

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö

MOOTTORIKUVUN VAIKUTUS EC-PUHALTIMEN HYÖ- TYSUHTEESEEN

Effect of an integrated EC motor on the fan efficiency

Työn tarkastaja: Professori, TkT Risto Soukka

Työn ohjaaja: Tutkijatohtori, TkT Tero Ahonen

Lappeenrannassa 23.1.2014

Santeri Pöyhönen

SISÄLLYS

SYMBOLILUETTELO	2
1 JOHDANTO	3
2 EC-MOOTTORI PUHALLINKÄYTÖSSÄ.....	5
3 KESKIPAKOISPUHALTIMEN HYÖTYSUHTeen MÄÄRITTÄMINEN.....	8
4 MOOTTORIKUVUN VAIKUTUKSEN SELVITTÄMINEN MITTAUKSIEN AVULLA.....	10
4.1 Mittausjärjestelyt.....	10
4.2 Suoritetut mittaukset ja laskenta	15
4.2.1 Tuottoarvojen laskenta	16
4.2.2 Epävarmuusanalyysi.....	17
4.2.3 Antureiden häiriöiden suodattaminen.....	18
5 TULOKSET	22
6 YHTEENVETO.....	29
LÄHTEET	30

SYMBOLILUETTELO

A	pinta-ala	[m ²]
C_c	osakuorman kompensointitekijä	
$\cos \varphi$	tehokerroin	
I	sähkövirta	[A]
k_p	puristuvuuskerroin	
n	näytteiden lukumäärä	
P	teho	[W]
p_{dyn}	dynaaminen paine	[Pa]
p_f	puhaltimen tuottama paine	[Pa]
q_v	tilavuusvirta	[m ³ /s]
s	otoskeskihajonta	
T	lämpötila	[K]
U	jännite	[V]
u_A	keskiarvon keskivirhe	
v	nopeus	[m/s]
η	hyötysuhde	
ρ	tiheys	[kg/m ³]
Δp_s	staattinen paine-ero	[Pa]
Δp_t	kokonaispaineen muutos	[Pa]

Alaindeksit

amb	ympäristön
dyn	dynaaminen
e	sähkö-, otto-
t	kokonais-
u	kaasu-

1 JOHDANTO

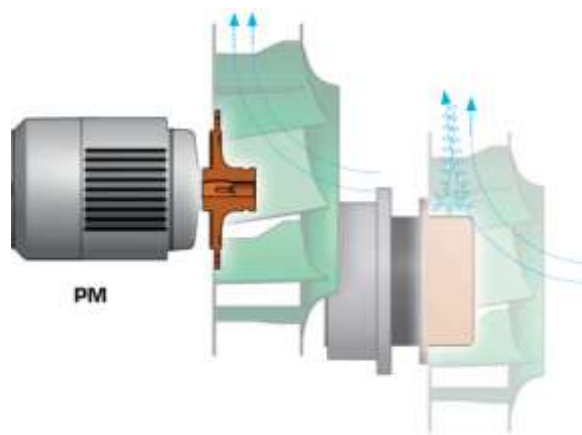
Tiukentuvat Euroopan unionin energiatehokkuusdirektiivit ohjaavat puhallinvalmistajia kehittämään tuotteistaan entistä energiatehokkaampia. Marraskuussa 2009 julkaistun EU:n ErP-direktiivin (”Energy related Products”, energiaan liittyvät tuotteet) 2009/125/EY nojalla on laadittu asetus, joka asettaa tavoitteet puhallinjärjestelmien vähimmäishyötysuhteille. Maaliskuussa 2011 julkaistun Euroopan komission asetuksen 327/2011 tavoitteen ensimmäinen vaihe astui voimaan 1.1.2013 ja toinen, korkeampaa vähimmäistehokkuutta vaativa vaihe astuu voimaan 1.1.2015. Säädöksillä pyritään velvoittamaan valmistajia ottamaan huomioon puhallinjärjestelmän kokonaishyötysuhde sen yksittäisten osien hyötysuhteiden sijaan. Ne myös siirtävät vastuuta järjestelmän tehokkuuden selvittämisestä asiakkaalta valmistajalle. Energiatehokkuusasetus velvoittaa puhallinvalmistajia tuomaan tuotteidensa tekniset tiedot vapaasti asiakkaan saataville. Tällöin asiakkaan on helpompi löytää energiatehokkain vaihtoehto. Ekosuunnitteluvaatimusten tavoitteena on myös yhdenmukaistaa energiatehokkuusvaatimuksia ja siten parantaa sisämarkkinoiden toimivuutta. Euroopan komission tekemä taustaselvitys osoitti, että käytönaikainen sähköenergiankulutus on merkittävin ympäristönäkökohta puhaltimen elinkaaren aikana. Siksi keskitytään nimenomaan energiatehokkuuteen, kun pyritään vähentämään puhaltimen elinkaaren ympäristövaikutuksia. (Euroopan komission asetus 327/2011.)

Energiatehokkuus on lainsäädännön ja teknologian kehityksen myötä noussut yhdeksi näkyvimmistä kilpailuedun tavoittelun keinoista puhallinmarkkinoilla. Energiatehokkuuden merkitys on hyvin oleellinen asiakkaalle, sillä puhaltimen käyttökustannukset riippuvat suoraan sen kuluttaman energian määrästä. Esimerkiksi ilmastointisovelluksissa puhaltimien toiminta on jatkuvaa, jolloin käyttökustannusten tärkein tekijä on nimenomaan laitteiston energiatehokkuus. Mainintaa energiatehokkuusasetuksen noudattamisesta (kuva 1) käytetään hyväksi puhallintuotteiden markkinoinnissa. Iso osa puhallinvalmistajista on jo saavuttanut asetuksen vuoden 2015 tavoitteen. Siten suurin osa puhallinmarkkinoiden varsinaisesta kilpailusta tapahtuu hyötysuhteita katsoen minimivaatimusten yläpuolella, eikä niin sanottu ErP-merkintä siis vielä takaa, että kyseessä olisi energiatehokkuudeltaan markkinoiden parasta luokkaa oleva tuote.



Kuva 1. Ebm-papstin käyttämä "ErP-merkintä", jolla kerrotaan tuotteen noudattavan ErP-direktiivin vaatimuksia.

Elektronisesti kommutoidulla (Electronically Commutated) moottorilla ajettu EC-puhallin on hyötysuhteeltaan yksi parhaista markkinoiden kokoonpanovaihtoehdoista keskipakoispuhallimelle. Toinen lähtökohtaisesti yhtä energiatehokas ratkaisu on kestmagneettimoottorilla varustettu puhallin, jonka säätö suoritetaan ulkoisella taajuusmuuttajalla. Taajuusmuuttajia valmistava Danfoss ja puhallinkokonaisuuksia valmistava Fläktwoods esittävät markkinointimateriaaleissaan, että kestmagneettimoottorilla ja erillisellä taajuusmuuttajalla ajettavalla puhaltimella voidaan saavuttaa korkeampi kokonaishyötysuhde kuin EC-puhaltimella. Syyksi hyötysuhteiden erolle ilmoitetaan EC-puhaltimen rakenne: siipipyörän keskellä oleva moottorin kupu estää sisääntulevaa ilmavirtaa alentaen puhaltimen kokonaishyötysuhdetta (kuva 2).



Kuva 2. Moottorikuvun vaikutus puhaltimen sisääntulon ilmavirtaan (Fläktwoods).

Kirjallisuuslähteistä ei ole löydettävissä tutkimuksia tai muita riippumattomia julkaisuja, joista selviäisi moottorikuvun vaikutus puhaltimen aerodynamiikkaan. Toistaiseksi ainoat kysymykseen kantaa ottavat olemassa olevat julkaisut ovat markkinointiin tarkoitettuja esitteitä.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää mittauksia suorittamalla, vaikuttaako elektronisesti kommutoidun keskipakoispuhaltimen moottorin kupu siipipyörän läpi kulkevaan ilmavirtaukseen siten, että puhaltimen kokonaishyötysuhde laskee. Mittaukset suoritettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston laboratoriossa. Mittauksia varten yliopiston työpajalla rakennettiin keskipakoispuhaltimeen kiinnitettäväksi moottorin kuvun vaikutusta simuloiva kappale. Puhaltimen tuottoa ja sähkötehoa mitattiin kuvun kanssa ja ilman. Lopuksi mittausten perusteella laskettuja hyötysuhteita vertailtiin kuvun vaikutuksen suuruuden selvittämiseksi.

2 EC-MOOTTORI PUHALLINKÄYTÖSSÄ

Tässä työssä tarkasteltavalla EC-puhallimella tarkoitetaan keskipakoispuhallinta, jonka ajo on toteutettu osittain siipipyörän sisään sijoitetulla elektronisesti kommutoidulla moottorilla. EC-puhallin ei ole käsitteenä yleisesti yksiselkoinen, ja eri puhallinvalmistajilla voi olla sille erilaiset määritelmät. Edellä mainittu määritelmä on melko yleinen suurimpien puhallin- ja taajuusmuuttajavalmistajien keskuudessa ja sitä käytetään lähtökohtana tässä työssä.

EC-puhallin on kasvattanut suosiotaan useissa alhaisen teholuokan sovelluksissa (Venkov 2011). EC-puhallimia käytetään perinteisen induktiomoottoripuhaltimen sijaan esimerkiksi elektronisten laitteiden jäähdytyksessä, jäähdytyslaitteiden lauhduttimissa ja erilaisissa ilmastointisovelluksissa, kuten autojen ilmastoinnissa ja rakennusten ilmanvaihdossa. Näiden käyttökohteiden asettamia tyypillisiä yhteisiä vaatimuksia ovat energiatehokkuus ja pieni tilantarve.

