ISTUIMEEN INTEGROIDUN ÄÄNITUNTUMALAITTEEN VÄRÄHTELYN OPTIMOINTI PIENILLÄ TAAJUUKSILLA

Jukka Linjama[1], **Seppo Uosukainen**[2], **Timo Avikainen**[3] **ja Tommi Immonen**[1]

[1] Flexound Systems Oy
Finnoonniitynkuja 4
02270 ESPOO
etunimi@flexound.com

[2] SU Akustiikka
Lehmustie 1 B
00780 Helsinki
etunimi.sukunimi@pp.inet.fi

[3] Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
Rakennedynamiikka ja vibroakustiikka
PL 1000
02044 VTT
etunimi.sukunimi@vtt.fi

Tiivistelmä

Suomessa kehitetty FLEXOUND Augmented Audio™ -äänentoistoratkaisu tuo moniaistisen kuuntelukokemuksen pehmeisiin tyynymäisiin tuotteisiin ja istuimiin. Elokuvasalin tuolien selkänojaan integroituna saavutetaan tarkka istuinkohtainen äänentoisto. Äänituntumalaitteeksi kutsutun ratkaisun ydin on levymäinen herätelähde, elastinen värinäelementti EVE, joka voidaan integroida istuimen sisään. Elementti säteilee ilmaäänen ja tuottaa istuimen pinnassa pienillä taajuuksilla tuntuvan äänivärähtelyn.

Ratkaisun optimaalinen toiminta yli koko audioalueen taajuuskaistan edellyttää huolellista vibroakustista suunnittelua. Bassotoisto muodostuu sekä kuultavasta lähikentästä että istujan tuntemasta tuolin värähtelystä. Esityksessä keskitytään istuimen selkänojan ratkaisuihin, joissa vain yhtä stereofonista EVE-lähdettä käyttämällä värähtely saadaan leviämään istuimen selkänojaan tasaisesti. Istuimen värähtelyjakaumaa simuloidaan numeerisesti Comsol Multiphysics -ympäristössä. Mallinnustyön tavoitteena on suunnittelusääntöjen luominen hyvin erityyppisten istuimien äänentoiston äänituntumatoteutuksiin. Tulokset osoittavat, että istuimen runkorakennetta ja pehmeitä osia hyödyntämällä äänituntumatoisto saadaan riittävän tasaiseksi taajuusalueella 20 – 100 Hz.

© 2019 Jukka Linjama, Seppo Uosukainen, Timo Avikainen ja Tommi Immonen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

1 JOHDANTO

Suomessa kehitetty uudenlainen Flexound Augmented Audio -äänentoistoratkaisu mahdollistaa moniaistisen, laajennetun kuunteluelämyksen: lähikenttäkuuntelun ja äänen tuntemisen pinnan värähtelynä. Alun perin terapiakäyttöön suunnatun innovaation pohjalle on kehitetty tyynymäisiä tuotteita, mm. HUMU Smart Cushion kuluttajamarkkinoille (kuva 1). Paras kuuntelukokemus saavutetaan, kun ääntä säteilevä värähtelylähde, elastinen värinäelementtti (Elastic vibrating element EVE) on integroitu istuimeen. Tällöin värähtely ei keskity ainoastaan pään ja hartioiden seudulle, vaan jakautuu laajemmalle alueelle. Lisäksi ilmäänen kautta aistittu bassotoisto on voimakkaampi, koska ääntä säteilevä pinta on laajempi. Istuimiin integroitua Augmented Audio -järjestelmää voidaan käyttää elokuvateatterissa täydentämään kaiuttimien äänentoistoa. Ensimmäinen toteutus otettiin käyttöön Suomessa Elokuvateatteri Kinossa Mäntyharjulla (kuva 1, [1]) ja käyttäjäpalaute on ollut positiivista. Äänikokemus kokonaisuutena on immersiivisempi kuin pelkillä kaiuttimilla toistettuna, ja puhedialogin selkeys on hyvä riippumatta istuinpaikasta.

