

INDUKTIOKONEEN JÄÄHDYTYSMELUUN LIITTYVIÄ TEKIJÖITÄ

Johannes Hyrynen, Ari Karjalainen
VTT Automaatio/Turvallisuustekniikka
PL 1307
Johannes.Hyrynen@vtt.fi

1. Johdanto

Suurten kaksinapaisten induktiokoneiden tapauksessa koneen jäähtytyksestä aiheutuva melu käsittää suurimman osan koneen melupäästöstä. Induktiokoneiden jäähtytys toteutetaan tavallisesti aksiaalipuhaltimella, jonka melutaso nousee etenkin suurilla pyörimisnopeuksilla merkitseväksi.

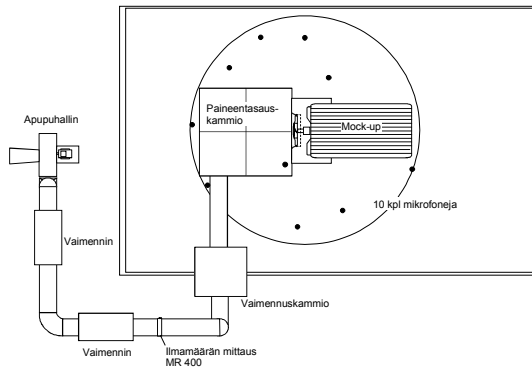
Puhallinmelu riippuu sekä puhaltimen suoritusarvoista että sen rakenteellisista ominaisuuksista. Suoritusarvoriippuvuus ilmaistaan puhaltimen ominaisäänitehon L_{W0} määritelmässä, jolloin kokonaisääniteho muuttuu puhaltimen tilavuusvirran q ja paineenkorotuksen Δp funktiona seuraavasti:

$$L_{WT} = L_{W0} + 10 \cdot \log \frac{q}{q_0} + 20 \cdot \log \frac{\Delta p}{\Delta p_0}. \quad (1)$$

Kaavassa q_0 saa arvon $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ja Δp_0 arvon 1 Pa . Logaritmitermit kuvaavat äänitehoa tilavuusvirran ja paineen yksikköä kohden. Termien kertoimet perustuvat $P \propto v^5$ riippuvuuteen sekä puhallinlakeihin. Kokonaisäänitehon jäljelle jäävään osuuteen vaikuttavat puhaltimen geometria ja rakenteelliset parametrit sekä puhaltimen toimintapiste. Kun puhaltimen vastapaine (paineenkorotus) muuttuu, myös ilmamäärä muuttuu, jolloin puhallin toimii eri toimintapisteessä. Jossakin toimintapisteessä puhallin saa ominaisäänitehonsa minimin. Useimmiten minimi on yhtenevä toimintapisteen kanssa, jossa puhaltimen aerodynaaminen hyötysuhde on maksimissaan. Yleensä tavoitteena onkin mitoittaa puhallin tähän toimintapisteeseen.

Ominaisäänitehon määrittämisen vuoksi testijärjestelmä on hyvä rakentaa sellaiseksi, että puhaltimen suoritusarvot voidaan mitata. Jotta myös eri toimintapisteeet voidaan testata, on puhaltimen ilmamäärää pystyttävä säätämään. Mittaus- ja säätöjärjestelmä on esitetty kuvassa 1. Mittaukset suoritettiin standardia ISO10302 soveltaen [1].

Kokeet päätettiin viedä läpi koesuunnittelumenetelmää käyttäen, jolloin tarvittavien kokeiden määrä saatiin minimoitua. Toisaalta muutokset koealueessa oli mahdollista kartoittaa luotettavasti. Oikean induktiokoneen sijaan käytössä oli ns. mock up, joka on näköismalli oikeasta laitteesta. Suunnitteluparametrien muuttaminen näköismallisissa on helpompaa kuin oikeassa laitteessa. Valokuva testin mock up:ista on esitetty kuvassa 2.



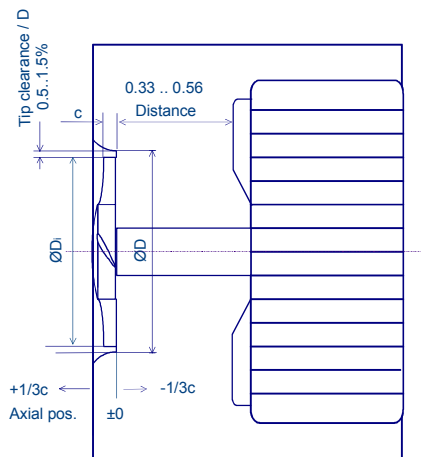
Kuva 1. Ilmamäärän säätöjärjestelmä.



