

ELASTINEN EPOKSI – RATKAISU RUNKOÄÄNIONGELMIIN

Lasse Kinnari, Tomi Lindroos ja Kari Saarinen

Noisetek Oy
Aakkulantie 40, 36220 KANGASALA
lasse.kinnari@noisetek.fi

VTT
PL 1300, 33101 TAMPERE
kari.p.saarinen@vtt.fi
tomi.lindroos@vtt.fi

1 JOHDANTO

Runkoäänellä tarkoitetaan rakenteen mekaanista värähtelyä, joka säteilee ääntä audioalueella eli taajuuksilla 20 Hz - 20 kHz. Usein ääntä synnyttää taivutusvärähtely, mutta mm. palkeilla myös pitkittäinen värähtely kytkeytyy tehokkaasti ilmaääneksi.

Runkoääni on monissa koneissa yksi tärkeimmistä äänen syntyyn vaikuttavista tekijöistä. Runkoäänien resonoiva osa on lähes aina pakkovärähtelyä merkittävämpää eli värähtely ja äänen säteily on voimakkainta rakenteen ominaistajuuksilla. Tyypillisesti teräksestä, mutta myös monista muista materiaaleista valmistetuilla koneen rakenteilla resonoiva värähtely on voimakasta koska rakenteen vaimennus on vähäistä. Joten rakenteiden vaimennuksen lisääminen on tehokas runkoäänien torjuntaperiaate.

Rakenteen vaimennus koostuu useista tekijöistä mm. materiaalin sisäinen vaimennus, liitosvaimennus, säteilyvaimennus ja rakennetta ympäröivän fluidin aiheuttama viskoosi vaimennus. Periaatteessa vaimennusta lisäävät toimenpiteet olisi järkevää integroida osaksi perusrakennetta, mutta vaimennuksen synnyttävät mekanismit ja ilmiöt ovat monimutkaisia ja niiden avulla vaimennusta ei rakenteissa yleensä pystytä merkittävästi lisäämään.

Perusrakenteen pinnoittaminen viskoelastisella häviöllisellä materiaalilla kasvattaa rakenteen vaimennusta laajalla taajuusalueella. Monipuolisempi ja paremmin paksuille rakenteille soveltuva on rajoitetun kerroksen vaimennusperiaatteen käyttö, perusrakenteeseen liitetyn vaimennusmateriaalin vapaan pinnan peittäminen muodonmuutoksen estävällä materiaalikerroksella.

