

## LOW NOISE DESIGNISTA ELEKTRONIIKKALAITTEESSA

**Ari Karjalainen\***, **Jukka Tanttari\*\***, **Timo Avikainen\*\*\*** ja **Risto Kaivola\*\*\*\***

\*Tampereen teknillinen korkeakoulu, Matematiikan laitos,

PL 692, 33101, Tampere, email: [ari.karjalainen@tut.fi](mailto:ari.karjalainen@tut.fi)

\*\*VTT Automaatio,

PL 1307, 33101, Tampere, email: [jukka.tanttari@vtt.fi](mailto:jukka.tanttari@vtt.fi)

\*\*\*Nokia Tutkimuskeskus

PL 407, 00045 Nokia Group, email: [timo.avikainen@nokia.com](mailto:timo.avikainen@nokia.com)

\*\*\*Nokia Tutkimuskeskus

PL 100, 33721 Tampere, email: [risto.kaivola@nokia.com](mailto:risto.kaivola@nokia.com)

### 1 JOHDANTO

Rinnakkaisessa suunnittelussa joudutaan toimimaan paljon ennakoituilla arvoilla, muun muassa liityntämitoilla. Melu, tai joku muu ongelma voi tulla yllätyksenä. Suunnitteluprosessin käynnistyttyä muutokset alkuarvauksissa voivat vaatia kallista ja aikaavievää uudelleensuunnittelua.

Valitettavan usein suunnitteluprosessi näyttäytyykin koneakustikolle perinteisempänä peräkäissuunnitteluna. Tällöin akustikko tulee mukaan vasta prototyypivaiheessa, kun huomataan että akustiset vaatimukset eivät ole toteutumassa. Virheellisten rakenteellisten ratkaisujen korjaaminen vasta prototyypivaiheessa on kallista ja aikaa vievää, joskus mahdotontakin. Yleensä vain lisäkeinojen käyttö on mahdollista ja taloudellisesti järkevää.

Low Noise Designilla (LND) tarkoitetaan järjestelmällistä lähestymistapaa, joka tukee asiakkaiden ja lainsäädännön vaatimukset täyttävien tai jopa ylittävien tuotteiden suunnittelua ja valmistusta. LND perustuu rinnakkais suunnitteluun, jossa eri suunnitteluprosessit kehittävät tuotetta yhtäaikaan. LND on enemmän lähestymistapa kuin formaali metodi. LND voidaan kääntää esim. suunnitteluun integroiduksi äänenhallinnaksi. Lähestymisellä pyritään minimoimaan yrityksen ja erehdyksen kautta eteneminen, tavoitteena on kerralla oikein tehty (first-time-right) suunnittelu. Ajatuksellisesti LND sisältää sekä melupäästön että äänenlaadun optimoinnin ja/tai minimoinnin.

Käytännössä LND tarkoittaa melun kannalta huonojen ratkaisujen karsimista paljon ennen prototyypivaihetta. LND:ssä laajaa, eri tasoista osaamista ja tietoa (ilmiöistä, keinoista, mitauksista sekä mallinnuksesta ja simuloinnista) integroidaan oikea-aikaisesti suunnitteluprosessiin. LND:ssä korostetaan rakenteellisia keinoja, jotka vaativat yleensä vain vähän tilaa, mutta vaativat huomattavasti enemmän osaamista. Usein rakenteelliset keinot myös parantavat jäähdytyksen hyötysuhdetta. Etenkin sarjatuotannossa meluntorjunnan kokonaiskustannukset jäävät pieniksi – joissain tapauksissa jopa laitteen tehosiheyttä voidaan kasvattaa.

Elektroniikkalaitteen suunnitteluprosessista tulevat akustisen suunnittelun liittyvät tekijät ja rajoitukset ovat tuotettu lämpöenergia ja maksimilämpötila, joista voidaan johtaa tarvittava ilmamäärä sekä käytettävissä oleva tila, aika ja raha. Lisäksi rajoitteeksi tulee usein henkilöresurssit. Etenkin tilasta ja taloudellisista resursseista kilpailevat kaikki rinnakkaiset suunnitteluprosessit. Hyvän lopputuloksen kannalta kaikkien rinnakkaisten suunnitteluprosessien

yhteistoiminta on kuitenkin ensiarvoisen tärkeää – vain täten voidaan varmistaa parhaan kompromissin syntyminen.

