetuissa tiloissa.

Ontelo ja kaula mitoitetaan siten, että niiden akustiset impedanssit poikkeavat huomattavasti toisistaan. Tällöin HR toimii pienillä taajuuksilla (koko << aallonpituus) likimain yhden va-

pausasteen jousi-massa -järjestelmänä. Ontelo varastoi potentiaalienergiaa toimien jousena. Kaula varastoi liike-energiaa toimien massana, joka liikkuu kaulassa kuin mäntä [4]. Valitsemalla ontelon ja kaulan mitat sopivasti voidaan järjestelmän ominaistaajuus virittää halutuksi. Jousi-massa malli on likimääräisyydestään huolimatta hyödyllinen apuväline HR:n toiminnan hahmottamisessa.

Mäntämoottorilentokoneiden valtakaudella HR:n tehokkuus pakoäänien vaimentamisessa oli tunnettua. Sitä hyödynnettiin sekä keskeis- että sivukanavasovelluksena [5]. HR:n fysikaalista akustiikkaa selvitti aikoinaan perusteellisesti mm. Ingard [6]. Käyttöä vaimentimena käsitellään nykyäänkin sekä teoriapainotteisissa [4] että vaimenninteknologiaan keskittyvissä [7, 8] kirjoissa. Kirjallisuudessa ei yleensä mennä klassista jousi-massa -mallia pidemmälle. Käytännössä resonaattoriin liittyy monimutkaisia 3-dimensioisia akustisia ilmiöitä. Klassisen mallin antamat tulokset voivat olla riittämättömiä tarkkaan virittämiseen [9,10,11].

2 KLASSINEN MITOITUS

Resonanssitaajuuden f_r ja läpäisyvaimennuksen TL klassiset yhtälöt ovat [9]

$$f_r = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S_n}{l_{n,eq} V_c}} \quad (1)$$

$$TL = 10 \log_{10} \left[1 + \left(\frac{\sqrt{S_n V_c / l_{n,eq}} / 2S_d}{f / f_r - f_r / f} \right)^2 \right] \quad (2)$$

missä c_0 on äänen nopeus, S_n on kaulan poikkipinnan ala, $l_{n,eq}$ on kaulan ekvivalentti pituus, V_c on ontelon tilavuus, S_d on pääkanavan poikkipinnan ala ja f on taajuus.

Kaulan ekvivalentti pituus saadaan lisäämällä kaulan geometriseen pituuteen korjaustermi, yleensä 0.82 kertaa kaulan halkaisija [4]. Korjaustermi on johdettavissa äärettömällä jäykällä tasolla olevan pyöreän mäntäsäteilijän säteilyimpedanssin lausekkeesta. Impedanssin imagiinäriosa tulkitaan takertuneeksi massaksi, joka lisää kaulan pituutta sen molemmissa päissä.

Yhtälön (2) mukaan TL on resonanssitaajuudella ääretön. Tämä seuraa häviöttömyydestä, impedanssisuhteista ja oletetuista tilavuusnopeuksien jatkuvuudesta. Niiden nojalla äänenpaine kanavassa HR:n kohdalla on viritystaajuudella nolla. Tällöin oletetaan aaltojen kanavassa säilyvän tasoaaltoina ja HR:n vaikuttavan samanaikaisesti koko kanavan poikkipinnalla.

3 MITOITUS ELEMENTTIMENETELMÄLLÄ

Klassinen mitoitus ei ota kanavan kokoa tai ontelon muotoa huomioon. Tämä voidaan tehdä ratkaisemalla Helmholtzin yhtälö elementtimenetelmällä (FEM). Laskennassa HR sijoitetaan tutkittavaan kanavaan, jota sisällytetään malliin riittävän pitkä osuus tasoalto-olosuhteiden varmistamiseksi kanavan päissä. Läpäisyvaimennus voidaan FEM-tulosten pohjalta laskea useilla eri menetelmillä. VTT:n käyttämässä menettelyssä TL lasketaan siirtomatriisin avulla. Siirtomatriisi ratkaistaan kahden akustisen kuorman menetelmällä [12] tai vaihtoehtoisesti kahden lähteen menetelmällä. Malleissa käytetään tyypillisesti 10...40 elementtiä aallonpituutta kohti. Usein esitettävä ”peukalosääntö” 6 elementtiä aallonpituutta kohti on yleensä riittämätön kaulan päiden lähikenttäilmiöiden luotettavaan kuvaamiseen.