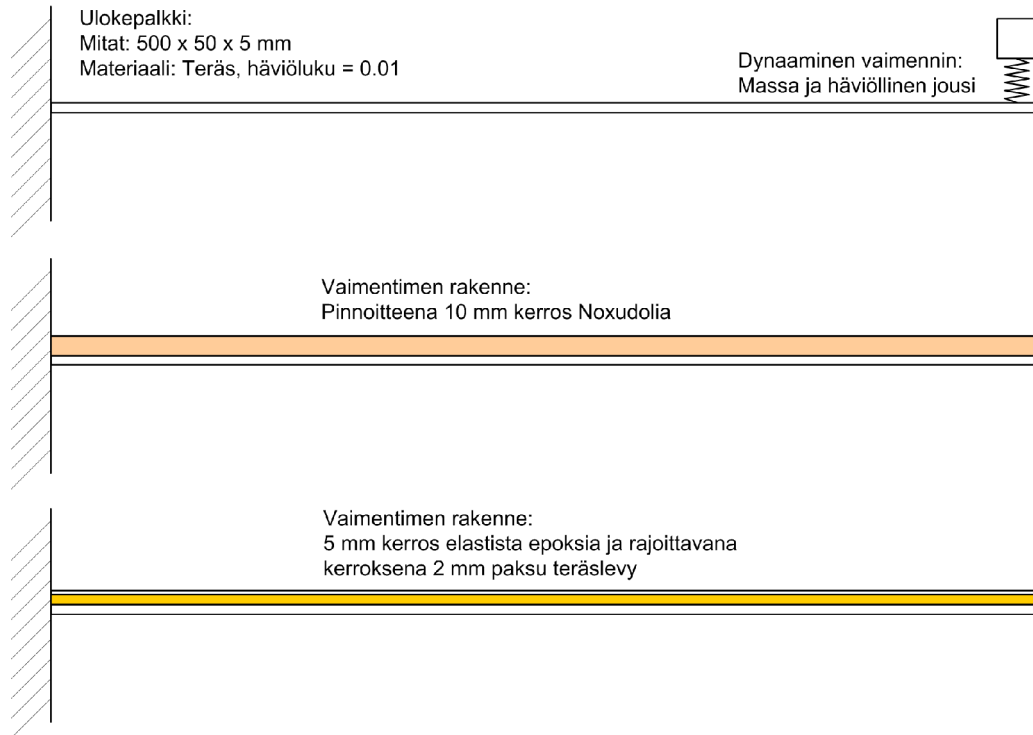
2 VAIMENNINPERIAATTEET

Dynaaminen vaimennin tai massavaimennin koostuu häviöllisestä jousesta ja massasta (Kuva 1). Systeemin ominaistajuus mitoitetaan samaksi kuin perusrakenteen vaimennettava ominaistajuus. Dynaamisia vaimentimia tarvitaan siis yksi jokaista vaimennettavaa ominaistajuutta kohti. Jotta saavutettu hyöty pysyy vakiona, niin perusrakenteen dynaamiset ominaisuudet eivät saa muuttua. Aktiivinen dynaaminen vaimennin, säädettävät jousen ominaisuudet, on käyttöominaisuuksiltaan monipuolisempi.

Perusrakenteen pinnoitus vaimennusmateriaalilla (Kuva 1, keskellä) vaikuttaa laajalla taajuusalueella. Kaupallisia materiaaleja on paljon, esim. Noxudol ja NoiseKiller. Useimmat materiaalit ovat viskoelastisia, joten niiden materiaaliominaisuudet ovat toimintalämpötilasta riippuvia. Saavutettava vaimennus on yleensä maksimissaan huoneen lämpötilassa. Tämä vaimennusperiaate soveltuu parhaiten ohutlevyrakenteiden vaimentamiseen.

Perinteisesti kerrosrakenteinen, rajoitetun kerroksen vaimennusperiaate (Kuva 1, alin) on monipuolisempi ja oikein mitoitettuna yleensä tehokkaampi kuin edeltävät vaimentimet. Se so-

veltuu myös paksuille rakenteille ja vaimennin voi olla geometrialtaan monimuotoinen, kunhan vaimennusmateriaalikerrokseen syntyy leikkausmuodonmuutosta. Käytettävät vaimennusmateriaalit ovat viskoelastisia, joten myös tämä vaimenninperiaate toimii optimaalisesti tietyllä käyttölämpötila-alueella. Dimensio- ja rakennevariaatioilla pystytään jossain määrin siirtämään maksimivaimennuksen taajuusalueita.



Kuva 1. Esimerkit eri vaimenninperiaatteiden soveltamisesta kun perusrakenteena on teräksen ulokepalkki.