Kuva 1. HUMU Augmented Audio cushion, ja Flexound -istuimia Elokuvateatteri Kinossa Mäntyharjulla.

Ratkaisun ydin on elastinen värinäelementti EVE^{TM}, kerroksittainen häviöllinen levyrakenne, jonka toimintaa on mallinnettu ja simuloitu viitteessä [21]. Elementin vibroakustiset ominaisuudet määrittävät äänensäteilyn lähi- ja kaukokenttään, sekä pinnassa tuntuvan värähtelyn. Rakenteen akustisen suorituskyvyn kuvaaminen ja optimointi on haastavaa, koska värähtelevät huokoiset kerrokset sekä tuottavat akustisia häviöitä että välittävät energiaa. Elementissä huokoinen absorptiomateriaali toimii siis sekä ilmaäänen että mekaanisen värähtelyn välittäjänä. Oikein mitoitetulla rakenteella saavutetaan hyvä hyötysuhde ja

äänenlaatu. EVE tuottaa jakautuneena äänilähteenä, joka kuulosta hyvin luonnollisesta sellaisenaan, vaikka äänimaisema aistitaan ikään kuin takaviistossa.

Signaalikäsittelyllä viimeistellään vasteen tasaisuus. Kuulokkeille kehitettyä binauraalista prosessointia voidaan myös hyödyntää äänikuvan levittämisessä enemmän myös etuviistoon, mutta lähikenttäkuuntelun luonteesta johtuen tehtävä ei ole suoraviivainen ja vaatii vielä kehitystyötä. Ensimmäisiä kokeiluja binauraalisen prosessoinnin hyödyntämisestä Augmented Audio -äänentoistossa jota on jo tehty Aalto-yliopistossa [3].

2 YLEISTÄ COMSOL-OHJELMASTA

COMSOL Multiphysics on elementtimenetelmään (FEM) perustuva laskentaohjelmisto, joka tarjoaa suhteellisen laajan mahdollisuuden monifysikaalisten ratkaisujen samanaikaiseen laskemiseen ja analysointiin. Mukaan voi liittää perinteisen rakennemekaniikan lisäksi lämmönhallintaa, virtausdynamiikkaa, akustiikkaa, sähkömagnetiikkaa, MEMS sovelluksia jne.

Mallinnuksessa käytettävät parametrit voidaan lisätä jo heti mallinnuksen alussa parametrilistaan, jolloin laskentamallia on helppo päivittää muuttamalla niiden arvoja. Parametreja hyväksikäyttäen voidaan helposti parametripyyhkäisyllä tehdä herkkyysanalyysiä missä lasketaan ja tulostetaan annettujen rajoitusten sisällä valittuja parametreja esimerkiksi jonkin toisen muuttujan funktiona. Ratkaisija suorittaa laskuiteraatioita niin kauan, kunnes tulos on annetun virhemarginaalin sisällä. Eräs ohjelmiston merkittävä etu on sen avoimuus, kaikki laskentayhtälöt ovat käyttäjän luettavissa ja tarvittaessa muokattavissa, kunhan vain tietää, mitä on tekemässä. Materiaalikirjastossa on mukana yleisimpien insinöörisovelluksissa käytettyjen materiaalien parametrit, mutta sinne on helppo käyttäjän lisätä materiaaliparametreja.

