

Ilmastointikoneen suorituskyvyn seuranta

Satu Kärki & Juhani Hyvärinen

VTT Rakennustekniikka



ISBN 951-38-5110-9 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5111-7 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1997

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka, talo- ja palotekniikka, Lämpömiehenkuja 3, PL 1804, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 455 2408

VTT Byggnadsteknik, Byggnadsfysik, hus- och brandteknik, Värmemansgränden 3, PB 1804, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 455 2408

VTT Building Technology, Building Physics, Building Services and Fire Technology, Lämpömiehenkuja 3,
P.O.Box 1804, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 455 2408

Tekninen toimitus Kerttu Tirronen

VTT OFFSETPAINO, ESPOO 1997

Kärki, Satu & Hyvärinen, Juhani. Ilmastointikoneen suorituskyvyn seuranta [Monitoring the performance of air-conditioning plants]. Espoo 1997, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1832. 44 s.

UDK 697.94

Avainsanat air conditioning equipment, monitoring, performance evaluation, requirements, indoor air, fault detection, temperature, humidity, air flow

TIIVISTELMÄ

Teknisellä suorituskyvyllä tarkoitetaan sitä, kuinka hyvin järjestelmä suoriutuu sille asetetuista teknisistä vaatimuksista eri käyttöolosuhteissa. Suorituskykytekijöiden seurannalla voidaan järjestelmän toimintaa parantaa koko sen elinkaaren aikana. Suorituskyvyn seurannassa voidaan käyttää apuna vikadiagnoosimenetelmiä, joiden avulla pyritään havaitsemaan ja paikallistamaan, mikä järjestelmä tai sen osa aiheuttaa muutoksen suorituskykytekijöissä.

Raportissa tarkastellaan ilmastointikoneen toiminnan suorituskykyvaatimuksia, joista keskeisimpiä ovat lämpötilan, ilmamäärän ja kosteuden säädön vaatimukset. Toisaalta ilmastointikoneen halutaan toimivan tiettyjä kuormitustekijöitä vastavalla lämmitys- tai jäähdytysteholla, kunhan ilmanvaihto samalla täyttää sisäilman puhtausvaatimukset.

Prosessiin liittyvä vikatietämys voidaan jäsentää vikapuun avulla. Sen käyttö on havainnollinen tapa päätellä, missä järjestelmän kohdassa toiminta poikkeaa normaalista tai on viallinen, ja mihin kaikkeen järjestelmässä tämä vaikuttaa. Vikapuun tulisi muodostaa käyttövarmuusanalyysin pohjalta, jolloin vikapuussa esiintyvät järjestelmän todennäköisimmät ja merkittävimmät viat. Suorituskykyvaatimukset ovat vikapuun syöttötietoja. Raportissa esitellään vikapuuta vikadiagnoosimenetelmänä sekä sen soveltamista ilmastointikoneeseen. Lisäksi annetaan esimerkkejä ilmastointikoneen mahdollisista vikapuista.

Vikapuun vikoihin liittyviä oireita havaitaan vian havaitsemismenetelmillä tai toteamalla oire tarkastamalla. Raportissa kuvataan kahdelle eri ilmastointikoneelle kehitetyt tehon seurantamenetelmät, joissa tarkastellaan ilmastointikoneesta haluttua, saatavaa ja maksimitehoa. Menetelmiä voidaan käyttää sekä ilmastointikoneen toiminnan seurantaan että vian havaitsemiseen. Ne ovat saatavissa myös tietokoneohjelmoina.

Raportissa esitetään yhteenvedonomaaisesti myös kansainvälisessä IEA (International Energy Agency) Annex 25 -projektissa kehitettyjä ilmastointikoneen vikadiagnoosimenetelmiä ja -sovelluksia, joita voidaan hyödyntää kehitettäessä kaupallisia sovelluksia ilmastointikoneen vikadiagnoosiin. On tärkeää huomata, että vikadiagnoosisovellukset ovat aina jossain määrin järjestelmäriippuvaisia. Toisin sanoen vikadiagnoosimenetelmät on erikseen sovitettava jokaiselle järjestelmäkokonaisuudelle.

Kärki, Satu & Hyvärinen, Juhani. Ilmastointikoneen suorituskyvyn seuranta [Monitoring the performance of air-conditioning plants]. Espoo 1997, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1832. 44 p.

UDC 697.94

Keywords air conditioning equipment, monitoring, performance evaluation, requirements, indoor air, fault detection, temperature, humidity, air flow

ABSTRACT

The technical performance means how well a system achieves the performance requirements appointed to it in different operational circumstances. The operation of the system can be improved during its whole life-cycle by monitoring the performance factors. Fault diagnosis methods can aid the monitoring of the performance. They aim to detect and locate the system or its component which changes performance factors.

In this report, the performance requirements of air-conditioning plants are considered. Control of temperature, air flow rate and humidity are the most essential requirements. On the other hand, the air-conditioning plant generates a heating or cooling power corresponding to certain building loads. With this power, the air change rate should meet the requirements determined by indoor air quality requirements.

The fault knowledge of a process can be specified with a fault tree. It can be used for inferring illustratively which part of the system operates abnormally or has a fault, and how this behaviour influences the whole system. The fault tree should be formed on the basis of a reliability analysis. Then the most probable and important faults would exist in the fault tree. The performance requirements are inputs to the fault tree. In this report, the fault tree as a fault diagnosis method and its application to air-conditioning plants are described. In addition, examples of possible fault trees of air-conditioning plants are shown.

The symptoms of the faults in the fault tree are detected with fault detection methods or by visual inspection. In the report, power monitoring methods developed for two different air-conditioning plants are described. The methods monitor the desired, obtained and maximum powers of the plant, and can be used both for operation monitoring and fault detection. Computer programs of the methods were also done.

In the report, a summary of the fault diagnosis methods of air-conditioning plants developed in the Annex 25 project of the International Energy Agency are presented. These methods can be utilized when developing commercial applications of fault diagnostics of air handling units. It is important to notice that the fault diagnosis applications always somewhat depend on the system structure. So, the fault diagnosis methods should be adapted separately for each system assembly.

ALKUSANAT

Rakennusten teknisten järjestelmien suorituskykyyn voidaan olennaisesti vaikuttaa toisaalta suunnitteluratkaisuilla, toisaalta oikealla käytöllä. Suunnitteluun on viime vuosina kiinnitetty paljon huomiota, ja järjestelmien toimintaa on esimerkiksi kehittyneiden suunnittelumenetelmien avulla voitu parantaa. Oikean käyttötavan vaikutusta ei ole tutkittu yhtä paljon, vaikka myös sen avulla suorituskykyä voitaisiin paljonkin parantaa. Suunnitteluratkaisujen vaikutus kohdistuu uusiin tai perusparrannettaviin rakennuksiin, kun taas oikean käyttötavan kautta parannuksia voidaan saavuttaa koko rakennuskannassa.

Suorituskyvyn seurannassa voidaan käyttää apuna vikadiagnoosimenetelmiä, joiden avulla paikallistetaan, missä osassa järjestelmää suorituskykytekijöitä muuttava vika tai toimintahäiriö sijaitsee. "Ilmastointikoneen suorituskyvyn seuranta" -projektin tavoitteena oli kehittää ilmastointikoneen teknisen suorituskyvyn seurantamenetelmiä. Projekti kuului Teknologian kehittämiskeskuksen (TEKES) RAKET-tutkimusohjelmaan.

Rakennusten vikadiagnoosia on viime vuosina tutkittu kansainvälisissä IEA (International Energy Agency) Annex 25 ja 34 -projekteissa sekä kotimaisissa LVIS-2000 - ja Raket-tutkimusohjelmiin kuuluneissa projekteissa sekä TEKES:n soveltavan tutkimuksen hankkeissa. Näiden projektien tulokset olivat lähtökohtina tässä hankkeessa.

Tutkimuksen toteuttivat diplomi-insinöörit Satu Kärki ja Juhani Hyvärinen (vuoden 1996 ajan) VTT Rakennustekniikasta.

Espoossa 1997

Tekijät

SISÄLLYSLUETTELO

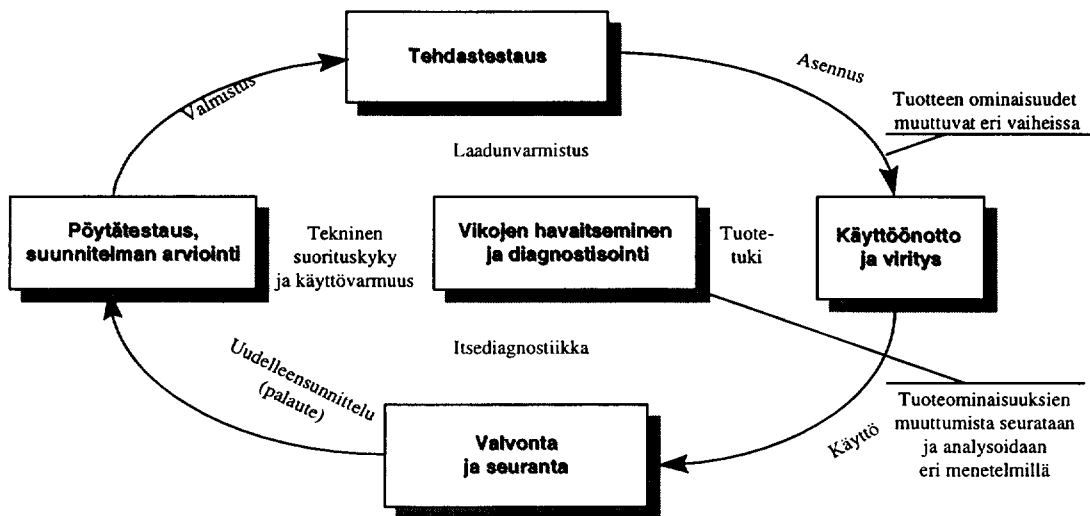
TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT.....	4
ALKUSANAT.....	5
1. JOHDANTO	7
2. ILMASTOINTIKONEEN SUORITUSKYKYVAATIMUKSET	8
2.1 LÄMPÖTEHOON LIITTYVÄT VAATIMUKSET	8
2.1.1 Lämpötiloihin liittyvät vaatimukset	9
2.1.2 Ilmamäärään liittyvät vaatimukset	10
2.2 KONEEN TIIVYDEN VAATIMUKSET.....	11
2.3 ILMAN PUHTAUDEN VAATIMUKSET	11
2.4 ÄÄNITASON VAATIMUKSET	12
2.5 ILMAN KOSTEUDEN VAATIMUKSET.....	13
2.6 HYÖTYSUHTEET	13
3. VIKAPUU VIKADIAGNOOSIMENETELMÄNÄ.....	16
3.1 ONGELMIEN LÄHESTYMISTAVAT.....	16
3.2 VIKAPUUN KUVAAMA TIETO	16
3.3 VIKAPUUANALYYSI IEC 1025 -STANDARDIN MUKAAN	17
3.3.1 Vikapuun muodostamisperiaatteet	17
3.3.2 Analyysin vaiheet.....	18
4. VIKAPUUANALYYSIN SOVELTAMINEN ILMASTOINTIKONEESEEN	19
4.1 MAHDOLLISIA HUIPPUVIKOJA.....	19
4.2 TYYPILLISIÄ ILMASTOINTIKONEEN VIKOJA.....	19
4.3 ESIMERKKEJÄ ILMASTOINTIKONEEN VIKAPUISTA	21
4.3.1 Vikapuuanalyysiin sovellettava ilmastointikone	21
4.3.2 Ilmastointikoneen vikapuita.....	23
5. ILMASTOINTIKONEEN TEHON SEURANTA	28
5.1 TARKASTELTAVAT TEHOT	28
5.2 TEHON SEURANTAOHJELMAT.....	31
5.2.1 IK-TEHO- ja TEHOsim-ohjelmat.....	31
5.2.2 TEHOdat-ohjelma.....	32
6. IEA ANNEX 25:SSÄ KEHITETYT VIKADIAGNOOSIMENETELMÄT	35
7. JOHTOPÄÄTÖKSET	42
LÄHTEET.....	43

1. JOHDANTO

Suorituskyky voidaan määritellä tavaksi, miten joku reagoi, tai tehokkuudeksi, jolla joku täyttää sille tarkoitetun tehtävän. Teknisessä mielessä suorituskykyarvot ovat mitattavissa olevia asioita. Toisin sanoen suorituskyvyllä tarkoitetaan sitä, kuinka hyvin järjestelmä suoriutuu sille asetetuista teknisistä suorituskykyvaatimuksista eri käyttöolosuhteissa.

Taloteknisten järjestelmien suorituskykyyn vaikuttavat suunnittelun- ja käytönaikeiset ratkaisut, joissa tapahtuneet virheet ja väärinarvioinnit voivat vaikuttaa merkittävästi rakennuksen energiankulutukseen. Siksi on tärkeää seurata, kuinka määritellyt suorituskykyvaatimukset toteutuvat, ja puuttua mahdollisesti havaittuihin epäkohtiin ajoissa.

Suorituskyvyn seurannassa voidaan käyttää apuna vikadiagnoosimenetelmiä, joiden avulla paikallistetaan, missä järjestelmässä ja sen osassa tai komponentissa vika sijaitsee. Vikadiagnoosin avulla pyritään siis vaikuttamaan järjestelmän tekniseen suorituskykyyn. Vikadiagnoosimenetelmiä voidaan hyödyntää järjestelmän tai tuotteen elinkaaren useassa eri vaiheessa (kuva 1).



Kuva 1. Vikadiagnoosimenetelmien hyödyntäminen järjestelmän suorituskyvyn seurannassa.

2. ILMASTOINTIKONEEN SUORITUSKYKYVAATIMUKSET

Ilmastointikone on talotekninen keskuslaitteisto, josta halutaan saada tietty määrä tietyssä lämpötilassa ja kosteudessa olevaa sekä tietyt puhtausominaisuudet täyttävää ilmaa. Ilmastointikoneesta halutaan siis saada irti tietty teho, joka voi olla lämmitys- tai jäähdytysteho, sekä tietty määrä poisto- ja tuloilmaa.