3 ELASTISET EPOKSIT

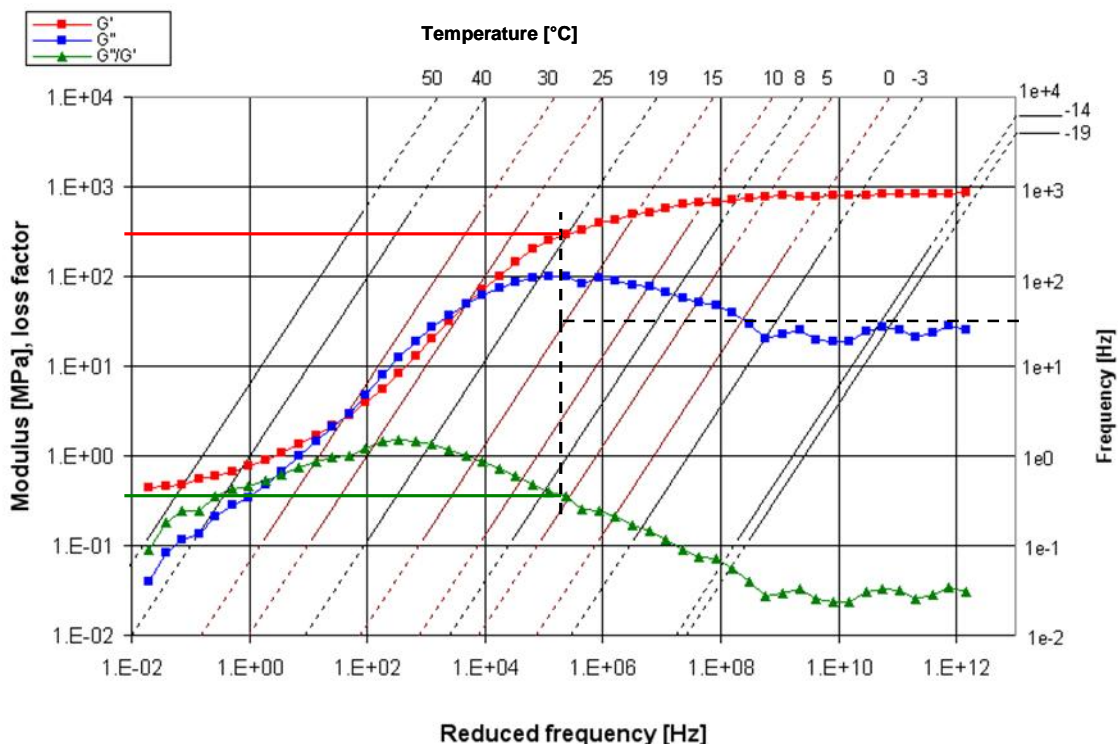
Viskoelastisten materiaalien ominaisuuksien lämpötila-taajuusriippuvuus aiheuttaa helposti odottamattomia ongelmia käytännön sovelluskohteissa. Yleensä käytössä olevasta kaupallisesta vaimennusmateriaalista ei ole saatavilla lämpötila-taajuusriippuvia materiaaliparametreja: kompleksinen kimmomoduli ja häviökerroin. Tämän seurauksena päädytään helposti ratkaisuun, joka ei toimi käyttökohteessa optimaalisesti, vaan vaimennusmateriaalin käyttölämpötila ja/tai taajuusalue on väärä.

VTT:llä kehitetyt elastiset epoksit tarjoavat ratkaisun edellä kuvattuun ongelmaan. Kehitetyn epoksiperheen materiaaleilla on korkea vaimennuskyky ja lisäksi erityisominaisuutena niiden materiaaliominaisuudet ovat säädettävissä vastaamaan käyttökohteen lämpötila ja taajuus vaatimuksia. Polymeerit saavuttavat häviökertoimen maksimiarvon ns. lasinsiirtymäalueella (T_g). Epoksien korkea vaimennuskyky ja säädettävyys perustuvat T_g -lämpötilan säätämiseen epoksisysteemin stoikiometrisiä seossuhteita muuttamalla. Epoksimodifikaattorin määrää lisäämällä tai vähentämällä voidaan epoksisysteemin T_g :tä säätää muutaman asteen tarkkuudella. Kehitetty seosperhe kattaa tällä hetkellä lämpötilavälin $-15\text{ °C} - 160\text{ °C}$ ja parhaimmillaan epoksisysteemin häviökertoimeksi saavutetaan 1,7. Erittäin suurien häviökertoimen maksimiarvojen myötä epoksisysteemin häviökerroin pysyy yli tason 1,0 varsin laajalla lämpötila-alueella, epoksisysteemin koostumuksesta riippuen jopa yli 30 °C :n, mutta tyypillisimmin noin $10 - 15\text{ °C}$:n laajuisella lämpötila-alueella.