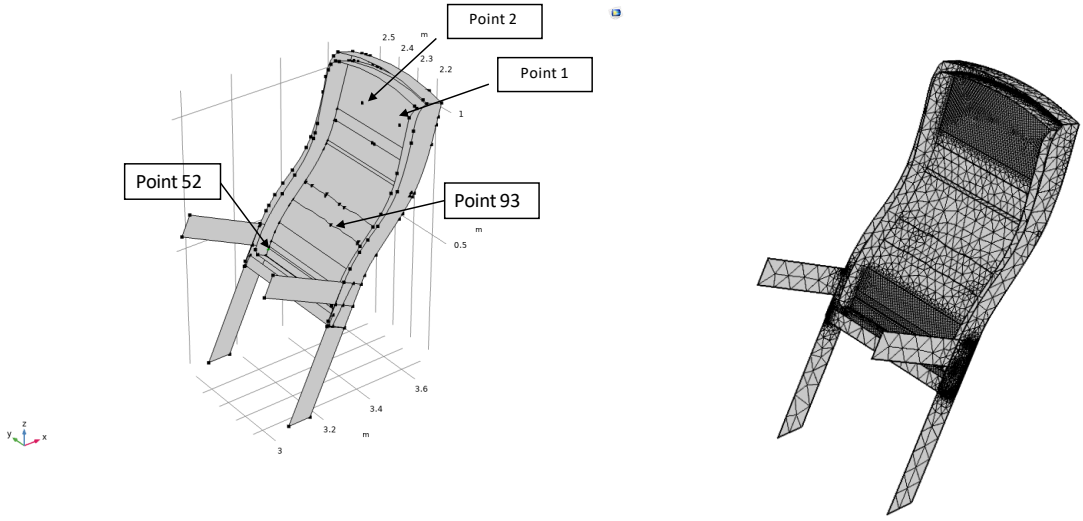
Analysoitavaa rakennetta kuvaava geometriamalli voidaan luoda ohjelmiston omilla mallinrakennustyökaluilla tai vaihtoehtoisesti ulkopuolinen geometria voidaan lukea yleisemmissä CAD-formaateissa. Voidaan myös lukea verkko, jonka Comsol-ohjelmisto muuntaa geometriaksi. Tämän jälkeen geometriamalli verkotetaan Comsol-ohjelmiston omalla verkottajalla.

3 VIBROAKUSTINEN MALLINNUS JA SIMULOINTI

Istuimen dynaamista vastetta mallinnettiin numeerisesti Comsol Multiphysics –ohjelmistolla, versiolla 5.4. Tässä esityksessä kuvataan simulointituloksia istuimen selkänojan osalta taajuusalueella 0 – 200 Hz. Pohjana on olemassaolevan istuimen geometria, joka syötettiin ensimmäisiä simulointeja varten step-fileinä ja viimeisimpiä varten Nastran-verkkona, jonka Comsol muunsi geometriaksi. Apurunko, selkänoja, jalat ja käsinojat mallinnettiin kuorina, vaahtomuovit solideina, ja apurungon ja selkänojan välinen tukipalkki ensimmäisissä mallinnuksissa Comsolin linear extension –menetelmällä ja viimeisimmissä solidina. Mallinnuksessa käytettävien osien materiaali oli vaneria, paitsi em. tukipalkki oli terästä.

3.1 Malli

Malli koostuu osista: puinen selkänoja, siihen keskiosastaan kiinnitetty apurunko Feelframe ja lattiaan jäykästi kiinnittyvä jalkaosa. Ensin tarkasteltiin apurungon ja selkänojan dynamiikkaa vapaana kappaleena. Sen jälkeen lisättiin selkänoja kiinnitys lattiaan yksinkertaistetulla puisella jalkaosalla.



Kuva 2. Laskennan geometria (vasen kuva) ja elementtiverkko (oikea kuva).

