Jyväskylän yliopiston julkaisuarkisto
Jyväskylä University Digital Archive

UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ

This is an electronic reprint of the original article.
This reprint *may differ* from the original in pagination and typographic detail.

Author(s): Airaksinen, Tuomas; Heikkola, Erkki

Title: Äänenvaimentimien mallinnuspohjainen monitavotteinen muodonoptimointi

Year: 2011

Version:

Please cite the original version:

Airaksinen, T., & Heikkola, E. (2011). Äänenvaimentimien mallinnuspohjainen monitavotteinen muodonoptimointi. In M. Hiipakka (Ed.), Akustiikkapäivät 2011 (pp. 171-176). Akustinen Seura ry. http://www.akustinenseura.fi/images/stories/akustiikkapaivat2011/Airaksinen.pdf

All material supplied via JYX is protected by copyright and other intellectual property rights, and duplication or sale of all or part of any of the repository collections is not permitted, except that material may be duplicated by you for your research use or educational purposes in electronic or print form. You must obtain permission for any other use. Electronic or print copies may not be offered, whether for sale or otherwise to anyone who is not an authorised user.

ÄÄNENVAIMENTIMIEN MALLINNUSPOHJAINEN MONITAVOITTEINEN MUODONOPTIMOINTI

Tuomas Airaksinen[1], **Erkki Heikkola**[2]

[1] Jyväskylän yliopisto
PL 35 (Agora), 40014 Jyväskylän yliopisto
tuomas.a.airaksinen@jyu.fi

[2] Numerola Oy
PL 126, 40101 Jyväskylä
erkki.heikkola@numerola.fi

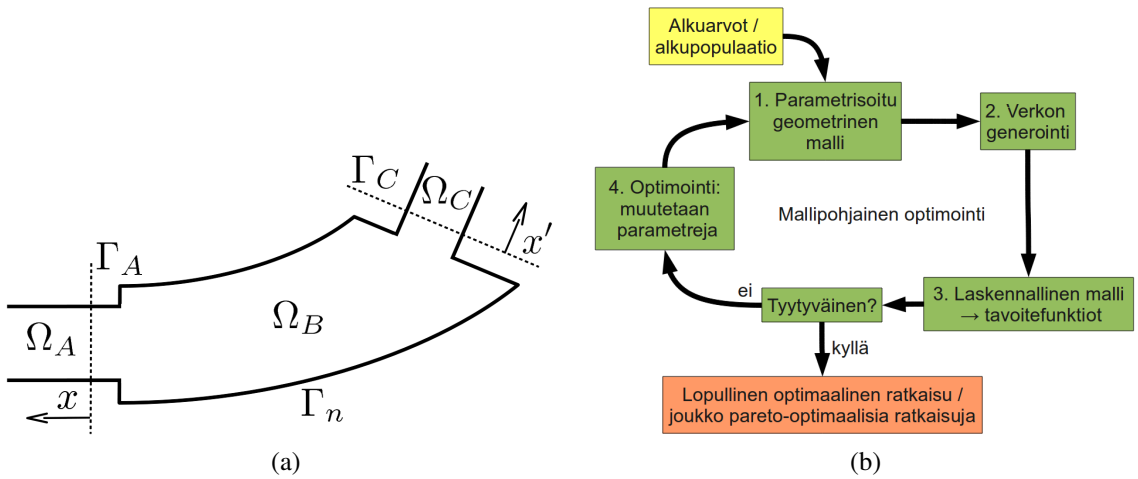
1 JOHDANTO

Putkijärjestelmissä äänenvaimentimien tarkoituksena on vaimentaa ääniaaltoja halutuilla taajuuksilla ja tällä tavoin estää melun kulkeutuminen järjestelmän läpi. Erilaisia äänenvaimentimia tarvitaan esimerkiksi autoissa, ilmastointijärjestelmissä sekä teollisuudessa käytettävien moottoreiden pakokaasujärjestelmissä. Tässä artikkelissa käsitellään reaktiivisten äänenvaimentimien mallinnusta ja muodonoptimointia. Numeerisen simulointimallin ja matemaattisen optimointialgoritmin avulla vaimentimelle voidaan hakea automaattisesti sopivat mitoitukset ja muotoparametrit haluttujen vaimennusominaisuuksien saavuttamiseksi.