Jos vaadittua suorituskykyarvoa ei saavuteta, kyseessä on joko suunnittelu- tai mitoitusvirhe tai käytönaikainen vika eli mikä tahansa poikkeama kohteen vaadituista ominaisuuksista (SFS 3750). Tällaisia ovat esimerkiksi pellin tai venttiilin jumittuminen, tukkeuma esimerkiksi suodattimessa, tulo- tai poistoilmasäleikössä tai patterissa, väärä säätöalgoritmi tai -viesti, anturivika, nestepuolen tilanteeseen nähden väärä lämpötila tai vuoto nestepuolella. Jotta voidaan todeta, mikä aiheuttaa suorituskyvyn häiriön, ilmastointikone on pilkottava osiin. Osia tarkastellaan sekä itsenäisinä kokonaisuuksina että niiden aiheuttamina vaikutuksina koko ilmastointikoneeseen.

2.1 LÄMPÖTEHOON LIITTYVÄT VAATIMUKSET

Ilmastointikoneesta saatava teho on (Huom! Eri asia kuin ilmastointikoneeseen syötetty teho varsinkin silloin, kun käynnissä on ristikkäisiä tai toistensa kumoavia prosesseja):

$$\phi_{ik} = q_{v,i} \rho_i c_{p,i} (t_{ik} - t_u) \quad (1)$$

jossa

$q_{v,i}$	ilman tilavuusvirta (m^3/s)
ρ_i	ilman tiheys (kg/m^3)
$c_{p,i}$	ilman ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK)
t_{ik}	ilmastointikoneelta lähtevän ilman lämpötila ($^{\circ}\text{C}$)
t_u	ulkoilman lämpötila ($^{\circ}\text{C}$).

Kaavassa 1 ei ole otettu huomioon mahdollista ilman absoluuttisen kosteuden muutosta ilmastointikoneessa. Mutta suorituskykyvaatimuksia ajatellen riittänee, että teho määritellään viitteellisesti. Koska ilmastointikoneen lämpötehoa ei voida suoraan mitata, on se laskettava erillisten lämpötila- ja virtausmittausten perusteella. Kaavassa 1 ei myöskään oteta huomioon ilmastointikoneessa tapahtuvaa ilmavirtauksen vuotoa.

Ilmastointikoneen keskeisimpänä suorituskykyvaatimuksena onkin saada IV-koneesta kullakin hetkellä irti haluttu lämpöteho. Vakioilmavirtaisessa järjestelmässä on tällöin kyseessä vain lämpötilan säätö, ts. tuleeko koneesta halutun lämpöistä ilmaa. Muuttuvilmavirtaisessa järjestelmässä saatavaa tehoa säädetään myös ilmavirran avulla. Lämpöteho tuotetaan yhdessä tai useammassa prosessissa. Jos te-

hon tuoton kustannuksia ei tarkastella, lopputulokselle on samantekevää, mitä prosessit todellisuudessa ovat.

2.1.1 Lämpötiloihin liittyvät vaatimukset

Standardissa SFS 5768 on esitetty vaatimuksia keskusilmastointikoneen jälkeisen ilman lämpötilan säädölle. Nämä vaatimukset on esitetty taulukossa 1. Standardissa SFS 5768 esitetään myös vaatimuksia esilämmityspatterin paluuveden lämpötilalle, jotka on esitetty taulukossa 2. Edellytykset taulukoiden 1 ja 2 mukaisille säädön toiminnan tarkastamiselle ovat

- keskusilmastointikoneeseen tulevan, lämmitykseen tai jäähdytykseen käytettävän, nesteen lämpötilan jatkuvaa värähtelyä ei saa esiintyä
- keskusilmastointikoneeseen tulevan ilman lämpötilan jatkuvaa värähtelyä tai äkillisiä muutoksia ei saa tapahtua
- mahdollinen ilman kanavan staattisen paineen säätö toimii sille asetettujen vaatimusten mukaisesti.

Taulukko 1. Standardin SFS 5768 mukaiset vaatimukset keskusilmastointikoneen jälkeisen ilman lämpötilan säädölle.

Tilanne	Vaatus
Käynnistys	<ul style="list-style-type: none"> • asettumisaika $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$:n tarkkuudella lopullisesta arvosta enintään 15 min
Käyntiaika	<ul style="list-style-type: none"> • lämpötilan keskiarvon suurin sallittu poikkeama asetusarvosta $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ • symmetrisesti keskiarvon molemmin puolin sijaitsevat rajat, joiden sisällä lämpötilan tulee olla vähintään 90 % ajasta $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ • jatkuvaa värähtelyä ei saa esiintyä
Asetusarvon muutos	<ul style="list-style-type: none"> • asettumisaika $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$:n tarkkuudella lopullisesta arvosta enintään 10 min • lämpötilan asettumisajan jälkeisen keskiarvon suurin sallittu poikkeama uudesta asetusarvosta $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ • symmetrisesti asettumisajan jälkeisen keskiarvon molemmin puolin sijaitsevat rajat, joiden sisällä lämpötilan tulee olla vähintään 90 % ajasta $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$

Taulukko 2. Standardin SFS 5768 mukaiset vaatimukset esilämmityspatterin paluuveden lämpötilalle.

Tilanne	Vaatus
Seisonta-aika	Paluuveden lämpötila 15...25 $^\circ\text{C}$
Käynnistys	Paluuveden alin lämpötila 10 $^\circ\text{C}$

2.1.2 Ilmamäärään liittyvät vaatimukset

Ilmastointikoneen tavoitteena on tuottaa ilmastoitavalle vyöhykkeelle haluttu ilmamäärä, joka riippuu ilmanvaihdon tarpeesta. Jos ilmanvaihtoa käytetään myös tilojen lämmitykseen tai jäähdytykseen, määräytyy tarvittava enimmäisilmavirta tilan lämmitys- tai jäähdytystarpeesta ja vähimmäisilmavirta raitisilmatarpeen tai tilan kuivaustarpeen mukaan.

Jotta ilma siirtyisi koneen läpi, ilmastointikoneessa pitää olla tulo- ja poistopuhaltimet. Puhaltimien voidaan ajatella tuottavan tietyn määrän ilmaa tietyllä sähkötehoilla. Sähköteho muuttuu pääosin lämmöksi, joka siirtyy puhaltimen läpi virtaavaan ilmaan. Puhallinteho voidaan määrittää joko puhaltimen ominaiskäyrien perusteella määritetyn ilmavirran funktion polynomisovitteella, laskemalla ilmavirran, paine-eron ja hyötysuhteen perusteella tai mittaamalla suoraan puhaltimen sähköteho.

Tulo- ja poistoilmakoneen puhaltimien tuottama ilmamäärä (energiatehokkuus) ilmaistaan tunnuslukuna seuraavasti:

$$\frac{P_{tulo} + P_{poisto}}{q_{v,max}} \quad (2)$$

jossa

P_{tulo} tuloilmapuhaltimen sähköteho (kW)

P_{poisto} poistoilmapuhaltimen sähköteho (kW)

$q_{v,max}$ suurempi ilman tilavuusvirta (m^3/s).

Taulukossa 3 (Shemeikka et al. 1996) on esitetty puhaltimien energiatehokkuusluokittelu tulo-poistojärjestelmällä. Luokittelu koskee koko IV-järjestelmää, jossa tulo- ja poistopuhaltimien tehot on jaettu rakennuksen nimellisilmavirralla. Pelkälle poistoilmalaitokselle voidaan käyttää arvoja, jotka ovat 45 % tulo-poistolaitoksen arvoista. Aakkosten alkupäässä olevat luokat ovat vähän kuluttavia. Normaalille toimistokäyttöajalle (n. 2.500 h/a) tulisi käyttää vähintään luokan D järjestelmää. Luokan A saavuttaminen ei luultavasti ole taloudellisesti kannattavaa nykyisillä sähköenergianhinnoilla.

Taulukko 3. Tulo-poistojärjestelmän puhaltimien energiatehokkuusluokittelu.

Luokka	Tehontarve kW/(m^3/s)
A	< 1,0
B	1,0 - 1,5
C	1,5 - 2,0
D	2,0 - 2,5
E	2,5 - 3,0
F	3,0 - 4,0
G	> 4,0

2.2 KONEEN TIIVIYDEN VAATIMUKSET

Rakennusmääräyskokoelman osan D2 mukaan "Ilmanvaihtolaitoksen osien tulee olla riittävän tiiviit". Vuotoilmavirta ei saa käyttötilanteessa ylittää 6 %:a kokonaisilmavirrasta. Ilmastointikoneissa ovat useimmiten sekä tulo- että poistokone pääosiltaan alipaineisia, jolloin vuoto kasvattaa suunniteltuja ilmavirtoja. Suurimmat vuodot esiintyvät putkien, sähköjohtojen ja ilmastointikanavien läpivientikohdissa (Leskinen et al. 1989), ilmakehän ja koneen välisessä liitoksessa, salpojen läpiviennissä sekä paneelien nurkissa. Vuotoilma tulee siis pääasiassa rakennuksen sisältä (tai menee rakennukseen, kun ilmastointikone on ylipaineinen).

Ilmastointikoneen vuodot lisäävät suoraan puhaltimien energiankulutusta ja rakennusvuotojen kautta myös lämpöenergiankulutusta (Leskinen et al. 1989). Tulopuolella vuotoilmavirta on osa tuloilmavirtaa. Jotta vaadittu ulkoilmavirta toteutuisi, on puhaltimen kokonaisilmavirtaa suurennettava vuotoilmavirran verran. Poistopuolella vuotoilmavirta pienentää ilmastoitavien tilojen poistoilmavirtaa. Jotta ilmastoitavien tilojen ilmanvaihto olisi haluttu tai painesuhteet säilyisivät oikeina, on myös poistopuhaltimen ilmavirtaa kasvatettava.

Ilmastointikoneiden vuotojen vaikutus keskittyy yleensä rajattuun osaan rakennusta, toisin kuin kanavavuotojen. Näin ollen D2-määräysten rajoissakin pysyvä vuoto muuttaa helposti suunnitellut painesuhteet paikallisesti kokonaan (Leskinen et al. 1989). Tehokkain tapa vähentää vuotojen vaikutusta on määritellä ilmastointikoneelle määräyksien vähimmäisvaatimuksia tiukempi tiiviysluokka. Painesuhteiden hallinnan lisäksi tällöin yleensä sekä lämpö- että sähköenergian käyttö pieneenee, suodattimien erotuskyky paranee ja äänitaso alenee.

2.3 ILMAN PUHTAUDEN VAATIMUKSET

Rakennuksen sisäilman laatuun vaikuttavat epäpuhtaudet voivat olla peräisin ulkoa, sisältä, rakennusmateriaaleista tai LVI-järjestelmästä (Batterman 1996). Ulkoilman epäpuhtauslähteitä ovat ajoneuvot, voimalaitokset, jätteenpolttolaitokset, jäteveden käsittelylaitokset, kulkeutuva pöly, maaperän bakteerit ja siitepöly. Rakennuksen sisällä tapahtuvaan toimintaan liittyviä epäpuhtauslähteitä ovat rakennuksen käyttäjät ja heidän toimintonsa (esim. tupakointi) sekä toimistolaitteet ja -materiaalit (esim. tulostimet). Ilmastointikoneen tärkeimpiä epäpuhtauslähteitä ovat huono suodatin ja huonosti hoidettu kostutin.

Tuloilman puhtaudelle asetetaan Rakennusmääräyskokoelman osassa D2 vaatimuksia siten, että "Sisäilmassa ei saa esiintyä haitallisessa määrin kaasumaisia tai hiukkasmuodossa olevia epäpuhtauksia eikä mikro-organismeja" ja "Oleskelutiloihin on johdettava tyydyttävän sisäilman puhtauden takaava määrä ulkoilmaa". Ensimmäinen vaatimus täytetään suodattamalla ilmaa riittävästi ja toinen mitoittamalla tiloihin riittävä raitisilmamäärä.

Ilmastointikoneen suodattimilla pienennetään ulkoilman haitallisten ilmansaasteiden, esimerkiksi partikkeleiden, määrää sekä hengitysilman laadun parantamiseksi että ilmastointilaitoksen ja ilmastoitavien tilojen likaantumisen estämiseksi. Suodattimen erotuskykyä huonontavat vuodot suodatinkehyyksen ja sen kiinnityskorokkeen välistä eli vuodot suodattimen ohi sekä suodattimen jälkeisten ilmastointikoneen osien vaipan vuodot (Leskinen et al. 1989). Vuotojen suuruus riippuu koneen tiiviysluokan lisäksi koneen sisällä vallitsevasta alipaineesta ympäristöön nähden. Koska puhallinosan vuotoilmavirta on yleensä lähes 2/3 koko koneen vaipan vuotoilmavirrasta, ei riitä, että pelkästään koneen suodatinosa on tiivis.

Taulukko 4. Maksimisuodatinluokat.

Ilmanvaihtolaitoksen tiiviysluokka	Alipaine	Ylipaine
K	EU5	EU9
A	EU6	EU9
B	EU7	EU9
C	EU8	EU9

Suodattimien ominaisuuksiin vaikuttavat alipainepuolella suodatinkehys ja alipainainen vaippa sekä vastaavasti ylipainepuolella ainoastaan suodatinkehys ja pääty. Tämän takia on määritelty käytännössä suurimmat suodatinluokat, kun kehyksen vuoto on alle 0,5 % taulukon 4 mukaisesti. Ylipaineelliset suodattimet määritellään ainoastaan suodatinkehyyksen vuotojen mukaan. Alipaineiset osat on arvioitu "keskimääräisen suuruiseksi", mutta jos koneen pinta-ala on poikkeuksellisen suuri, suodatusluokkaa voidaan joutua alentamaan.

Monikerroksisessa rakennuksessa, jossa putket ja johdot kulkevat useimmiten erillisessä roilossa kerrosten läpi, roiloon rajoittuvasta tilasta vuotoilman mukana leviävät hajut, haitalliset epäpuhtaudet, bakteerit jne. voivat pilata koko ilmastointijärjestelmän toiminnan. Siis vaikka ilmaa suodatettaisiin ilmastointikoneella riittävästi, saattaa sisäilman laatu olla silti epätydyttävä.