Oleellinen osa LND-ajattelua on realistinen hahmotus siitä missä nykyisin ollaan, mihin voidaan päästä rakenteellisin keinoin ja mihin halutaan päästä, jotta tarvittavia lisäkeinoja voidaan arvioida. LND:n yksi tarkoitus onkin laatia skenaarioita (ensin kokonaistasosta tarkentuen tarvittaessa kapeakaistaiseen arviointiin) siitä millaiseksi melupäästö muodostuu erilaisilla rajoituksilla, jo suunnittelun alkuvaiheessa, jolloin tuleva konstruktio on vielä epämääräinen (fuzzy). Tällöin tehtävät päätökset heijastuvat kaikkiin seuraaviin suunnitteluvaiheisiin sekä perusrakenteen mahdollisiin myöhempisiin modifikaatioihin ja päivityksiin.

## 2 LOW NOISE DESIGN –PROSESSISTA

Low Noise Design –prosessi on tuotekehityksen ja suunnittelun rinnakkaisprosessi. Tuotekehitysprosessin tarkoitus on varmistaa, että kaikki suunnittelun kannalta oleelliset tekijät tulevat huomioituksi ja vaatimuslista toteutuu. Tuotekehitysprosessille on kuvaavaa, että sen alkupuolella rakenteellisia variaatioita on paljon. Variaatioiden suuri lukumäärä pakottaa käyttämään erilaisia menetelmiä sen alku- ja loppuvaiheissa. Tuotekehitysprosessin tarkoituksena on tehdä paras kompromissi eri vaatimusten välillä. Tuotekehitysprosessi on myös tietoa lisäävä oppimisprosessi, joka palvelee tulevia suunnittelutehtäviä.

Suunnitteluprosessi alkaa tehtävän asettelun selvittelyllä, minkä tuloksena syntyy vaatimuslista. Akustiset vaatimukset ovat joillakin tuotteilla viranomaisten asettamia, mutta yhä useammin asiakkaalla on omia erityisvaatimuksia. Viranomais määräykset ovat minimimääräyksiä ja ne perustuvat eurooppalaisiin ja amerikkalaisiin standardeihin. Vaatimus esitetään joko laitteen äänitehotasotasona tai äänenpainetasotasona tarkastelupisteessä. Vaatimuslistan päivitysten vähentämisen kannalta olisi hyvä pystyä arvioimaan karkeasti akustisten vaatimusten täyttämiseksi tarvittavaa tilaa.

Luonnosteluvaiheessa etsitään toimintarakenteen täyttäviä periaatteellisia ratkaisuja, konsepteja. Ratkaisut perustuvat kokemukseen ja nyrkkisääntöihin ollen pääosin kvalitatiivisia (parempi–huonompi) ja osin kvantitatiivisia. Huomattavaa on että jo tässä vaiheessa pyritään tekemään myös teknis-taloudellista arviointia. Akustisen suunnittelun kannalta tässä vaiheessa vaaditaan mm. suuruusluokka-arvioita eri osalähteiden merkittävyydestä. Akustisesti hyvin suunnitellussa laitteessa on yleensä useita merkittäviä osalähteitä, samoin yksittäisten ”resonanssien” merkitys on (erittäin) pieni. Akustiselta kannalta tavoitteena on lyödä lukkoon rakenteelliset keinot, samalla arvio lisäkeinojen tilan tarpeesta paranee. Akustinen mallinnus on (osa-)järjestelmätasoisista.

Kehittelyvaihe (embodiment design) sisältää kokoonpanorakenteiden kehittelyn ja arvioinnin, jonka tavoitteena on valita paras rakenne, usein pienin modifikaatiovaihtoehdoin, toteutettavaksi prototyypissä. Akustinen mallinnus on aluksi osajärjestelmätasoisista kautta osajärjestelmien yksityiskohtien mallinnukseksi. Yksityiskohtien mallinnuksessa korostuu todellisen herätteen tunteminen. Kehittelyvaiheen akustisen suunnittelun tuloksena syntyvät yksityiskohtaiset keino-, tila- ja materiaalivaatimukset. Joihinkin ongelmaan voi vielä olla muutamia puhallin- tai lisäkeinovaihtoehtoja, joita prototyypissä arvioidaan tarkemmin.

Prototyypillä tehdään vielä mahdollisesti tarvittavat yksityiskohtien vertailut sekä suoritetaan tarvittavat suorituskyvyn arvioinnit. Testituloksia verrataan vaatimuslistaan. Ongelmatapauk-

sisä voidaan turvautua kehittyneimpiin mittaus-, mallinnus- ja simulointityökaluihin. Prototyypivaiheen jälkeen lopullinen kokoonpanorakenne on selvillä.