Äänenvaimentimen numeeriseen mallinnukseen käytetään hybridimenetelmää, jossa tarkastellaan putkijärjestelmän yksittäistä epäsäännöllistä osaa ja arvioidaan sen vaikutusta akustiseen aaltoon [1, 2]. Säännöllisissä ja tasaisen muotoisissa putkissa etenevä akustinen aalto voidaan esittää aaltomuotoisten kantafunktioiden avulla. Epäsäännöllisessä osassa ratkaistaan akustinen aaltoyhtälö elementtimenetelmällä ja kytketään ratkaisu säännöllisissä osissa käytettäviin kantafunktioesityksiin. Elementtimenetelmä on joustava geometrian muotojen ja materiaalimuutosten suhteen, joten hybridimenetelmän avulla voidaan simuloida luotettavasti monimutkaisten komponenttien ja vaihtuvien materiaaliparametrien vaikutusta painevaihtelun etenemiseen. Menetelmällä saadaan myös suoraviivaisesti arvioitua epäsäännöllisen osan aiheuttama vaimennus painevaihtelussa.

Simulointimallien avulla pyritään yleensä vähentämään aikaavievien ja kalliiden koejärjestelyjen tarvetta tuotekehityksessä ja optimoinnissa. Edistynytkään simulointimalli ei välttämättä johda hyvään lopputulokseen, mikäli sopivien parametrien hakeminen perustuu vain yritykseen ja erehdykseen. Tarvitaan myös matemaattisia optimointialgoritmeja, joiden avulla voidaan hallita useiden parametrien yhteisvaikutus simulointimallin lopputulokseen. Mallinnuspohjaisessa optimoinnissa tavoite esitetään tavoitefunktiona, jonka arvoa pyritään yleensä minimoimaan optimointialgoritmilla. Tavoitefunktion arvo riippuu simulointimallin ratkaisusta, joka edelleen riippuu valituista säätöparametreista. Nämä voivat liittyä esimerkiksi kappaleen mitoituksiin tai materiaaliominaisuuksiin.

Monitavoitteisessa optimoinnissa useita tavoitefunktioita pyritään minimoimaan saman-



(a) (b)

Kuva 1: (a) Putkijärjestelmän läpileikkaus yleisessä tapauksessa: sisääntuloputki Ω_A, mielivaltaisen muotoinen äänenvaimennin Ω_B ja ulosmenoputki Ω_C. (b) Mallipohjaisen optimoinnin periaate.

aikaisesti. Monitavotteisen optimoinnin käsitteitä ja menetelmiä on käsitelty tarkemmin kirjassa [3]. Tässä työssä maksimoidaan melunvaimentimen siirtohäviö usealla taajuusalueella samanaikaisesti säätäen valittuja muotoparametreja. Hybridimenetelmä on toteutettu Numerola Oy:n Numerrin-mallinnuskielellä [2], äänenvaimentimen geometrian verkon generoimiseen käytetään avoimen lähdekoodin Netgen -verkkogeneraattoria [4] ja optimointitehtävän ratkaisemiseen käytetään tunnettua NSGA-II geneettistä optimointialgoritmia [5]. Geneettisten algoritmien etuna on se, että ne ovat helposti liitettävissä erilaisten simulointimenetelmien yhteyteen, eivätkä ne ole herkkiä tavoitefunktioiden ominaisuuksille.

Laskentaesimerkit osoittavat, että esitetyllä menettelyllä saadaan tehokkaasti ratkaistua mallinnuspohjaisia äänenvaimentimien muodonoptimointiongelmia. Tutkimus on raportoitu tarkemmin artikkelissa [6].