2.4 ÄÄNITASON VAATIMUKSET

Rakennusmääräyskokoelman osan D2 mukaan "Ilmanvaihtolaitos ei saa aiheuttaa tai välittää oleskelutilaan ääntä, joka tilan kokonaisäänitason huomioon ottaen on häiritsevä". Ilmastointikoneen äänen tehotasolle ei ole asetettu omia vaatimuksia. Ilmastointikoneen aiheuttamia ääniä vaimennetaan kanavistoon asennettavilla äänenvaimentimilla, jottei huonetiloihin välity häiritseviä ääniä. Ilmastointikoneen pattereiden otsapintanopeus valitaan yleensä väliltä 2 - 5 m/s, jotta ääni ei olisi haitallinen ja jotta pattereiden otsapinta-alat olisivat lämmönsiirrolle ihanteelliset. Ilmastointikoneen tiiviysluokkaa kiristämällä alenee vuotoilman aiheuttama ääni.

2.5 ILMAN KOSTEUDEN VAATIMUKSET

Jos säädetään myös kosteutta, yhtenä suorituskäytännön vaatimuksena on koneesta lähtevän ilman kosteus. Laskennallisissa tarkasteluissa käytetään yleensä ilman absoluuttista kosteutta, mutta mitattava suure on suhteellinen kosteus. Lisäksi esimerkiksi sisäilman kosteusvaatimukset annetaan suhteellisina kosteuksina. Mollier-diagrammin avulla tai sen perusteella tehdyillä tietokonesovelluksilla suhteelliset kosteudet voidaan muuttaa kutakin lämpötilaa vastaaviksi absoluuttisiksi kosteuksiksi.

Taulukko 5. Standardin SFS 5768 asettamat vaatimukset keskusilmastointikoneen jälkeisen ilman suhteelliselle kosteudelle.

Tilanne	Vaatimus
Käynnistys	asettumisaika ± 10 % RH tarkkuuteen lopullisesta arvosta enintään 15 min
Käyntiaika	jatkuvaa värähtelyä ei saa esiintyä
Asetusarvon muutos	kosteuden muutoksen tulee tapahtua asetusarvon muutosta vastaavaan suuntaan

Standardissa SFS 5768 on asetettu vaatimuksia keskusilmastointikoneen jälkeisen ilman suhteelliselle kosteudelle, kun säädettävänä suurena on huoneilman tai poistoilman suhteellinen kosteus (taulukko 5). Edellytykset taulukon 5 mukaisten säädön toiminnan vaatimusten tarkastamiselle:

- Keskusilmastointikoneelle tulevan, lämmitykseen tai jäähdytykseen käytettävän nesteen lämpötilan jatkuvaa värähtelyä ei saa esiintyä.
- Keskusilmastointikoneelle tulevan ilman lämpötilan tai kosteuden jatkuvaa värähtelyä tai äkillisiä muutoksia ei saa esiintyä.
- Säädettävälle suurelle esitettyjen vaatimusten saavuttamista todettaessa ilmastointikoneen kosteussäädön tulee olla toiminta-alueellaan.
- Mahdollisen ilmakehän staattisen paineen säädön on toimittava sille asetettujen vaatimusten mukaisesti.

2.6 HYÖTYSUHTEET

Rakennusmääräyskokoelman osan D2 mukaan "Ilmanvaihdon energiankulutuksen tulee olla mahdollisimman pieni". Yksi keino pienentää energiankulutusta on käyttää lämmöntalteenottoa. Lämmöntalteenoton tehokkuutta kuvaa lämmöntalteenoton hyötysuhde. Taulukossa 6 on esitetty tyypillisiä lämmöntalteenottolaitteiden lämpötilahyötysuhteita.

Taulukko 6. Tyypillisiä lämmönsiirrinten lämpötilahyötysuhteita (Anon 1987).

Lämmöntalteenottolaitteen tyyppi	Hyötysuhde %
Vesiglykolijärjestelmät	50 - 60
Levylämmönsiirtimet	55 - 65
Lämpöputkipatterit	55 - 60
Pyörivät regeneraattorit	75 - 82
Kiinteät regeneraattorit	80 - 90

Jos poistoilmavirta on yli 10 % suurempi kuin tuloilmavirta, lämmöntalteenoton lämpötilahyötysuhde lasketaan seuraavasti:

$$\eta_{LTO} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_1} \quad (3)$$

jossa

T_1 lämmöntalteenottolaitteeseen tulevan tuloilman lämpötila (K)

T_3 lämmöntalteenottolaitteeseen tulevan poistoilman lämpötila (K)

T_4 lämmöntalteenottolaitteesta lähtevän poistoilman lämpötila (K).

Jos poistoilmavirta ja tuloilmavirta ovat lähes yhtä suuret, lämmöntalteenoton lämpötilahyötysuhde lasketaan seuraavasti:

$$\eta_{LTO} = \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_1} \quad (4)$$

jossa

T_2 lämmöntalteenottolaitteelta lähtevän tuloilman lämpötila (K).

Käytännössä LTO:n lämpötilahyötysuhde ei välttämättä ole kovin yksiselitteinen. Siihen vaikuttavat tulo- ja poistopuolen ilmamäärien lisäksi myös ilman tiivistyminen ja haihtuminen. Lisäksi hyötysuhteen arvoon vaikuttavat anturien sijaintipaikat.

Myös puhaltimelle voidaan määrittää hyötysuhde:

$$\eta_P = \frac{q_{v,i} \Delta p}{P} \quad (5)$$

jossa

$q_{v,i}$ ilman tilavuusvirta (m^3/s)

Δp puhaltimen paine-ero (kPa)

P puhaltimen sähköteho (kW).

Kun vakioilmavirtaisessa järjestelmässä esimerkiksi suodatin tukkeutuu, sen paine-ero kasvaa. Jos tällöin halutaan ylläpitää haluttua vakioilmavirtaa ja puhaltimen säätöön käytetään taajuusmuuttajaa, kasvattaa se puhaltimen pyörimisnopeutta. Tällöin puhaltimen sähköteho kasvaa voimakkaasti ja samalla hyötysuhde heikkenee. Tällaisessa tapauksessa siis puhaltimen hyötysuhteen pieneneminen indikoi suodattimen likaantumista. Vastaavasti myös muut järjestelmän säätö- ja kompensointitoiminnot (taajuusmuuttajat, paine-erokytkimet, termostaatit jne.) ja niiden luotettavuus voivat vaikuttaa hyötysuhteisiin.

3. VIKAPUU VIKADIAGNOOSIMENETELMÄNÄ

Vikadiagnoosimenetelmiä voidaan käyttää apuna järjestelmän suorituskykytekijöiden seurannassa. Vikadiagnoosimenetelmien avulla pyritään havaitsemaan ja tulkitsemaan suorituskykytekijöissä aiheutuneet poikkeamat. Vikapuun käyttö on havainnollinen tapa päätellä, missä kohdassa järjestelmää on normaalista poikkeavaa toimintaa tai vikaa, ja mihin kaikkeen tämä vaikuttaa koko järjestelmässä ja rakennustasolla.

3.1 ONGELMIEN LÄHESTYMISTAVAT

Ongelmat voidaan nimetä niiden ratkaisuperiaatteiden avulla. Top-down-lähestymistavassa lähdetään liikkeelle jostakin koko järjestelmän toimintaa kuvaavasta tekijästä ja edetään kohti pienempiä yksityiskohtia. Vastaavasti bottom-up-lähestymistavassa lähdetään liikkeelle jostakin yksityiskohdasta, jonka merkitystä kokonaisuudelle ei välttämättä tiedetä, ja päädytään vian seuraukseen kokonaisuuden kannalta. Osaprosessitasolta lähdettäessä on käytettävä molempia lähestymistapoja ratkaisun saamiseksi.

Sovellettaessa rakennukseen top-down-lähestymistapaa tiedetään heti, että tarkastettava vika vaikuttaa rakennuksen toimintaan haitallisesti. Top-down-lähestymistapa soveltuu hyvin käytettäväksi, kun halutaan paikantaa järjestelmään ilmaantunut vika.

Bottom-up-lähestymistavassa tarkastellaan yksittäisten komponenttien ja pienten osajärjestelmien toimintaa. Komponentin tai osaprosessin vikaantuminen ei kuitenkaan välttämättä näy heti rakennustasolla. Bottom-up-lähestymistavan avulla pyritään ennustamaan niitä seurauksia, jotka tietyn yksittäisen prosessin osan vikaantuminen koko järjestelmälle aiheuttaa.

3.2 VIKAPUUN KUVAAMA TIETO

Prosessiin liittyvä vikatietämys voidaan jäsentää vikapuun avulla. Vikapuu on organisoitu graafinen esitys ehdoista tai muista tekijöistä, jotka aiheuttavat tai myötävaikuttavat määrätyn, ei-toivottavan tapahtuman, ns. huipputapahtuman, esiintymiseen (IEC 1025). Vikapuu on erityisen sopiva sellaisten monimutkaisten järjestelmien analyysiin, jotka muodostuvat useista erilaisista toimintatavoitteista omaavista, toiminnallisesti toisiinsa liittyvistä tai toisistaan riippuvista osajärjestelmistä. Jotta vikapuut olisivat mahdollisimman käyttökelpoisia, on tärkeää, että ne on muodostettu käyttövarmuusanalyysin perusteella, jolloin niissä esiintyvät todennäköisimmät ja merkittävimmät viat.

Vikapuussa huipputapahtuma on vikapuun juurena ja huipputapahtuman syntyminen vaikuttavat syyt puun oksina. Vikapuussa käytetään periaatteessa top-down-lähestymistapaa osoittamalla syyt tai syiden yhdistelmät, jotka voivat johtaa määrättyyn huipputapahtumaan. Bottom-up-lähestymistavan kuvaamiseen vikapuun

yhteydessä voidaan käyttää oirejoukkoja, jotka kuvaavat vikojen oireet ja niiden liittymisiä vikoihin. Vikapuu muodostuu hierarkkisesta rakenteesta, jossa yhtä ylemmän tason vikaa voi selittää yksi tai useampi alemman tason vika. Oirejoukkoja voidaan käyttää merkinä vian ilmaantumisesta. Sama oire voi olla merkittävä yhteen tai useampaan vikaan.

3.3 VIKAPUUANALYYSI IEC 1025 -STANDARDIN MUKAAN

3.3.1 Vikapuun muodostamisperiaatteet

Vikapuun rakentaminen pitäisi aloittaa järjestelmän suunnitteluvaiheessa. Vikapuun laajuuden pitäisi olla sellainen, että se vaikuttaa suunnittelun etenemiseen. Jotta vikapuutekniikkaa käytettäisiin tehokkaasti järjestelmän analysointimenetelmänä, käsittelyn pitäisi muodostua ainakin seuraavista vaiheista: analyysin vaikutusalueen määrittely, järjestelmän suunnitteluun, toimintoihin ja käyttöön tutustuminen, huipputapahtuman määrittelemine, vikapuun rakentaminen, vikapuun logiikan analysointi sekä analyysin tulosten raportointi.

Jokainen järjestelmä tulisi määrittellä kuvaamalla järjestelmätoiminnot ja identifioimalla järjestelmän rajapinnat. Sellaisen määrittelyn tulisi sisältää

- suunnittelutarkoituksen yhteenvedo
- järjestelmän rajat, kuten sähköiset, mekaaniset ja toiminnalliset liittynät
- järjestelmän fyysinen rakenne vastakohtana toiminnalliselle rakenteelle
- toiminnallisten tilojen identifiointi yhdistettynä järjestelmän toiminnan kuvaamiseen ja oletettuun tai sallittavissa olevaan toimintaan kaikissa toimintatiloissa (mahdolliset toimintatilat)
- järjestelmän ympäristöolosuhteet ja asiaankuuluvat inhimilliset tekijät
- luettelo käyttökelpoisista dokumenteista, kuten piirustuksista, määrittelyistä, käsikirjoista jne.

Kaikista syistä ilmenevät tapahtumat tulee sisällyttää vikapuuhun. Sellaisten syiden tulisi sisältää kaikkien ympäristö- tai muiden olosuhteiden vaikutukset, joihin tavara saattaa olla taipuvainen. Tapahtumat, jotka analysoija on ottanut huomioon, mutta ei ole epäsovivina liittännyt jatkoanalyysiin, pitäisi dokumentoida, mutta ei sisällyttää lopulliseen vikapuuhun.

Vikapuun kehittäminen aloitetaan huipputapahtuman määrittelyllä. Huipputapahtuma on ylimmän tason ulostulo, kun taas vastaavat syöttötapahtumat tunnistavat mahdolliset syyt ja olosuhteet huipputapahtuman ilmenemiselle. Jokainen syöttötapahtuma voi olla alemman tason ulostulotapahtuma.

Tietyn vikapuuhaaran rakentaminen päättyy, kun saavutetaan yksi tai useampi seuraavista:

- perustapahtuma (itsenäinen tapahtuma, jolle asiaankuuluvat ominaisuudet voidaan määrittellä muulla tavalla kuin vikapuuna)
- tapahtuma, jota ei analysoijan mukaan tarvitse edelleen kehittää

- tapahtuma, joka on kehitetty tai jatkokehitetään toisessa vikapuussa

3.3.2 Analyysin vaiheet

Vikapuuanalyysi etenee vaiheissa. Ensin määritellään analyysin vaikutusalue. Sen pitäisi sisältää analysoitavan järjestelmän määrittelyn, analyysin tarkoituksen ja laajuuden ja tehdyt perusoletukset. Oletusten pitäisi sisältää odotettavissa olevat toiminta- ja ylläpito-olosuhteet sekä järjestelmän toiminta kaikkien mahdollisten olosuhteiden aikana.

Jotta vikapuuanalyysi onnistuu, tarvitaan yksityiskohtaista tietoa järjestelmästä. Tämä tieto hankitaan tutustumalla järjestelmään joko itsenäisesti tai asiantuntijoiden avustuksella.

Huipputapahtuma on koko analyysin tavoite. Sellainen tapahtuma voi olla vaarallisen olosuhteen olemassa olo tai järjestelmän kyvyttömyys täyttää toivottu toiminto. Huipputapahtuma tulisi määritellä mahdollisuuksien mukaan mitattavissa olevissa yksiköissä.

Vikapuun muodostamisen jälkeen se arvioidaan. Järjestelmän loogisten (laadullisten) ja numeeristen (määrällisten) analyysien tavoitteena on

- sellaisten tapahtumien identifiointi, jotka voivat suoraan aiheuttaa järjestelmän vioittumisen, ja sellaisten tapahtumien todennäköisyydet
- järjestelmän vikatoleranssien arviointi
- järjestelmien, alijärjestelmien tai komponenttien vikojen riippumattomuuden toteennäyttäminen
- kriittisten komponenttien ja vikamekanismien paikallistamiseen tarvittavan tiedon arviointi
- laitteen vikadiagnostiikan, korjausten syöttötietojen ja ylläpitostrategioiden identifiointi.

