

SUODATTAVAT RAKENTEET JA AKUSTISET METAMATERIAALIT

Jukka Tanntari ja Heikki Parviainen

VTT
PL 1300 / Tekniikankatu 1
33101 TAMPERE
etunimi.sukunimi@vtt.fi

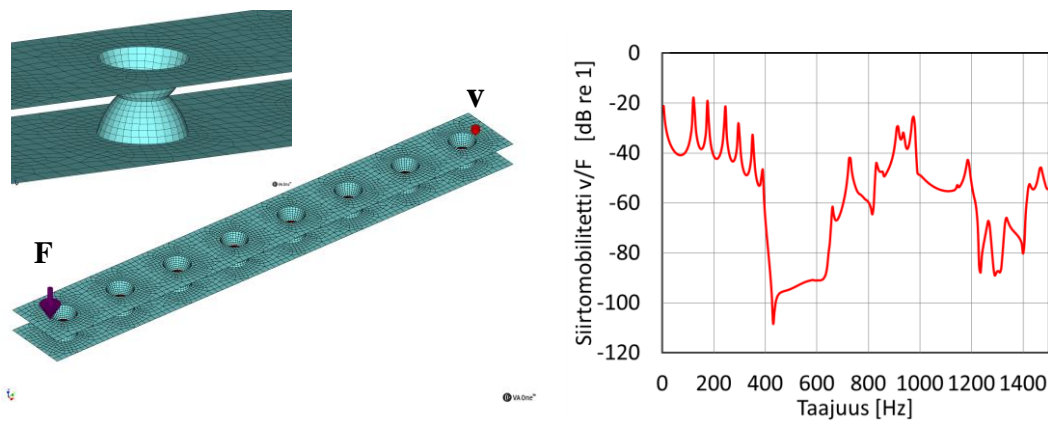
Tiivistelmä

Suodattavissa rakenteissa mekaaniset aallot voivat edetä vapaasti vain tietyillä taajuuksilla tai tiettyyn suuntaan. Estokaistoilla esiintyy voimakasta etenemisvaimenemista. Estokaistoja esiintyy monissa perinteisissä, jaksollisissa rakenteissa. Niissä sirontaa synnyttävien rakenneosien välimatkat ovat tyypillisesti samaa kokoluokkaa kuin aallonpituus. Metamateriaaleissa rakenneosat ovat aallonpituuteen nähden pieniä. Tässä katsauksessa käsitellään metamateriaaleja koskevaa tutkimusta erityisesti äänenhallinnan kannalta ja arvioidaan tämän perusteella materiaalien käyttöpotentiaalia. Erityyppisten rakenteiden käyttäytymistä havainnollistetaan simulointiesimerkeillä. Lopuksi pohditaan automaattisen suunnittelun ja optimoinnin käyttömahdollisuuksia.

1 JOHDANTO

Koneiden ja kuljetusvälineiden rakenteissa tavoitellaan usein keveyttä ja suurta ominaisjäykkyyttä. Ominaisuudet ovat akustisesti epäedullisia. Suuresta ominaisjäykkyydestä, jolla tässä tarkoitetaan erityisesti taiputusjäykkyyden ja pinta-alamassan suhdetta, aiheutuu taiputusaaltojen suuri etenemisnopeus. Sen ollessa lähellä ilmaäänäen etenemisnopeutta levyrakenne eristää koinsidenssi-ilmion vuoksi huonosti ääntä ja säteilee sitä tehokkaasti. Kevyillä, jäykillä rakenteilla myös alimmat ominaistajuudet ovat suhteellisen suuria. Tämä voi olla akustisesti hyödyllistä hyvin pienillä taajuuksilla, mutta massalain mukaisen ääneneristävyyden taajuusalue voi jäädä kapeaksi. Hyvien konstruktiivisten ja meluakustisten ominaisuuksien välinen ristiriita on eräs merkittävä ajava tekijä uusien kevytrakenneratkaisujen kehittämisessä.