2 MATEMAATTINEN MUOTOILU

Akustisen painevaihtelun etenemistä putkijärjestelmässä voidaan mallintaa Helmholtzin yhtälöllä

$$-\boldsymbol{\nabla}\cdot\frac{1}{\rho}\boldsymbol{\nabla}p-\frac{k^2}{\rho}p \;=\; 0, \tag{1}$$

missä p on painevaihtelun amplitudi, $k = \omega/c$ on aaltoluku, ρ on väliaineen tiheys, ω kulmataajuus ja c äänen nopeus väliaineessa. Artikkelissa tarkastellaan putkijärjestelmän yksittäistä osaa, jossa kahden säännöllisen putken välissä on epäsäännöllinen osa. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 1a. Käytämme akustisen aallon numeeriseen mallinnukseen artikkelissa [1] esitettyä hybridimenetelmää, jossa epäsäännöllisessä osassa Ω_B Helmholtzin yhtälö ratkaistaan äärellisten elementtien menetelmää, kun taas säännöllisissä putkissa Ω_A, Ω_C hyödynnetään tunnettuja analyyttisia esitysmuotoja.

Aaltomuotojen amplitudit ja painekenttä äänenvaimentimen sisällä saadaan lineaarisen yhtälöryhmän ratkaisuna, joka on muodostettu käyttämällä hybridimenetelmää. Akustinen siirtohäviö järjestelmän epäsäännölliselle osalle Ω_B määritellään ulosmenevän ja sisääntulevan äänen tehon suhdelukuna, joka saadaan ratkaistuista aaltomuotojen amplitudeista. Hybridimenetelmä on kuvattu tarkemmin artikkeleissa [1, 2, 6].

3 MALLINNUSPOHJAINEN MUODONOPTIMOINTI

Simulointimalliin pohjautuvan muodonoptimoinnin vaiheita on havainnollistettu kuvassa 1b. Seuraavassa annetaan tarkempi kuvaus jokaisesta vaiheesta:

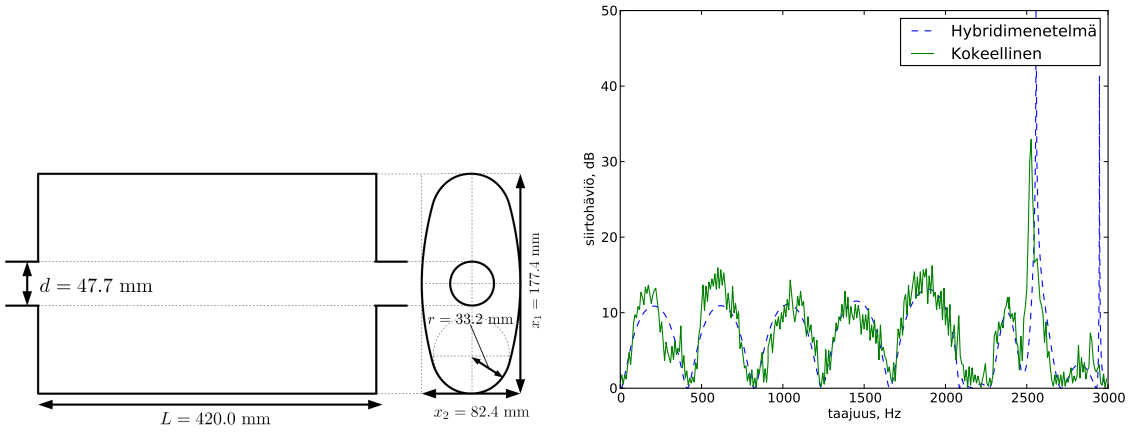
1. Geometrisen mallin parametrisointi: Äänenvaimentimen muoto määritellään sopivien reaaliarvoisten parametrien avulla. Optimointi aloitetaan tietyistä parametrien alkuarvoista. Geneettisiä algoritmeja käytettäessä alkuarvot yleensä muodostetaan satunnaislukujen avulla.
2. Verkon generointi: Äärellisten elementtien menetelmässä käytettävä verkko pitää generoida äänenvaimentimen epäsäännölliselle osalle Ω_B. Verkko generoidaan uudelleen aina kun muotoparametreja muutetaan optimointimenetelmässä.
3. Laskennallinen malli: Tavoitefunktion arvo saadaan ratkaisemalla hybridimalli halutuilla taajuuksilla ja laskemalla edelleen äänenvaimentimen siirtohäviö.
4. Optimointi: Jos tyydyttävä ratkaisu on saavutettu, voidaan optimointialgoritmin suoritus keskeyttää. Muussa tapauksessa säätöparametreja muutetaan pyrkien löytämään tavoitefunktioiden suhteen parempia ratkaisuja.