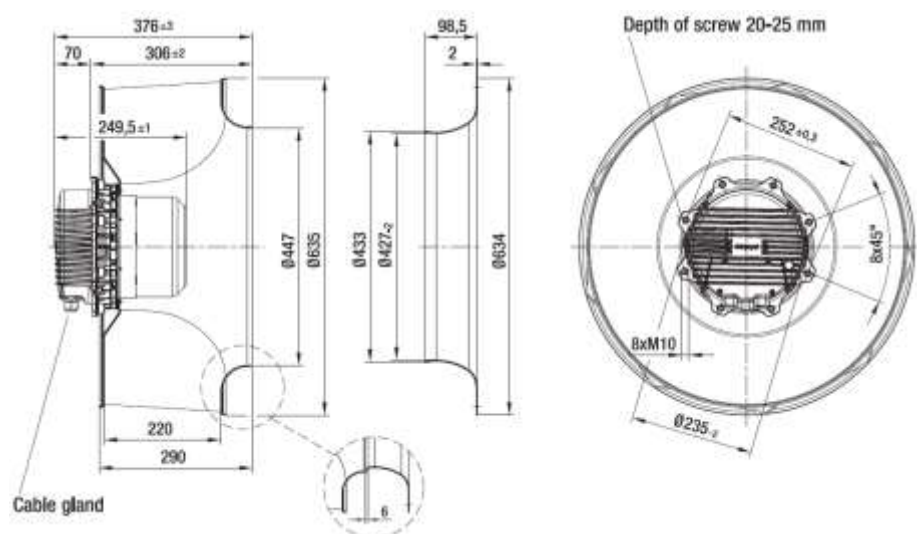
EC-moottori on elektronisesti kommutoitu harjaton tasavirtamoottori, joka sisältää integroidun taajuusmuuttajan. Kommutoinnilla tarkoitetaan sähkövirran suunnan kääntöä sähkömoottorin johdinkäämityksissä. Virrankäännön aiheuttamalla magneettikentän napojen vaihdolla saadaan aikaan samansuuntaiset voimat, jotka saavat moottorin pyörimään. Elektronisessa kommutoinnissa virrankääntö suoritetaan harjojen ja halkaistun renkaan sijaan elektronisen piirin avulla. EC-moottorin magnetointi on yleensä toteutettu kestopagneetin

avulla. Moottorin rakenteesta johtuen puhaltimen siipipyörä on EC-puhaltimessa rakennettu osaksi moottorin ulkoista tai sisäistä roottoria. (Wellington ja Petrov 2011, 14-16.)

Kuvassa 3 on esitetty tyypillinen koteloimaton EC-puhallin valmistajalta ebm-papst (malli R3G630AB0603). Kuvassa 4 on esitetty mainitun puhaltimen piirustukset, joista on nähtävissä moottorin sijoittuminen siipipyörän sisään.



Kuva 3. Koteloimaton EC-puhallin ebm-papstilta (ebm-papst 2013).

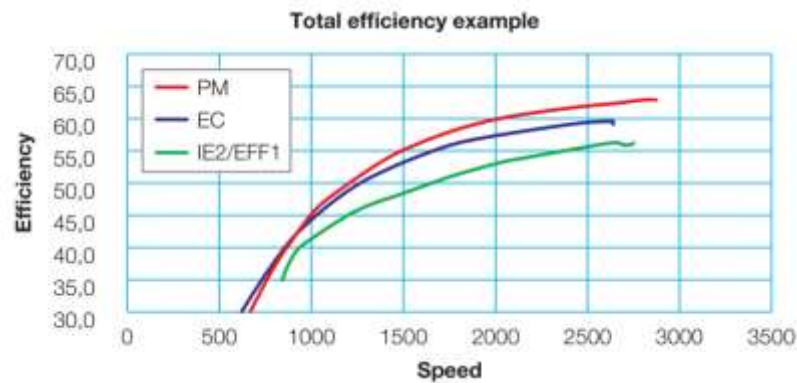


Kuva 4. Puhaltimen piirustukset, joista ilmenee moottorin sijoittuminen siipipyörän sisään (ebm-papst 2013).

EC-puhaltimella katsotaan olevan muutamia etuja muihin vastaaviin puhaltimiin nähden. Erityisesti alhaisissa teholuokissa EC-moottorilla varustettu puhallin on energiatehokkuutensa ansiosta taloudellisempi vaihtoehto kuin oikosulkumoottorilla varustettu puhallin (Petrov 2011, 13). Vaikka EC-puhallin on kokonaisuutena hankintahinnaltaan kalliimpi kuin vastaavan teholuokan induktiomoottori-taajuusmuuttaja-järjestelmä, se on monesti taloudellisempi ratkaisu alhaisempien käyttökustannustensa ansiosta (Petrov 2011, 80). EC-puhaltimella on myös muita etuja perinteiseen oikosulkumoottorilla varustettuun puhaltimeen nähden:

- Magneetikenttää ei tarvitse luoda sähkövirran avulla, kun käytetään kestopagneettia. Tällöin vältetään johtimen resistanssista aiheutuva lämpenemisen energiahäviö.
- Moottorissa on yksi kuluva osa vähemmän harjattoman kommutoinnin ansiosta.
- EC-puhallin on kooltaan pienempi integroidun moottorin ansiosta.
- Taajuusmuuttajan ansiosta pyörimisnopeutta voidaan säätää enemmän ilman että hyötysuhde laskee huomattavasti (Venkov 2011).

EC-puhallin on tietyissä asennuskohteissa paras ratkaisu moottorityypin mahdollistaman pienen koonsa ansiosta. Kun puhaltimen tilantarpeella ei ole merkitystä, kiinnitetään huomiota puhallinjärjestelmän kokonaishyötysuhteeseen. Vaikka EC-moottorilla ajettu puhallin voittaaakin induktiomoottorilla ajetun puhaltimen hyötysuhteessa alemmissa teholuokissa, se ei silti ole välttämättä paras mahdollinen ratkaisu. Kun tarkastellaan nimenomaan kokonaishyötysuhdetta yksittäisten osien, kuten moottorin hyötysuhteen sijaan, on mahdollista, että erillisellä taajuusmuuttajalla ohjattu ja kestopagneettimoottorilla ajettu puhallin voittaa EC-puhaltimen hyötysuhteessa sen tyypillisellä tehoalueella. Kuvassa 5 on esitetty kuvaaja Fläktwoodsien markkinointimateriaalista, josta ilmenee erilaisten puhallinkokonaisuuksien hyötysuhteet eri pyörimisnopeuksilla.



Kuva 5. Erilaisilla moottoreilla ajettujen puhallinten hyötysuhteiden vertailu Fläktwoodsien markkinointimateriaalissa (Fläktwoods).

Ratkaisevan eron hyötysuhteissa tekee markkinointimateriaalin mukaan EC-moottorin kupu, joka siipipyörän sisässä tukkii virtausta alentaen puhaltimen tuottoa. Kattavan tiedonhaun jälkeen voidaan melko varmasti sanoa, että markkinointimateriaalien lisäksi ei ole olemassa muita julkaisuja, jotka ottaisivat kantaa moottorikuvun aerodynaamiseen vaikutukseen.

3 KESKIPAKOISPUHALTIMEN HYÖTYSUHTEN MÄÄRITTÄMINEN

Keskipakoispuhaltimen hyötysuhde koostuu siipipyörä-, akseli-, moottori- ja kokonaishyötysuhteista. Tässä osiossa tarkastellaan kokonaishyötysuhteen määrittystapoja ja niihin liittyviä määräyksiä ja standardeja.

Standardissa SFS-EN ISO 5801 ja Euroopan komission asetuksessa 327/2011 annetaan ohjeet keskipakoispuhaltimen kokonaishyötysuhteen määrittämiseksi. Standardi sisältää yksityiskohtaisia ohjeita mittausjärjestelyjen oikeanlaiseen toteutukseen, kun taas asetuksessa keskitytään hyötysuhteen määrittämiseen ja sen vertailuun vähimmäisvaatimuksiin.