4. VIKAPUUANALYYSIN SOVELTAMINEN ILMASTOINTIKONEESEEN

4.1 MAHDOLLISIA HUIPPUVIKOJA

Luvussa 2 kuvattiin ilmastointikoneen suorituskykyvaatimuksia, joista on johdettavissa vikapuun huipputapahtumia. Vikapuut voidaan määritellä esimerkiksi seuraaville ilmastointikoneen huipputapahtumille:

- Ilmastointikoneesta lähtevän tuloilman lämpötila on liian korkea.
- Ilmastointikoneesta lähtevän tuloilman lämpötila on liian matala.
- Ilmastointikoneesta ei saada riittävästi tehoa.
- Ilmastointikoneesta lähtevän tuloilman lämpötilan asettumisaika on liian pitkä.
- Ilmastointikoneesta lähtevän tuloilman lämpötila poikkeaa liikaa asetusarvosta.
- Ilmastointikoneesta lähtevän tuloilman lämpötila värähtelee liikaa.
- Lämmityspatterista lähtevän veden lämpötila on liian matala.
- Ilmastointikoneesta ei tule tarpeeksi ilmaa.
- Ilmastointikoneesta tulee liikaa ilmaa.
- Puhaltimien hyötysuhteet ovat liian korkeat.
- Puhaltimien hyötysuhteet ovat liian matalat.
- Puhaltimet kuluttavat liikaa sähköenergiaa.
- Ilmastointikone kuluttaa liikaa energiaa.
- Ilmastointikone kuluttaa liian vähän energiaa.
- Liian korkea CO₂-pitoisuus tilassa (jonka aiheuttaa ilmastointikone, ei esimerkiksi liika ihmismäärä).
- Ilmastointikoneen äänitaso on liian korkea.
- Ilmastointikoneesta lähtevän ilman kosteuden asettumisaika on liian pitkä.
- Ilmastointikoneesta lähtevän ilman kosteus värähtelee.
- Lämmöntalteenottolaitteen lämpötilahyötysuhde on liian matala.
- Lämmöntalteenottolaitteen lämpötilahyötysuhde on liian korkea.
- Tuloilmapuhaltimen hyötysuhde on liian matala.
- Ilmastointikone pysähtyy odottamattomasti.

Edellä olevassa listassa jotkut vikapuista voivat olla toistensa osavikapuita. Esimerkiksi huipputapahtuman "ilmastointikone kuluttaa liikaa energiaa" yhtenä syynä voi olla toinen huipputapahtuma "ilmastointikoneesta lähtevän tuloilman lämpötila värähtelee liikaa". Ei olekaan tarkoitus, että kaikista mahdollisista huipputapahtumista tehdään välttämättä vikapuut, vaan vain niistä, jotka ovat kulloinkin kyssä olevalle järjestelmälle oleellisia.

4.2 TYYPILLISIÄ ILMASTOINTIKONEEN VIKOJA

Vikapuun alatasojen viat muodostuvat bottom-up-lähestymistavan perusteella. Koska käytännössä ei voida kuitenkaan seurata ilmastointikoneen kaikkien komponenttien toimintaa, on bottom-up-lähestymistavassa olennaisen tärkeää, että

seurattaviksi komponenteiksi valitaan ne komponentit ja viat, joiden vikaantuminen on todennäköisintä tai joiden vikaantuminen vaikuttaa eniten ilmastointikoneen ja siten myös koko rakennuksen toimintaan. Taulukossa 7 on esitetty ilmastointikoneiden komponenttien tyypillisiä vikoja ja niiden oireita.

Taulukko 7. Tyypillisiä vikoja ilmastointikoneissa (Kelly 1991).

KOMPONENTTI	VIKA	OIRE
Anturi	<ul style="list-style-type: none"> • anturipoikkeama (bias) <ul style="list-style-type: none"> • anturi vikaantuu täydellisesti • anturi toimii yhä, mutta antaa virhenäyttämiä • liukuminen (drift), anturipoikkeaman suuruus muuttuu jatkuvasti ajan mukana • väärä paikka 	<ul style="list-style-type: none"> • näyttö avoin tai vaihtelurajojen ulkopuolella • yllättävä epänormaali näyttö • hidas ja pysyvä muutos näyttämässä pitkän ajan aikana • huono energiatasapaino, valituksia käyttäjiltä
Toimimoottori	<ul style="list-style-type: none"> • pneumaattinen vuoto venttiilien ja peltien toimimoo- reissa • juuttuminen • ei aukea • ei sulkeudu • väärä avautuminen tai sul- keutuminen • ei-yhdistetyn liitännän taipu- ma 	<ul style="list-style-type: none"> • säädettävän laitteen hitaus tai vas- teettomuus ohjaukseen • säädettävän laitteen hitaus tai vas- teettomuus ohjaukseen • epänormaali lämpötila-, paine- tai si- jaintilukema • epänormaali lämpötila-, paine- tai ohjauslukema • heilahteleva lämpötila tai paine tai ohjauslukema • epänormaali lämpötila-, paine- tai ohjauslukema
Venttiilit ja pellit	<ul style="list-style-type: none"> • juuttuminen • ei aukea • ei sulkeudu • vuoto • venttiilin laakerin vika 	<ul style="list-style-type: none"> • epänormaali venttiilin tai pellin asen- to tai niiden tilatieto • epänormaali venttiilin tai pellin asen- to tai niiden tilatieto • epänormaali venttiilin tai pellin asen- to tai niiden tilatieto • epänormaali sekoitetun lämpötilan lukema • epänormaali venttiilin tai pellin asen- to tai niiden tilatieto
Rele	<ul style="list-style-type: none"> • patterin vika • kosketin ei toimi • kosketin ei vapaudu 	<ul style="list-style-type: none"> • epänormaali venttiilin tai pellin asen- to tai niiden tilatieto • epänormaali venttiilin tai pellin asen- to tai niiden tilatieto • epänormaali venttiilin tai pellin asen- to tai niiden tilatieto
Moottori	<ul style="list-style-type: none"> • täydellinen vioittuminen • huonontunut toiminta 	<ul style="list-style-type: none"> • epänormaali tilatieto, virta ei toimin- ta-alueella • moottorin liiallinen energiankulutus

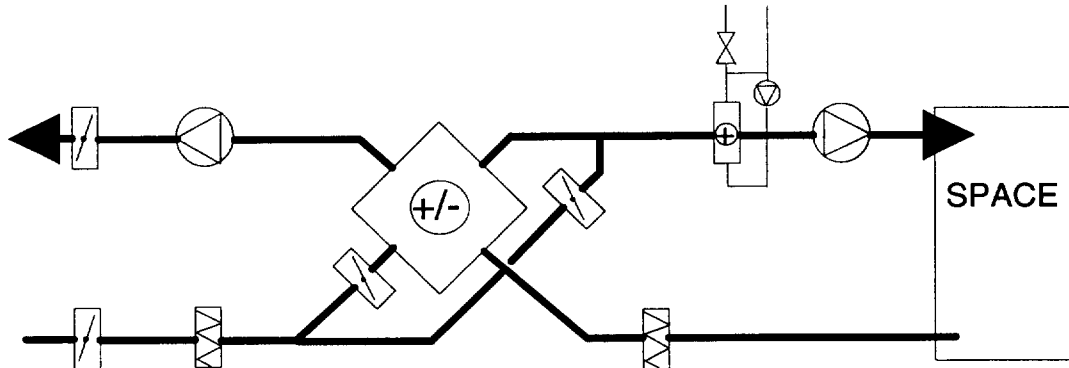
KOMPONENTTI	VIKA	OIRE
Pumppu	<ul style="list-style-type: none"> • vuoto • ei pumppaa • kavitointi 	<ul style="list-style-type: none"> • virtauksen paine toiminta-alueen ulkopuolella • toiminta muuttuu portaattain
Patteri	<ul style="list-style-type: none"> • virtauksen tukkeutuminen • vuoto • jäänyt 	<ul style="list-style-type: none"> • virtauksen paine toiminta-alueen ulkopuolella • äkillinen epänormaali lämpötilan tai virtauksen muutos
Suodatin	<ul style="list-style-type: none"> • virtauksen tukkeutuminen • automaattinen väliaineen syötön vika • paine-eromittauksen vika 	<ul style="list-style-type: none"> • virtauslukema toiminta-alueen ulkopuolella • suodattimen painelukemat toiminta-alueen ulkopuolella • suodattimen painelukemat toiminta-alueen ulkopuolella
Putkisto	<ul style="list-style-type: none"> • tukkeutuminen • vuoto • virheellinen eristys 	<ul style="list-style-type: none"> • paine tai virtausmittaus toiminta-alueen ulkopuolella • liiallinen lämpötilan lasku
Sähköjohdot	<ul style="list-style-type: none"> • yhteys poikki • huono maadoitus 	<ul style="list-style-type: none"> • jaksottainen tehosiignaali • häiriöllinen signaali
Säädöt	<ul style="list-style-type: none"> • liukuma (drift) • poikkema (bias) • pneumaattinen vuoto • ohjainyksikön tai liityntöjen sulkeuma • huojunta • asetusarvoa ei ylläpidetä • mikroprosessorivika 	<ul style="list-style-type: none"> • hidas ja jatkuva näytön muutos • äkilliset epänormaalit näytöt • hidas tai epänormaali näyttö ja vaste • epänormaali näyttö ja vaste • toistuva näytön heilahtelu lyhyen ajan kuluessa • epänormaali lukema • äkillinen epänormaali ohjaus tai ohjauksen puute
Puhallin	<ul style="list-style-type: none"> • jänniteimpulssit • sakkaus • pyörii väärinpäin • hihna poikki • laakerivika • nopeussäädön vika • tilavuussäädön vika 	<ul style="list-style-type: none"> • epänormaali ja heilahteleva painelukema • epänormaali paine- tai virtauslukema • epänormaali paine- tai virtauslukema • epänormaali paine- tai virtauslukema • epänormaali paine- tai virtauslukema • liiallinen energiankulutus • liiallinen energiankulutus
Teho	<ul style="list-style-type: none"> • sähkötehon syötön keskeytys 	<ul style="list-style-type: none"> • signaali tai teho puuttuu

4.3 ESIMERKKEJÄ ILMASTOINTIKONEEN VIKAPUISTA

4.3.1 Vikapuuanalyysiin sovellettava ilmastointikone

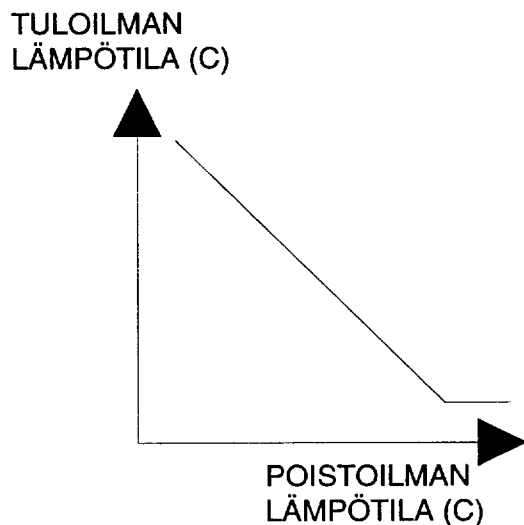
Koska vikapuut on yleensä muodostettava erikseen kullekin järjestelmälle, valittiin tarkasteltavaksi ilmastointikoneeksi kuvassa 2 esitetty tyypillinen kone. Ilmastointikoneessa on tulopuolella ulkoilmapelti (sulkupelti), suodatin, levylämmöntalteenottolaite, vesikiertoinen lämmityspatteri ja puhallin. Poistopuolella on suo-

datin, levy-LTO, puhallin ja poistoilmapelti (sulkupelti). Levy-LTO:ta säädetään ohituspellillä. Ilmastointikone on vakioilmavirtainen.



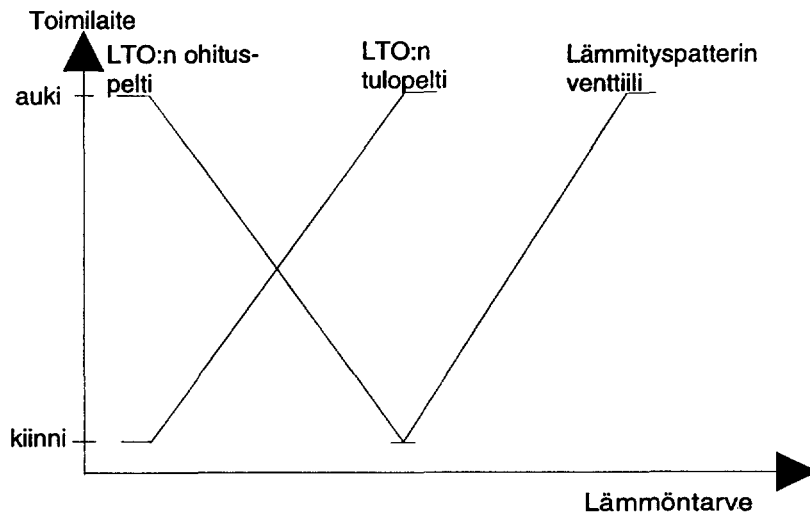
Kuva 2. Tarkasteltava ilmastointikone.

Tuloilmapuhaltimen käyttöä ohjataan rakennusautomaatiojärjestelmän aikaohjelmalla. Tuloilmapuhallin ei saa käydä, mikäli lämmityspatterin pumppu ei ole käynnissä. Poistoilmapuhaltimen käynti on ryhmäkeskuksessa lukittu tuloilmapuhaltimen käyntiin. Lämmityspatterin pumppu on käynnissä jatkuvasti.



Kuva 3. Tuloilman lämpötilan asetusarvo määräytyy poistoilman lämpötilan mukaan.