Mallipohjaisen optimoinnin kukin vaihe voidaan toteuttaa erilaisilla menetelmillä ja ohjelmistoilla, ts. verkon generointiohjelmisto, laskennallinen malli ja optimointialgoritmi voidaan valita vapaasti sillä rajoitteella, että toimiva kommunikaatiorajapinta eri komponenttien välillä säilyy. Mallipohjaisen optimoinnin viitekehys on näinollen hyvin joustava eikä rajoitu mihinkään tiettyyn simulointi- tai optimointimenetelmään.

Monitavotteinen optimointiongelma akustiselle äänenvaimentimelle määritellään siten, että siirtohäviö (transmission loss, TL) maksimoituu kahdessa taajuusalueessa yhtäaikaa. Molempia taajuusalueita vastaa erillinen tavoitefunktio. Äänenvaimentimen muoto määräytyy säätöparametreista $\mathbf{x} = \{x_1, \cdots, x_{n_x}\}$ ja taajuusalueet on määritelty vektoreilla $\boldsymbol{\omega} = \{\omega_1, \cdots, \omega_{n_\omega}\}$ ja $\boldsymbol{\iota} = \{\iota_1, \cdots, \iota_{n_\iota}\}$. Tavoitefunktiot ovat

$$f_1(\mathbf{x}) = -\frac{1}{n_\omega}\sum_{i=1}^{n_\omega}\tau(\mathbf{x}, \omega_i) \qquad \text{ja} \qquad f_2(\mathbf{x}) = -\frac{1}{n_\iota}\sum_{i=1}^{n_\iota}\tau(\mathbf{x}, \iota_i), \tag{2}$$

missä $\tau(\mathbf{x}, f) = \min(TL(\mathbf{x}, f), TL_{max})$. Tässä $TL(\mathbf{x}, f)$ on äänenvaimentimen siirtohäviön arvo säätöparametreilla $\mathbf{x}$ ja $TL_{max} = 50$ dB on siirtohäviön rajoitinarvo. Rajoitinarvo TL_{max} tarvitaan mahdollisten $TL(f)$-käyrän kapeiden piikkien vuoksi, jotka huonontavat optimointimenetelmän konvergoitumista.



(a) (b)

Kuva 2: (a) Kaavio äänenvaimentimesta, jota käytetään hybridimenetelmän validoimiseen. (b) Numeerisesti laskettu siirtohäviö jota verrataan kokeellisesti saatuihin tuloksiin.

4 NUMEERISET KOKEET

4.1 Hybridimenetelmän validointi

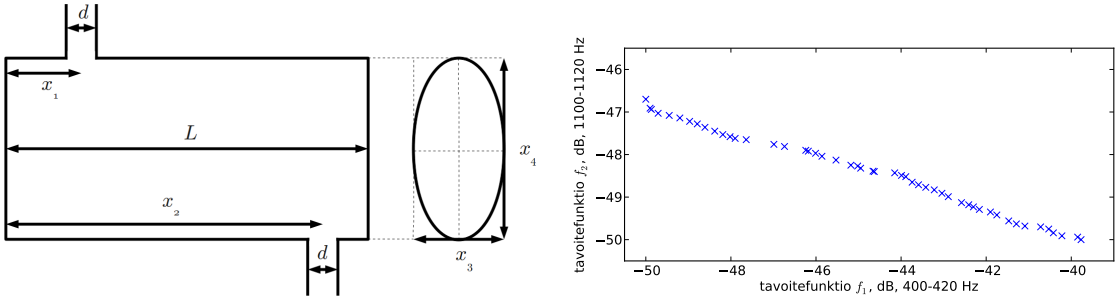
Hybridimenetelmä validoitiin vertaamalla numeerisesti määritettyä siirtohäviötä kokeellisiin tuloksiin, jotka on raportoitu artikkelissa [7]. Ensimmäinen koe artikkelissa [7] on yksinkertainen vaimennuskammio, jonka mitat ja muoto on määritelty kuvassa 2a. Numeeriset ja kokeelliset tulokset on piirretty kuvassa 2b ja niistä nähdään että numeeriset ja kokeelliset tulokset vastaavat hyvin toisiaan. Voidaan todeta, että hybridimenetelmä antaa tarkan arvion siirtohäviöstä valitulla testiongelmalla.