Tuotesarjojen seuranta voidaan käyttää sekä taatun tason oikeellisuuden arviointiin että tulevien tuotemodifikaatioiden akustisten ominaisuuksien arviointiin.

Koska suunnitteluprosessin vaatimukset ja toivomukset voivat muuttua kehitystyön aikana tarvitaan kaikkien suunnitteluvaiheiden välille paluumahdollisuus. Paluumahdollisuudet ovat tarpeellisia myös, koska kaikki tarvittava tieto ei aina ole saatavilla silloin kuin se ideaalitapauksessa vaadittaisiin. Järjestelmällinen toimintatapa kuitenkin osoittaa tarpeen tälle tiedolle ja sitä voidaan ryhtyä hankkimaan. Suunnittelun tehokkuuden kannalta tulee pyrkiä mahdollisimman nopeisiin ja suoraviivaisiin tarkastus- ja paluumahdollisuuksiin.

### 3 TYÖKALUISTA

LND:ssä ja koneakustiikassa suurimmat ongelmat johtuvat vajavaisesta järjestelmän ja osajärjestelmien toiminnan ymmärtämisestä. Kun järjestelmän toiminta ymmärretään voidaan tästä johtaa myös melunsyntymekanismit ja edelleen kyseisen laitteen kannalta parhaat meluntorjuntakeinot.

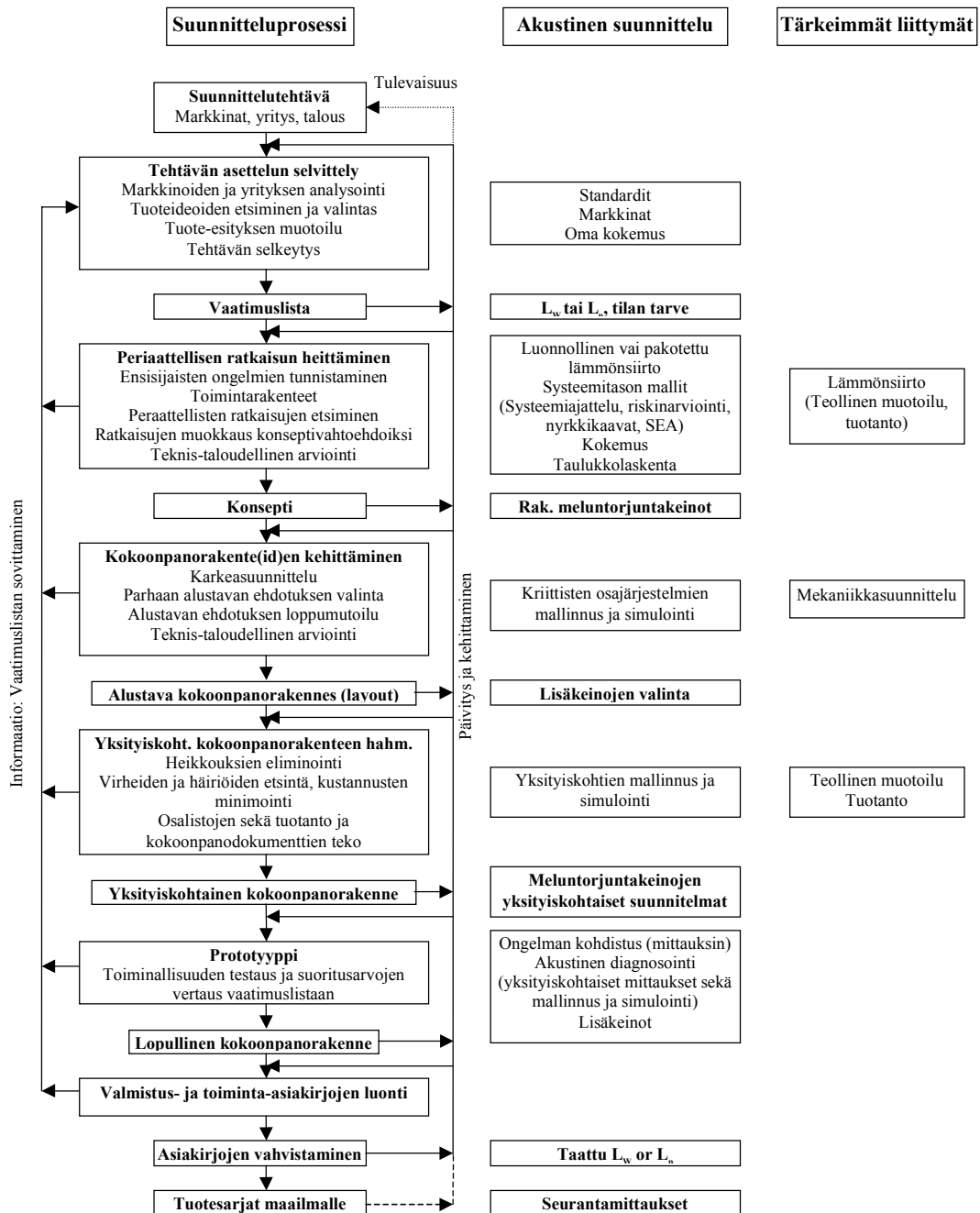
LND:tä helpottavia työkaluja ovat kirjallisuustutkimukset, kaaviot, taulukot, periaatekuvat ja luokittelut. Tässä artikkelissa esitettävä LND-kaavio on kehitetty Pahl G. & Beitz W.: Engineering design –kirjan, ISO/TR 11688-1:1995(E) –standardin sekä kokemuksen pohjalta. Tärkein koko suunnitteluprosessia ohjaava tekijä on vaatimuslista, johon kirjataan kaikki tuotteeseen liittyvät vaatimukset ja toivomukset. Vaatimukset ovat ehdottomia yleensä numeerisia rajoituksia. Toivomukset puolestaan otetaan huomioon sillä edellytyksellä, että niistä koostuvat kustannukset ovat kohtuullisia hyötyyn verrattuna. Toivomuksia voi olla eritasoisia. Konstruktiota koskevia päätöksiä arvioidaan vaatimuslistaa sekä teknillistaloudellista arviointia vasten.