Lämpötila-taajuusriippuvien materiaaliparametrien määrittämiseen käytetään DMTA laitteisto (Dynamic Mechanical Thermal Analysis). DMTA mittauksessa näytemateriaaliin kohdistetaan sinimuotoinen dynaaminen kuormitus ja mitataan voimaa, siirtymää sekä näiden vaiheeroa, lämpötilan ja taajuuden funktiona. Parhaimmillaan DMTA laitteella voidaan määrittää materiaalin käyttäytyminen jopa 1kHz taajuudella, tämä ei kuitenkaan riitä kun puhutaan sovelluskohteista, joissa esiintyy audioalueen taajuuksia. Mitattua taajuusaluetta pystytään laajentamaan laskennallisesti käyttämällä hyväksi aika-lämpötila superpositiota. Käytetyin menetelmä mitatun taajuusalueen laajentamiseen eli master-käyrien laadintaan on WLF-yhtälöt (Williams-Landel-Ferry).

$$\log[a_T] = C_1(T-T_{\text{ref}})/(C_2 + T - T_{\text{ref}}) \quad (1)$$

Missä a_T on lämpötilariippuva siirtokerroin, jonka avulla käyrät siirretään referenssilämpötilasta T_{ref} . C_1 ja C_2 ovat vakioita. Käytännössä mittaus tapahtuu useassa eri vakiolämpötilassa, joissa jokaisessa mitataan materiaaliominaisuudet useammalla taajuudella. Mitattavien taajuuksien määrä sekä lämpötila-askelten väli määrittävät kuinka laajaksi taajuusalue on mahdollista laajentaa. Mittauspisteiden lukumäärä luonnollisesti vaikuttaa myös tarkkuuteen. Mittauksia tehtäessä on tärkeää huomioida, että taajuusaluetta voidaan laajentaa laskennallisesti, mutta lämpötila-aluetta ei ole mahdollista laajentaa. Kun materiaalin master-käyrät ja siirtokerroimet on määritetty, voidaan mittaustuloksista koostaa materiaaliominaisuuksien lämpötila-taajuusriippuvuus nomogrammi (Kuva 2).



Kuva 2. Erään epoksityypin materiaaliominaisuuksien taajuus- ja lämpötilariippuvuuden esittävä nomogrammi. Punaisella on merkitty liukumodulin reaaliosa ja sinisellä imaginääriosaa sekä vihreällä häviöluku.

Nestemäisiin lähtöaineisiin perustuvat epoksit tarjoavat mahdollisuuden valmistaa hyvin erityyppisiä tuotteita, kuten erimuotoisia valukappaleita tai kuitulujitettuja komposiitteja. Käy-

tännössä valmistus tapahtuu sekoittamalla lähtöaineet sekä tarvittavat lisäaineet, kuten palonestoaineet keskenään, jonka jälkeen seos voidaan valaa tai injektoida käyttökohteen edellyttämään muotoon. Tyypillisesti vaimenninelementtien valmistus suoritetaan siten, että rajoittavat materiaalikerrokset muodostavat osan muotista. Erityistapauksissa vaimentava epoksikerros voidaan valmistaa myös suoraan vaimennettavan rakenteen pintaan. Epoksien hyvä adheesio useimpiin alustamateriaaleihin helpottaa vaimentimien valmistusta. Suurta liitoslujuutta edellyttävissä kohteissa adheesiota voidaan edelleen parantaa liitospintojen primerkäsittelyllä. Erilliset vaimenninelementit voidaan liittää vaimennettavaan rakenteeseen joko liimaamalla tai joissain tapauksissa myös mekaanisella kiinnityksellä.

4 VAIMENNINRAKENTEIDEN MITOITTAMINEN

Vaimentimien mitoituksen lähtöarvoina tarvitaan perusrakenteen vaimennus taajuuden funktiona ja ongelmataajuusalueen rajat. Nämä molemmat ovat helposti mittauksin määritettävissä. Lisäksi tarvitaan käytettävän vaimennusmateriaalin ominaisuudet, esimerkiksi kuvassa 2 esitetyssä muodossa.