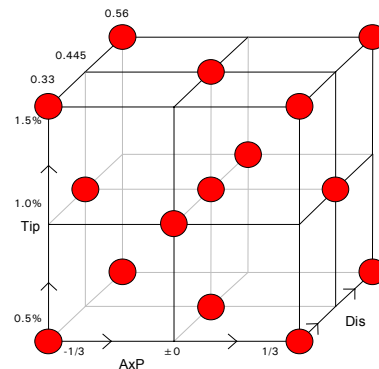
Kuva 2. Mock up

2. Suunnitteluparametrit ja koesuunnitelma

Puhallinsovelluksessa tutkittaviksi suunnitteluparametreiksi valittiin siipipyörän siiven kärkiväly, siipipyörän aksiaalisuuntainen paikka imukauluksessa sekä siipipyörän ja imukauluksen etäisyys moottorikilvestä. Parametrit ja niiden vaihteluvälit on valittu perustuen aikaisemmin julkaistuun tutkimusmateriaaliin [2,3,4] sekä puhallinvalmistajien antamiin ohjesääntöihin. Kaaviokuva parametreistä on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Kokeen muuttujat vaihteluväleineen



Kuva 4. Koesuunnitelman koalue.

Koesuunnitelma tehtiin koesuunnitteluohjelmistoa (Modde 5.0) käyttäen. Kyseessä olevalle tapaukselle sopiva menetelmä käsitti toistokokeineen 17 koetta, joiden avulla menetelmän mukaan pystyttiin hyvällä tarkkuudella kattamaan koalue. Suunnitteluparametrien testikombinaatiot on esitetty kuvassa 4.

Mitattuina vasteina olivat puhaltimen tilavuusvirta, paineenkorotus ja ääniteho. Koesuunnittelumenetelmän avulla oli mahdollista analysoida, mitkä tekijöistä olivat merkityksellisimpiä eri vasteiden kannalta. Tulosten perusteella oli mahdollista luoda ennustemalli, kuinka suunnitteluparametrien eli faktorien muutokset vaikuttavat mitattuihin vasteisiin koalueen vaihteluvälien sisällä. Mallista pystytään myös näkemään, onko koasetelman eri faktorien välillä yhteisvaikutuksia mitattujen vasteiden kannalta.

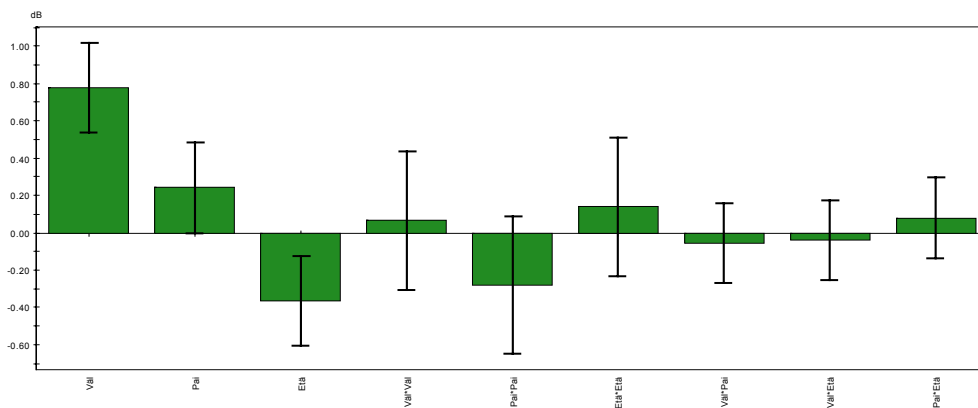
Koesuunnitelman tutkimuksen tulokset voidaan esittää vastepintoina, jotka on luotu tuloksista saadun ennustemallin avulla. Ennustemalli esitetään polynomina, joka on käytettyjen faktorien funktio. Esimerkiksi tässä esitetyn ennustemallin polynomi on muotoa:

$$y = vakio + a \cdot väl + b \cdot pai + c \cdot etä + d \cdot väl^2 + e \cdot pai^2 + f \cdot etä^2 + g \cdot väl \cdot pai + h \cdot väl \cdot etä + i \cdot pai \cdot etä, \quad (2)$$

