

Ilkka Loukkola

OHIVIRTAUSMOOTTORIT JA NIIDEN KUNNONVALVONTA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Teemu Mäkiäho
Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Ilkka Loukkola
Ohivirtausmoottorit ja niiden kunnonvalvonta
Condition monitoring of turbofan engines
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2021

Ohivirtausmoottori on nykypäivänä lentokoneissa hyvin laajasti käytetty kaasuturbiinimoottorityyppi. Erityisesti korkean ohivirtaussuhteen ohivirtausmoottoreita käytetään nykypäivänä lähes jokaisessa suuressa kaupallisessa lentokoneessa. Ohivirtausmoottoreiden tekninen kehitys on ollut suurta viime vuosikymmenten aikana ja niiden kunnossapito on muuttunut samalla. Tässä kandidaatintyössä tutkitaan modernien ohivirtausmoottoreiden kunnonvalvontaa. Työn tavoitteena on selvittää, kuinka ohivirtausmoottoreiden kunnonvalvontaa suoritetaan ja kuinka sitä hyödynnetään nykypäivänä huoltopäätösten teossa ja huoltojen suunnittelussa. Työssä käytettävä tutkimusmenetelmä on kirjallisuustutkimus.

Tutkimuksessa havaittiin, että erityisesti sensoreilla suoritettavan kunnonvalvonnan merkitys on nykypäivänä suuressa roolissa ohivirtausmoottoreiden kunnossapidossa. Inhimilliset tekijät eivät vaikuta sensoreilta saatavan kunnonvalvontatiedon luotettavuuteen, ja sensorit myös mahdollistavat jatkuvan kunnonvalvontatiedon saamisen. Nykypäivänä sensoreilta saatavaa kunnonvalvontatietoa siirretään langattomasti maahan analysoitavaksi lentojen aikana. Ohivirtausmoottorin toiminnan kannalta kriittisiä kohteita ja suureita valvotaan jatkuvasti sensoreilla. Näitä ovat muun muassa palokaasun lämpötila sekä ahdinten pyörimisnopeudet.

Ohivirtausmoottoreiden kunnossapitoa suoritetaan nykypäivänä pääsääntöisesti predikttiivisen kunnossapitostrategian mukaan. Predikttiivisen kunnossapitostrategian keskeisenä ajatuksena on valvoa ohivirtausmoottoria jatkuvasti ja suorittaa huollot moottorin kunnon perusteella ennen vikaantumista. Sensoreilta saatavan reaaliaikaisen kunnonvalvontatiedon perusteella voidaan tehdä huoltoihin liittyviä päätöksiä lentokoneen ollessa ilmassa. Näin voidaan säästää huoltoihin kuluva aikaa ja pienentää kustannuksia. Kunnonvalvontatietoa käytetään myös huoltojen optimoimiseen. Kunnonvalvontatietoa voidaan myös käyttää erilaisten mallien kehittämiseen, joilla voidaan ennustaa moottorin jäljellä olevan käyttöikä.

Kunnonvalvonnalla on suuri merkitys ohivirtausmoottoreiden operointiin nykypäivänä. Kunnonvalvonnan avulla voidaan välttää kalliita vikaantumisia ja tehdä päätöksiä huoltojen sisältöihin ja ajankohtiin liittyen.

Avainsanat: Ohivirtausmoottori, kunnonvalvonta, predikttiivinen huolto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
2. OHIVIRTAUSMOOTTORI	3
2.1 Rakenne	3
2.2 Toiminta	5
2.3 Käyttökohteet.....	7
3. OHIVIRTAUSMOOTTOREIDEN KUNNONVALVONTA	10
3.1 Käytetyt menetelmät	10
3.2 Tyypillisiä valvottavia kohteita ja suureita	12
3.2.1 Polttoainejärjestelmä	12
3.2.2 Voitelujärjestelmä	13
3.2.3 Värähtely.....	14
3.2.4 Ahdinten pyörimisnopeudet	14
3.2.5 Palokaasut	15
3.3 Sensoreilta saatavan kunnonvalvontatiedon siirtäminen.....	16
4. SENSOREILTA SAATAVAN KUNNONVALVONTATIEDON KÄYTTÖ	17
4.1 Kunnossapitostrategiat	17
4.2 Reaaliaikainen kunnonvalvontatieto	19
4.3 Huoltojen optimointi	20
5. YHTEENVETO	24
LÄHTEET.....	26