Tarkastellun istuinrakenteen CAD-geometriatiedoston lukeminen Comsol-ohjelmaan ja suoraan sen pohjalta tehty verkottaminen osoittautui haasteelliseksi työn aikana. Tämä tapa toimi vielä istuinmallille. jossa oli rakenteena mukana vain takalevy ja apurunko Feelframe sekä niitä yhdistävä rakenne. Geometriatiedoston siirtoa testattiin eri CAD formaateissa (mm. step, iges, parasolid), käyttäen suurinta käytettävää geometriatoleranssia sekä muutamia ohjelmistojen tarjoamia toimintavaihtoehtoja. Kun lähtögeometriaan lisättiin tilavuus- eli solidigeometriat selkänojan ylä- ja alaosaan kuvaamaan absorptiomateriaalia, piti lopulta käyttää vaihtoehtoista tapaa geometrioiden sisään lukemisessa. Siinä istuimen rakenteet verkotettiin ensiksi hyvin tiheällä elementtiverkolla Hypermesh ohjelmassa josta elementtiverkko luettiin Comsoliin sisään Nastran-formaatissa. Comsol ohjelma kykenee luomaan uuden geometrian sisäänluettavasta elementtiverkosta ja näin luotua geometriaa käytimme pohjana istuinmallinnuksessa. Tiheän verkon käyttö oli perusteltua, jotta Comsol luo geometrian mahdollisimman tarkasti.

Laskentamallin elementtiverkon tiheyttä päivitetään taajuusalueittain, sillä verkon tiheydellä useimmin on merkittävä vaikutus laskenta-ajan pituuteen. Akustisissa laskentatapauksissa verkon tiheysvaatimus kasvaa mentäessä suuremmille äänitaajuuksille, rakenneanalyyseissä on käytettävä taas paikallisia tihennyksiä liitosten ja geometriaepäjatkuvuuskohtien lähellä. Esimerkiksi alla olevassa kuvan elementtiverkossa on noin 400 000 vapausastetta. Absorptiomateriaalien vaatimat geometriatilavuudet on verkotettu Tetrahedratilavuuselementeillä. Samoin myös apurungon ja takalevyn yhdistävä palkkirakenne on kuvattu tilavuuselementeillä. Muilta osin istuimen levyrakenteiden kuvaamisessa on käytetty Triangles-kuorielementtiä, jolle annetaan levyosakohtaisesti sen käyttämä paksuus.

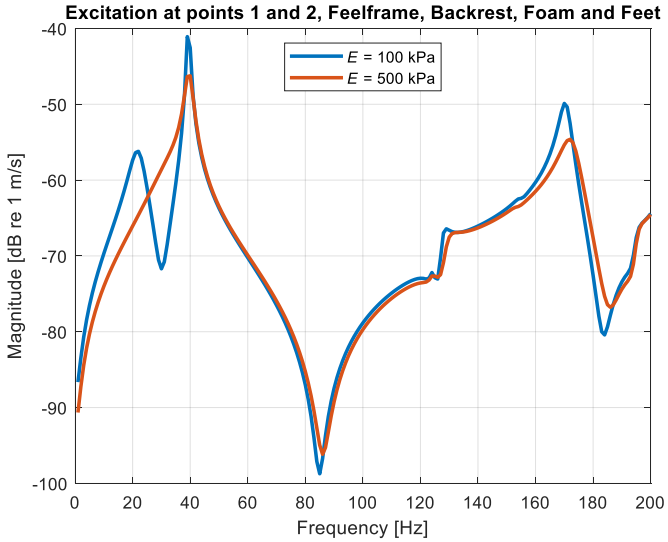
3.2 Simulointi

Mallilla tehdyillä simuloinneilla oli tarkoituksena selvittää yksinkertaistetun tuolirakenteen avulla, miten elastinen apurunko ”Feelframe” auttaa värähtelyn leviämistä koko selkänojan alueelle. Herätelähteenä toimiva EVE-elementti on mallinnettu kahtena pistevoimana (1 N).

Malli rakennettiin herätelähteestä käsin: ensin Feelframe apurunko vapaana kappaleena, sitten se kiinnitettynä selkänojaan, sitten lisäämällä joustinelementtinä toimiva vaahtomuovi apurungon ylä- ja alaosaan. Lopuksi lisättiin rakenteen jalkaosa, joka on jäykästi kiinni lattiassa. Ensin laskettiin yhden voimaherätteen (vasen stereokanava) vaste neljässä ideaalitapauksessa. Sitten tarkasteltiin kahden samanvaiheisen herätteen (monotoisto, vasen ja oikea stereokanava).