Suppenemistarkastelu on syytä aina tehdä mallien laadun varmistamiseksi. Laboratoriosovelluksissa viritystaajuuden (ks. alempana) laskentavirhe on ollut selvästi alle 1 % [1]. Klassisella menetelmällä vastaava virhe on tyypillisesti alle 10%. TL :n maksimiarvon tarkka ennakointi on osoittautunut haastavammaksi. Maksimiarvo on herkkä häviöille ja HR :n häviöiden ennustaminen on vaikeaa. Voimalasovelluksista on hyvin vaikea tai mahdoton saada vastaavaa validointitietoa. Virtaus ja lämpötilavaihtelut aiheuttavat ylimääräistä mitoitusepävarmuutta. Asennetut ratkaisut ovat osoittautuneet tehokkaiksi joten tarkkuus on ollut riittävä.

4 HELMHOLTZ-RESONAATTORIN RESONANSSI- JA VIRITYSTAAJUUS

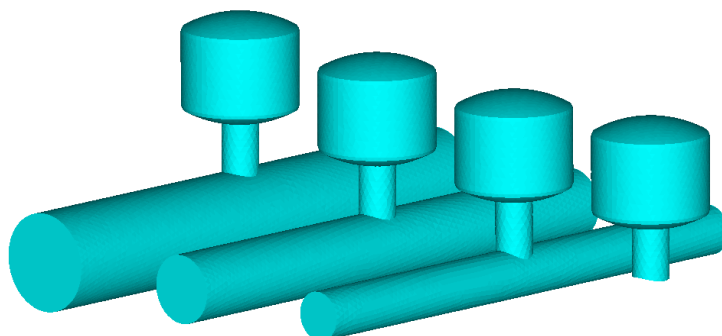
HR :n toimintaa karakterisoi kaksi eri taajuutta, resonanssitaajuus ja viritystaajuus. Näiden eroa on selitetty taulukossa 1. Klassisessa mitoituksessa resonanssi- ja viritystaajuus ovat teorian rajoitteiden vuoksi yksi ja sama asia. Todellisten sovellusten laskenta- ja mittaustulosten tulkinnassa tämä erottelu tarvitaan.

Taulukko 1: *Resonanssitaajuus ja viritystaajuus.*

Resonanssitaajuus	Viritystaajuus
Taajuus, jolla resonaattorin vaste (ontelon äänenpaine) on suurimmillaan	Taajuus, jolla resonaattorin TL on suurimmillaan
Kaulan massan ja ontelon jousen erimerkkiset impedanssit kumoavat toisensa: resonanssi, ominaistaajuus, impedanssinimi	Kanavassa etenevän primäärikentän ja kaulan säteilemän sekundäärikentän välisen destruktiivisen interferenssin maksimi
Riippuu ontelon joustavuudesta, kaulan kaasumassasta sekä kanavan akustisten olosuhteiden kautta massaan vaikuttavasta ulkoisesta lisäkuormasta (massa, jäykkyys)	Riippuu kanavan geometriasta sekä kaulan ("männän") äänensäteilyominaisuuksista

5 ESIMERKKI

Tarkastellaan kuvan 2 mukaista HR :ia sijoitettuna kolmeen erikokoiseen kanavaan. Taulukossa 2 on resonaattorin viritystaajuus ja resonanssitaajuus eri tapauksissa laskettuna klassisella menetelmällä ja elementtimenetelmällä. Koska HR :n resonanssitaajuus vaihtelee sijotusympäristön mukaan, on sille laskettu resonanssitaajuus sekä äärettömässä että puoliäärettömässä kanavassa. Lähde on kanavan päässä oleva mäntä, tilavuusnopeus $1 + 0i \text{ m}^3/\text{s}$. Kuvassa 3 on TL -käyrät eri kanavissa eri menetelmillä. Kuvassa 4 on TL -käyrät $\text{Ø}1100$ kanavassa sekä elementtimenetelmällä lasketut ontelon ja alavirran äänenpaine.