Dynaamisen vaimentimien mitoitusta on tarkasteltu mm. viitteessä [1]. Samassa lähteessä on esitetty nyrkkikaava vaimennusmateriaalilla pinnoitetun rakenteen (lähinnä levy) häviöluvun (η) estimoimiseksi:

$$\eta = 14 \left(\frac{\eta_2 E_2}{E_1} \right) \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2. \quad (2)$$

Numero 2 viittaa vaimennusmateriaaliin ja numero 1 perusrakenteen materiaaliin. Kaavan mukaan vaimennusmateriaalin hyötyvaikutus määräytyy häviöluvun ja kimmomodulin tulon perusteella. Lisäksi lopputulosta voidaan parantaa vaimennusmateriaalikerroksen paksuutta (d_2) kasvattamalla. Tarkempi mitoitusesitys löytyy viitteestä [2].

Viitteessä [3] on analyttisten mitoitusten menetelmien esitys sekä vaimennusmateriaalilla pinnoitetun rakenteen että kerrosrakenteiden häviöluvun estimoimiseksi. Viitteestä löytyy myös vaimennusmateriaalien analyttisen mallinnuksen perusteet.

Yleisessä tapauksessa vaimenninrakenteen suunnittelu ja mitoitus voidaan tehdä elementtimenetelmällä (FEM), numeerisena simulointina. Käytettävissä on kaksi tapaa: muodonmuutosenergiatarkastelu ja suora vastelaskenta.

Rakenteen muodonmuutosenergia (E) saadaan määritettyä ominaismuotoanalyysin tuloksena. Vaimentimella varustetun rakenteen häviöluvut (η_{tot}) ominaistuuksilla lasketaan perusrakenteen (E_{rak}), vaimennusmateriaalin (E_{VEM}) ja rajoittavan kerroksen (E_{rake}) elementtien yhteenlaskettujen muodonmuutosenergioiden ja vastaavien häviölukujen avulla kaavalla

$$\eta_{tot} = \frac{\eta_{rak} E_{rak} + \eta_{VEM} E_{VEM} + \eta_{rake} E_{rake}}{E_{rak} + E_{VEM} + E_{rake}}. \quad (3)$$

Suorassa vastelaskennassa vaimennus annetaan materiaaliominaisuutena, jolloin vaimennusmateriaalin taajuusriippuvien ominaisuuksien vaikutus nähdään suoraan rakenteen värähtelyvasteessa. Vaimentimien hyötyvaikutus on helposti laskettavissa halutulla taajuusalueella joko värähtely- tai melusuurena. Tarvittaessa häviöluvut ominaistuuksilla voidaan määrittää vastetuloksista esimerkiksi moodiohjelmistolla. Suora vastelaskenta on ominaistuuksianalyysi-