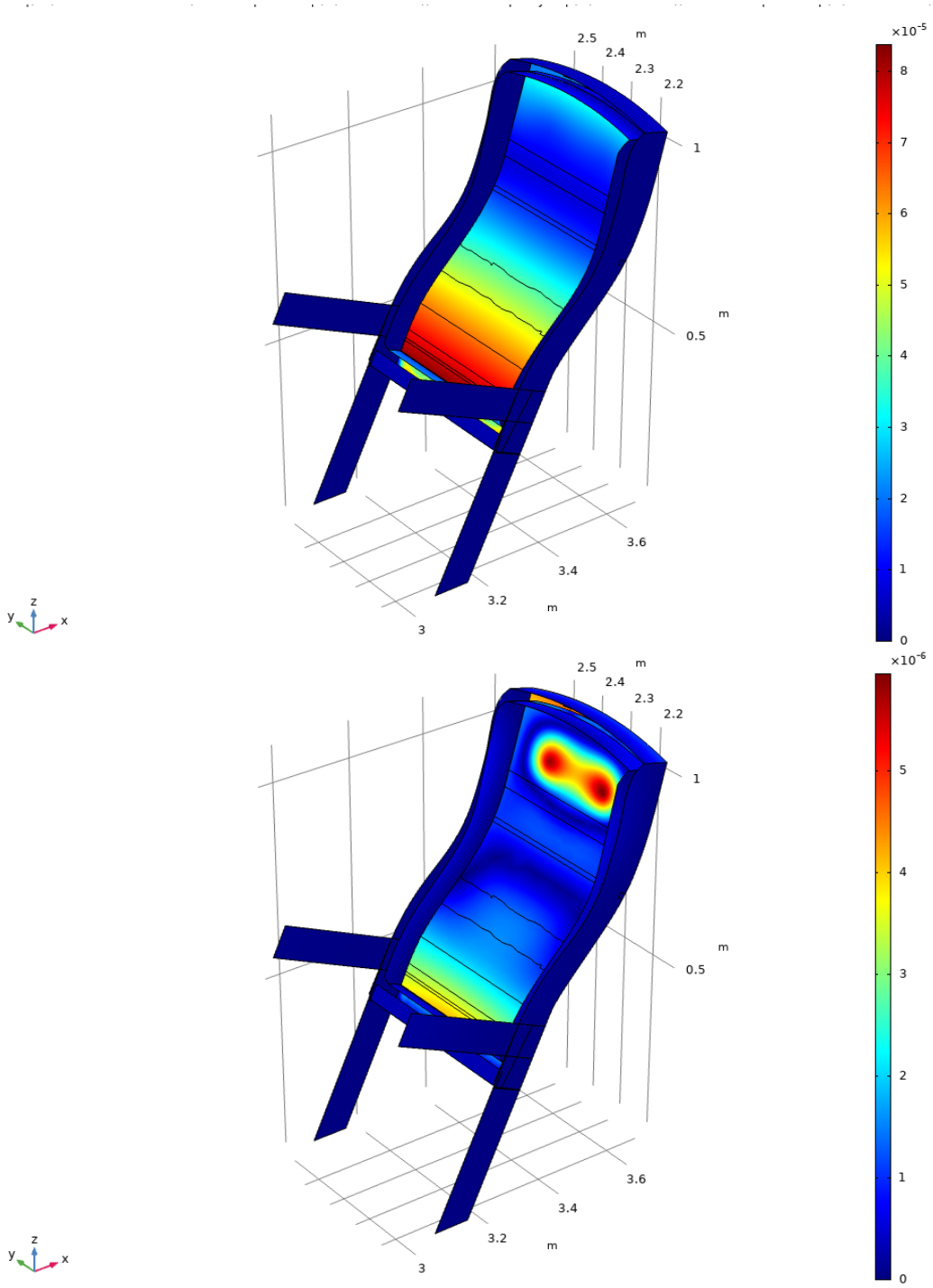
4 TULOKSIA

Kuvassa 3 on esitetty istuimen yläosan (herätepiste 1) nopeusvaste taajuuksilla 0 – 200 Hz kahdella vaahtomuovin jäykkyyden (kimmomodulin) arvolla. Arvolla 500 kPa vasteessa on resonansi taajuudella 40 Hz. Joustavammalla kimmomodulin mitoituksella 100 kPa vaste kasvaa noin 6 dB tällä taajuudella, ja lisäksi syntyy resonanssivahvistus myös 20 Hz alueelle.



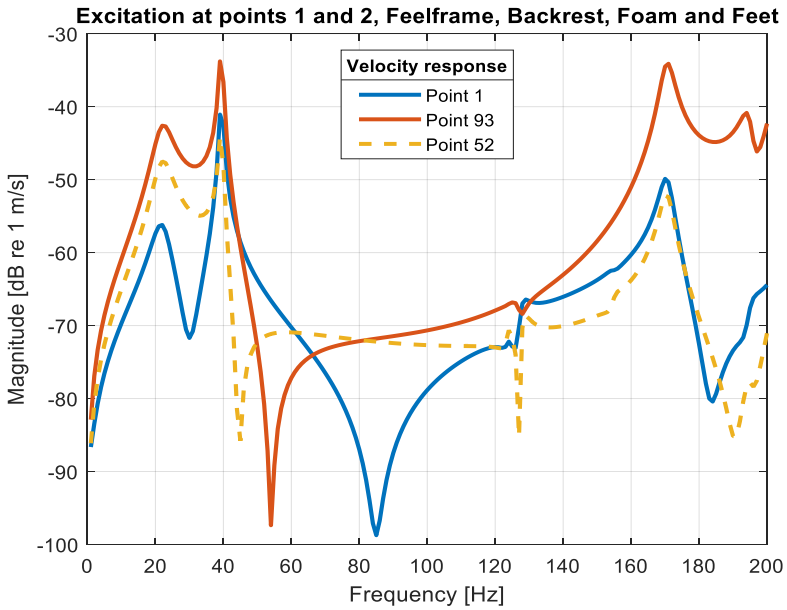