Levyrakenteissa olevilla epäjatkuvuuksilla voi olla merkittäviä vaikutuksia niiden akustisiin ominaisuuksiin. Eräs epäedullinen vaikutus on säteilysuhteen kasvu pienillä (alkriittisillä) taajuuksilla [1]. Edullisia vaikutuksia voivat olla epäjatkuvuuksien aiheuttamista interferensseistä johtuvat suodatusilmiöt. Suodatuksen vuoksi aallot eivät etene rakenteessa vapaasti tietyillä taajuusalueilla (stopband, bandgap, estokaista) tai tiettyyn suuntaan, vaan vaimenevat nopeasti. Suodatus voi tulla tavoitellun lisäjäykkyyden tai -lujuuden sivutuotteena. Klassisia esimerkkejä tästä ovat jäykistetyt (ribbed) levyt sekä erilaiset ristikkorakenteet (grid) [2,3]. Näissä suodatusta esiintyy taajuuksilla, joilla epäjatkuvuuden alueellinen toistumiskaala on aallonpituuden suuruusluokkaa. Suodatus tunnetaan Bragg-suodatuksena [4]. Eräs mielenkiintoinen käytännön rakenne on kalottikennorakenne [5]. Jaksollisen erityisrakenteen vuoksi rakenne suodattaa voimakkaasti tiettyjä taajuuksia (kuva 1). Kalottikennolla on useita mielenkiintoisia, voimakkaasta leikkausjäykkyydsvaihtelusta johtuvia akustisia ominaisuuksia, joihin ei ole mahdollisuutta puuttua tässä yhteydessä.



Kuva 1. Eräs kalottikennorakenne ja 400...600 Hz estokaista siirtomobilitetissa v/F .

Valmistustekniikkojen kehittyminen on synnyttänyt uusia ideoita ja mahdollisuuksia suodatuksen aikaansaamiseksi. *Metamateriaaleissa* on keinotekoinen, aallonpituuteen nähden hienojakoinen, usein jaksollinen rakenne. Estokaistojen synty niissä ei yleensä liity alueelliseen skaalaan, vaan paikallisiin ilmiöihin. Taajuudet voivatkin olla huomattavan paljon pienempiä kuin Bragg -suodatuksessa (tästä nimitys Sub-Bragg -suodatus).

Tämän katsauksen tavoitteena on luodata akustisten metamateriaalien tutkimusta ja materiaalien tarjoamia uusia mahdollisuuksia rakenteiden äänensäteily- tai ääneneristävyysominaisuuksien hallintaan.