Hyötysuhde määritetään puhaltimen toimiessa optimaalisessa energiatehokkuuspisteessä (Euroopan komission asetus 327/2011, s. 17). Standardin SFS-EN ISO 5801 mukaan hyötysuhde lasketaan kaasutehon ja moottorin ottotehon suhteena kaavalla

$$\eta = \frac{P_u}{P_e} \quad (1)$$

η = hyötysuhde

P_u = kaasuteho [W]

P_e = moottorin ottoteho [W]

(SFS-EN ISO 5801: 2009, 45)

Euroopan komission asetuksen hyötysuhteen laskentatapa eroaa hieman standardin tavasta. Kun puhaltimessa on taajuusmuuttaja, asetuksen mukaan hyötysuhde lasketaan kaavalla

$$\eta = \frac{P_u}{P_e} * C_c \quad (2)$$

C_c = osakuorman kompensointitekijä seuraavasti:

- moottorissa on taajuusmuuttaja ja $P_e \geq 5$ kW, jolloin $C_c = 1,04$
- moottorissa on taajuusmuuttaja ja $P_e < 5$ kW, jolloin $C_c = -0,03 * \ln(P_e) + 1,088$

(Euroopan komission asetus 327/2011, s. 18)

Moottorin ottoteho on moottorin tuloavoista mitattu sähköteho. Sen määrittäminen perustuu virran ja jännitteen mittauksiin ja lasketaan kaavalla

$$P_e = \sqrt{3} * U * I * \cos \varphi \quad (3)$$

$\cos \varphi$ = tehokerroin

I = sähkövirta [A]

U = jännite [V]

(Pyrhönen ja muut 2008. 287)

Puhaltimen kaasuteho lasketaan sekä standardin että asetuksen mukaan kaavalla

$$P_u = q_v * p_f * k_p \quad (4)$$

k_p = puristuvuuskerroin

p_f = puhaltimen tuottama paine [Pa]

q_v = tilavuusvirta [m³/s]

Euroopan unionissa ja siten myös Suomessa valmistettavien puhaltimien hyötysuhteen määrittämisessä ja siihen liittyvien tietojen ilmaisussa on noudatettava Euroopan komission asettamaa edellä mainittua asetusta. Toisin kuin esimerkiksi lait ja asetukset, standardit eivät itsessään ole velvoittavia ja niiden soveltaminen on vapaaehtoista (Suomen Standardisoi- misliitto SFS ry 2013, 7). Laitevalmistajien on kuitenkin järkevää käyttää EU:ssa ja Suo- messa vahvistettuja standardeja, kuten aiemmin mainittua SFS-EN ISO 5801:tä laitteiden testauksessa. Lainsäädännössä usein viitataan standardeihin vaatimukset täyttävinä ratkai- suina, ja niitä soveltamalla voidaan varmistaa, että käytetty toimintatapa täyttää lainsäädän- nön asettamat vaatimukset (Suomen Standardisoi misliitto SFS ry 2013, 16).

4 MOOTTORIKUVUN VAIKUTUKSEN SELVITTÄMINEN MIT- TAUKSIEN AVULLA

Tässä osiossa on kuvattu moottorikuvun vaikutuksen selvittämiseksi suoritettujen mittausten mittausjärjestelyt, suoritustapa, laskenta ja epävarmuusanalyysi.

4.1 Mittausjärjestelyt

Mittauksissa käytettiin Fläktwoods sin puhallinta Centripal EU 4 MD 630 (kuva 6 ja taulukko 1). Puhallinta ajettiin ABB:n ACH550-taajuusmuuttajalla. DriveWindow Light -ohjelmis- tolla ohjattiin taajuusmuuttajaa ja tallennettiin sen arviot pyörimisnopeudesta ja vääntömo- mentista. Puhaltimen ja taajuusmuuttajan sähkötehoa mitattiin Norma D 6100 -tehoanaly-

saattorilla. Pyöreän virtauskanavan halkaisija oli 630 mm. Lähtöpuolen virtauskanavan kuristamiseen käytettyä Fläktwoodsin SPB3 D2 -säätöpeltiä (kuva 7) ohjattiin TTi-virtalähteellä.

Taulukko 1. Mittauksissa käytetyn puhaltimen toiminta-arvot sen nimellispisteessä.

Puhallin					Moottori			
Pyörimisnopeus (rpm)	Teho (kW)	Virtaama (m ³ /s)	Kokonaispainetuotto (Pa)	Siipipyörän halkaisija (mm)	Pyörimisnopeus (rpm)	Teho (kW)	Sähkövirta (A)	cosφ
1446	7.50	2.90	1190	630	1450	7.5	15.7	0.80



Kuva 6. Mittauksissa käytetty Fläktwoodsin puhallin Centripal EU 4 MD 630.



Kuva 7. Fläktwoodsin Säätöpelti SPB3 D2.

Tilavuusvirtaa mitattiin Elridge 9800MPNH -massavirtamittarilla (kuva 8). Se asennettiin tulopuolen putkeen. Staattista paine-eroa mitattiin Rosemount 2051C -anturilla. Anturiin kytkettiin neljä pitot-putkea sekä tulo- että lähtöpuolelle. Tulopuolella pitot-putkien etäisyys imuaukosta oli 7*putken halkaisija (D) ja puhaltimelta 3*D. Lähtöpuolella pitot-putkien etäisyydet olivat puhaltimelta 7*D ja säätöpölyiltä 3*D.



Kuva 8. Massavirtamittari Elridge 9800MPNH ja tulopuolen pitot-putket.

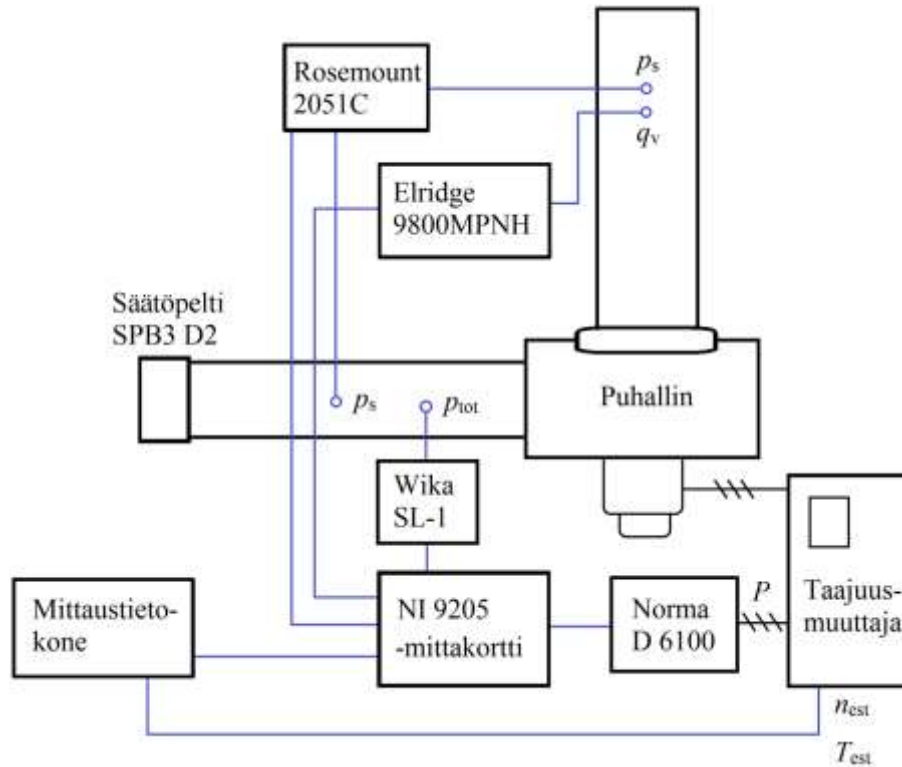
Antureita syötettiin 25 V:n jännitteellä Seltron-jännitelähteellä. Antureilta saadut jänniteviestit mitattiin tietokoneeseen kytketyllä NI 9205 -mittakortilla. Mittakortilta saadut näytteen luettiin ja tallennettiin SignalExpress Labview 2012 -ohjelmistolla. Jänniteviestien skaalaus mittasuureiksi on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Jänniteviestien skaalaus mitatuiksi suureiksi.

	Staattinen paine-ero	Tilavuusvirta	Sähköteho
Jänniteviesti	1 V ... 5 V	1 V ... 5 V	0 V ... 10 V
Mitattu arvo	0 Pa ... 3000 Pa	0 m ³ /s ... 6 m ³ /s	0 kW ... 5 kW

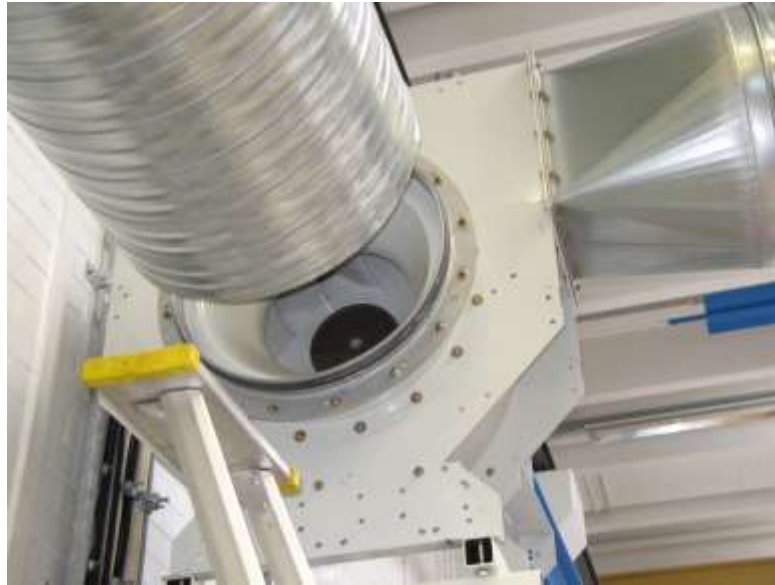
Vallitsevaa ilmanpainetta ja lämpötilaa mitattiin barometrillä ja sen elohopealämpömittarilla. Niiden arvoja käytettiin mittaustulosten korjaamiseen.

Mittausjärjestelmä on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Mittausjärjestelmä. Selkeyden vuoksi jännitelähteet on jätetty kuvasta pois.