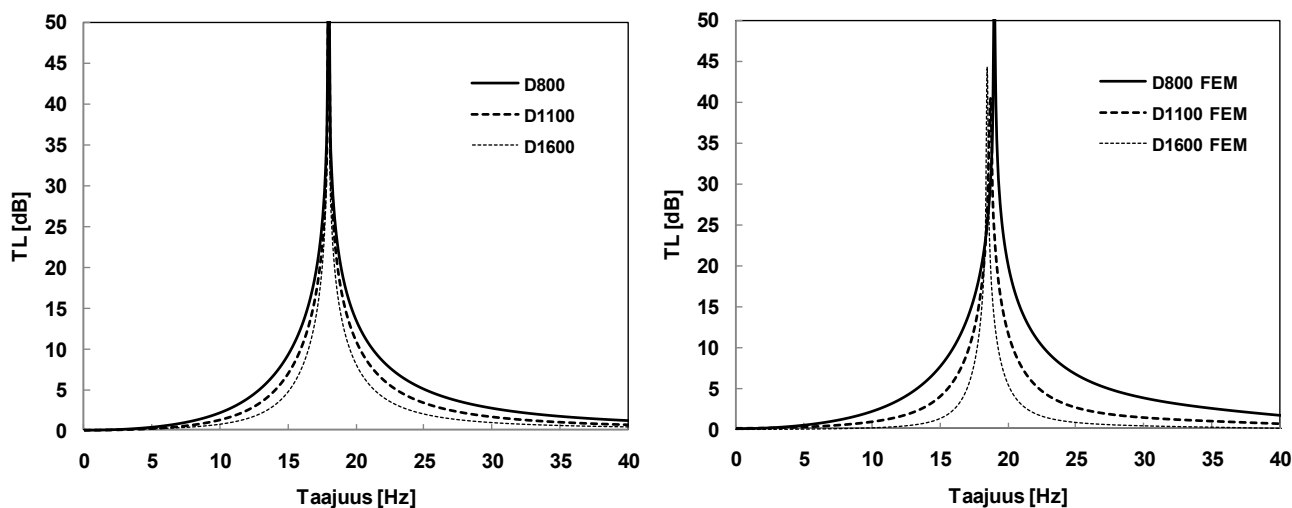
Kuva 2: HR 800, 1100 ja $\text{Ø}1600$ mm kanavissa. Kanavan pituus 9m. HR :n parametrit $V_c = 4.52 \text{ m}^3$, $D_n = 600 \text{ mm}$, $L_n = 800 \text{ mm}$. Häviötön kaasu $c_0 = 504 \text{ m/s}$ ja $\rho_0 = 0.57 \text{ kg/m}^3$. Koon ja aallonpituuden λ suhteet @19Hz: $L_n / \lambda = 0.030$; $H_c / \lambda = 0.068$. H_c on ontelon korkeus.

Taulukko 2: Lasketut viritystaajuudet ja resonanssitaajuudet.