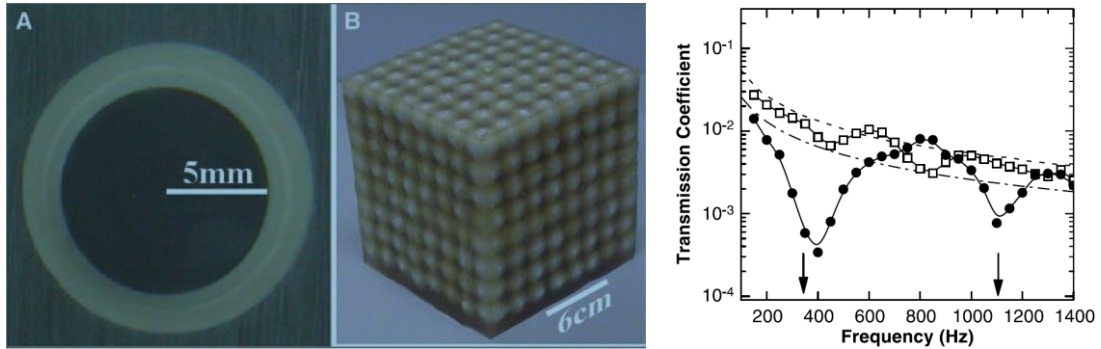
2 AKUSTISET METAMATERIAALIT

Akustisten metamateriaalien yleisin perustyyppi on ”Locally Resonant Acoustic Metamaterial” LRAM [6], jossa on värähtelyyn viritystaajuuksillaan reagoivista, diskreeteistä resonaattoreista muodostuva hila. Ensimmäisiä julkaisuja aiheesta oli Liu’n ym. tutkimus [7], jossa LRAM-rakenteesta käytettiin nimitystä ”Locally Resonant Sonic Material”. Tutkimuksessa silikonipinnoitettuja, halkaisijaltaan 10 mm lyijykuulia upotettiin epoksi-matriisiin (kuva 2). Impedanssiputkimittauksissa todettiin kaksi estokaistaa, joilla ääneneristävyys oli hyvin suuri. Merkittävää oli kuulien välinen pieni etäisyys, luokkaa sadasosa mekaanisesta aallonpituudesta. Ensimmäisen estokaistan todettiin liittyvät kuulian jousi-massa -resonanssiin ja jälkimmäisen silikonipinnoitteen resonointiin. Rakennetta käsitellään myös viitteessä [8].

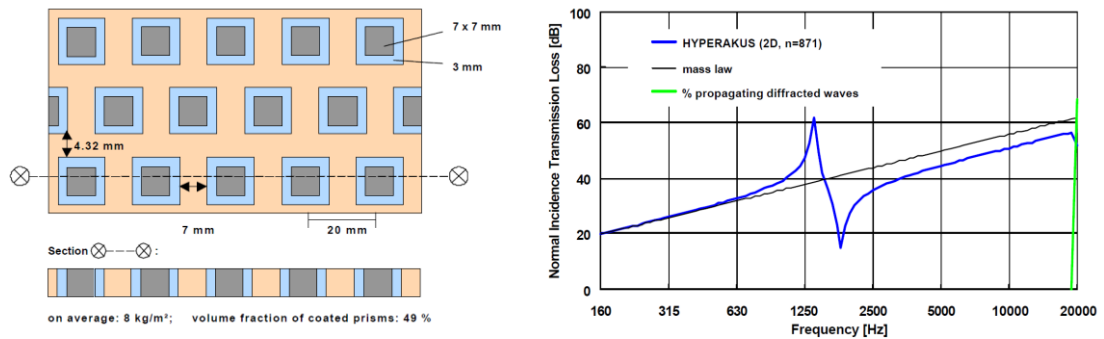
Liu’n ym. tulosten innoittamana Maysenhölder [9] käsitteli teoreettisesti samantyyppistä rakenneideaa (kuva 3) todeten resonaattoreiden mahdollistavan merkittäviä ylityksiä massalain mukaiseen ääneneristävyteen. Naify ym. [10] lisäsivät pistemassoja esijännitetyyn ohueen kalvoon ja kalvohdistelmiin (kuva 4). Impedanssiputkimittauksissa todettiin myös massalain ylityksiä ja negatiivisia dynaamisia massoja. Weith & Petersson [11] havainnollistivat laskentaesimerkeillä puupalkkiin upotettujen pistemassojen joustavan pinnoittamisen mahdollistaman Sub-Bragg suodatuksen ja jäykkiin massoihin perustuvan Bragg-suodatuksen välistä eroa. Estokaistan leventämistä demonstroititiin virittämällä peräkkäisiä resonaattoreita lähekkäisille taajuuksille.

Xiao ym. [12] tutkivat teoreettisesti äärettömän levyn eristävyyskäyttäytymistä diffuusilla akustisella herätteellä. Laskennassa käytettiin levyn päälle lisättyä erillistä resonaattorihilaa. Massalain alueelle viritetyillä resonaattoreilla voitiin saavuttaa korkea TL-huippu, mutta siihen liittyi myös TL-kuoppa viritystaajuuden yläpuolella. Kriittisen taajuuden