Moottorikuvun vaikutusta simuloiva kappale pyrittiin valitsemaan siten, että se simuloisi mahdollisimman realistisesti käytettyä puhallinta kooltaan vastaavan EC-puhaltimen moottorikupua. Kuvuksi valikoitui sopivan kokoisin muoviämpärin pohja. Sen korkeus on 78 mm, alempi halkaisija 238 mm ja ylempi halkaisija 228 mm. Kupu kiinnitettiin keskelle siipipyörän sisäpintaa (kuvat 10 ja 11).



Kuva 10. Muoviämpäristä valmistettu kupu puhaltimen sisällä.



Kuva 11. Lähikuva kuvusta siipipyörän keskellä.

Laitevalmistajien ilmoittamat epätarkkuustiedot mittalaitteille on esitetty taulukossa 3. Taulukko on lainattu mittausraportista, jonka tein kesätöissä Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa yhteistyössä TkT Tero Ahosen kanssa.

Taulukko 3. Mittalaitteille ilmoitettuja tarkkuus-/mittausepävarmuustietoja ja niiden perusteella johdetut normaalijakauman (1σ) mukaiset B-tyyppin mittausepävarmuudet.

	Ilmoitettu tarkkuus/mittausepävarmuus	Ilmoitetusta arvosta johdettu normaalijakauman (1σ) mukainen B-tyyppin epävarmuus u_B
Staattinen paine-ero	0.1 % mittausalueesta (3σ).	1 Pa
Tilavuusvirta	1 % lukemasta + 0.7 % täydestä skaalasta (oletuksena 1σ)	1 % lukemasta + 0.042 m ³ /s
Sähköteho	Riippuu mitatusta jännitteestä, sähkövirrasta ja tehokertoimesta. Tässä valittu 1 % lukemasta.	Oletetaan keskimäärin n. 10 % virhe tasajakautuneeksi, jolloin $u_B = 1\%/\sqrt{3} \approx 0.578\%$ lukemasta.
NI-9205	”Residual gain error” 115 ppm lukemasta ja tarkkuudeksi ”Residual offset error” 20 ppm alueesta.	Oletetaan, että mittauskortin vaikutus u_B mitattuun arvoon on suoraan näiden arvojen mukainen.

4.2 Suoritetut mittaukset ja laskenta

Puhaltimen tuoton selvittämiseksi mittaukset suoritettiin kahdenlaisilla eri mittaussarjoilla. Puhallinkäyriä varten suoritettiin mittaussarjat vakiokierrosnopeuksilla 700, 1000 ja 1300 rpm. Virtauksen kuristukseen käytetyn säätöpellin skaala jännitteenä oli 0 ... 10 V, jolloin 0 V:ssa pelti oli auki ja 10 V:ssa täysin kiinni. Virtauksen kuristaminen aloitettiin jännitteellä 5,0 V ja mittauspisteet luotiin kuristamalla virtausta puoli voltia kerrallaan yhdeksään volttiin asti.

Mittaussarjoja suoritettiin myös sekä maksimi- että nimellisvirtaamilla. Maksimivirtaaman saavuttamiseksi säätöpelti avattiin mittaussarjaa varten. Nimellisvirtaama saatiin aikaiseksi 6,5 V säätöjännitteellä. Molemmissa sarjoissa mittauspisteet muodostettiin ajamalla puhallinta 700 rpm:stä 1300 rpm:ään 100 rpm:n välein.

Jokaisen mittauspisteen ajallinen pituus oli viisi minuuttia. Näytteitä otettiin 50 sekuntia kohden, ja saaduista 15000 näytteestä otettiin keskiarvo laskentaa varten. Jokaisessa mittauspisteessä kirjattiin ylös vallitseva ilmanpaine ja lämpötila.

4.2.1 Tuottoarvojen laskenta

Tuottoarvojen laskennassa on käytetty mittauspisteiden näytteiden keskiarvoja viiden minuutin ajalta. Puhaltimen kokonaishyötysuhde laskettiin kaavalla

$$\eta = \frac{\Delta p_t q_v}{P} \quad (5)$$

Δp_t = kokonaispaineen muutos [Pa]

P = sähköteho [W]

Kokonaispaine laskettiin kaavalla

$$\Delta p_t = \Delta p_s + p_{dyn} \quad (6)$$

Δp_s = staattinen paine-ero [Pa]

p_{dyn} = dynaaminen paine [Pa]

Dynaaminen paine on tässä laskettu massavirtamittarin tilavuusvirrasta johdetun virtausnopeuden avulla:

$$p_{dyn} = \frac{1}{2} * \rho * v^2 = \frac{1}{2} * \rho * \left(\frac{Q_v}{A}\right)^2 \quad (7)$$

A = pinta-ala [m²] = 0,312 m²

v = nopeus [m/s]

ρ = tiheys [kg/m³] = 1,204 kg/m³

Mittaukset suoritettiin useiden viikkojen aikana, jolloin laboratorion ilmanpaine ja lämpötila vaihtelivat hieman eri mittaussarjojen välillä. Vaihtelujen merkitys otettiin huomioon kirjaimella ylös laboratoriossa vallitseva ilmanpaine ja lämpötila jokaisessa mittauspisteessä ja muuntamalla tulokset normaaliolosuhteisiin korjauskertoimella, joka lasketaan kaavalla

$$k = \frac{T_{amb}}{293} \frac{101300}{p_{atm}} \quad (8)$$

T_{amb} = lämpötila [K]

4.2.2 Epävarmuusanalyysi

Tämä osio on kokonaisuudessaan lainattu mittausraportista, jonka tein kesätöissä Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa yhteistyössä TkT Tero Ahosen kanssa.

Virherajojen määrittämistä varten mittaustuloksille määritettiin A- ja B-tyypin mittausepävarmuudet. Koska mittaustulokset esitetään keskiarvojen avulla, A-tyypin, eli mitattavan arvon vaihtelusta johtuvan mittausepävarmuuden mittana käytetään keskiarvon keskivirhettä:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

u_A = keskiarvon keskivirhe

s = otoskeskihajonta

n = näytteiden lukumäärä

B-tyypin mittausepävarmuuden määrittämiseksi tilavuusvirrälle, puhaltimen tuottamalle staattiselle paine-erolle sekä taajuusmuuttajan kuluttamalle sähköteholle määritettiin virherajat anturi- ja mittalaittevalmistajien antamien tietojen perusteella, (joista osa on listattu taulukossa 3). Laskujen yksinkertaistamiseksi puhaltimen tuottaman paine-eron B-tyypin mittausepävarmuuden oletetaan vastaavan staattisen paine-eroanturin mittausepävarmuutta.

Sähkötehonmittauksen osalta virherajan suuruus laskettiin valmistajan ilmoittamien yhtälöiden mukaisesti käyttäen ylöskirjattuja mittausrvoja jännitteelle, sähkövirralle, taajuudelle sekä tehokertoimelle. Oletettavasti yhtälöt tuottavat arvion tehonmittauksen maksimivirheestä, sillä ilmoitetuissa yhtälöissä tekijät on summattu sellaisenaan toisiinsa. Tästä on muodostettu arvio normaalijakauman mukaisesta B-tyyppin epävarmuudesta sähköteholle käyttäen oletusta suuruudeltaan 10 prosentin tasajakautuneesta virheestä. Käytännössä sähkötehon mittausepävarmuus oli noin 1 % lukemasta mitatun virran sekä tehokertoimen ollessa pienimmillään (esim. 1.2 A ja 0.66 ind.). Koska epävarmuus laski vain hieman suuremmalla kuormituksella, valittiin 1 % lukemasta tehonmittauksen virheeksi.

NI-9205 -jännitteenmittauskortin vaikutus mittaustuloksiin huomioitiin kortille ilmoitetuilla tarkkuuden arvoilla. Tässä kohdassa on tehty oletus, ettei jänniteviestin ja alkuperäisen mitatun arvon välisellä skaalauksella (esimerkiksi noin 750 staattisella paine-erolla) ole ollut vaikutusta B-tyyppin mittaasepävarmuuden suuruuteen.

Lopuksi yksittäiset A- ja B-tyyppin mittaasepävarmuuden komponentit on yhdistetty toisiinsa neliöllisen summaamisen avulla kaavalla

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + \sum u_B^2} \quad (10)$$

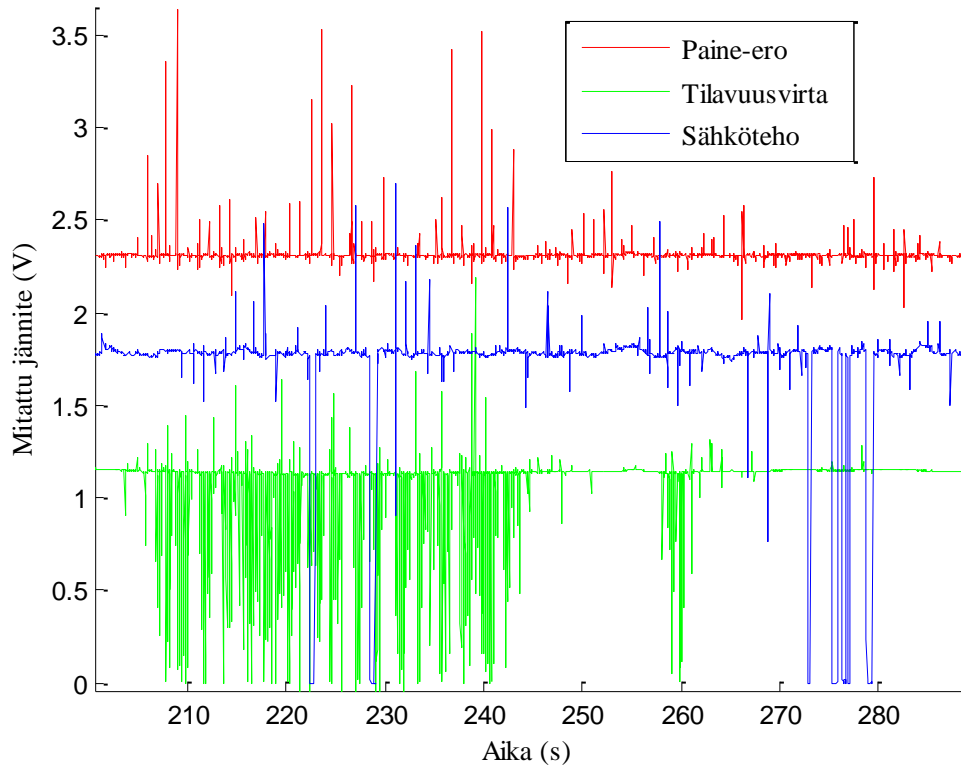
Tästä saadaan yhdistetyt epävarmuudet mitatulle paineelle, tilavuusvirralle ja sähköteholle.