4.2 Optimointitehtävä

Esimerkkinä optimointitehtävän ratkaisemisesta käsitellään kuvan 3a mukaisen äänenvaimentimen mitoitusta. Kammion pituus on $L = 800$ mm ja sisääntulo- ja ulosmenoputkien halkaisijat ovat $d = 50.8$ mm. Optimointia varten määritellään seuraavat äänenvaimentimen muotoon vaikuttavat säätöparametrit: sisääntulo- ja ulosmenoputkien sijainnit $x_1 \in [d/2, L - d/2] = [25.4, 774.6]$ mm $x_2 \in [L/2, L - d/2] = [400, 744.6]$ mm, ja poikkileikkaukseltaan elliptisen kammion ensimmäisen ja toisen akselin pituudet $x_3,\ x_4 \in [50, 100]$ mm.

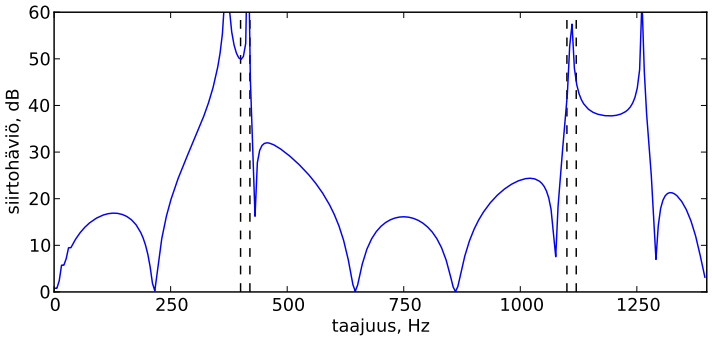
Siirtohäviö optimoitiin taajuusalueilla 400–420 Hz ja 1100–1120 Hz, optimoitavat taajuudet määräytyvät kaavan (2) vektoreista $\boldsymbol{\omega} = [400, 405, 410, 415, 420]$ Hz ja $\boldsymbol{\iota} = [1100, 1105, 1110, 1115, 1120]$ Hz. Alkupopulaatiossa tavoitefunktioiden arvot olivat keskimäärin $f_1 = -15$ dB ja $f_2 = -15$ dB. Optimoinnin myötä tavoitefunktioiden arvot paranivat yli 25 dB verrattuna satunnaisen lähtöpopulaation keskimääräisiin arvoihin.

Kuvassa 3b on optimointitehtävän ratkaisuna saatava Pareto-optimaalinen rintama sa-



(a) (b)

Kuva 3: (a) Äänenvaimentimen kaaviokuva. (b) Pareto-optimaalinen rintama optimointitehtävälle.