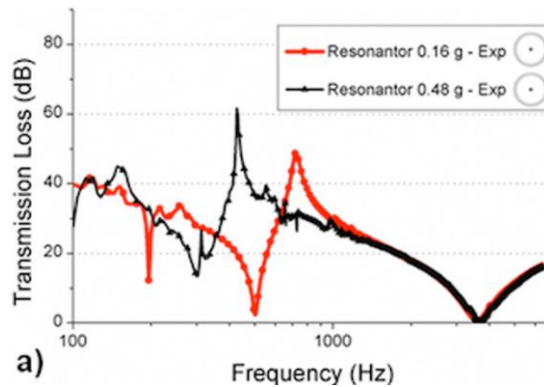
alueelle viritetyillä resonaattoreilla voitiin täyttää koinsidenssikuoppa ilman havaittavia heikentäviä sivuvaikutuksia (kuva 5). Song ym. [13] tutkivat teoreettisesti estokaistojen leventämismahdollisuuksia yleistetyillä resonaattoreilla (kuva 5). Erityyppisillä resonaattoreilla vaikutettiin erikseen taivutusvärähtelyyn liittyviin poikkeamaan ja kiertymään. Tulosten mukaan erityyppisillä resonaattoreilla voidaan saada aikaan suodatusta tehostavia keskinäisvaikutuksia.



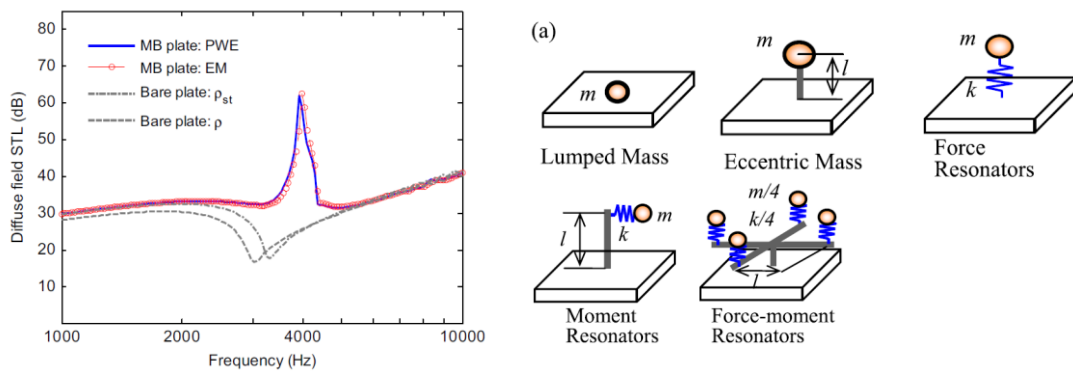
Kuva 2. "Locally Resonant Sonic Material" ja mitattu tehonläpäisyysuhde. Estokaistat noin 400 ja 1100 Hz. Vertailukäyränä täyteen materiaali.[7].



Kuva 3. Pinnoitettuja lyijymassoja epoksimatriisissa ja laskettu ääneneristävyys [9].



Kuva 4. Metamateriaalikalvo ja lisämäärän vaikutus ääneneristävyyteen [10]. Kuvan käyrät ovat yhdelle kalvolle. Kalvon halkaisija 29 mm.



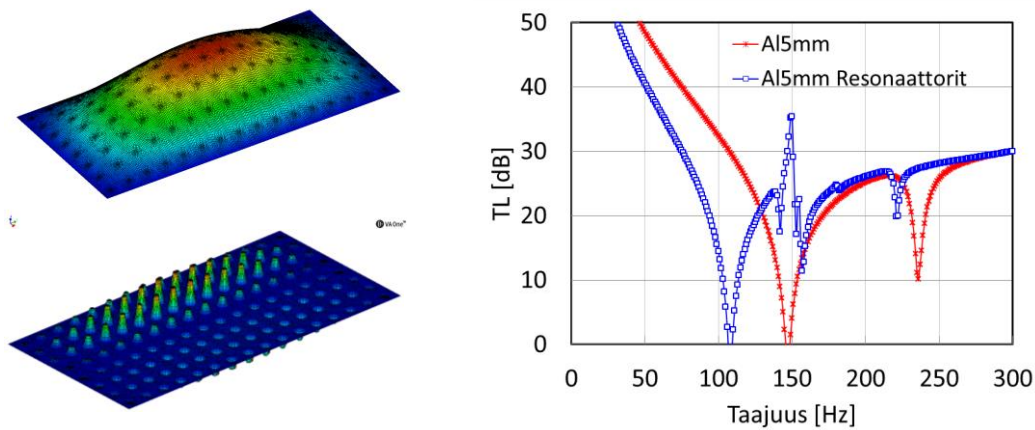
Kuva 5. Vas: Periodisella resonaattorihilalla aikaansaatu antikoinssidenssi 4 mm alumiinilevyssä [12]. Oik: erityyppisiä resonaattoreita [13].