Hyötysuhteen mittaasepävarmuus määritettiin hyödyntäen taulukon 3 arvoja sekä käyttäen suhteellisten yhdistettyjen epävarmuusarvojen yhdistämistä yhtälön 10 mukaisesti.

4.2.3 Antureiden häiriöiden suodattaminen

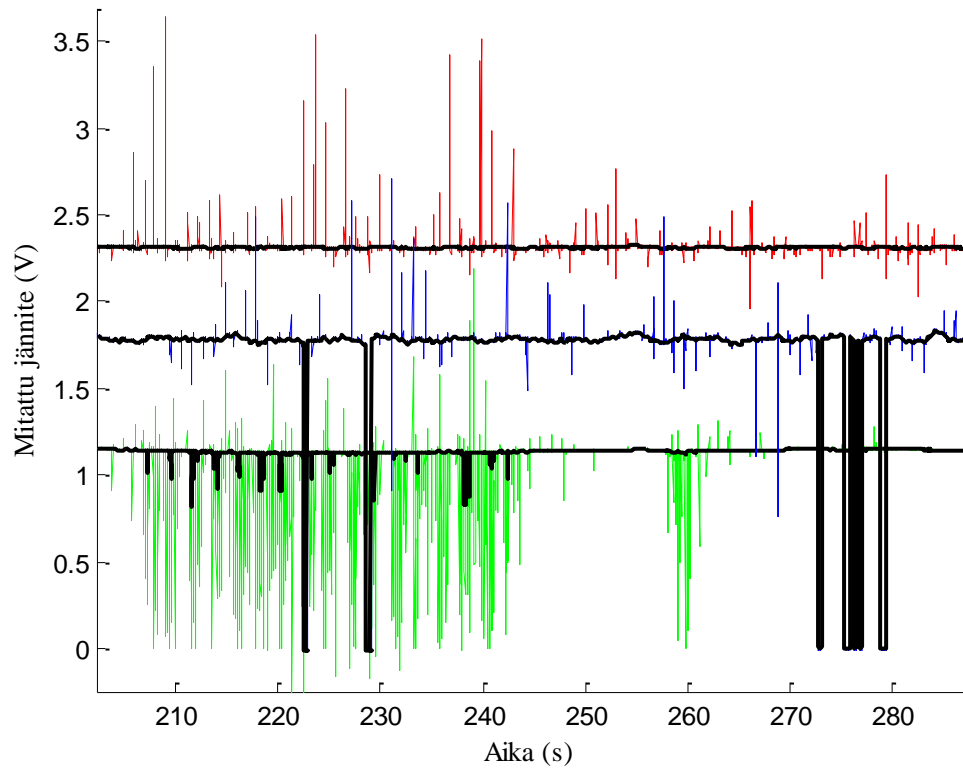
Anturien lukemissa esiintyi jonkin verran häiriöitä, jotka saivat osan näytteistä eroamaan keskiarvosta runsaasti. Nämä häiriöt pyrittiin suodattamaan pois Matlab-ohjelmiston medfilt1-funktiolla. Kuvassa 12 on esitetty jänniteviesti kuvullisen 1300 rpm:n mittaussarjan yhdeksänneistä mittauspisteestä. Tehoanalysointorilta tuleva sinisellä kuvattu signaali putoaa

ajoittain noltaan volttiin. Myös virtaaman vihreässä jännitesignaaliassa on nähtävissä häiriöitä, jotka on syytä saada suodatettua pois.



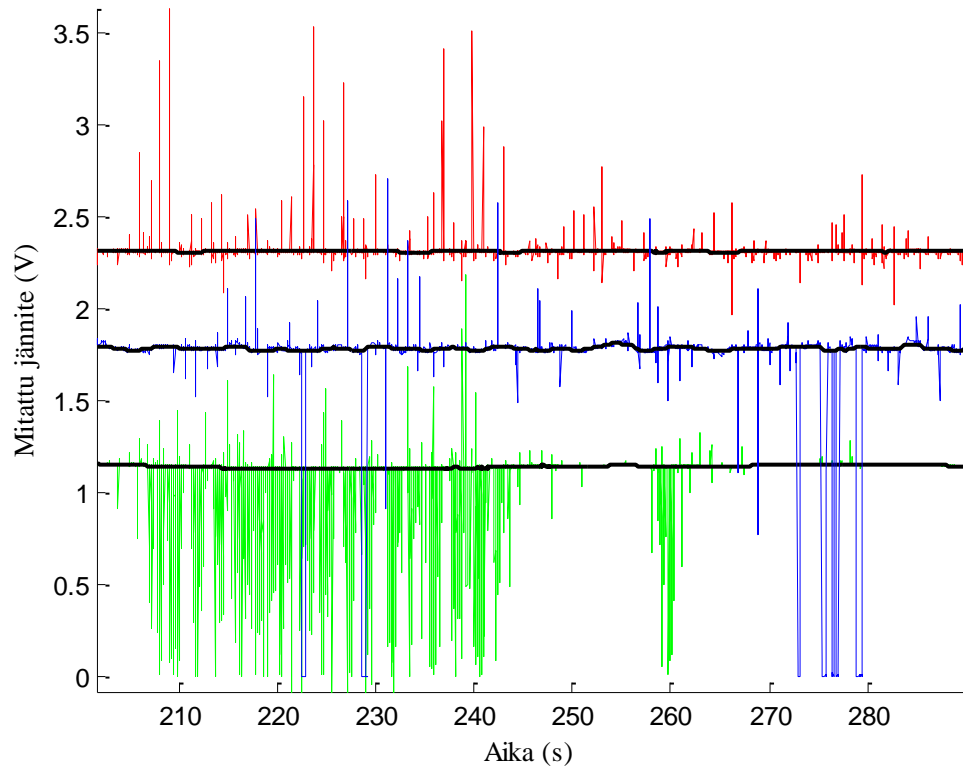
Kuva 12. Kuvullisen 1300 rpm:n mittaussarjan yhdeksännen mittauspisteen jännitesignaali.

Kuvassa 13 on esitetty kymmenen näytteen medilt1-funktiolla käsiteltyä jännitedataa samasta mittauspisteestä.



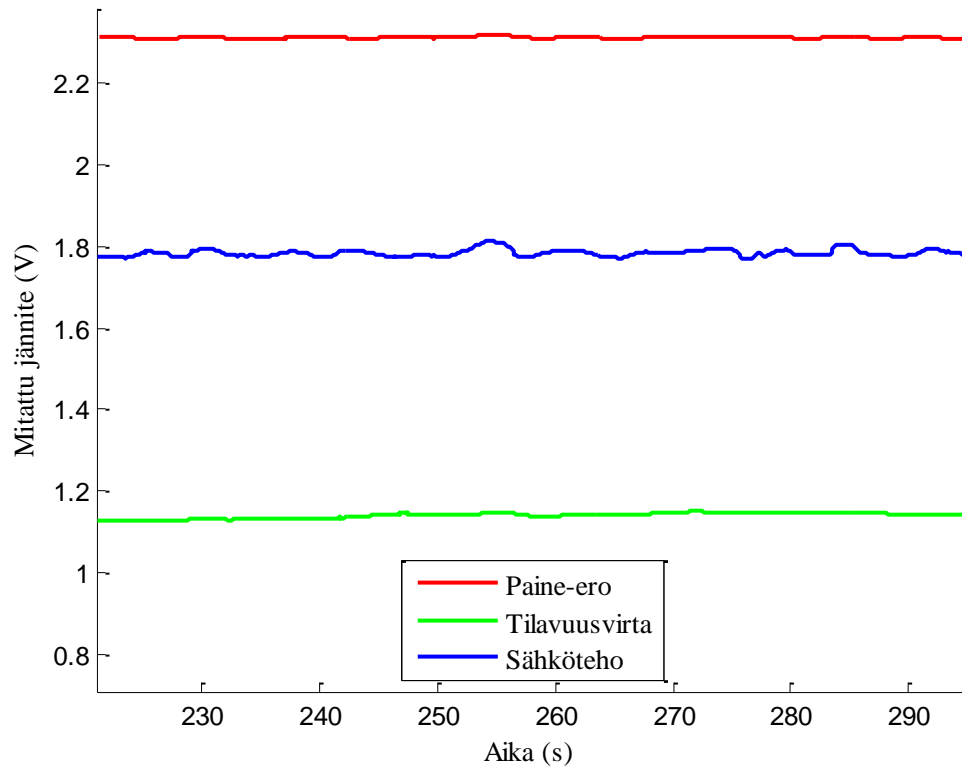
Kuva 13. Kymmenen näytteen medfilt1-funktiolla suodatettu jännitesignaali.