Koneen käydessä koneella pyritään pitämään koneelta lähtevän tuloilman lämpötila poistoilman lämpötilaan verrannollisessa arvossa kuvan 3 mukaisesti. Lämmöntarpeen kasvaessa säätöohjelma avaa ensimmäisenä portaana LTO:n tulopeltiä ja sulkee ohituspeltiä sekä toisena portaana avaa lämmityspatterin venttiiliä kuvan 4 mukaisesti. Tuloilman lämpötilan ei sallita laskea alle määrätyn raja-arvon. LTO:n huurtumisen estämiseksi säätöohjelma estää poistoilman lämpötilan (mitattuna poistopuolelta LTO:n jälkeen) laskemasta alle asetusarvon sulkemalla LTO:n tulopeltiä ja avaamalla LTO:n ohituspeltiä.



Kuva 4. Toimilaitteiden ohjaukset lämmöntarpeen mukaan.

Koneen seisoessa pyritään jäätymisvaaran ehkäisemiseksi lämmityspatterin paluuveden lämpötila pitämään asetusarvossa. Jäätymisvaaratermostaatin toimiessa koneen käydessä tuloilmapuhallin pysähtyy, minkä jälkeen säätö toimii kuten koneen seisoessa. Jäätymisvaaratermostaatin lauettua se on kuitattava käsin.

Koneesta tehtävät mittaukset:

- ulkolämpötila t_u
- ilmastointikoneesta lähtevän ilman lämpötila t_{ik}
- rakennuksen poistoilman lämpötila t_p
- LTO:sta ulospuhallettavan ilman lämpötila t_{up}
- lämmityspatterille tulevan veden lämpötila $t_{v,t}$ (mittaus saadaan lämmitysjärjestelmän puolelta)
- lämmityspatterista poistuvan veden lämpötila $t_{v,p}$
- paine-ero tuloilmapuolen suodattimen yli $\Delta p_{s,t}$
- paine-ero poistoilmapuolen suodattimen yli $\Delta p_{s,p}$
- paine-ero tuloilmapuhaltimen yli $\Delta p_{p,t}$
- paine-ero poistoilmapuhaltimen yli $\Delta p_{p,p}$
- paine-ero lämmityspatterin pumpun yli Δp_{lp}

4.3.2 Ilmastointikoneen vikapuita

Seuraavassa on esimerkkejä luvussa 4.3.1 kuvatun vakioilmavirtaisen ilmastointikoneen vikapuita. Jos vika- tai häiriötilanteet näkyvät vasta huonetilassa, on vikapuihin otettu mukaan vain sellaiset viat, jotka aiheutuvat viasta ilmastointikoneesta. Siis esimerkiksi huipputapahtumassa *liian suuri CO₂-pitoisuus tilassa* ei ole otettu mukaan vikaa "liian paljon ihmisiä tilassa". Lisäksi esitetyt vikapuut eivät välttämättä ole täydellisiä, vaan tarkoitus oli esittää viitteellisiä vikapuita. Vikapuissa viat on esitetty ISOILLA kirjaimilla ja oireet pienillä kirjaimilla. Jos ilmoi-

tettua oiretta ei mitata luvussa 4.3.1 kuvatussa tapauksessa, oire on merkitty sulkuihin. Jos oireeksi on mainittu tarkastus, oiretta ei voi mitata tai havaita automaattisesti, vaan käyttäjän on tarkastettava vikaan liittyvät oireet silmämääräisesti.

LIIAN SUURI CO₂-PITOISUUS TILASSA

mitattu CO₂ ylittää tavoitellun tason

KONE PYSÄHTYY

koneesta ei lähde ääniä

SÄHKÖHÄIRIÖ

IV-HÄTÄPYSÄYTYS

TULOILMAPUHALLIN PYSÄHTYY

mitattu paine-ero on mitätön

(mitattu ilmavirta on mitätön)

(ei sähkövirtaa)

MOOTTORI RIKKI

HIHNA POIKKI

tarkastus

SULAKKEET PALANEET

tarkastus

LÄMPÖSUOJA RIKKI

PALO-OHJAUS

AUTOMAATIOVIKA

VÄÄRÄ AIKAOHJELMA

AUTOMAATIOLAITTEEN KELLO SEKAISIN

OHJELMOINTIVIRHE

PIENI TULOILMAVIRTA

(ilmavirta merkittävästi alle tavoitearvon)

MITOITUSVIRHE

ULKOILMAPELTI JUUTTUNUT

tarkastus

SUODATIN TUKOSSA

mitattu paine-ero on pieni

LTO TUKOSSA, KUN OHITUSPELTI JUUTTUNUT KIINNI

(mitattu paine-ero on pieni)

tarkastus

LÄMMITYSPATTERI TUKOSSA

tarkastus

PUHALLIN PYÖRII VÄÄRINPÄIN

(painesuhteet väärin)

AUTOMAATIOVIKA

VÄÄRÄ AIKAOHJELMA

AUTOMAATIOLAITTEEN KELLO SEKAISIN

OHJELMOINTIVIRHE

CO₂-ANTURIN VIKA

vertailu toisen mittarin näyttämään

valitukset

VÄÄRÄ KALIBROINTI
EI KYTKETTY
VÄÄRÄ PAIKKA

KONEESTA LÄHTEVÄN ILMAN LÄMPÖTILA ON LIIAN MATALA
mitattu lämpötila alle tavoitearvon

MITOITUSVIRHE

LTO ja lämmityspatteri täysteholla

LIIAN PIENI LTO

LIIAN PIENI LÄMMITYSPATTERI

LTO:N OHITUSPELTI JUUTTUNUT AUKI

LÄMMITYSPATTERIN TUOTTOPUOLELTA EI SAADA TEHOA

VIRTAAMA LOPPUNUT / HEIKENTYNYT

(mitattu nestevirta on pieni)

PUMPUN VIKA

PYSÄHTYNYT

mitattu paine-ero on pieni

MOOTTORIVIKA

LAAKERIVIKA

JUOKSUPYÖRÄ PYÖRII TAKAPERIN

tarkastus

KAVITOINTI

toiminta muuttuu portaittain

PUTKISTO RIKKI

VUOTO

JÄÄTYMINEN

TUKKEUTUMINEN

VENTTIILI JUUTTUNUT

epänormaali venttiilin asento tai asennon tilatieto

LÄMMÖNTUOTTO LAKKAA

nesteen lämpötila matala

AUTOMAATIOLAITTEEN VIKA

VÄÄRÄ ASETUSARVO

VÄÄRÄT VIRITYSPARAMETRIT

SÄÄTÖALGORITMI SEKAISIN

VÄÄRÄ AIKAOHJELMA

AUTOMAATIOLAITTEEN KELLO SEKAISIN

OHJELMOINTIVIRHE

MIKROPROSESSORIVIKA

äkillinen epänormaali ohjaus tai ohjauksen puute

ANTURIVIKA

ANTURIPOIKKEAMA

näyttö avoin tai vaihtelurajojen ulkopuolella

yllättävä epänormaali näyttö

LIUKUMINEN

hidas ja pysyvä muutos näyttämässä pitkän ajan kuluessa

VÄÄRÄ PAIKKA
huono energiatasapaino
valitukset

ILMASTOINTIKONEESTA EI SAADA RIITTÄVÄSTI LÄMPÖTEHOA
saatava teho on pienempi kuin haluttu teho

KONE PYSÄHTYY

koneesta ei lähde ääniä

SÄHKÖHÄIRIÖ

IV-HÄTÄPYSÄYTYS

TULOILMAPUHALLIN PYSÄHTYY

mitattu paine-ero on mitätön

(mitattu ilmavirta on mitätön)

(ei sähkövirtaa)

MOOTTORI RIKKI

HIHNA POIKKI

tarkastus

SULAKKEET PALANEET

tarkastus

LÄMPÖSUOJA RIKKI

PALO-OHJAUS

AUTOMAATIOVIKA

VÄÄRÄ AIKAOHJELMA

AUTOMAATIOLAITTEEN KELLO SEKAISIN

OHJELMOINTIVIRHE

PIENI TULOILMAVIRTA

(ilmavirta merkittävästi alle tavoitearvon)

MITOITUSVIRHE

ULKOILMAPELTI JUUTTUNUT

tarkastus

SUODATIN TUKOSSA

mitattu paine-ero on pieni

LTO TUKOSSA, KUN OHITUSPELTI JUUTTUNUT KIINNI

(mitattu paine-ero on pieni)

tarkastus

LÄMMITYSPATTERI TUKOSSA

tarkastus

PUHALLIN PYÖRII VÄÄRINPÄIN

(painesuhteet väärin)

AUTOMAATIOVIKA

VÄÄRÄ AIKAOHJELMA

AUTOMAATIOLAITTEEN KELLO SEKAISIN

OHJELMOINTIVIRHE

MITOITUSVIRHE

LTO ja lämmityspatteri täysteholla

LIIAN PIENI LTO

LIIAN PIENI LÄMMITYSPATTERI
LTO:N OHITUSPELTI JUUTTUNUT AUKI
LÄMMITYSPATTERIN TUOTTOPUOLELTA EI SAADA TEHOA
VIRTAAMA LOPPUNUT / HEIKENTYNYT
(mitattu nestevirta on pieni)
PUMPUN VIKKA
PYSÄHTYNYT
MOOTTORIVIKKA
LAAKERIVIKKA
JUOKSUPYÖRÄ PYÖRII TAKAPERIN
tarkastus
KAVITOINTI
toiminta muuttuu portaittain
PUTKISTO RIKKI
VUOTO
JÄÄTYMINEN
TUKKEUTUMINEN
VENTTIILI JUUTTUNUT
epänormaali venttiilin asento tai asennon tilatieto
LÄMMÖNTUOTTO LAKKAA
nesteen lämpötila matala

5. ILMASTOINTIKONEEN TEHON SEURANTA

Tässä luvussa kuvattu ilmastointikoneen tehon seurantamenetelmä on ilmastointikoneen toiminnan seurantamenetelmä, jota voidaan käyttää myös vian havaitsemiseen. Tämä vian havaitsemismenetelmä seuraa luvussa 4.3.1 kuvatun ilmastointikoneen tehoja. Menetelmässä lasketaan ilmastointikoneesta haluttu, siitä saatava ja maksimiteho. Vian havaitsemismenetelmä ei siis kerro, missä vika on, vaan vain havaitsee jossakin olevan vian. Jotta vika voidaan myös paikallistaa, käytetään apuna luvussa 4.3.2 kuvattuja vikapuita. Toiminnan seurantamenetelmänä tehomenetelmä liittyy luvussa 2.1 kuvattuun lämpötehon suorituskykykriteeriin.

5.1 TARKASTELTAVAT TEHOT

Haluttu teho

$$\phi_h = q_{v,it} \rho_i c_{p,i} (t_{ik,as} - t_u) \quad (6)$$

jossa

$q_{v,it}$ ilmastointikoneen tuloilmavirta (m^3/s)

ρ_i ilman tiheys (kg/m^3)

$c_{p,i}$ ilman ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK)

$t_{ik,as}$ ilmastointikoneesta lähtevän ilman lämpötilan asetusarvo ($^{\circ}C$)

t_u ulkolämpötila ($^{\circ}C$).

Saatava teho

$$\phi_s = q_{v,it} \rho_i c_{p,i} (t_{ik} - t_u) \quad (7)$$

jossa

t_{ik} ilmastointikoneesta lähtevän ilman lämpötila ($^{\circ}C$)

muut suureet kuten haluttua tehoa laskettaessa.

Maksimiteho

Maksimiteho muodostuu tarkasteltavassa ilmastointikoneessa kahdesta osasta. Toinen on LTO:sta saatava ilmaisteho ja toinen lämmityspatterista saatava maksimiteho.

$$\phi_{max} = \phi_{LTO} + \phi_p \quad (8)$$

LTO:n teho

Huurtumisen estämiseksi LTO:ta ohitetaan, kun LTO:lta ulospuhallettavan ilman lämpötila $t_{up} < t_{up,raja}$.

Kun $t_{up} \geq t_{up,raja}$, LTO:n maksimiteho on

$$\phi_{LTO} = q_{v,ip} \rho_i c_{p,i} (t_p - t_{up}) \quad (9)$$

jossa

$q_{v,ip}$ ilmastointikoneen poistoilmavirta (m^3/s)
 t_p rakennuksen poistoilman lämpötila ($^{\circ}C$).

Kun $t_{up} < t_{up,raja}$, LTO:ta ohitetaan jäätymisen estämiseksi. Tällöin poistopuolen lämpöteho siirtyy tulopuolen läpi kulkeneeseen ilmavirtaan. Tulopuolen teho on:

$$\phi_{LTO,T} = q_{v,it} \rho_i c_{p,i} (1 - \varphi)(t - t_u) \quad (10)$$

jossa

φ ohituspellin asento (0-1)
 t LTO:n tulopuolen läpi kulkeneen ilman lämpötila ennen sekoittamista
 LTO:n ohittaneeseen ilmavirtaan ($^{\circ}C$).

LTO:n läpi kulkenut ja LTO:n ohittanut ilma sekoitetaan, jolloin tuloilman lämpötila LTO:n jälkeen t_{LTO} on

$$t_{LTO} = (1 - \varphi) \cdot t + \varphi \cdot t_u \quad (11)$$

Kaavasta 11 voidaan ratkaista LTO:n tulopuolen läpi kulkeneen ilman lämpötila ennen sekoittamista t , joka sijoitetaan kaavaan 10.

Poistopuolen teho on yhtä suuri kuin LTO:n teho siinä tapauksessa, että $t_{up} \geq t_{up,raja}$ (kaava 9). Kun poistopuolen teho on yhtä suuri kuin tulopuolen teho eli

$$\phi_{LTO,P} = \phi_{LTO,T} \quad (12)$$

saadaan tuloilman lämpötilalle LTO:n jälkeen eli t_{LTO} :lle kaava

$$t_{LTO} = \left(\frac{q_{v,ip} (t_p - t_{up})}{q_{v,it} (1 - \varphi)} + t_u \right) (1 - \varphi) + \varphi \cdot t_u \quad (13)$$

Jos kaavassa 13 $\varphi = 1$, niin $t_{LTO} = t_u$.

Tällöin LTO:n hyödynnettävä teho lasketaan seuraavasti:

$$\phi_{LTO} = q_{v,it} \rho_i c_{p,i} (t_{LTO} - t_u) \quad (14)$$

Lämmityspatterin teho

Jäätymisvaaran takia patterista lähtevän veden lämpötila ei saa alittaa $t_{v,praja}$. Kuitenkin jos $t_{LTO} \geq t_{v,praja}$, paluuvesi voi jäähtyä enintään lämpötilaan t_{LTO} . Patterin tehoksi lasketaan teoreettinen maksimiteho kullakin hetkellä.