Akustisen suunnittelun kannalta tärkeimmät alkuvaiheen suunnittelutyökalut ovat systeemijattelu (systems approach), rakenteen ominaisäänitehotaso, riskinarviointi sekä lisäkeinojen kannalta luokittelut. Lisäkeinojen luokittelut perustuvat keinojen tehokkuuden arviointiin taajuustasossa sekä painehäviön (myös rakenteellinen keino) ja kustannusten kannalta.

LND:n kannalta on lisäksi oleellista yhdistää teoreettinen ja kokeellinen osaaminen. Kokeellisessa työssä kannattaa mahdollisuuksien mukaan hyödyntää koesuunnittelua ja mock upeja. Koesuunnittelulla pyritään vähentämään tehtäviä kokeita (mittausta sekä mallinnusta ja simulointia sekä virtauksen visualisointia) sekä saamaan tehdyistä kokeista maksimaalinen hyöty. Kokeilla tulee mahdollisuuksien selvittää koko melunsyntyketjuun vaikuttavia tekijöitä. Perinteisestä akustisesta ajattelusta poiketen ei voida rajoittaa pelkkään akustiseen kuvaamiseen ja äänen etenemiseen. Koesuunnittelun merkitys korostuu, kun kokeiltavia muuttujia on paljon ja muuttujilla oletetaan olevan yhteisvaikutuksia.

Mock upit puolestaan mahdollistavat kokeet ilman täysimittaista prototyyppiä, myös heti suunnitteluprosessin alkuvaiheessa. Osajärjestelmiä kuvaavat mock upit ovat myös huomattavasti halvempia kuin prototyypit. Mock upeja voidaan käyttää sekä oman kokemuksen kasvattamiseen että mallinnuksen ja simuloinnin verifiointiin, sillä niissä testiolosuhteet saadaan paremmin kontrolloitua, joten havainnointi on tarkempaa ja virhemahdollisuudet pienemmät

Mallinnus- ja simulointityökaluista korostuvat koko (osa-)järjestelmän kuvaamiseen kykenevät työkalut. Näitä työkaluja ovat taulukkolaskenta, asiantuntijaohjelmistot (esim. EQUIP+) sekä tilastollinen energia-analyysi. Akustiikassa ehkä perinteisemmin käytetyt elementtipohjaiset työkalut soveltuvat yksityiskohtaiseen mallinnukseen ja simulointiin suunnittelun loppuvaiheessa sekä akustisten ongelmien tarkkaan diagnosointiin.



Kuva 1. LND-kaavio [1].