Romero-Garcia ym. [6] tutkivat teoreettisesti ja kokeellisesti mekaanis-akustisen sirotta-jarakenteen (locally multi-resonant acoustic metamaterial, LMRAM) toimintaa. Mielenkiintoinen rakenneidea perustuu pieniin, pinottuihin LDPF-muovisiin U-palkkeihin. Estokaistoja muodostuu sekä mekaanisten että akustisten resonanssien kautta. Claeys ym. [14] tutkivat teoreettisesti globaalia värähtelynvaimennusta levyrakenteessa resonaattorien välimatkan funktiona. Tuloksena oli, että vaimennus heikkenee resonaattorien välisen etäisyyden kasvaessa lähelle mittaa $0.5 \times$ rakenteellinen aallonpituus. Meng ym. [15] on soveltanut LRAM-tyyppistä rakennetta vedenalaisen absorption tehostamiseen sukellusveneissä. Muita kuin LRAM-tyypin akustisia metamateriaaleja ovat mm. erilaiset reikä-, ristikko- ja kennorakenteet, palkki/poimurakenteet tms., [16-20].

LRAM-rakenteisiin liittyy tiettyä hypeä kuten materiaalin *negatiivinen tiheys (tai massa)* [6,8]. Tämä on matemaattinen temppu, joka tarvitaan mekaniikan toisen peruslain toteuttamiseksi esim. yhdeksi massaksi homogenisoidussa massa-jousi-massa järjestelmässä sen resonanssitaajuuden lähellä, [21]. Myös massalakea käytetään usein virheellisesti, esim. [10]. Se ei ole mielekäs vertailukohta alimpien ominaistuuksien alueella, vaan vasta huomattavasti niiden yläpuolella (ominaismuotojen massa-alueella).