Kun $t_{LTO} \geq t_{v,praja}$, lämmityspatterin maksimiteho on

$$\phi_p = q_{v,v} \rho_v c_{p,v} (t_{v,t} - t_{LTO}) \quad (15)$$

jossa

$q_{v,v}$	patterin vesivirta (m^3/s)
ρ_v	veden tiheys (kg/m^3)
$c_{p,v}$	veden ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK)
$t_{v,t}$	patterille tulevan veden lämpötila ($^{\circ}C$).

Kun $t_{LTO} < t_{v,praja}$, lämmityspatterin maksimiteho on

$$\phi_p = q_{v,v} \rho_v c_{p,v} (t_{v,t} - t_{v,praja}). \quad (16)$$

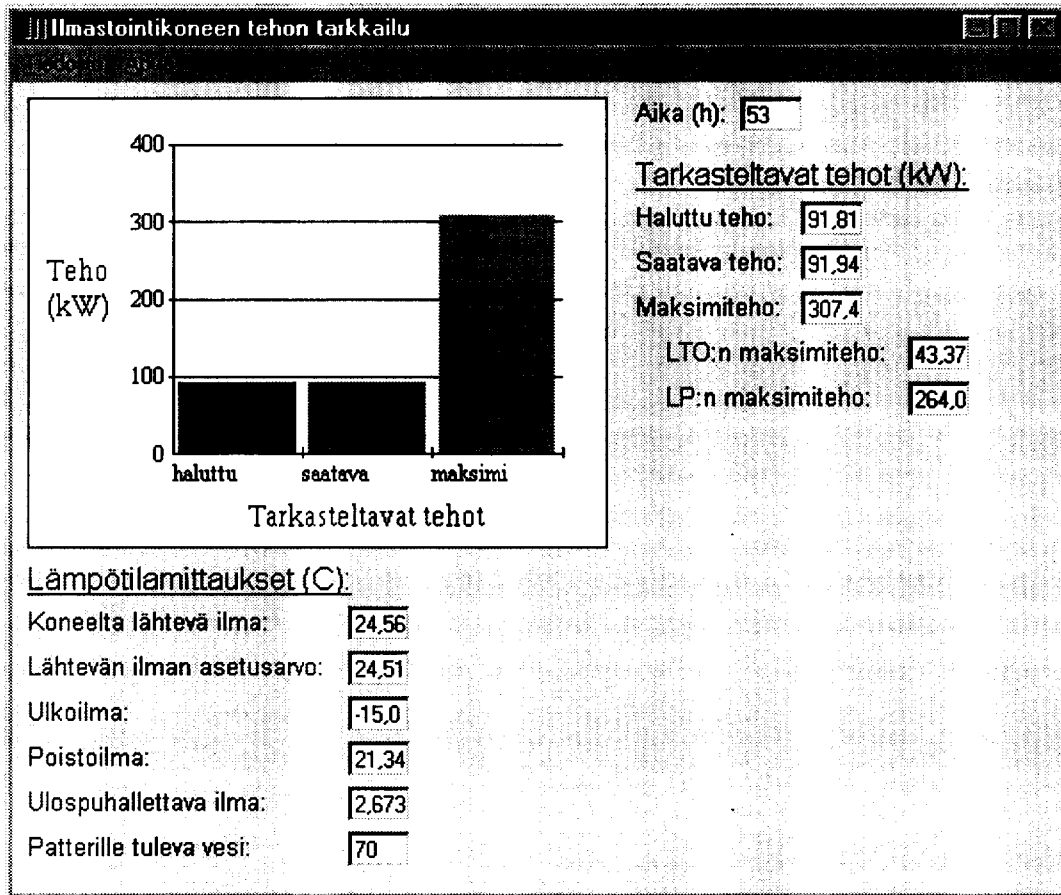
Menetelmän sisältämät oletukset:

- Ilman ja veden tiheyksille käytetään vakioarvoja (ilma: $1,2 kg/m^3$ ja vesi: $1000 kg/m^3$).
- Ilman ja veden ominaislämpökapasiteeteille käytetään vakioarvoja (ilma $1,0 kJ/kgK$ ja vesi $4,2 kJ/kgK$).
- Tehon siirtyminen LTO:ssa poistopuolelta tulopuolelle ja lämmityspatterissa vesipuolelta ilmapuolelle on häviötöntä. Tällä kompensoidaan sitä, että ilman lämpötilan nousua puhaltimessa ei oteta laskennassa huomioon.
- Ohituspellin oletetaan toimivan lineaarisesti ja ideaalisesti ja auktoriteetin olevan = 1.
- Huurtumisen estämiseksi LTO:ta ohitetaan, kun LTO:sta ulospuhallettavan ilman lämpötila $t_{up} < t_{up,raja}$.
- Jäätymisvaaran takia patterista lähtevän veden lämpötila ei saa alittaa lämpötilaa $t_{v,praja}$.

On tärkeätä huomata, että menetelmä muuttuu hiukan, jos ilmastointikoneelta tehtävät mittaukset eivät sisällä kaikkia luvussa 4.3.1 kuvattuja mittauksia. Tilanteissa, joissa tarvittavaa tietoa ei saada määritettyä, on järkevää käyttää esimerkiksi mitoitusarvoja. Tässä kuvatussa tapauksessa tällaisia tietoja ovat ilma- ja vesivirrat. Luonnollisesti menetelmän luotettavuus paranee, jos kaikki tarvittavat suureet mitataan, mutta se on kuitenkin mittauspisteiden kalleuden takia harvoin mahdollista.

5.2 TEHON SEURANTAOHJELMAT

5.2.1 IK-TEHO- ja TEHOSim-ohjelmat



Kuva 5. TEHOSim-ohjelman päänäyttö.

Luvussa 5.1 kuvatusta tehomenetelmästä tehtiin kaksi tietokoneohjelmaa, jotka laskevat tarkasteltavat tehot ja piirtävät ne pylväskaavioiksi. Ohjelmat kehitettiin demonstraatiotarkoituksiin ja ne antavat siten viitteitä, millaiselta käytännön tilanteessa hyödynnettävä tehon seurantaohjelmat voisivat näyttää. Ohjelmat ovat saatavissa VTT Rakennustekniikasta.

IK-TEHO-ohjelma ei tarvitse mitään lähtötietoja, vaan se laskee tehot satunnaisesti tietyille väleille aikaansaatuisten keinotekoisien mittausten perusteella. Ohjelma on tarkoitettu puhtaasti demonstraatiotarkoituksiin.

TEHOSim-ohjelma on vastaava ohjelma, mutta siinä käytetään mittauksina simuloituja lähtötietoja. Kuvassa 5 on esitetty TEHOSim-ohjelman päänäyttö, jossa pylväskaavioon piirretään haluttu, saatava ja enimmäisteho. Lisäksi näytössä näkyvät tarkasteltavien tehojen lukuarvot, enimmäistehon jakautuminen eri komponenteille ja lämpötilamittaukset.

Ohjelmat on tarkoitettu ilmastointikoneen käyttäjän apuneuvoksi, eivätkä ne ota kantaa siihen, miten suuri poikkeama halutun ja saatavan tehon välillä on merkittävä. Ohjelmat eivät myöskään arvioi, miten kauan poikkeama saa kestää, ennen kuin siihen tulisi reagoida. Ohjelmista siis näkee, jos haluttu ja saatava teho poikkeavat toisistaan. Tällöin ilmastointikoneessa on vikaa tai se ei muuten toimi halutulla tavalla. Jos lisäksi maksimiteho on pienempi kuin haluttu teho, kone voi olla alimitoitettu tai esimerkiksi lämmityksen tuotto on jostakin syystä loppunut.

5.2.2 TEHODat-ohjelma

Luvussa 5.1 kuvattu tehomenetelmä soveltuu ilmastointikoneelle, joka koostuu LTO:sta ja vesikiertoisesta lämmityspatterista. Kansainvälisessä IEA Annex 34 -yhteistyöprojektissa (Computer-aided Evaluation of HVAC System Performance: the Practical Application of Fault Detection and Diagnosis Techniques in Real Buildings) sovelletaan vikadiagnostiikkaa käytännössä. Tässä hankkeessa oli käytettävissä mittaustietoa laboratorioilmastointikoneesta sekä normaalin että viallisen toiminnan ajalta. Näitä tietoja hyödynnetään TEHODat-ohjelmassa.

Koska laboratorioilmastointikoneessa oli LTO:n paikalla sekoitus, muutettiin tehomenetelmää tähän koneeseen soveltuvaksi. Tällöin maksimiteho muodostuu sekoituksesta saatavasta ilmaistehosta ja lämmityspatterin maksimitehosta eli kaava 8 muuttuu muotoon

$$\phi_{\max} = \phi_{SEK} + \phi_p \quad (17)$$

jossa

ϕ_{SEK} sekoituksesta saatava ilmaisteho (kW).

Kun sekoitettavien ilmavirtojen kosteuksia ei oteta huomioon, on ilman lämpötila sekoituksen jälkeen t_{sek}

$$t_{sek} = \frac{q_{v,iu} t_u + (q_{v,it} - q_{v,iu}) t_p}{q_{v,it}} \quad (18)$$

jossa

$q_{v,iu}$ ulkoilmavirta (m^3/s).

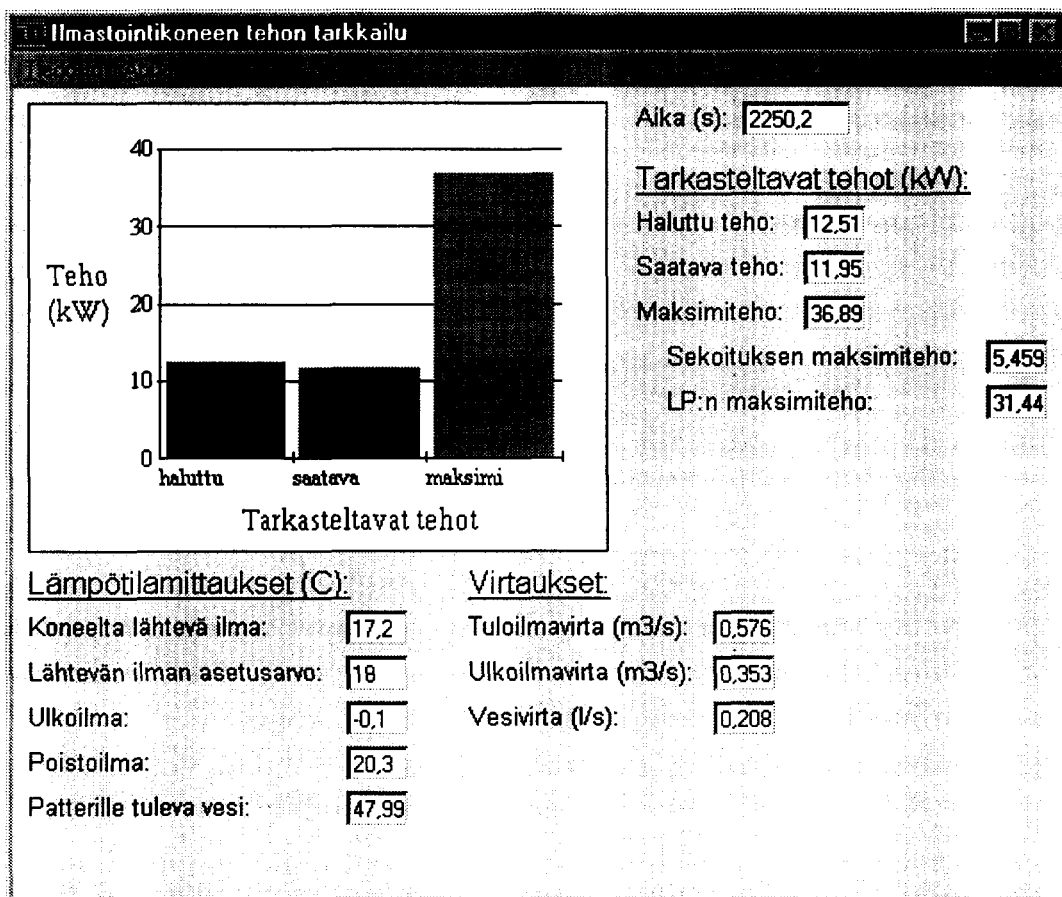
Jos kaavassa 18 $q_{v,it} = 0$, niin $t_{sek} = t_u$.

Tällöin sekoituksesta saatava teho on

$$\phi_{SEK} = q_{v,it} \rho_i c_{p,i} (t_{sek} - t_u). \quad (19)$$

Lämmityspatterin maksimiteho ϕ_p lasketaan kuten luvussa 5.1 esitettiin paitsi, että kaavoissa 15 ja 16 LTO:n jälkeinen lämpötila t_{LTO} korvataan sekoituksen jälkei-

sellä lämpötilalla t_{sek} . Kuvassa 6 on esitetty TEHODat-ohjelman päänäyttö, joka poikkeaa hieman (virtausmittaukset) TEHOSim-ohjelman näytöstä. Jos haluttu teho on 5 % suurempi tai pienempi kuin saatava teho tai jos haluttu teho on 5 % suurempi kuin maksimiteho, kyseinen ajanhetki prosenttipoikkeamien suuruudet ja ero suure ($t_{ik,as} - t_{ik}$) tulostetaan tiedostoon, josta niitä voidaan tarkastella myöhemmin.



Kuva 6. TEHODat-ohjelman päänäyttö.

TEHODat-ohjelmassa käytetyt mittaustiedot tai tiedot automaatiojärjestelmästä ovat seuraavat:

- aika
- ulkoilmavirta ($q_{v,iu}$)
- ilmastointikoneen tuloilmavirta ($q_{v,it}$)
- lämmityspatterin vesivirta ($q_{v,v}$)
- ulkolämpötila (t_u)
- ilmastointikoneesta lähtevän ilman lämpötila (t_{ik})
- ilmastointikoneesta lähtevän ilman lämpötilan asetusarvo ($t_{ik,as}$)
- poistoilman lämpötila (t_p)
- lämmityspatterin tulevan veden lämpötila ($t_{v,t}$).