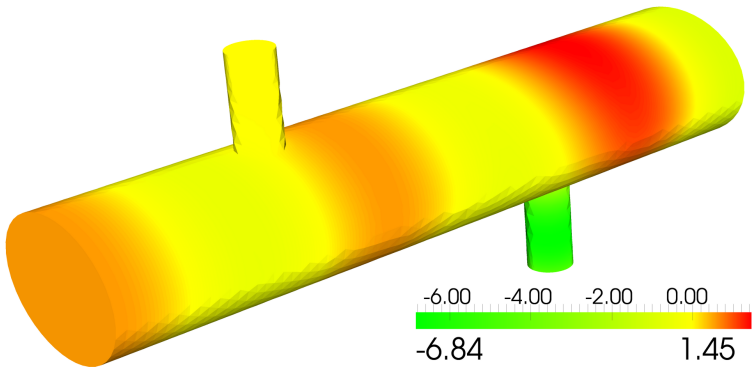


Kuva 4: Akustinen siirtohäviö taajuuden funktiona optimaaliselle ratkaisulle. Siirtohäviö maksimoidaan taajuusalueilla 400-420 Hz ja 1100-1120 Hz.

dan NSGA-II-algoritmin sukupolven jälkeen. Optimointi konvergoitui usealla satunnaislukugeneraattorin siemenluvulla suoritetuissa testeissä samalle rintamalle, joten algoritmin voidaan katsoa toimivan luotettavasti. Kuvassa 4 on piirretty siirtohäviö taajuuden funktiona valitulle Pareto-optimaaliselle ratkaisulle $f_1 = -49.7$ dB , $f_2 = -47.0$ dB, joka saadaan säätöparametrien arvoilla $\mathbf{x} = [206, 568, 71, 100]$ mm. Nähdään, että erityisen hyvä melunvaimennus saadaan molemmissa optimoiduissa taajuusalueissa. Kuvassa 5 on äänenpaineen reaaliosa esimerkkiratkaisulle. Kuvasta nähdään, että kammiossa muodostuu seisova aalto siten, että aallon solmukohta sijoittuu ulosmenoputken kohdalle. Tämä vaimentaa ulosmenevää melua merkittävästi.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä on käsitelty akustisen äänenvaimentimen monitavoitteista optimointia. Äänenvaimentimen muotoparametrit optimoitiin siten, että sen akustinen siirtohäviö maksimoitui. Akustinen vaimennus laskettiin numeerisesti hybridimenetelmällä, joka osoittautui tarkaksi menetelmäksi äänenvaimenninkomponentin akustiikan mallintamisessa. Optimointimenetelmänä käytettiin NSGA-II-algoritmia, jota käytettiin siten, että kahta taajuusaluetta optimoitiin samanaikaisesti. Optimointi paransi merkittävästi äänenvaimenninten melunvaimennusta valituilla taajuusalueilla. Esitelty mallipohjaisen optimoinnin menetelmä mahdollistaa luotettavan, geneerisen ja kehittyneen lähestymista-



Kuva 5: Äänenpaineen reaaliosa optimaaliselle ratkaisulle taajuudella $f = 1110$ Hz.

van monenlaisiin kolmiulotteisiin äänenvaimenninten optimointiongelmiin.

VIITTEET

[1] KIRBY R, Modeling sound propagation in acoustic waveguides using a hybrid numerical method, *J. Acoust. Soc. Am.*, **124**(2008) 4, 1930–1940.

[2] HEIKKOLA E, Putkijärjestelmässä etenevän painevaihtelun mallinnus hybridimenetelmällä, *Akustiikkapäivät 2009*, sivut 252–257, Akustinen Seura ry.

[3] MIETTINEN K, *Nonlinear multiobjective optimization*, International Series in Operations Research & Managemenent Science, Springer, 1998.

[4] SCHÖBERL J, NETGEN - an advancing front 2D/3D-mesh generator based on abstract rules, *Comput. Visual. Sci*, **1**(1997), 41–52.

[5] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, & MEYARIVAN T, A fast elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE T. Evolut. Comput.*, **6**(2000), 182–197.

[6] AIRAKSINEN T & HEIKKOLA E, Multiobjective muffler shape optimization with hybrid acoustics modelling, Laitosraportti B6/2010, Tietotekniikan laitos, Jyväskylän yliopisto. Lähetetty julkaistavaksi.

[7] GERGES S N Y, JORDAN R, THIEME F A, COELHO J L B, & ARENAS J P, Muffler modeling by transfer matrix method and experimental verification, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **27**(2005), 132–140.