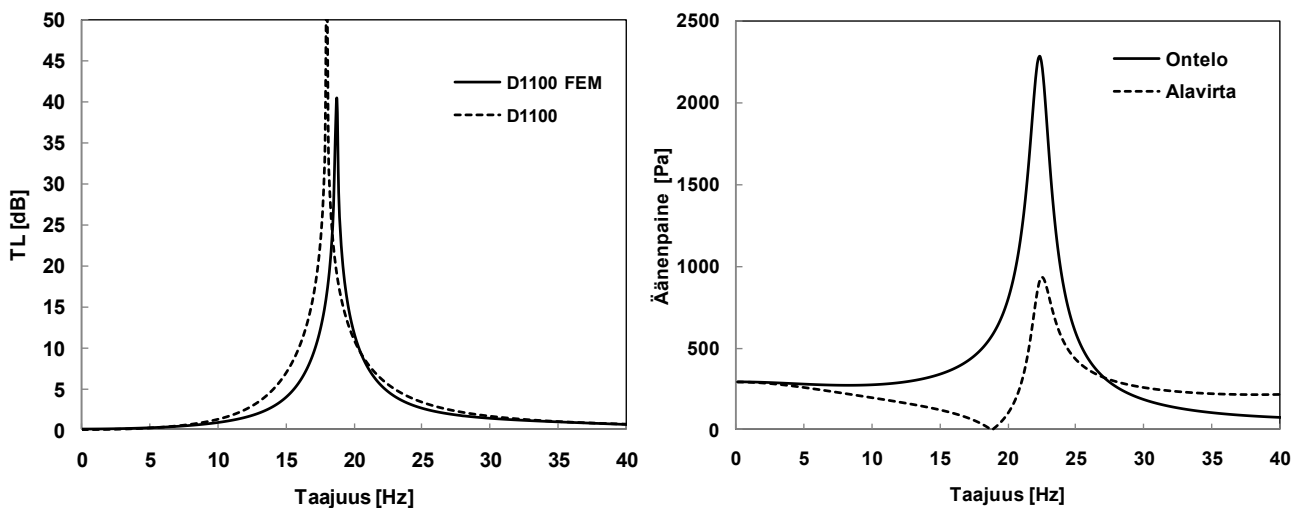
Menetelmä	Kanava	Viritystaajuus Hz	Klassinen / FEM viritystaajuus, ero %	Resonanssitaajuus	
				Ääretön Hz	Puoliääretön Hz
Klassinen	Ei ota kantaa	18.0	-	18.0	18.0
FEM	Ø800	19.1	-6.3	13.9*	24.3
FEM	Ø1100	18.9	-4.9	17.6	22.4
FEM	Ø1600	18.6	-3.5	18.4	20.6
FEM	Puolivapaa kenttä**	-			19.1

** Kaula säteilee puoliavaruuteen äärettömältä jäykältä tasolta

*Heikko resonanssi



Kuva 3: TL-käyrät. Vasemmalla klassinen teoria, oikealla FEM.



Kuva 4: TL-käyrät, klassinen vs. FEM (vasemmalla) sekä FEM-mallilla lasketut ontelon ja alavirran äänenpaineet (oikealla). Puoliääretön Ø1100 kanava.

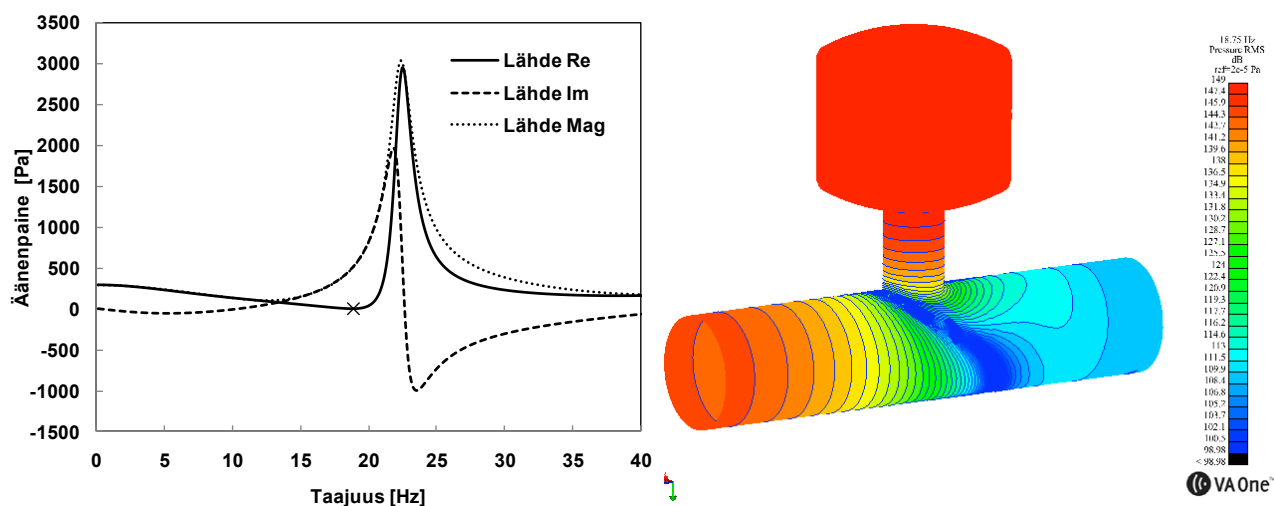
Klassisella menetelmällä ja FEMillä saadaan yleisluonteeltaan toisiaan vastaavat tulokset. Viritystaajuuden erot ovat kuitenkin merkittävät. FEM-tulosten mukaan viritystaajuus piene-