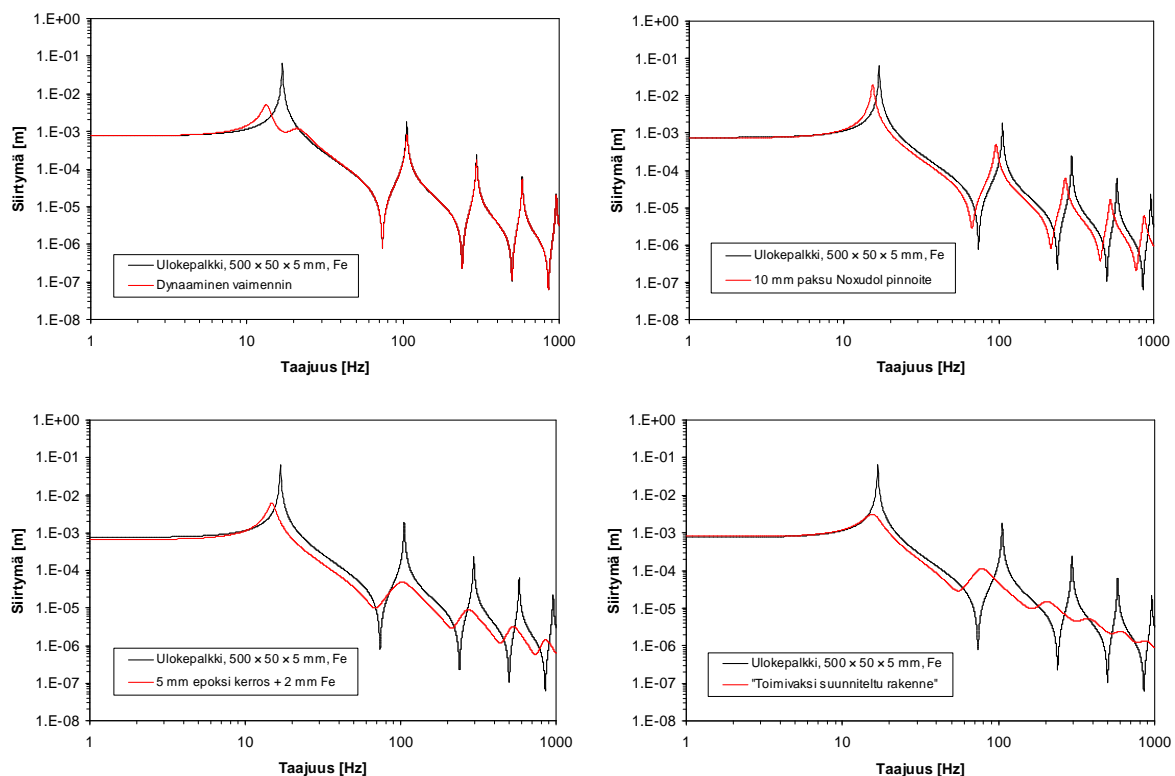
siä raskaampaa laskentaa, joten laskenta-ajat ovat pitkiä ja isojen rakenteiden tarkastelu osissa voi olla välttämätöntä.

Kuvassa 3 on kuvan 1 vaimenninrakenteiden mallinnustulokset. Laskenta on tehty käyttäen suoraa vastelaskentaa (palkin päässä pystysuora vakiovoima) ja DMTA:lla määritettyjä vaimennusmateriaalien materiaaliominaisuuksia.

Dynaaminen vaimennin toimii hyvin mitoitustaajuudellaan, alimmalla ominaistaajuudella. Pientä hyötyä havaitaan myös toisella ominaistaajuudella. Perusrakenteen massan lisäys on 6.4 % (massaton jousi).

Noxudol pinnoite vaikuttaa koko taajuusalueella, mutta koska kyseessä on melko jäykkä rakenne niin hyöty jää vähäiseksi. Perusrakenteen massan lisäys on 25.5 %.

Elastinen epoksi toimii selvästi parhaiten. Mutta perusrakenteeseen päälle rakennettuna massan lisäys on 53.4 %. Suunnitteleamalla vaimenninratkaisu osaksi perusrakennetta saatiin yhtä tehokas vaimennus ja likimäärin sama staattinen lujuus, mutta perusrakenteen massan lisäys on vain 4.1 %.



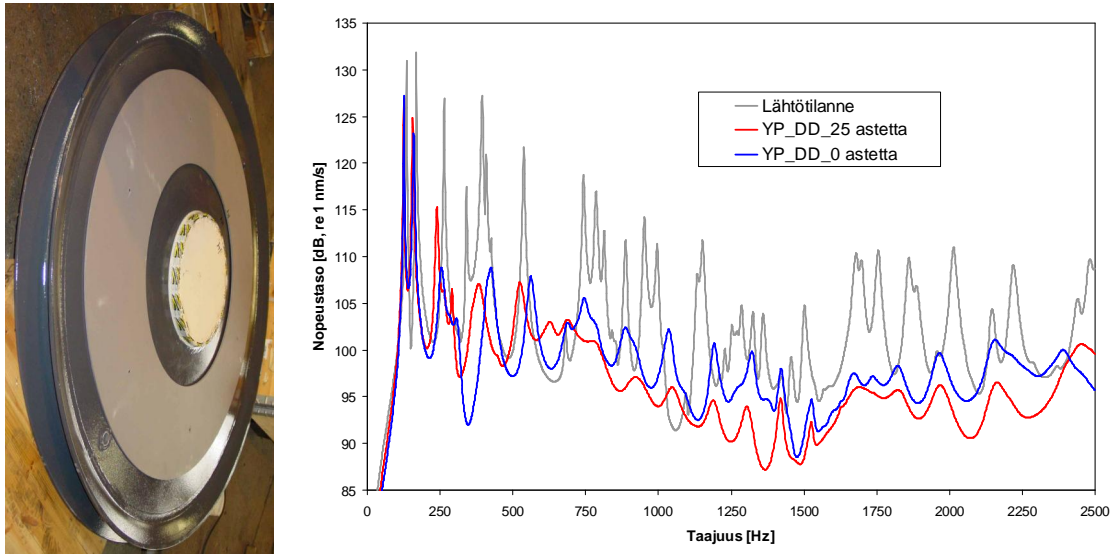
Kuva 3. Kuvan 1 mukaisten vaimennusrakenteiden mallinnustulokset sekä perusrakenteeseen integroidun vaimenninrakenteen, toimivaksi suunniteltu konstruktio, laskentatulokset.