### 3.1 Systemiajattelu

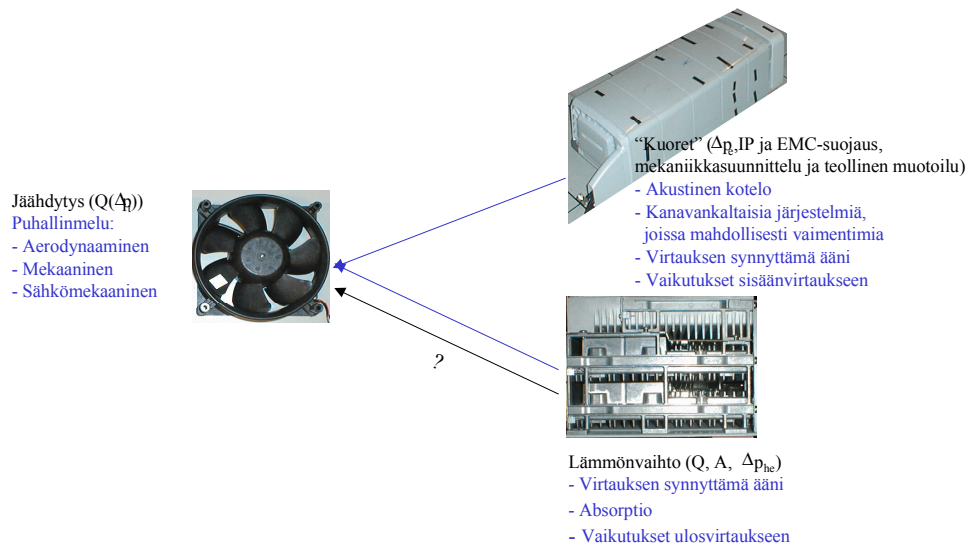
Systemiajattelua käytetään järjestelmän toiminnan ymmärtämiseen. Sen avulla hahmotetaan akustisen toiminnan kannalta tärkeimmät osajärjestelmät ja niiden riippuvuudet muista suunnitteluprosesseista. Akustisesti merkittävimpien osajärjestelmien hahmottaminen vaatii aikai-

sempaa tuntemusta vastaavista järjestelmistä tai mittauksia sekä mahdollisesti mallinnusta ja simulointia. Osajärjestelmiin ja tärkeimpiin melulähteisiin jako auttaa ongelman paloittelussa helpommin hallittaviin kokonaisuuksiin ja varmistaa keskittymisen oleelliseen.

Kuvassa 2 on esimerkki systeemiajattelun toteutuksesta [1]. Toteutukseen löytyy toki monia muistakin, akustiselta kannalta tarkempiakin tapoja, mutta alkuvaiheessa systeemiajattelun on hyvä tukea suunnitteluprosessia mahdollisimman laajasti. Melunsyntyketju alkaa hukkalämmöstä, jonka johtaminen laitteesta vaatii pakotettua lämmönsiirtoa (puhaltimen). Tarvittava lämmönsiirto voidaan kuvata jäähdytettävän pinta-alan ( $A$ ), tilavuusvirran ( $Q$ ) ja jäähdytys-elementissä syntyvän painehäviön avulla ( $\Delta p_{ne}$ ). Jäähdytys-elementit toimivat akustisesti absorptiomateriaalina, jonka tehokkuus voidaan kuvata keskimääräisenä absorptiona.

(Osa-)järjestelmän kokonaispainehäviötä ( $\Delta p_t$ ) hallitsee useimmissa tapauksissa kanavan kaltaiset järjestelmät ovissa, paneeleissa ja jäähdytys-elementtien sijoituskohdissa. Ovet ja paneelit määräytyvät mekaanisessa suunnittelussa teollisen muotoilun avustamana. Joissain tapauksissa ovet ja paneelit muodostavat akustisen kotelon. Kanavan kaltaiset järjestelmät toimivat äänen kuljettajina, joissain erityistapauksissa niillä voi myös olla merkittävä vuorovaikutus yhdessä muiden komponenttien kanssa.

Laitteen IP- ja EMC-suojaus voi vaatia erityisesti ovilta ja paneeleilta erikoisrakenteita. Suojausvaatimukset yhdessä toimintaympäristön kanssa määräävät laitteeseen soveltuvat (absorptio-)materiaalit. Rakenteen ulkomitat määräytyvät yleensä käytettävissä olevien tilojen, esimerkiksi edellisten laitesukupolvien, standardien tai vakiintuneen tilanteen mukaan.