3 HYÖDYNTÄMISPOTENTIALI JA MITOITUS

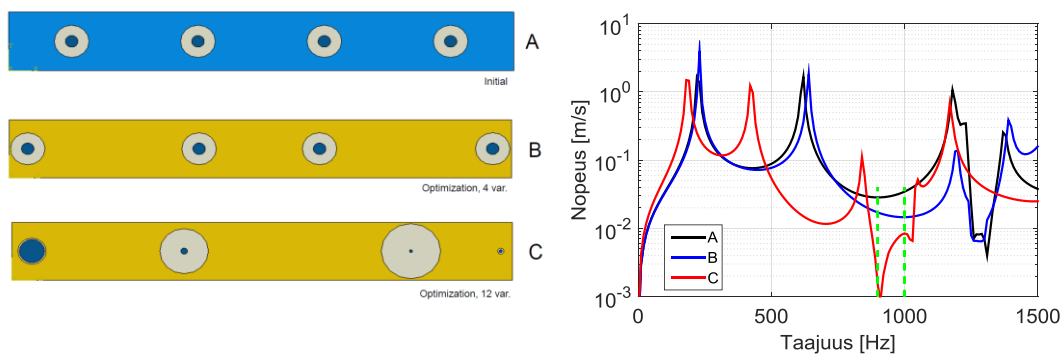
LRAM-materiaalissa estokaistojen vaikutus riippuu herätteen luonteesta. Keskittynyt (piste- tai viivatyyppinen) heräte synnyttää pääasiassa ns. vapaita taivutusaaltoja (toisella tavalla tulkittuna resonoivaa värähtelyä), johon estokaistat vaikuttavat suoraan. Tavoiteltuja hyötyjä voivat olla mm. (i) syöttötehon minimointi, (ii) värähtelyn vaimentaminen rakenteen tietyssä pisteessä, (iii) värähtelyn globaali minimointi tai (iv) äänensäteilyn minimointi. Jakautuneen herätteen tapauksessa kohteena on yleensä ilmaäänän eristävyys. Estokaistojen vaikutus on tällöin rajatumpaa. Äänikenttä kytkeytyy rakenteen vapaisiin taivutusaaltoihiin vain rajoitetusti, etupäässä kriittisen taajuuden (koinssidenssi) tai alimpien taivutusominaistuuksien alueella. Asiasta tarkemmin, ks. [1, luku 5]. Muilla taajuuksilla äänenläpäisyä hallitsee massa-alueellaan värähtelevien ominaismuotojen vaste, johon estokaistat eivät juuri vaikuta. Kuvassa 6 on alumiinilevyn alimman taivutusominaistajuuden (noin 155 Hz) kohdalle viritetyn 128 resonaattorin hilan vaikutus äänen eristävyysminimit. Hila toimii dynaamisena värähtelynvaimentimena: vaimennetun ominaistajuuden ylä- ja alapuolille syntyvät uudet vastemaksimit ja niihin liittyvät eristävyysminimit. Alkuperäisellä ominaistajuudella eristävyys paranee yli 30 dB, mutta heikkenee pienillä taajuuksilla ts. alimman ominaismuodon jäykkyysalueella.



Kuva 6. Resonaattorihilan vaikutus 5 mm alumiinilevyn ääneneristävyyteen. Vas: vaste viritystaajuuksella ilman resonaattoreita/resonaattoreilla. Oik: eristävyyskäyrät.

LRAM-metamateriaali voidaan toteuttaa lukemattomilla eri tavoilla. Mikään ei esimerkiksi edellytä resonaattorien olevan erillisiä, diskreettejä komponentteja. Ratkaisusta ei vielä ole kertynyt laajaa tietämystä, mikä vaikeuttaa liikkeellelähtöä konseptoinnissa ja käytännön mitoituksessa. Automatisoitu laskenta ja sitä ohjaavat optimointialgoritmit voivat auttaa sekä parhaiden että uusien, odottamattomien ratkaisujen löytämisessä. Tehdävää varten määritellään kohdefunktiona toimiva, minimoitava suure, esim. haluttu estokaista sekä joukko ratkaisun luonnetta ja geometriaa rajaavia muuttujia.

Kuvassa 7 on yksinkertainen esimerkki alumiinipalkissa (320 x 40 x 5 mm) neljällä resonaattorilla taajuuksivälillä 900...1000 Hz toteutetun estokaistan syvyyden maksimoinnista. Tapauksessa B (4 suunnittelumuuttujaa) referenssitapauksen A resonaattoreita voidaan siirrellä palkin pituussuunnassa. Tapauksessa C (12 suunnittelumuuttujaa) myös resonaattorin eri komponenttien halkaisijat voivat muuttua.



Kuva 7. Estokaistan syvyyden optimointi alumiinipalkissa taajuuksivälillä 900...1000 Hz. Suunnitteluparametreina resonaattorien paikka (B) tai paikka ja mittasuhteet (C).

Matemaattisen optimointitehtävän minimoitavana kohdefunktiona on tarkasteltavan taajuuksivälin maksimivaste (kuvassa oikean reunan nopeusvasteen itseisarvo vasemman reunan harmoniseen voimahäätteen). Optimointi toteutettiin Abaqus-Matlab -ympäristössä. Epälineaarinen, rajoitettu optimointitehtävä ratkaistiin numeerisesti Sequential quadratic programming-menetelmällä (SQP). SQP-algoritmien keskeinen osa on Lagrangen funktion kvadraattiseen approksimaatioon perustuvan aliprobleeman ratkaiseminen. Jokaisella iterointikierröksellä tarvitaan kohde- ja rajoitusfunktioiden gradientit suun-