Käytetyt vakiot:

- ilman tiheys $\rho_i = 1.2 \text{ kg/m}^3$
- veden tiheys $\rho_v = 1000 \text{ kg/m}^3$
- ilman ominaislämpökapasiteetti $c_{p,i} = 1 \text{ kJ/kgK}$
- veden ominaislämpökapasiteetti $c_{p,v} = 4.2 \text{ kJ/kgK}$
- patterin paluueden jäätymisrajalämpötila $t_{v,praja} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$.

Vaikka mittaustietoihin vaikuttaneet viat eivät olleet sellaisia, joita tehomenetelmällä tyypillisesti pyritään havitsemaan, menetelmä löysi testatuista tiedostoista esiintyneet vikatilanteet yhtä vikaa lukuun ottamatta. Tämä vika oli sellainen, jota tehomenetelmällä ei pystytä havaitsemaan.

6. IEA ANNEX 25:SSÄ KEHITETYT VIKADIAGNOOSIMENETELMÄT

IEA Annex 34 -projektia edelsi IEA Annex 25 - projekti (Real Time Simulation of HEVAC Systems for Building Optimisation, Fault Detection and Diagnosis (BOFD)), jossa mm. kehitettiin LVI-järjestelmien vikadiagnoosimenetelmiä. Tässä luvussa esitetään yhteenvedonmaisesti kehitettyjä ilmastointikoneen vikadiagnoosimenetelmiä tai -sovelluksia tai molempia.

Vikapuusovellus ilmastointikoneelle

Japanilaisten (Yuzawa et al. 1996) vikadiagnoosijärjestelmä, jota kutsutaan vikapuuanalyysijärjestelmäksi (FTA system), soveltaa vikapuuta. Hyödynnetävä vikapuuta on tehty ilmastointikoneelle, joka koostuu sekoituksesta, jäädytyksestä ja puhaltimesta. Järjestelmässä käytetään muuttuvaa ilmapirtaa (VAV-järjestelmä). Vikapuuta ulottuu palveltavaan tilaan asti.

Vikapuuanalyysijärjestelmä käyttää seuraavia syöttötietoja:

- Mittaukset
 - huonelämpötila
 - sisäänpuhalluslämpötila
 - tuloilmapuhaltimen nopeus
 - tuloilmapuhaltimen staattinen paine
 - jäädytyspatterin tulevan veden lämpötila
 - jäädytyspatterista lähtevän veden lämpötila
- Ohjaukset
 - VAV-pellin uudelleenasetusviesti
 - VAV-pellin avausviesti
- Asetusarvot
 - sisäänpuhalluslämpötila
 - tuloilmapuhaltimen staattinen paine
 - jäädytyspatterille tulevan veden lämpötila
- Algoritmi
 - VAV:n säätöalgoritmi

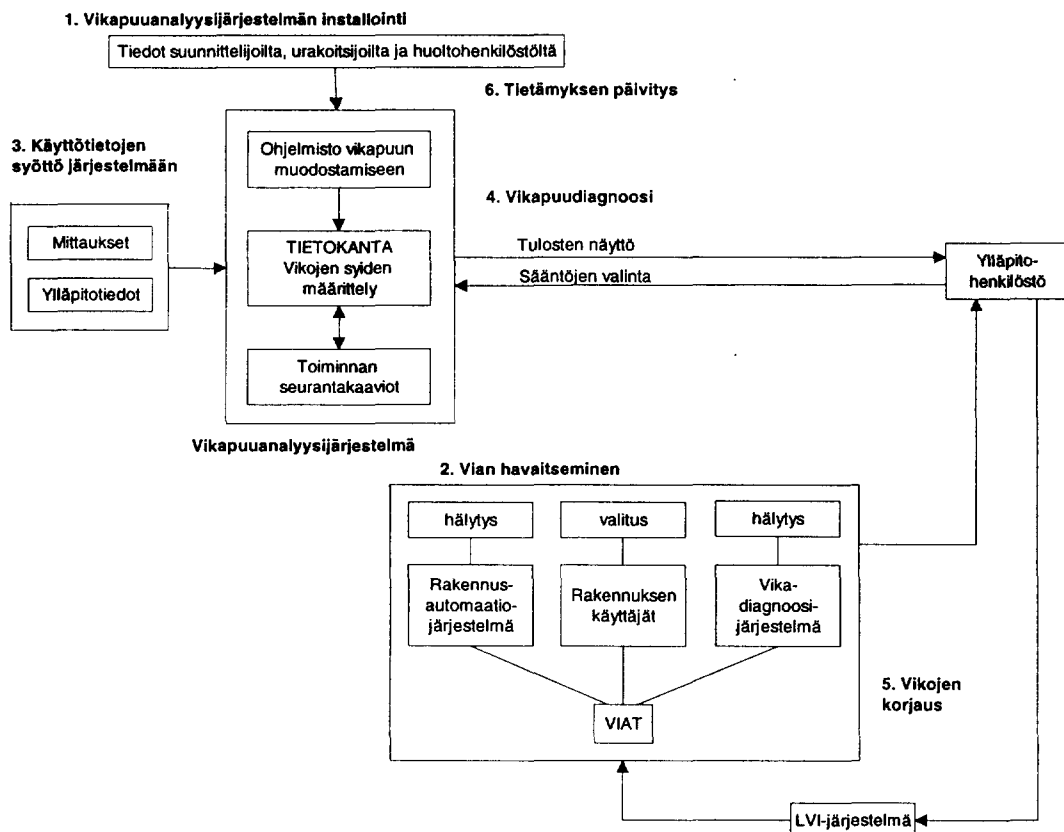
Käytettävä vikapuuta (vain viat esitetty):

HUONELÄMPÖTILA POIKKEAA ASETUSARVOSTA
LIIALLINEN SISÄINEN LÄMMÖN TUOTTO
RIITTÄMÄTÖN SISÄÄNPUHALLUSLÄMPÖTILA
RIITTÄMÄTÖN KONEESTA LÄHTEVÄN ILMAN
LÄMPÖTILA
PUUTE LÄMPÖTILAN ASETUKSEN SÄÄDÖSSÄ
PUUTE ASETUKSEN SÄÄDÖSSÄ
VAV-ONGELMA

RIITTÄMÄTÖN SEKOITUSLÄMPÖTILA KONEESSA
VIRHE ULKOILMAN JÄÄHDYTYKSEN
SÄÄDÖSSÄ
VIRHE SEKOITUSPELTIEN SÄÄDÖSSÄ
SEKOITUSPELTIEN/PELTIEN TOIMIMOOT-
TORIEN VAURIOITUMINEN
KORKEA/MATALA ULKOLÄMPÖTILA
VAV-PELLIN SÄÄTÖ PUUTTUU
VUOTO KANAVASSA
PATTERIIN TULEVAN VEDEN LÄMPÖTILA
VAIHTALEE
ASETUSARVO VAIHTALEE
PUTKISTON HUONO ERISTYS
PUTKISTOVUOTO
VIRHE KONEEN VENTTIILIN SÄÄDÖSSÄ
VIALLINEN JOHTOJEN KYTKENTÄ
KOHINA
SÄÄTIMEN HUONONEMINEN
VÄÄRÄT SÄÄTÖPARAMETRIT
KONEEN VENTTIILIN HUONONEMINEN /
VENTTIILIN TOIMIMOOTTORIN VAURIOITUMINEN
LIIAN PIENI PATERI
EPÄTASAINEN PATERIN RIVOTUS
HUONO KANAVIEN ERISTYS
SISÄÄNPUHALLUSILMAVIRRRAN PUUTE / YLIMÄÄRÄ
VIRHE VAV-PELLIN SÄÄDÖSSÄ
VIRHE ILMAVIRRRAN SÄÄTÖALGORITMISSA
VIALLINEN JOHTOJEN KYTKENTÄ
KOHINA
SÄÄTIMEN HUONONEMINEN
VÄÄRÄT SÄÄTÖPARAMETRIT
STAATTISEN PAINEEN PUUTE / YLIMÄÄRÄ
VIRHE PUHALTIMEN SÄÄDÖSSÄ
VIKA STAATTISEN PAINEEN ANTURISSA
VIRHE STAATTISEN PAINEEN SÄÄTÖ-
ALGORITMISSA
VIALLINEN JOHTOJEN KYTKENTÄ
KOHINA
SÄÄTIMEN HUONONEMINEN
VÄÄRÄT SÄÄTÖPARAMETRIT
RIITTÄMÄTÖN PUHALTIMEN KOKO
VIALLINEN SHIPIYÖRÄN ASENNUS
PUHALTIMEN VAURIOITUMINEN
VAV-PELLIN HUONONEMINEN / VAV-PELLIN TOIMI-
MOOTTORIN VAURIOITUMINEN
VAV-PELLIN SÄÄDÖN PUUTE

VAV-YKSIKKÖ ON LIIAN PIENI
 VUOTO KANAVASTA
 KONE KÄYNNISTYY LIIAN MYÖHÄÄN
 RIITTÄMÄTÖN ILMAN HAJOTTIMEN ASENTO
 SUUNNITELTUA PIENEMPI SEINIEN ERISTYSPAKSUUS
 SUUNNITELTUA SUUREMMAT IKKUNAT
 IKKUNA / OVI ON AUKI
 VARJOSTUSTA EI KÄYTETÄ RIITTÄVÄSTI

Kuvassa 7 on esitetty japanilaisten järjestelmän käyttöperiaate. Vikapuu muodostuu eri asiantuntijoilta saatavista tiedoista. Sen muodostaminen voidaan automatisoida jonkun ohjelman avulla. Vikapuun sisältämä vikatietämys syötetään sääntöinä tietokantaan, joka saa tietoa myös toiminnan seuranta-kaavioista sekä mittauksista ja ylläpitotiedoista. Viat havaitaan rakennusautomaatio- tai vikadiagnosijärjestelmien antamien hälytysten tai käyttäjien tekemien valitusten perusteella. Järjestelmä kysyy käyttökäyttäjiltä kysymyksiä ja antaa diagnooseja. Käyttökäyttäjät arvioi, ovatko vikapuuanalyysin perusteella saadut diagnoosit mahdollisia, ja tekee tarvittaessa LVI-järjestelmään korjaavat toiminnot. Prosessin jälkeen voidaan vikatietämystä päivittää.



Kuva 7. Vuokaavio diagnosoinnista vikapuuanalyysijärjestelmässä.

Ilmastointikoneen kvalitatiivinen mallipohjainen vian havaitseminen

Ilmastointikoneelle, johon kuuluvat sekoitus, lämmitys ja jäähdytys, kehitettiin kvalitatiivista lähestymistapaa hyödyntävää vikojen havaitsemista (Glass et al. 1995). Kvalitatiiviset mallit valittiin, koska usein on epäkäytännöllistä tai jopa mahdotonta määrittää järjestelmän perinteisten kvantitatiivisten mallien fyysiset parametrit.

Vianhavaitsemisstrategia pohjautuu järjestelmän jatkuvuustilan toiminnan analysointiin, jossa ilmastointikoneesta mitataan ulkolämpötila, poistolämpötila ja sisäpuhalluslämpötila. Lisäksi tiedossa ovat säätöviestit pattereille ja sekoitukseen. Nämä viestit muutetaan kvalitatiivisiksi arvoiksi. Mitattujen kvalitatiivisten säätöviestien ja vastaavien mallipohjaisten ennakoitujen arvojen välisten epätasapainojen perusteella havaitaan lämpötilamittauksiin perustuvat viat. Menetelmällä voidaan havaita yksittäisistä vioista aiheutuvat oireet.

Diagnostiset testit ilmastoinnin vikadiagnostiikassa

VTT Rakennustekniikassa kehitettiin ilmastoinnin vikadiagnoosimenetelmä, joka perustuu diagnostisten testien hyödyntämiseen sekä vikojen havainnoinnissa että niiden paikallistamisessa ja tunnistamisessa (Pakanen 1996). Diagnostinen testi hyödyntää toiminnassaan mm. automaatiojärjestelmän ohjaus- ja säätöalgoritmeja. Testejä sovellettiin todellisessa ilmastointikoneessa, johon kuuluivat lämmön talteenotto, sekoitus, esilämmitys, kostutus, jäähdytys ja jälkilämmitys.

Diagnostinen testi on joukko prosessiin kohdistuvia ohjaus- ja mittaustoimintoja. Diagnostisessa testissä prosessi aktivoidaan sopivilla input-signaaleilla sekä tarkkaillaan heräte- ja vastesignaaleja niiden normaalin toiminnan mukaiseen käyttäytymiseen nähden. Jos vertailu osoittaa epänormaaleja poikkeavuuksia, prosessin toiminnassa on todennäköisesti vikaa. Diagnostinen testi kohdistuu aina yhteen prosessiin kerrallaan.

Prosessin toiminnan malli perustuu kvalitatiivisten ja kvantitatiivisten piirteiden avulla laadittuihin loogisiin ehtoihin. Tunnistamisen aikana mitatut tiedot edustavat prosessille ominaista toimintaa, kun kaikki on kunnossa. Kun prosessin todellinen kunto ei ole tiedossa, tallennettuja tietoja verrataan vikaa havaittaessa saatuihin mittauksiin. Vian paikantaminen ja tunnistaminen perustuvat heuristiseen luokitteluun ja päättelyyn, jolloin hyödynnetään aikaisempia vikatapauksia.

Vian havaitseminen ARX-mallilla ja laajennetulla Kalman filter -algoritmilla

Yoshida et al. (1996) kehittivät kaksi automaattista äkillisten vikojen havaitsemismenetelmää, jotka molemmat perustuvat järjestelmän dynamiikan matemaattiseen malliin. Toinen on autoregressiivinen eksogeeninen (ARX) malli ja toinen perustuu laajennettuun Kalman filter -menetelmään. ARX-mallia käytettiin havaitsemaan vika ilmastoinnin VAV-yksikössä ja Kalman filter -menetelmää kokonai-

suudessa, joka muodostui jäädytyspatterista, sen vesivirran säätöventtiilistä, PI-säätimestä ja lämpötila-anturista.

Jäädytyspatterin toiminnan seuranta

Fyysisiin malleihin perustuva toiminnan seurantamenetelmä ja sen kyky havaita jäädytyspatterin venttiilin vuoto ja patterin vesipuolen tukkeutuminen kuvataan lähtessä Haves et al. (1996). Menetelmässä seurataan patterin konduktanssia ja vuotovirtausta. Nämä suureet voitaisiin muuttaa konkreettisimmiksi muuttujiksi, kuten patterin tehon alenemiseksi tai energiankulutuksen suurenemiseksi. Fyysisten mallien parametrit estimoitiin RBF-mallilla (Radial Basis Function Model).