Kuva 3. Herätelähteen piste 1 nopeusvaste monofonisella herätteellä (yksikkövoimaheräte pisteissä 1 ja 2) kahdessa tapauksessa: selkänojan ja apurungon välisen vaahtomuovin kimmomoduli 100 kPa ja 500 kPa.

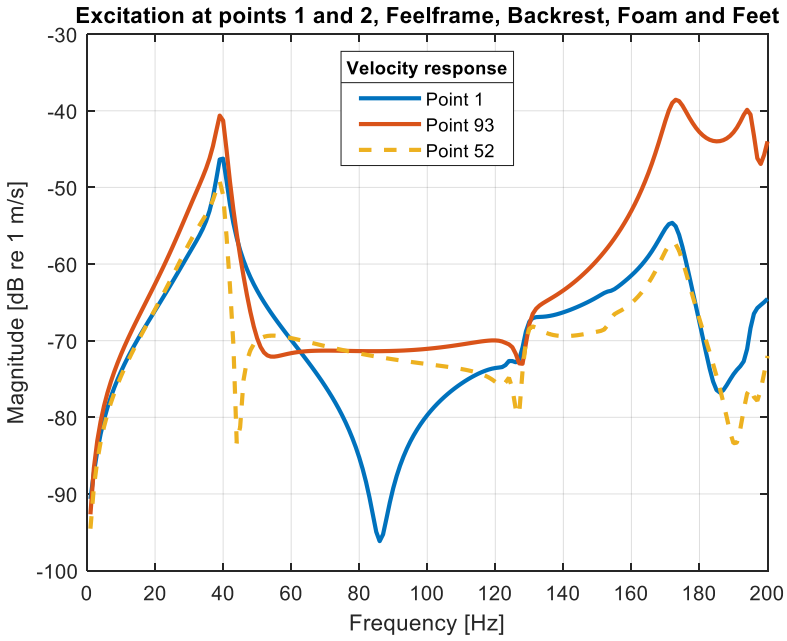
Kuvassa 4 on esitetty värähtelyn pinnan normaalisuuntaisen komponentin amplitudijakauma taajuudella 30 Hz. Havaitaan, että selkänojan alaosassa värähtely on voimakkaampaa kuin sen yläosassa. Käyttäjän pään kohdalla vallitseva värähtely saadaan siis jakautumaan koko selkänojaan apurungon resonanssien avulla.