5 KÄYTÄNNÖN ESIMERKKI

Elastisten epoksien jatkokehityksen myötä materiaali- ja tuotanto-osaamista on siirretty VTT:ltä Noisetek Oy:lle, joka on aloittanut materiaalin tuotannon sovelluskohteisiin. Noisetek Oy:n tavoitteena on elastisten epoksien avulla tarjota asiakkaille uusi, ominaisuuksiltaan ylivoimainen ratkaisu rakenteen vaimentamiseen.

Yksi prototyypivaiheeseen edennyt sovelluskohde on satamanosturin köysipyörä. Sen käyttölämpötila-alue on luokkaa $-5 \dots 25 \text{ }^\circ\text{C}$, joka on melko laaja yhdelle vaimennusmateriaalille. Tästä syystä päädyttiin käyttämään kahta epoksilaatua, jotka toimivat optimaalisesti lämpötilojen $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ympäristössä. Itse vaimenninratkaisu koostuu kahdesta identtisestä osasta, joissa käytetään eri epoksilaatuja. Molemmat epoksilaadut on injektoitu pulteilla kohdistetun rajoittavan kerroksen ja köysipyörän väliin.

Vaimenninratkaisun toimintaa simuloitiin FE-mallilla. Kuvassa 4 on esimerkki tuloksista, köysipyörän kyljen nopeustason muutos laskettuna kahdessa eri lämpötilassa.



Kuva 4. Vasemmalla on köysipyörä ja sen kyljessä vaimenninrakenne. Oikealla on vaimentimien vaikutus pyörän kyljen nopeustasoon laskettuna kahdessa eri lämpötilassa.

6 YHTEENVETO

Elastinen epoksi tarjoaa tehokkaan vaimennusratkaisun erilaisiin käyttökohteisiin. Tuoteperehen materiaaleilla on korkea vaimennuskyky ja tunnetut lämpötila-taajuusriippuvat materiaaliominaisuudet. Nämä mahdollistavat vaimenninrakenteiden mitoituksen ja toteutuksen koneen toimintalämpötilaan ja ongelmataajuusalueelle, mikä maksimoi saavutettavan hyödyn.

VTT:n kehittämien elastisten epoksien materiaali-, mitoitus- ja valmistusteknistä osaamista ollaan siirtämässä Noisetek Oy:lle. Näin varmistetaan vaimenninrakenteiden kaupallinen saatavuus. Noisetekin panostuksen taustalla on visio elastisten epoksien potentiaalista monipuolisena ja tehokkaana runkoäänien torjuntakeinona. Haasteellinen jatkokehityskohde on vaimenninratkaisuiden integrointi suunnitteluvaiheessa osaksi koneen perusrakennetta

VIITTEET

1. BROCK J T, *Mechanical vibration and shock measurements*. Brüel & Kjær, Søborg 1984.
2. CREMER L, HECKL M. *Structure-borne sound*. Springer-Verlag, 1987.
3. ANDREN P, FALK T, *Calculation of loss factors for damped structures, from parametric formulations of the damping material properties*. Chalmers University of Technology, Göteborg, 1999.