nee kanavan halkaisijan kasvaessa. Resonanssitaajuus vaihtelee merkittävästi kanavakoon ja akustisten olosuhteiden (puoliääretön, ääretön) mukaan. Suuressa kanavassa akustiset olosuhteet vaikuttavat vähemmän, mikä on luontevaa. Kuvan 4 oikeanpuoleiset käyrät ovat mielenkiintoiset. Alavirran puolella ääni vaimenee viritystaajuudella mutta voimistuu resonanssitaajuudella. Viritystaajuutta ei havaita ontelon äänenpaineessa.

6 MITEN HR OIKEIN VAIMENTAA ÄÄNTÄ KANAVASSA?

HR on reaktiivinen vaimennin. Viritystaajuudella pääosa äänienergiasta heijastuu takaisin resonaattorin kohdasta. Vain pieni osa pääsee etenemään alavirtaan. Energia ei häviä, joten voidaan kysyä, mihin energia päättyy. Reaktiivisiin vaimentimiin liittyy paradoksaaliselta tuntuva ilmiö: alavirtaan päätyvää energiaa (aktiivista äänitehoa) syntyy vähemmän. Vaimennin vaikuttaa lähteen näkemään akustiseen kuormaan tehden lähteen äänensäteilyn tehottomammaksi. Resonaattorin toimintaa on siten hyödyllistä tarkastella lähteen näkökulmasta.

Kuvassa 5 on esitetty äänenpaineet kanavan alussa lähdetasolla. Herätteenä ja vaihereferenssinä on reaalin yksikkötilavuusnopeus, joten äänenpaine ilmaisee suoraa myös lähteen näkemän akustisen impedanssin. Viritystaajuudella äänenpaineen reaali-osalla on minimi. Siten HR minimoi aktiivisen äänitehon. Samalla se kasvattaa imaginääriosana ilmenevää reaktiivista (lähteen ja HR:n välissä ”vellovaa”) äänitehoa. Kokonaisäänepaine lähteen ja HR:n välissä ei viritystaajuudella välttämättä juuri muutu, joten viritystaajuutta ei siellä ehkä havaita. Resonanssitaajuudella äänenpaineen reaali-osalla on maksimi. Siksi alavirran puolella voidaan havaita resonanssin aiheuttamaa aktiivisen äänitehon (ja äänenpaineen) kasvua. Ilmiö on havaittu myös käytännön tapauksessa melun lisääntymisenä viritystaajuuden läheisellä taajuudella. Mitoituksessa onkin syytä selvittää myös resonanssitaajuus ja varmistua, että taajuudelle ei osu voimakkaita herähteitä. Myös virtaus saattaa sopivissa olosuhteissa herättää HR:n resonanssin. Ohitettaessa resonanssitaajuus muuttuu vaihe nopeasti 180° . Tämä aiheuttaa äänenpaineen imaginääriosan merkin vaihtumisen.



Kuva 5: Lähdetason äänenpaineen reaali- ja imaginääriosat sekä magnitudi. X =viritystaajuus (vasemmalla) sekä äänenpainejakauma viritystaajuudella (oikealla). Puoliääretön $\text{Ø}1100$ kanava.

Kuvassa 5 on myös alueellinen äänenpainejakauma viritystaajuudella. Äänenpaineen minimipinta on vino ja lievästi kaareva. Jos HR:n kaulan säteilykuvio kanavaan on pallo, voidaan aaltorintamat piirtämällä päätellä interferenssipinnan olevan juuri tämän tyyppinen.