Ilmastointikoneen vian havaitseminen residuaalien ja parametrien rekursiivisen identifioinnin avulla

Lee et al. (1996a) ovat tutkineet residuaalien ja parametrien identifioinnin käyttöä ilmastointikoneen vian havaitsemisessa. Ilmastointikone koostui sekoituksesta, jäädytyksestä ja puhaltimista. Tutkimuksessa järjestelmässä saattoi olla joko laite- tai anturivika. Laitevika oli joko tulo- tai poistopuhaltimissa tai jäädytyspatterin pumpussa tai kolmitieventtiilissä. Anturivika oli lämpötila- tai paineantureissa tai ilmavirtojen mittauksissa. Järjestelmästä tarkasteltiin seitsemää residuaalia. Parametrien identifioinnissa käytettiin ARMAX- ja ARX-malleja MISO- (multi-input/single-output) ja SISO-rakenteita (single-input/single-output) estimoimaan malliparametrit rekursiivisesti Kalman filter -menetelmän avulla.

Puhallintehon käyttö vian havaitsemisessa ja ilmanvaihtojärjestelmien toiminnan seurannassa

Norford & Little (1993) esittävät vaihtoehtoja ilmanvaihtojärjestelmän puhallintehon käyttöön vian havaitsemisessa ja toiminnan seurannassa. Puhallintehon arvioimiseksi on esitetty kolme menetelmää.

Kun puhallintehoa ennustetaan lämpökuormien ja sisäänpuhallusilman lämpötilan asetusarvon funktiona, tarvitaan toistettuja käyräsovituksia optimisäätöasetusten läheisyydessä. Lisäksi menetelmää rajaa rakennusdynamiikka, minkä seurauksena tehomittaukset jättävät asetusarvojen muutoksista. Menetelmä tarvitsee myös sähköistä alamittarointia erottaakseen havaitut viat LI-järjestelmän sähkötehonluennasta.

Puhallintehon ennustamista ilmavirran funktiona ei voi käyttää optimointiin, mutta se tarjoaa luotettavamman yhteyden vian havaitsemiseen ilman tarvetta ylimääräisiin käyräsovituksiin optimisäätöasetusten läheisyydessä. Menetelmää voidaan käyttää vian havaitsemiseen, kun optimiasetukset on saavutettu. Staattisen paineen muutokset rajoittavat menetelmää, jos puhallintehoa ei mallinneta sekä virtauksen että paineen funktiona. Menetelmällä ei voi havaita vikoja, jotka liittyvät sisäänpuhallusilman lämpötilaan.

Puhallintehon ennustaminen moottorin pyörimisnopeuden säätösignaalin funktiona määrittää kiinteän korrelaation, joka on suhteellisen immuuni painevaihteluille, mutta ei kykene havaitsemaan useimpia ilmanvaihtojärjestelmän vikoja. Kuitenkin tätä yhteyttä voidaan käyttää erillisen nopeuden säätösignaalin korrelaation kanssa poistamaan sähköisen alamittaroinnin tarve edellyttäen, että yksittäinen tai harvinainen teho-nopeus-korrelaatio voidaan määrittää aikoina, jolloin LI-järjestelmän teho muuttuu ainoastaan yksittäisen komponentin vaikutuksesta.

Ilmastoinnin lämmityspatterin vian havaitseminen

Ruotsissa on tutkittu ilmastointikoneen lämmityspatterin vian havaitsemista ja vikadiagnoosia fyysisen mallin parametrien estimoinnilla (Olsson et al. 1996). Tarkasteluissa olivat mukana patteri, patterin ja lämpötila-antureiden sijaintien väliset putkistot sekä säätöventtiili. Tarkasteltuja päätekijöitä olivat lämpötilahyötysuhde, pumpun vesivirta ja kolmitieventtiilin toiminta (vuodot) sekä ilman lämpötilan säätö. Tutkimuksessa todettiin mm., että dynaamisten ominaisuuksien ratkaisemiseksi näytteenottoväli saa olla enintään $\frac{1}{4}$ järjestelmän lyhyimmästä merkityksellisestä aikavakiosta.

Vianhakuavaruuden käyttö ilmastointijärjestelmän vikadiagnostiikassa

Jiang & Zhou (1996) esittelevät vianhakuavaruuden (Fault Direction Space — FDS) käyttöä ilmastointikoneen vian havaitsemisessa ja diagnostisoinnissa. FDS-menetelmää käytettäessä vältetään järjestelmän mallin identifioinnilta. Avaruus muodostetaan ominaisuusparametreista, jotka rakennetaan mitatuista tiedoista. Ominaisuusparametrit valitaan siten, että ne voidaan ilmaista komponenttien rakenteen avulla ja että ne ovat vakioita normaalin, ei-viallisen toiminnan aikana. Kun suuri muutos ominaisuusparametreissa havaitaan, komponenteissa on tapahtunut vika.

Neuraaliverkot ilmastointikoneen vikadiagnoosissa

Lee et al. (1996b) kuvaavat kaksikerroksisen neuraaliverkon soveltamista ilmastointikoneen vikadiagnoosiin ja keskittyvät erityisesti anturivikojen havaitsemiseen. Neuraaliverkon ensimmäinen kerros opetettiin tunnistamaan alajärjestelmä, jossa vika tapahtuu. Toinen kerros opetettiin määrittämään alajärjestelmän vian spesifinen syy. Sisäänpuhallusilman lämpötilalle johdettiin regressioyhtälö estimoimaan lämpötilaa, kun anturimittaus todetaan virheelliseksi. Estimoitua arvoa käytetään vikadiagnoosissa ja palautetietona säätötarkoituksiin. Regressioyhtälöä ja neuraaliverkkototeutusta testattiin simuloituilla tiedoilla.

Fysikaalisten mallien ja neuraaliverkkojen käyttö jäähdytyspatterin vian havaitsemisessa

Dumitru & Marchio (1996) tutkivat jäähdytyspatterin ripojen likaantumisen ja putkiston korroosion (materiaalin lohkeilemisen) havaitsemista fysikaalisin mallien ja neuraaliverkoin. Tutkimuksessa määritettiin tarkasteltavat parametrit, poikkeamarajat (rajat, joiden ylittyessä vika on mahdollinen), näytteenottovälit ja arvot energiankulutuksen kasvulle. Lähestymistapoja testattiin simuloituilla viallisilla ja ei-viallisilla tiedoilla.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Järjestelmän suorituskykyvaatimuksia analysoimalla selvitetään, millaisia kriteerejä järjestelmän toiminnan tulisi täyttää. Näiden perusteella määritetään, millaisia vikoja ja toimintahäiriöitä tulisi seurata ja pyrkiä havaitsemaan. Tässä projektissa analysoitiin yleisesti ilmastointikoneen suorituskykyvaatimuksia. Seuraavaksi tulisi määrittellä, miten suorituskykymittarit määritetään tuotteen eri elinkaarivaiheissa, jotta suorituskykytekijöiden toteutumista voitaisiin seurata vaiheittain järjestelmän pöytätestauksessa suunnitelmia arvioitaessa, tehdastestauksessa, käyttöönottossa ja virityksessä sekä valvonnassa ja seurannassa. Tätä varten voi olla tarpeen määrittellä suorituskykyvaatimukset erikseen ilmastointikoneen kullekin eri komponentille.

Suorituskykyvaatimusten toteutumisen seurannassa voidaan käyttää apuna vikadiagnostiikkamenetelmiä. Esimerkiksi käyttövarmuusanalyysin perusteella laadittua järjestelmän vikapuuta voidaan käyttää paikannettaessa järjestelmään ilmaantunutta vikaa (top-down-lähestymistapa) ja ennustettaessa seurauksia, joita tietyn yksittäisen prosessiosan vikaantuminen voi aiheuttaa koko järjestelmälle (bottom-up-lähestymistapa). Suorituskykyvaatimukset ovat vikapuun syöttötietoja.

Vikadiagnoosimenetelmien toimivuus voidaan luotettavasti todentaa vasta sovellettaessa niitä todellisiin järjestelmiin käytännön olosuhteissa tai käytäntöä vastaavissa testiolosuhteissa. Täten menetelmäkehityksessä on erittäin tärkeää ottaa huomioon niiden sovellettavuus käytäntöön. Tämä tarkoittaa esimerkiksi, että instrumentointikustannusten minimoimiseksi pyritään käyttämään vain niitä mittausteknikkoja, joita järjestelmästä tehdään muutenkin. Lisäksi vikadiagnoosimenetelmien tulisi olla sellaisia, etteivät ne vaadi poikkeuksellisen paljon laskentatehoa tai muita erikoisvaatimuksia tietokonelaitteistoilta tai -ohjelmistoilta. Vikadiagnoosimenetelmien hyödynnettävyyden kannalta on edullista, että menetelmät ovat yksinkertaisia, menetelmäkuvaukset selkeitä ja että menetelmät ovat saatavissa algoritmimuodossa. Menetelmäkehityksen tulisi keskittyä järjestelmän tärkeisiin komponentteihin ja niiden tyypillisiin vikoihin.

LÄHTEET

Anon. 1987. Ilmanvaihdon lämmöntalteenoton käyttö- ja suunnittelutietoa teollisuudelle. 2. tarkistettu painos. Helsinki: Valtion painatuskeskus. 69 s. + liitt. (Neste B1). ISBN 951-9063-2-7

Batterman, S. 1996. Indoor Air Pollutants and Their Behavior. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, LVI-tekniikan lisensiaattiseminaari 9.-13.12.1996. (Luentomoniste). 200 s.

Dumitru, R. & Marchio, D. 1996. Fault Identification in Air Handling Units Using Physical Models and Neural Networks. Teoksessa: Hyvärinen, J. (toim.) Real Time Simulation of HVAC Systems for Building Optimization, Fault Detection and Diagnosis. Technical Papers of IEA Annex 25. Helsinki: Oy Edita Ab. S. 641 - 648. ISBN 952-5004-11-2

Glass, A.S., Gruber, P., Roos, M. & Tödtli, J. 1995. Qualitative Model-Based Fault Detection in Air-Handling Units. IEEE Control Systems Magazine, vol. 15, issue 4, s. 11 - 22.

Haves, P., Salisbury, T. I. & Wright, J. A. 1996. Condition Monitoring in HVAC Subsystems Using First Principles Models. ASHRAE Transactions. Vol. 102, Part 1, s. 519 - 527.

IEC 1025. 1990. International standard on fault tree analysis (FTA). International Electrotechnical Commission. 39 s.

Jiang, Y. & Zhou, Q. 1996. Fault Direction Space plus If-Then Method for On-Line FDD in Air-Conditioning System. Teoksessa: Hyvärinen, J. (toim.) Real Time Simulation of HVAC Systems for Building Optimization, Fault Detection and Diagnosis. Technical Papers of IEA Annex 25. Helsinki: Oy Edita Ab. S. 525 - 536. ISBN 952-5004-11-2

Kelly, G. E. 1991. Common faults in air conditioning systems. 2 s. (IEA Annex 25 working paper).

Lee, W.-Y., Park, C. & Kelly, G. E. 1996a. Fault Detection in an Air-Handling Unit Using Residual and Recursive Parameter Identification Methods. ASHRAE Transactions. Vol. 102, Part 1, s. 528 - 539.

Lee, W.-Y., Shin, D.-R. & House, J. M. 1996b. Fault Diagnosis and Temperature Sensor Recovery for an Air-Handling Unit. Teoksessa: Hyvärinen, J. (toim.) Real Time Simulation of HVAC Systems for Building Optimization, Fault Detection and Diagnosis. Technical Papers of IEA Annex 25. Helsinki: Oy Edita Ab. S. 613 - 640. ISBN 952-5004-11-2

Leskinen, S., Luostarinen, J. & Selkämä, J. 1989. Ilmastointikoneen tiiviyyden merkitys. LVI-lehti 6-7. s. 10 - 16.

Norford, L. K. & Little, R. D. 1993. Fault Detection and Load Monitoring in Ventilation Systems. ASHRAE Transactions. Vol. 99, Part 1.

Olsson, L. G., Isakson, P. & Blomberg, P. 1996. FDD Tests on a Coil Subsystem Using Parameter Estimation in the Physical Model Approach. Teoksessa: Hyvärinen, J. (toim.) Real Time Simulation of HVAC Systems for Building Optimization, Fault Detection and Diagnosis. Technical Papers of IEA Annex 25. Helsinki: Oy Edita Ab. S. 437 - 457. ISBN 952-5004-11-2

Pakanen, J. 1996. Detecting and isolating faults of an air-handling unit using online diagnostic tests. Espoo: VTT Building Technology, Building Physics, Building Services and Fire Technology. 52 s. (VTT Publications 284). ISBN 951-38-4942-2

Shemeikka, J., Kosonen, R., Hoving, P., Laitila, P., Pihala, H. & Laine, T. 1996. Rakennuksen sähköenergiankulutuksen tavoitearvot. Espoo: VTT Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka, talo- ja palotekniikka. 123 s. + liitt. 9 s. (VTT Tiedotteita 1756). ISBN 951-38-4911-2

SFS 3750. 1986. Luotettavuussanasto. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. 56 s.

SFS 5768. 1993. Ilmastointijärjestelmien säädön toiminnalle asetettavat vaatimukset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. 6 s.

Ympäristöministeriö. 1987. Suomen rakentamismääräyskokoelma osa D2. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Määräykset ja ohjeet 1987. 21 s.

Yoshida, H., Iwami, T., Yuzawa, H. & Suzuki, M. 1996. Typical faults of Air-Conditioning Systems and Fault Detection by ARX Model and Extended Kalman Filter. ASHRAE Transactions. Vol. 102, Part 1, s. 557 - 564.

Yuzawa, H., Suzuki, M., Takei, H. & Yoshida, H. 1996. The FTA System For Application To HVAC Systems. Teoksessa: Hyvärinen, J. (toim.) Real Time Simulation of HVAC Systems for Building Optimization, Fault Detection and Diagnosis. Technical Papers of IEA Annex 25. Helsinki: Oy Edita Ab. S. 129 - 144. ISBN 952-5004-11-2