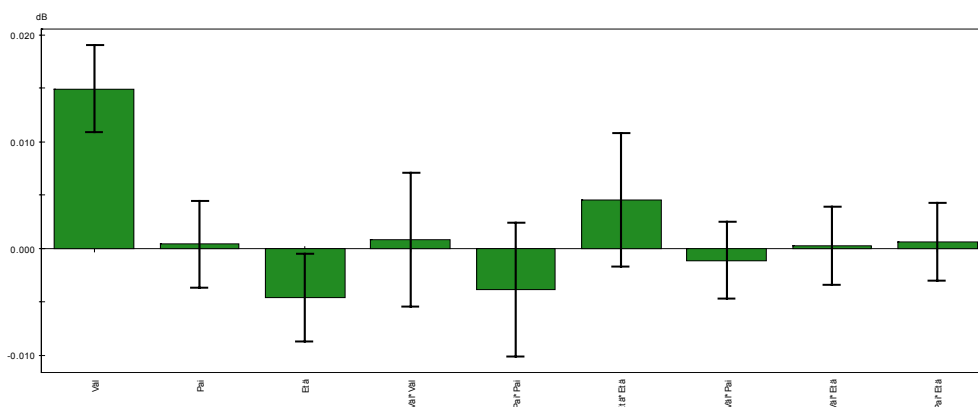
jossa a, b, c, d, f, g, h ja i ovat faktorien ja niiden yhdistelmien termien vakioita.

3. Tulokset

Tuloksia on tässä käsitelty ainoastaan puhallinsovelluksen kokonaisäänitehon ja ominaisäänitehon osalta. Tulokset on esitetty toimintapisteessä, joka vastaa puhaltimen toimintaa normaalisti jäähdytysjärjestelmässä. Kuvassa 5 on nähtävissä faktorien vaikutukset puhallinsovelluksen kokonaisäänitehotasoon. Kuvassa 6 taas on esitetty vaikutukset ominaisäänitehotasoon. Huomataan, että äänitehotason tuloksiin eniten vaikuttava tekijä on siiven kärkivälys. Muista tekijöistä etäisyys moottorista nousee hieman aksiaalipaikoitusta tärkeämmäksi. Faktorien yhteisvaikutukset eivät näytä esittävän kovinkaan merkittävää roolia ennustemallissa.



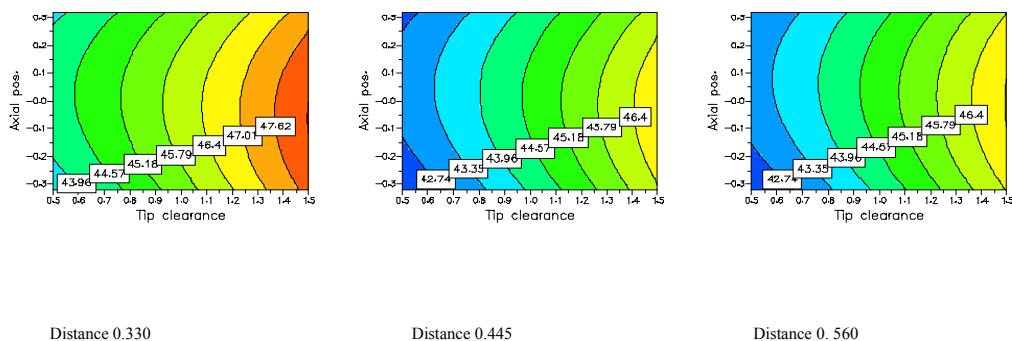
Kuva 5. Faktorien vaikutukset puhallinsovelluksen kokonaisäänitehotasoon.



Kuva 6. Faktorien vaikutukset puhallinsovelluksen ominaisäänitehotasoon.

Ominaisäänitehosta voidaan todeta sama kuin kokonaisäänitehostakin sillä erotuksella, että aksiaalipaikoituksen merkitys on jäänyt vähäiseksi. Tämä selittyy sillä, että

vaikka kokonaisäänitehotaso muuttuukin aksiaalipaikoituksen suhteen merkittävästi, samalla myös puhaltimen suoritusarvoissa tapahtuu muutoksia, jotka ovat saman suuntaisia. Ominaisäänitehon määritelmään viitaten kokonaisäänitehotason muutokset kompensoituvat muutoksilla puhaltimen suoritusarvoissa.