7 YHTEENVETO

Helmholtz-resonaattori on tehokas väline yksittäisten taajuuskomponenttien vaimentamisessa pakokanavissa erittäin pienillä taajuuksilla. Voimaloissa moottorit käyvät vakiokierrosnopeudella, joten taajuudet ovat vakioita. 25 dB läpäisyvaimennus on yleensä melko helposti saavutettavissa. Mitoituslaskelmissa klassinen teoria antaa hyvän alkuarvauksen, jota hyödyntämällä resonaattorin geometria voidaan iteroida kohdalleen elementtimenetelmään perustuvissa laskelmissa. Soveltamisessa on muistettava, että TL on vaimenninta äärettömässä kanavassa kuvaava suure. Äärelliseen kanavaan asennetun HR:n lopullinen vaikutus palautuu lähteen näkemän kuorman muutoksiin. Todellisen lisäsvaimennuksen (tai vahvistuksen) tarkka ennakointi edellyttää lähdeimpedanssin tuntemista. Käyttämällä ääretöntä lähdeimpedanssia saadaan turvallinen arvio, mutta tavoitteena on kyetä tulevaisuudessa laskemaan lähdesuureet [13]. Mitoituslaskelmissa on syytä tarkistaa viritystaajuuden lisäksi resonanssitaajuus. Mitoituksen selvittyä voidaan lopuksi tehdä vibroakustiset laskelmat ja niiden edellyttämät toimenpiteet. Lisäämällä resonaattoriin säädettävyyttä tai älyä [14] voidaan sen koosta ja mitoitusriskejä pienentää.

VIITTEET

- [1] Wärtsilä Finland Oy Power Plantsin *E-Power* -projekti.
- [2] HELMHOLTZ H, *Die Lehre von den Tonempfindungen als Physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. von Friedrich Vieweg und Sohn. Braunschweig 1863.
- [3] KUTTRUFF H, *Room Acoustics*. Third ed. Elsevier 1991.
- [4] PIERCE A D, *Acoustics. An Introduction to Its Physical Principles and Applications*. McGraw-Hill, New York 1989.
- [5] DAVIS D D Jr, STOKES G M, MOORE D & STEVENS G.L, *Theoretical and Experimental Investigation of Mufflers with Comments on Engine-Exhaust Muffler Design*. National Advisory Committee for Aeronautics. Report 1192. Langley Aeronautical Laboratory 1954.
- [6] INGARD U, On the Theory and Design of Acoustic Resonators. *Journal of the Acoustical Society of America* 25(1953)6, 1037-1061.
- [7] MUNJAL M L, *Acoustics of Ducts and Mufflers*. Wiley 1987.
- [8] BODÉN H & GLAV R, Exhaust and Intake Noise and Acoustical Design of Mufflers and Silencers. *Handbook of Noise and Vibration Control*. Chapter 85. Wiley 2007.
- [9] SELAMET A, DICKEY N S & NOVAK J M, Theoretical, Computational and Experimental Investigation of Helmholtz Resonators with Fixed Volume: Lumped versus Distributed Analysis. *Journal of Sound and Vibration* 187(1995)2, 358-367.
- [10] SELAMET A, RADAVIDICH P M, DICKEY N S & NOVAK J M, Circular Concentric Helmholtz Resonators. *Journal of the Acoustical Society of America* 101(1997)1, 41-51.
- [11] SELAMET A & JI Z L, Circular Asymmetric Helmholtz Resonators. *Journal of the Acoustical Society of America* 107(2000)5, 2360-2369.
- [12] TANTTARI J, ISOMOISIO H, NOUSIAINEN E & VEIJANEN V, Siirtomatriisin laskenta elementtimenetelmällä. *Akustiikkapäivät 2009*.
- [13] HYNNINEN A, TURUNEN R, ÅBOM M & BODÉN H, Acoustic Source Data for Medium Speed IC-Engines. *Akustiikkapäivät 2011*.
- [14] ISOMOISIO H, TANTTARI J & PELLINEN J, Tehokasta ja täsmällistä meluntorjuntaa säädettävällä Helmholtz-resonaattorilla. *Akustiikkapäivät 2011*.