Kuva 4. Esimerkki istuimen värähtelyjakaumasta. Pinnan normaalinsuuntainen siirtymä taajuuksilla 30 Hz (yllä) ja 110 Hz (alla).

Kuvassa 5 on vertailtu värähtelynopeutta eri pisteissä. Havaitaan, että alle 40 Hz taajuuksilla vaste on selkänojan alaosassa (piste 93) amplituditaan suurempi kuin niskan kohdalla (piste 1). Joustavamman vaahtomuovin tapauksessa ero on suurempi, johtuen 20 Hz taajuudella resonanssivahvistuksesta.





Kuva 5. Värähtelyn nopeusvaste taajuuksilla 0 – 200 Hz monofonisella herätteellä istuimen yläosassa (point 1), ristiselässä (point 93), ja apurungon alaosassa (point 52). Kaksi vaahtomuovin joustavuutta 100 kPA (yllä) ja 500 kPa (alla).

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Istuimen selkänojaan integroidun Augmented Audio-äänentoiston matalien taajuuksien värähtelytoistoa mallinnettiin numeerisesti Comsol Multiphysics -ympäristössä. Tavoitteena on. Multiphysics mahdollistaa monipuolisen analyysin, myös äänensäteilyn mallintamisen, mutta se osoittautui työlääksi valmiin geometrian tuomisessa ja verkottamisessa. Samoin värähtelymuotojen visualisointiin ei löytynyt yksinkertaista työkalua.

Tulokset osoittavat, että käyttämällä apurunkojärjestelyä alimpien audiotaajuuksien värähtelyjakaumaa saadaan laajennetuksi selkänojan yläosasta koko selkänojan alueelle.

Työssä kuvattu yksinkertaistettu vapaan istuimen mallitus muodostaa pohjan tarkemmalle analyysille, jossa otetaan huomioon ihmisen mekaaninen kuorma, ja värähtelyn välittyminen kehoon. Edelleen voidaan mallittaa äänensäteilyä lähikentässä, jonka vaste pienillä taajuuksilla määrittyy lähes koko istuimen pinnan värähtelyllä. Keskitaajuuksilla äänensäteily on enemmän paikallista EVE-elementin värähtelyä. Dynamiikan mallinnus ja simulointi mahdollistaa nopeamman kehityssyklin vaativan akustisen järjestelmän tuotekehityksessä.

VIITTEET

[1] https://mantyharju.fi/sisalto/elokuvateatteri-kino/tilat, viitattu 24.9.2019

[2] Linjama J, Uosukainen S, Immonen T, Avikainen T, Äänituntumasoittimen akustinen mallintaminen ja simulointi. Akustiikkapäivät 2017, Espoo.

[3] Puomio, O., Gonzalez, R., and Lokki, T., Augmented audio with behind-the-head listening device, In the AES International Conference on Immersive and Interactive Audio, York, UK, March 27-29, 2019.