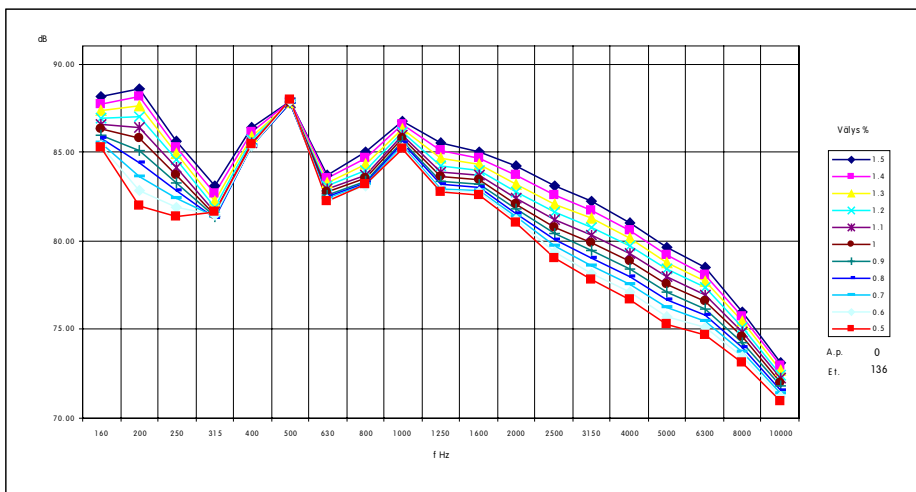


Kuva. 7. Ominaisäänitehotason vastepinta.

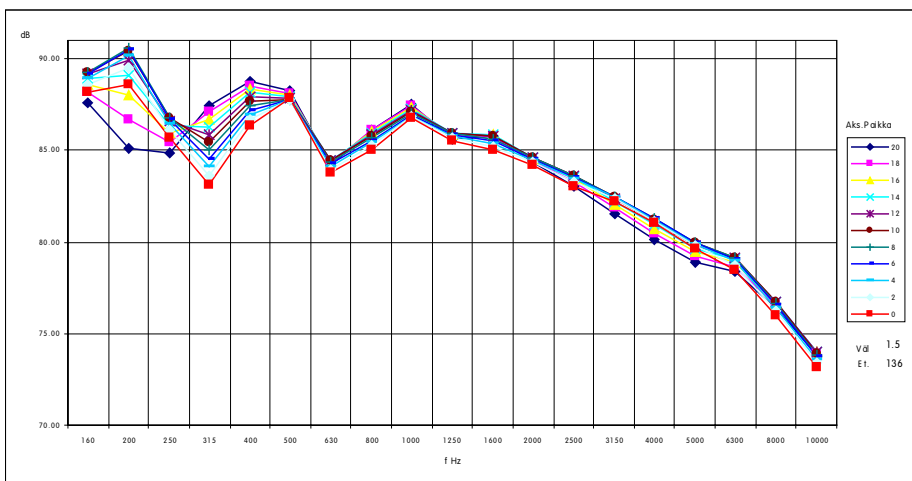
Kuvassa 7 on esitetty ominaisäänitehotason vastepinta. Nähdään, että pienimmät arvot saavutetaan, kun siipipyörän etäisyys moottorista on 0.445 tai suurempi. Sen lisäksi selvästi pienimmät arvot ominaisääniteho saa pienillä siiven kärkivälyksillä. Siipipyörän aksiaalisuuntaisen paikoituksen osalta isoja muutoksia ei ole vastepinnoissa saatu näkyviin.

4. Ennustemallit

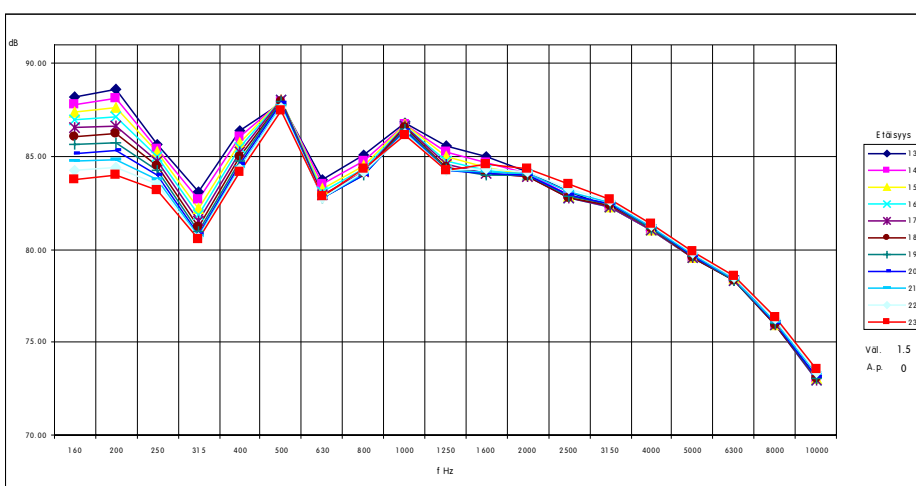
Koesuunnittelusta saatavia ennustemalleja voidaan tarkastella vastepintoina, jotka antavat havainnollisen kokonaiskuvan siitä, mitä koealueessa tapahtuu. Vastepinnoista on helppo nähdä merkittävimmät tekijät. Toisaalta ennustemallien kertoimia voidaan käyttää myös esimerkiksi simuloimaan jonkin tekijän vaikutuksia useampaan vasteseen kerralla. Tässä tutkimuksessa jokaiselle terssikaistalle on luotu oma ennustemallinsa ja niitä käyttämällä on saatu aikaan ennustemalli kunkin faktorin vaikutuksista puhaltimen taajuusjakaumaan 1/3-osakaistoin. Kuvissa 8..10 on esitetty kunkin faktorin vaikutus puhaltimen taajuusjakaumaan ennustemallin mukaan.