Kuvan mustat signaalit ovat vastaavien signaalien suodatettuja versioita. Vaikka kymmenen näytteen suodatus poistikin suurimman osan häiriöistä, jäljelle jäi vielä useita poikkeamia, jotka vaikuttavat otettavaan keskiarvoon ei-toivotulla tavalla. Siitä syystä suodatuksen näytteiden määräksi on tässä työssä valittu 150. Kuvassa 14 on esitetty 150 näytteen medfilt1-funktiolla suodatettua jännitedataa.



Kuva 14. 150 näytteen medfilt1-funktiolla suodatettu jännitesignaali.

Kuvassa 15 on esitetty lopullinen suodatettu jännitesignaali aiemmin mainitussa mittauspisteessä.



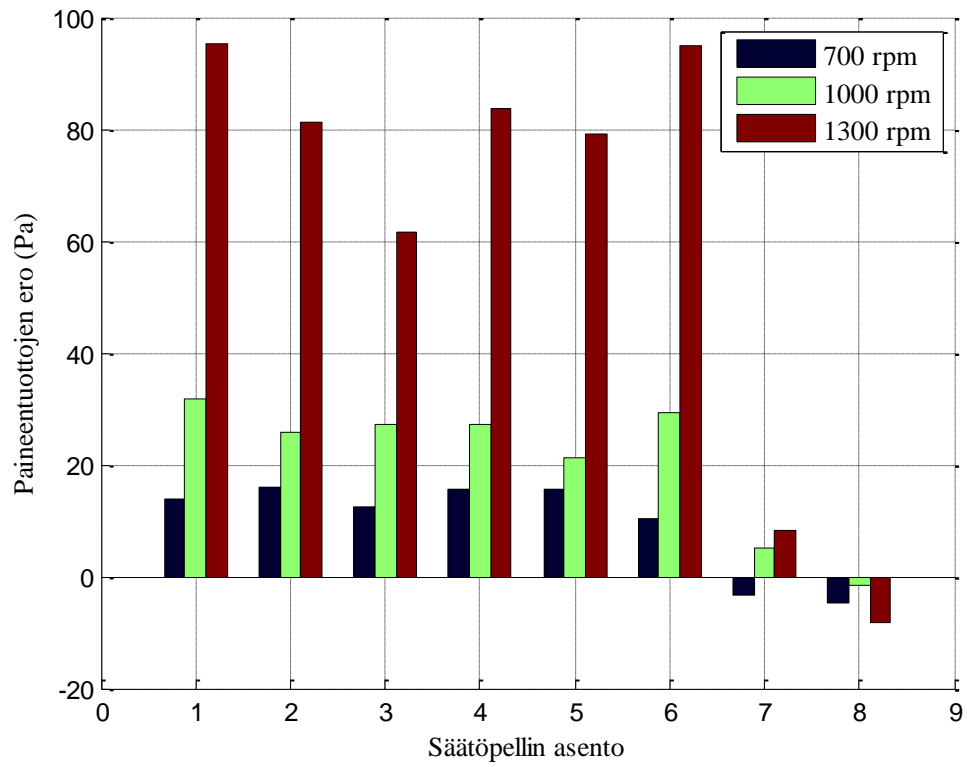
Kuva 15. Kuvullisen 1300 rpm:n mittaussarjan yhdeksännen mittauspisteen suodatettu jännitesignaali.

Kuten kuvasta 15 nähdään, valittu suodatus on riittävä poistamaan mittanäytteiden joukosta suurimmat anturien häiriöistä johtuvat poikkeamat. Toisaalta se ei myöskään ole suodatuksena liian raskas, sillä kuvaajista on vielä selvästi havaittavissa mitatuissa arvoissa ilmenevä anturista johtumaton puhaltimen toimintaan liittyvä vaihtelu.

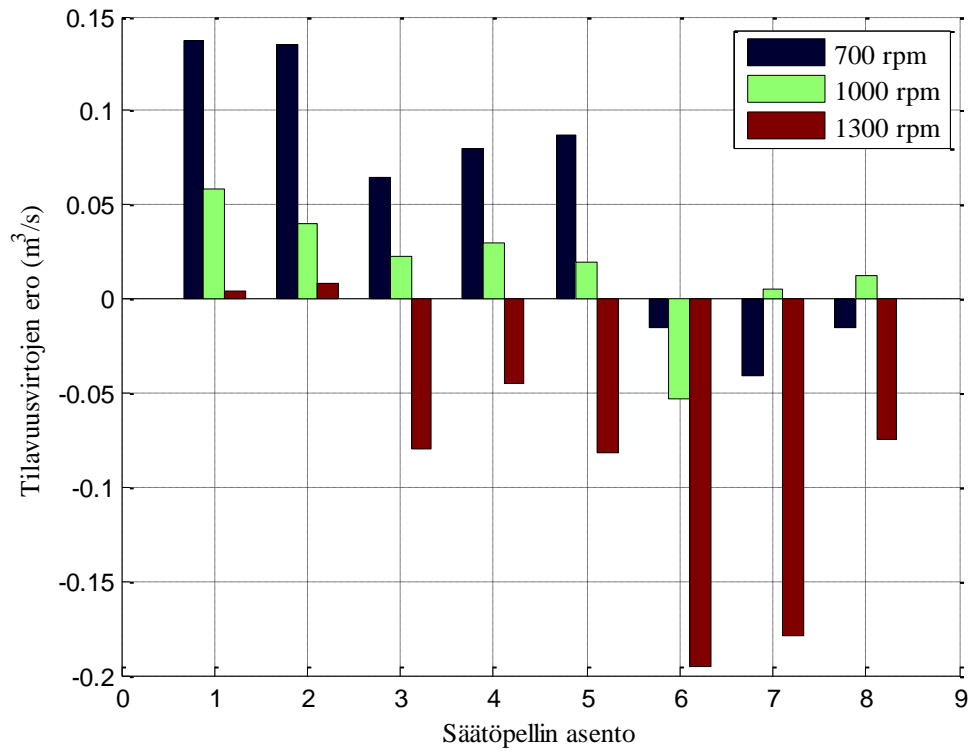
5 TULOKSET

Kuvissa 16-18 on esitetty moottorikuvun vaikutuksen suuruutta kuvaavia pylväsdiagrammeja. Diagrammit ilmaisevat kuvullisen ja kuvuttoman puhaltimen mittaustulosten erotuksen. Erotus on laskettu vähentämällä kuvullisen puhaltimen mitatut arvot kuvuttoman puhaltimen vastaavista arvoista. Toisin sanoen positiivinen erotus kuvaajassa osoittaa kuvun vaikuttaneen puhaltimen toimintaan heikentävästi. Seuraavien kuvien diagrammeissa säätöpellin asennolla 1 tarkoitetaan avointa asentoa. Asento 4 taas on lähimpänä puhaltimen nimellistoimintapistettä. Asennoissa 6-8 tuotettu virtaama lähestyy nollaa ja kokonaishyötysuhde

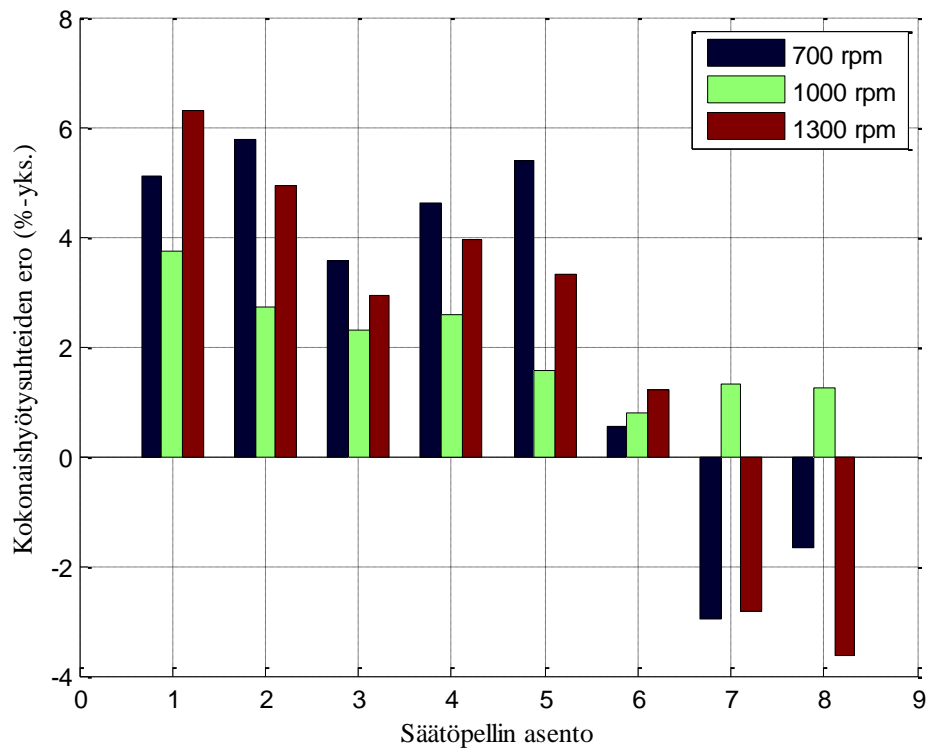
on alimmillaan. Kyseiset toimintapisteet eivät siten luotettavasti kuvaa moottorikuvun vaikutusta puhaltimen toimintaan.