nittelumuuttujien suhteen sekä Lagrangen funktion päivitetty Hessen matriisi. Differenssimenetelmään perustuva gradienttilaskenta on tyypillisesti SQP-prosessin aikaa vievin osa. Tämä myös edellyttää funktioilta riittävää sileyttä, vaikka tietyistä teoreettisista vaatimuksista voidaan käytännössä joustaa. Laskenta-aika riippuu olennaisesti funktioiden ja muuttujien lukumäärästä sekä vaaditusta ratkaisun tarkkuudesta. Esimerkkitehtävässä tyypillinen funktiolaskentojen lukumäärä oli 100-300.

4 KIITOKSET

Työ on tehty Tekesin rahoittaman Fimecc-HYBRIDS-ohjelman projektissa P3/SP1.

VIITTEET

- [1] Fahy F & Gardonio P, Sound and structural vibration. Academic Press 2007.
- [2] Cremer L, Heckl M & Petersson B A T, Structure-borne sound. Springer, 2005.
- [3] Mead D J, Wave propagation in continuous periodic structures: Research contributions from Southampton, 1964–1995. *J. Sound Vib.* 190(1996), 495-524.
- [4] Brillouin L, Wave Propagation in periodic structures. Dover, 1953.
- [5] Juutilainen T, Kalottikeno. *Ohutlevy* 2/2012, 28-30.
- [6] Romero-García V et al, Multi-resonant scatterers in sonic crystals: Locally multi-resonant acoustic metamaterial. *J. Sound Vib.* 332(2013), 184-198.
- [7] Liu Z et al, Locally Resonant Sonic Materials. *Science* 289(2000), 1734-1736.
- [8] Sheng P et al, Locally resonant sonic materials. *Physica B* 338 (2003) 201-205.
- [9] Maysenhölder W, Transmission loss of inhomogeneous plates with local resonators: methods of theoretical modelling. *Proceedings, Forum Acusticum 2002.*
- [10] Naify C J, Scaling of membrane-type locally resonant acoustic metamaterial arrays. *J. Acoust. Soc. Am.* 132(2012), 2784–2792.
- [11] Weith W & Petersson B A T, Periodic effects of resonant inserts in microstructure-composites. *Proceedings, NOVEM 2005.*
- [12] Xiao Y et al, Sound transmission loss of metamaterial-based thin plates with multiple subwavelength arrays of attached resonators. *J. Sound Vib.* 331(2012), 5408–5423.
- [13] Song, Y et al, Analysis and enhancement of flexural wave stop bands in 2D periodic plates. *Physics Letters A* 379(2015), 1449–1456.
- [14] Claeys C C et al, Global plate vibration reduction using a periodic grid of vibration absorbers. *Proceedings, ISMA2012-USD2012.*
- [15] Meng H et al, Optimization of locally resonant acoustic metamaterials on underwater sound absorption characteristics. *J. Sound Vib.* 331(2012), 4406–4416.
- [16] Diaz A R, Design of band-gap grid structures. *Struct. Multidisc. Optim.* 29(2005), 418–431.
- [17] Halkjær S, Maximizing band gaps in plate structures. *Struct. Multidisc. Optim.* 32(2006), 263–275.
- [18] Zhu R et al, A chiral elastic metamaterial beam for broadband vibration suppression. *J. Sound Vib.* 333(2014), 2759–2773.
- [19] Wang Y-F & Wang Y-S, Multiple wide complete bandgaps of two-dimensional phononic crystal slabs with cross-like holes. *J. Sound Vib.* 332(2013), 2019–2037.
- [20] Wen, J et al, Directional propagation characteristics of flexural wave in two-dimensional periodic grid-like plate structures. *ICSV14, 2007.*
- [21] Huang H H et al, On the negative effective mass density in acoustic metamaterials. *Int. J. Eng. Sci.* 47 (2009) 610–617.