Kuva 8. Siiven kärkivällyksen muutosvaikutus taajuusjakaumaan puhaltimen normaalitoimintapisteessä.



Kuva 9. Siipipyörän aksiaalipaikoituksen muutosvaikutus taajuusjakaumaan puhaltimen normaalitoimintapisteessä.



Kuva 10. Siipipyörän ja moottorikilven välisen etäisyyden muutosvaikutus taajuusjakaumaan puhaltimen normaalitoimintapisteessä.

Kuvan 8 kuvaajasta nähdään, että välyksen vaikutukset taajuusjakaumaan muiden parametrien pysyessä vakiona ovat luonteeltaan suhteellisen laajakaistaisia. Vain lapataajuus (500Hz) pysyy suhteellisen vakioarvoisena koealueeseen kuuluvalla vaihteluvälillä. Muut taajuuskaistat saavat säännönmukaisesti sitä suurempia arvoja, mitä suuremmaksi välyksen arvot asetetaan.

Siipipyörän aksiaalipaikoituksen vaikutus imukaulukseen nähden näyttää kuvan 9 mukaan keskittyvän pääasiassa 500Hz pienemmille taajuuskaistoille, jossa ≥ 315 Hz taajuuskaistat saavat suurempia arvoja pienemmällä aksiaalipaikoituksen arvoilla. 160Hz .. 250 Hz arvot saavat maksiminsa koealueen keskivaiheilla.

Etäisyyden vaikutukset näyttävät olevan suhteellisen pienet. Suurimmat vaikutukset ovat kuvan 10 mukaan taajuuskaistoilla ≤ 315 Hz, jolloin etäisyyden kasvaessa taajuuskaistat saavat pienempiä arvoja.

5. Johtopäätökset

Tehty tutkimus on keskittynyt tietyn koealueen sisällä tapahtuvien muutosten kartoittamiseen. Koesuunnittelumenetelmän avulla on saatu esiin valittujen suunnitteluparametrien joukosta merkittävimmät vaikuttavat tekijät. Sekä kokonais- että ominaisäänitehotasojen kohdalla merkittävimäksi vaikuttavaksi tekijäksi nousi siiven kärkiväly, jota kasvatettaessa, äänitasot nousivat huomattavasti. Toisena vaikuttavana tekijänä voidaan pitää siipipyörän ja moottorin välistä etäisyyttä. Etäisyyden kasvaessa osalla tutkimusalueella, äänitasot pienenevät jonkin verran. Faktorien neliölliset ja yhteisvaikutustermit jäivät kokonaisvaikutukseltaan pieniksi ennustemallissa.

Taajuusjakaumien ennustemallien perusteella voidaan nähdä, että eri suunnitteluparametrien aikaansaamat vaikutukset ovat erilaiset. Siiven kärkivälyksen vaikutukset näkyvät selkeimmin siipipyörän lapataajuutta suuremmilla taajuuksilla, kun taas siipipyörän aksiaalipaikoituksen ja etäisyyden vaikutukset näkyvät kapeammalla taajuusalueella siipitaajuutta pienemmillä taajuuskaistoilla. Toisaalta siipitaajuutta pienempien kaistojen muutokset johtuvat enemmänkin resonanssi-ilmiöistä kuin aerodynaamisista ilmiöistä, joita ominaisäänitehotarkastelulla yleensä pyritään hakemaan.

Kirjallisuutta

1. ISO 10302:1996 Acoustics - Method for the measurement of airborne noise emitted by small air-moving devices.
2. Hofe, R.V., Thien G.E.: An efficient approach to design low-noise automotive cooling systems. ImechE C143/84, ss 31-40.
3. Fukano T., Takamatsu T.: The Effects of tip clearance on the noise of low pressure axial and mixed flow fans. Journal of Sound and Vibration 105 (2), 1986, ss 291-308.
4. Forschungsberichte, Verbrennungsmaschinen, Heft 286: Geräuscharme Kühler-Lüfter-Systeme, UB/TIB Hannover 1981.