Kuva 16. Kuvun vaikutus paineentuottoon vakiopyörimisnopeuksilla.



Kuva 17. Kuvun vaikutus tilavuusvirtaan vakiopyörimisnopeuksilla.

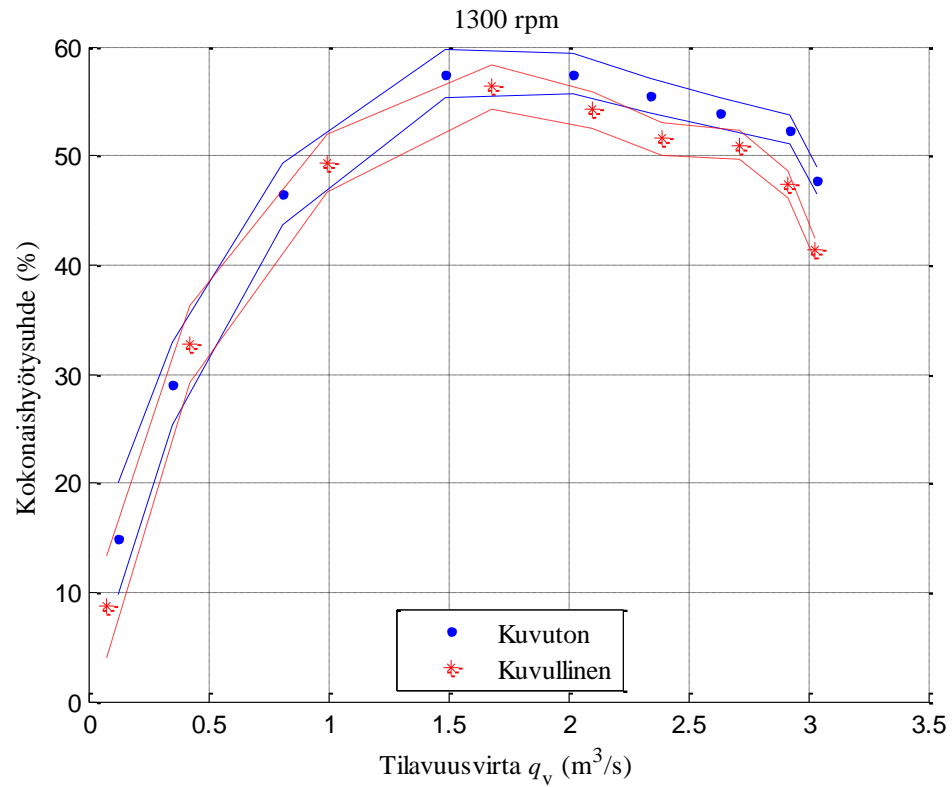


Kuva 18. Kuvun vaikutus kokonaishyötysuhteeseen vakiopyörimisnopeuksilla.

Kuten kuvasta 16 nähdään, moottorikuvun negatiivinen vaikutus puhaltimen paineentuotoon on suurimmillaan noin 100 Pa. Vaikutus on kaikissa mittauspisteissä huomattavasti suurempi kuin paineentuoton mittauksen virhe, jonka suuruusluokka on noin 1 Pa. Moottorikuvulla näyttäisi siis olevan selkeä alentava vaikutus puhaltimen paineentuottoon.

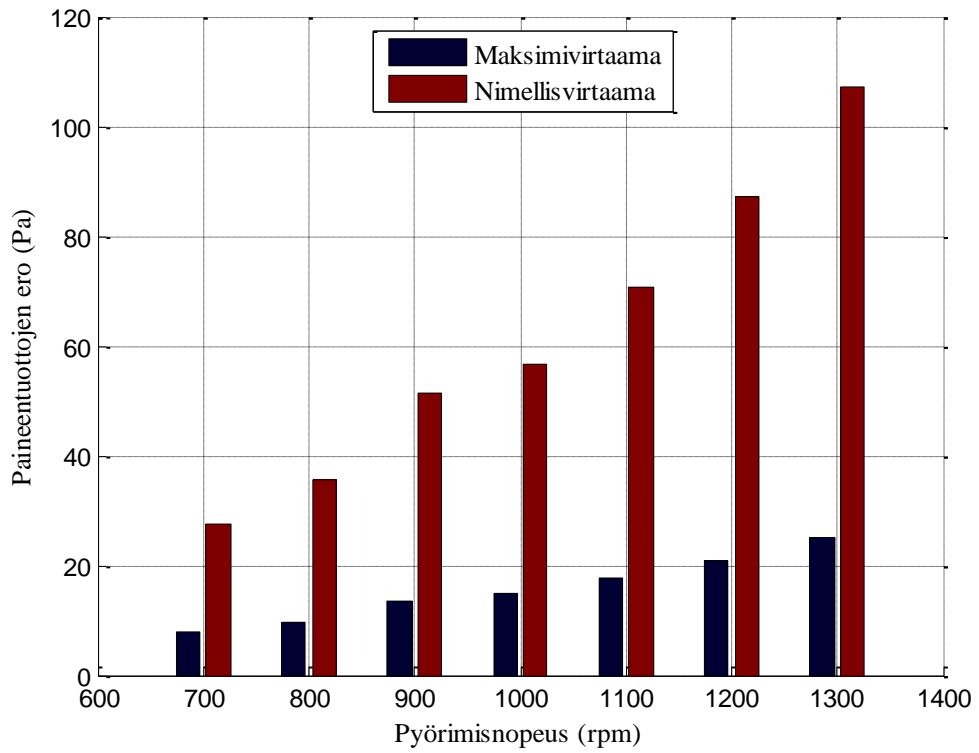
Pyörimisnopeudella 700 rpm kuvuttoman puhaltimen tilavuusvirta on enimmillään 0.14 m³/s suurempi kuin kuvullisen (kuva 17). Pyörimisnopeuden kasvaessa kuvun vaikutus muuttuu kuitenkin päinvastaiseksi. 1300 rpm:ssä kuvullisen puhaltimen tilavuusvirta on 0.075 m³/s kuvuttoman puhaltimen tilavuusvirtaa suurempi. Muutoksen suuruutta ja tilavuusvirran mittauksen tarkkuutta silmällä pitäen ei voida olla varmoja, että erotus on aiheutunut yksin kuvun vaikutuksesta. Anturien häiriötoiminnan lisäksi myös erot laboratorion olosuhteissa eri mittaussarjojen välillä ovat voineet vaikuttaa mitatun tilavuusvirran arvoon. Tästä syystä kuvun vaikutusta tilavuusvirtaan ei seuraavissa kohdissa enää tarkastella.

Moottorikuvun vaikutus puhaltimen kokonaishyötysuhteeseen on alentava (kuva 18). Se vaihteli kahden ja kuuden prosenttiyksikön välillä riippuen säätöpellin asennosta ja pyörimisnopeudesta. Esimerkiksi pyörimisnopeudella 1300 rpm säätöpellin nimellisasennolla hyötysuhteiden ero oli noin neljä prosenttiyksikköä. Kuvassa 19 on esitetty kierrosnopeudella 1300 rpm ajatun mittaussarjan tuloksia kokonaishyötysuhteelle. Kuvaajassa pisteet edustavat mittauspisteiden tuloksia ja niiden ympärillä kulkevat viivat tulosten virherajoja. Virtausta runsaasti kuristettaessa hyötysuhteissa ei ole mittaustarkkuuden puitteissa nähtävissä selkeää eroa. Toisaalta oikealta alkaen ensimmäisissä mittauspisteissä moottorikuvun vaikutus kokonaishyötysuhteeseen on selkeästi alentava. Ero pienenee seuraavien mittauspisteiden kohdalla, jolloin myös kuvullisen ja kuvuttoman puhaltimen mittausten virherajat kohtaavat ja asettuvat osin päällekkäin.

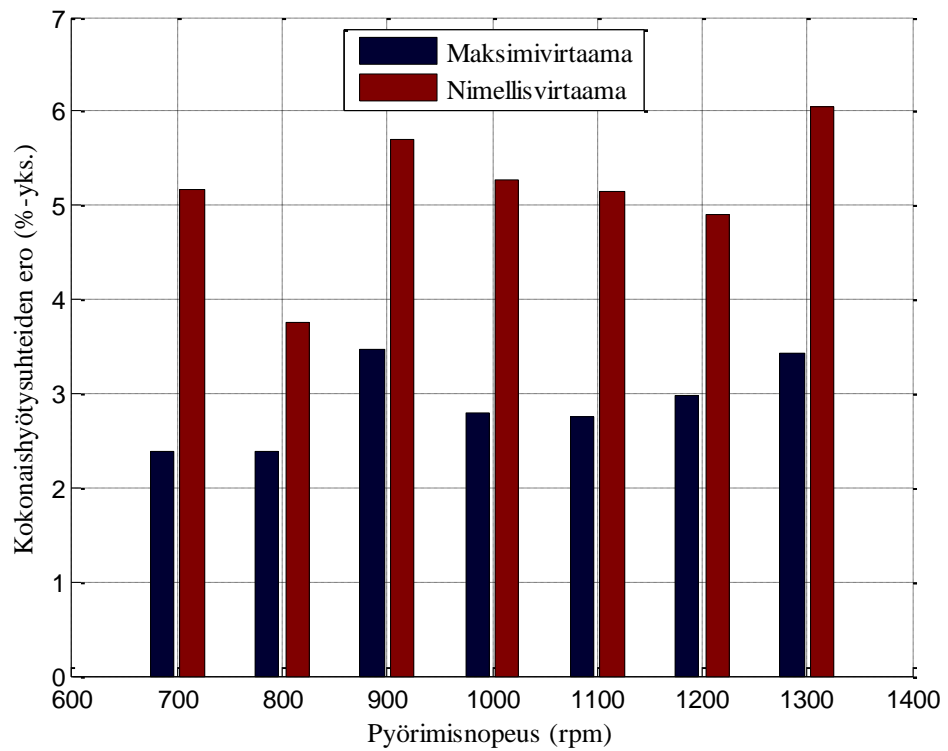


Kuva 19. Puhaltimen kokonaishyötysuhde tilavuusvirran funktiona ja virherajat.