Kuva 2. Yksinkertaistettu tukiaseman akustinen toiminta, systeemiajattelu [1].

### 3.3 Riskinarviointi

Riskinarviointi perustuu olemassa olevan osaamiseen vastaavista (osa-)järjestelmistä, jäähdytyksen tarvitsemaan tilavuusvirtaan, painehäviöön (system resistance) ja virtauksen synnyttämään meluun sekä arviointiin lisäkeinoilla saatavasta hyödystä. Syntyvää melua voidaan arvioida kaavalla

$$L_W = K + 10 \log \left( \frac{Q}{Q_0} \right) + 20 \log \left( \frac{\Delta p}{\Delta p_0} \right) + L_{w,flow} \quad (1)$$

missä  $L_W$  on (osa-)järjestelmässä syntyvä äänitehotaso,  $K$  on jäähdytysrakenteen ominaisäänitehotaso, joka voi sisältää myös ainakin osan virtauksen synnyttämästä melusta  $L_{w,flow}$ .  $Q$  on jäähdytyksen vaatima tilavuusvirta,  $Q_0 = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\Delta p$  on staattinen painehäviö (system resistance) ja  $\Delta p_0 = 1 \text{ Pa}$ . Arviointi voidaan tehdä joko A-painotettuna tai painottamattomana.

Tukiasemissa koko järjestelmälle lasketut ominaisäänitehotasot vaihtelevat huomattavasti. Ne ovat tyypillisesti luokkaa 50...55 dB A-painotettuina. Tukiasemissa käytettyjen puhaltimien A-painotetut ominaisäänitehotasot ovat n. 38...43 dB. Rakenteissa esiintyvät ”resonanssit”, tonaaliset äänet eivät tyypillisesti ole merkittäviä koko laitteen melupäästön kannalta. Merkittävin osatekijä puhaltimien aerodynaaminen melu. [2]

Kaavasta 1 havaitaan jäähdytyksen vaatima tilavuusvirta ja syntyvä painehäviö ovat melupäästön kannalta merkittäviä tekijöitä. Painehäviö on lisäksi tilavuusvirran funktio. Suunnitteluprosessin alkuvaiheissa vaadittavaa tilavuusvirtaa voidaan arvioida n.  $\pm 25\%$  tarkkuudella, joka antaa tilavuusvirta- ja painehäviötermeille vaihteluvälin n. -6...+5 dB. Yksityiskohtaisessa suunnittelussa tarkkuus paranee n.  $\pm 10\%$  (-2.5...+2 dB). Lopullisesti ilmamäärä määräytyy vasta prototyypitestauksessa.

Suunnitteluprosessin alkuvaiheissa laitteen melupäästöä voidaan arvioida

$$L_{W, radiated} = L_W - \Delta L \quad (2)$$

missä  $L_{W, radiated}$  on ympäristöön säteilevä äänitehotaso ja  $\Delta L$  lisäkeinojen lisäysvaimennus.

#### 4 YHTEENVETO

Suunnitteluprosessin luonteesta johtuen lähtöarvojen ja rakenteiden tarkkuus/tunnettuus parantuu suunnittelun edetessä. Suunnittelun alkuvaiheessa akustiset vaatimukset ( $L_W$  tai  $L_p$ ) ovat kuitenkin suhteellisen hyvin tunnetut. Tyypillisesti muut vaatimukset voivat muuttua enemmänkin.

Akustisen suunnittelun kannalta tärkeimmät reunaehdot tulevat kuitenkin muista suunnitteluprosesseista. Näitä reunaehtoja asettavat vaadittava tilavuusvirta, (osa-)järjestelmien painehäviö, käytettävissä oleva tila, EMC- ja IP-suojaukset sekä tietysti rajalliset resurssit. Akustisen suunnittelun kannalta tärkeimmät rinnakkaiset suunnitteluprosessit ovatkin lämmönvaihto, mekaniikkasuunnittelu ja teollinen muotoilu.

#### LÄHTEET

1. Karjalainen A. & Tanttari J., Low Noise Design of Electrical Equipment, Work report TUR A016, VTT Automaatio, Tampere, 2001, 54 s. EMISSIO-projektin sisäinen raportti.
2. Karjalainen A. & Hyrynen J., Puhallinmelun rakenteellinen minimointi. Kustannustehokasta meluntorjuntaa. Työraportti A012, VTT Automaatio, Tampere, 2001, 36 p. EMISSIO-projektin sisäinen raportti.