Kuvissa 20 ja 21 on esitetty kuvullisen ja kuvuttoman puhaltimen paineentuoton ja kokonaishyötysuhteiden erotukset säätöpellin vakioasunnoilla.



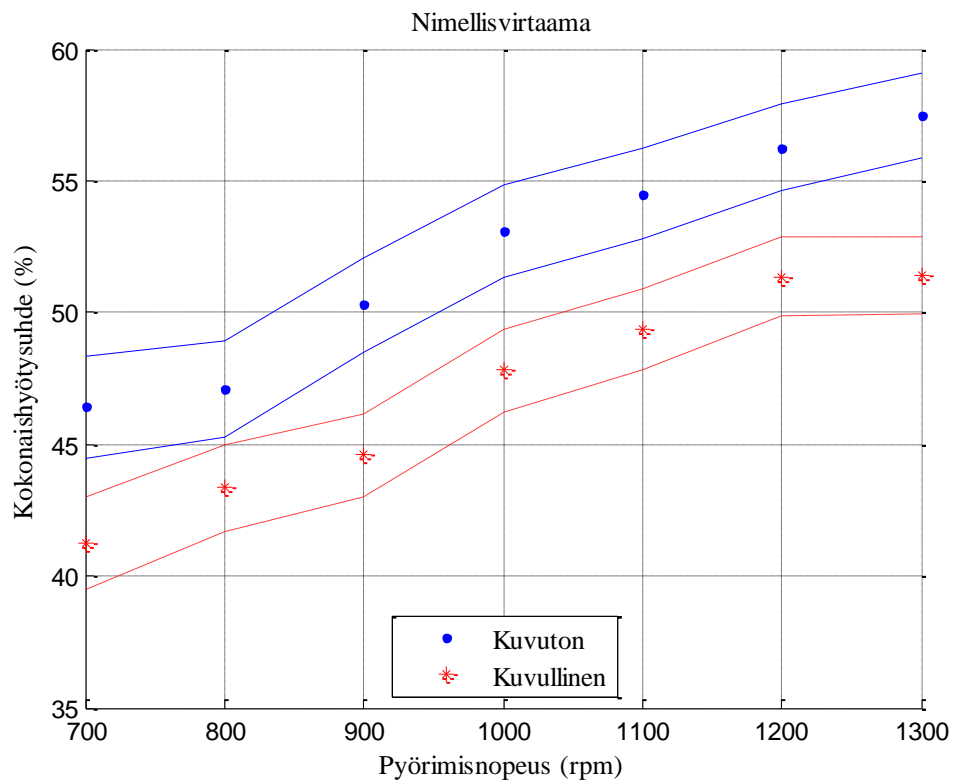
Kuva 20. Kuvun vaikutus paineentuuottoon säätöpellin vakioasenoilla.



Kuva 21. Kuvun vaikutus kokonaishyötysuhteeseen säätöpellin vakioasenoilla.

Myös näiden mittaussarjojen tuloksista ilmenee, että kuvullisen puhaltimen tuottama paine on pienempi kuin kuvuttoman (kuva 20). Maksimivirtaamalla häviö on suurimmillaan noin 25 Pa. Nimellisvirtaamalla, jonka toimintapiste myös kuvaa paremmin puhaltimen tyypillistä haluttua toimintaa, paineentuoton häviö oli enimmillään hieman yli 100 Pa.

Kuten aiempienkin mittaussarjojen tulokset osoittivat, kuvuttoman puhaltimen kokonaishyötysuhde on suurempi kuin kuvullisen (kuva 21). Hyötysuhteiden erotus on suurimmillaan noin 6 prosenttiyksikköä. Kuvassa 22 on esitetty nimellisvirtaamalla ajetun mittaussarjan tuloksia hyötysuhteelle. Kuten kuvaajasta nähdään, virherajat kuvullisen ja kuvuttoman puhaltimen mittauksille eivät tässä kohtaa asetu päällekkäin. Tällöin voidaan suurella varmuudella sanoa, että moottorikuvun vaikutus puhaltimen kokonaishyötysuhteeseen on alentava.



Kuva 22. Puhaltimen kokonaishyötysuhde pyörimisnopeuden funktiona ja virherajat.

6 YHTEENVETO

Taajuusmuuttajia valmistava Danfoss ja puhallinkokonaisuuksia valmistava Fläktwoods esittävät markkinointimateriaaleissaan, että EC-puhaltimen siipipyörän keskellä sijaitseva moottorikupu estää ilmavirtausta siten, että puhaltimen kokonaishyötysuhde laskee. Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää kirjallisuusselvityksen ja laboratoriomittausten avulla vaikuttaako siipipyörän keskellä sijaitseva moottorikupu EC-puhaltimen kokonaishyötysuhteeseen.

Kirjallisuusselvitys osoitti, että ei ole löydettävissä tutkimuksia tai muita riippumattomia julkaisuja, jotka käsitelisivät moottorikuvun vaikutusta puhaltimen aerodynamiikkaan. Toistaiseksi ainoat kysymykseen kantaa ottavat olemassa olevat julkaisut ovat markkinointiin tarkoitettuja esitteitä.

Mittaukset suoritettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston laboratoriossa. Moottorikuvun vaikutusta simuloitiin kappaleella, joka kiinnitettiin siipipyörän keskelle. Puhallinta ajettiin kappaleen kanssa ja ilman tulosten vertailemiseksi. Mittaustuloksista selvisi, että moottorikuvulla on selkeä alentava vaikutus puhaltimen tuottamaan paineeseen ja sitä kautta myös kokonaishyötysuhteeseen. Kuvuttoman puhaltimen kokonaishyötysuhde oli enimmillään 6 prosenttiyksikköä suurempi kuin kuvullisen puhaltimen.

Tässä tutkimuksessa on käytetty vain yhdenlaista kappaletta moottorikuvun vaikutuksen selvittämiseksi. Jatkotutkimuksilla on mahdollista selvittää, voidaanko erilaisella kuvun muotoilulla vähentää sen negatiivista vaikutusta puhaltimen sisääntuloaukon aerodynamiikkaan. Uusien mittausten lisäksi kuvun vaikutuksen suuruutta voitaisiin tutkia laskennallisesti virtausmallinnuksella.

LÄHTEET

Centriflow Plus PM. [www-tuotedokumentti]. Fläktwoods. [viitattu 2013]. Saatavissa:
<http://www.flaktwoods.fi/364a5d4e-e548-44fa-a720-728e14c0ec3e>

ECM Answers. [Wellingtonin www-sivuilla]. [viitattu 2013]. Saatavissa:
http://www.wdtl.com/ec_faq_answers.php#Whatareelectronically

ECplus Concept. [www-tuotedokumentti]. Danfoss. [viitattu 2013]. Saatavissa:
<http://www.danfoss.com/BusinessAreas/DrivesSolutions/ECplus-Concept/>

Energy efficiency in building services technology – Asynchronous, EC or PM motors?
[verkkoartikkeli Danfossin kotisivuilla]. Danfoss 2011. [viitattu 2013]. Saatavissa:
<http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/467D89CA-3BB5-4C34-B3EA-1F2A9957EA78/0/EnergyefficiencyinbuildingservicestechologyasynchronousE-CorPMmotorswpics2.pdf>

Euroopan komissio. 2011. Asetus 327/2011.

Petrov Ilya. 2011. Comparison of BLDC machine with Asynchronous motor in blower application. Lappeenranta: Degree Program in Electrical Engineering, Faculty of Technology, Lappeenranta University of Technology. Diplomityö. 84.

Pyrhönen Juha, Jokinen Tapani, Hrabovcová Valéria. 2008. Design of rotating electrical machines. John Wiley & Sons, Ltd. 512. ISBN 978-0-470-69516-6

R3G630AB0603. [www-tuotedokumentti]. ebm-papst. [viitattu 2013]. Saatavissa:
<http://www.ebmpapst.fi/fi/tuotteet/Keskipakopuhaltimet/Kaavuttomat-keskipakopuhaltimet/R3G630AB0603>

SFS-EN ISO 5801. 2009. Industrial fans. performance testing using standardized airways.

Suomen Standardoimisliitto SFS ry. 2013. SFS-käsikirja 1. Helsinki: SFS. 40 s. ISBN 978-952-242-166-1.

Venkov Aleksey. 2011. Design of electrically commutated motor and comparison of it with traditional induction motor for blower performance. Lappeenranta: Degree Program in Electrical Engineering, Faculty of Technology, Lappeenranta University of Technology. Diplomityö. 78.