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Kaksiakselisen ohivirtausmoottorin pääkomponentit sekä puhallinkanava (muokattu Aainsqatsi 2008)</i>	<i>4</i>
Kuva 2.	<i>Kaasujen nopeus-, paine- ja lämpötilavaihtelut perusmoottorin eri toimintavaiheissa (muokattu Dahl 2007; mukailten Koivisto & Jokinen 2008, s. 37).....</i>	<i>6</i>
Kuva 3.	<i>Turbiinimoottorityyppien propulsiiviset hyötysuhteet (mukailten Koivisto & Jokinen 2008, s. 76; Wild 2018, luku 12.8.1)</i>	<i>8</i>
Kuva 4.	<i>International Aero Engines V2500 -ohivirtausmoottorin korkeapaineturbiinin siivessä havaittavia poikkeamia (muokattu Cleynen 2013).....</i>	<i>11</i>
Kuva 5.	<i>Ohivirtausmoottorin vikaantumisen käyttäytyminen (mukailten Ugechi et al. 2009, s. 178; muokattu Malhotra 2021)</i>	<i>18</i>
Kuva 6.	<i>Ohivirtausmoottorin huoltojen optimointi (mukailten Willingham 2016).....</i>	<i>20</i>
Kuva 7.	<i>Huoltotoimenpiteiden aikataulut ja suorittaminen jäljellä olevan käyttöiän ennustavan mallin avulla (Stamboliska et al. 2015, s. 15).....</i>	<i>22</i>

1. JOHDANTO

Kaupallinen eli maksua vastaan suoritettava ilmailu on kasvanut valtavasti viime vuosina ja se tulee kasvamaan tulevaisuudessa entisestään. Ilmailu tarjoaa huomattavia etuja muihin kuljetus- ja matkustuskeinoihin verrattuna, mutta sivuvaikutuksena ovat korkeat päästöt. Kaupallisen ilmailun kasvun seurauksena myös lentokoneiden moottoreiden tekninen kehitys on ollut suurta, ja se on keskittynyt erityisesti päästöjen vähentämiseen sekä kustannusten minimointiin. (Maclsaac & Langton 2011, s. 228) Nykypäivänä kaupallisten lentokoneiden tehonlähteenä käytetään pääsääntöisesti ohivirtausmoottoreita, joilla on korkea ohivirtaussuhde (Wild 2018, luku 11.2.2.1). Korkean ohivirtaussuhteen ohivirtausmoottori on tehokkain kaasuturbiinimoottorityyppi nopeuksilla, joilla useimmat kaupalliset lentokoneet operoivat. Niiden käytön suosioon vaikuttavia ominaisuuksia ovat myös vähäpäästöisyys sekä matala melutaso muihin kaasuturbiinimoottorityyppeihin verrattuna. (Crane *et al.* 2018, s. 377; Wild 2018, luku 11.2.2) Perinteisten kaasuturbiinimoottoreilla varustettujen lentokoneiden korvaajaksi on suunniteltu muun muassa vedyllä ja sähköllä toimivia vaihtoehtoja, mutta niiden kantomatkat sekä rahtikapasiteetit ovat vielä nykypäivänä huomattavan heikot. Tämän vuoksi ohivirtausmoottorein varustettuja lentokoneita tullaan käyttämään vielä pitkään kaupallisessa lentoliikenteessä ja niiden kehitystä tullaan jatkamaan entisestään (Maclsaac & Langton 2011, s. 228).

Kunnonvalvonnalla on hyvin suuri rooli nykypäivän kaupallisessa ilmailussa, koska turvallisuustason tulee olla korkea. Myös huoltoihin ja tarkastuksiin varatut ajat ovat hyvin rajallisia. Kunnonvalvontaa hyödynnetään hyvin paljon kaupallisten lentokoneiden moottoreiden huoltojen suunnittelussa, mutta myös lentoturvallisuuteen liittyvien päätösten teossa. Kunnonvalvontatiedon perusteella optimoitujen huoltojen avulla saadaan vähennettyä huoltokustannuksia ja kasvatettua lentokoneiden taivaalla viettämää aikaa. Kunnonvalvontatiedon avulla saadaan myös pienennettyä päästöjä ja polttoaineen kulutusta. (Rolls Royce 2015, s. 199) Nykypäivänä sensoreilla on erittäin tärkeä rooli ohivirtausmoottoreiden kunnonvalvonnassa niiltä jatkuvasti saatavan luotettavan kunnonvalvontatiedon vuoksi.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää, millä menetelmillä modernien ohivirtausmoottoreiden kunnonvalvontaa suoritetaan sekä mitkä ovat tarkkailtavat kunnonvalvontakohteet. Työssä selvitetään myös, kuinka ohivirtausmoottoreiden sensoreilta saa-

tavaa kunnonvalvontatietoa käytetään huolto-ohjelmien optimoimiseen ja kuinka huoltopäätöksiä tehdään reaaliaikaisen kunnonvalvontatiedon perusteella. Työn keskeiset tutkimuskysymykset ovat:

- Kuinka ohivirtausmoottoreiden kunnonvalvontaa suoritetaan nykypäivänä?
- Kuinka sensoreilta saatavaa kunnonvalvontatietoa käytetään huoltojen suunnittelussa?

Työssä käsitellään moderneja ohivirtausturbiinimoottoreita, joilla on korkea ohivirtausuhde. Työssä ei käsitellä kustannuksia. Julkaisujen julkaisuajankohta on rajattu vuosille 2000–2021. Työ perustuu teoriakirjallisuuden sekä aiemman tutkimuksen analysointiin, joten käytettävä tutkimusmenetelmä on kirjallisuustutkimus.

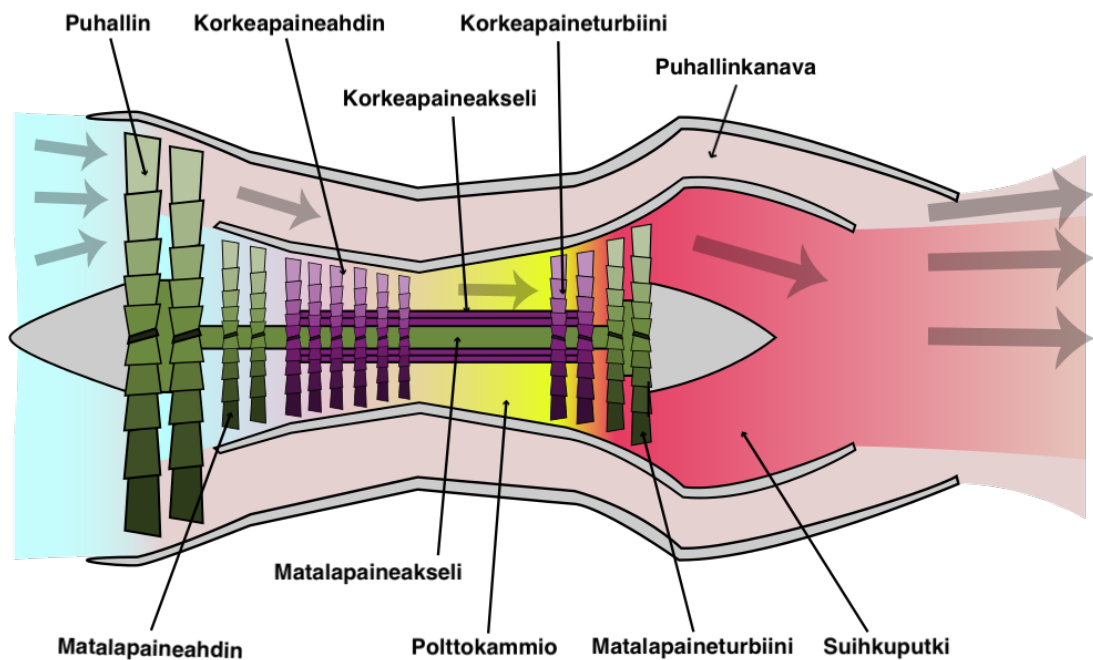
Tämän työ on jaettu viiteen lukuun, joista toisessa luvussa kerrotaan ohivirtausmoottorin komponenteista, toimintaperiaatteesta, eduista ja käyttökohteista. Tämän jälkeen käsitellään ohivirtausmoottoreiden kunnonvalvontaa, muun muassa tyypillisiä valvottavia kohteita ja suureita, käytettyjä kunnonvalvontamenetelmiä sekä kunnonvalvontatiedon siirtämistä. Työn neljännessä luvussa kerrotaan sensoreilta saatavan kunnonvalvontatiedon käytöstä ohivirtausmoottoreiden kunnossapidon näkökulmasta, ja viidennessä luvussa esitetään päätelmiä ja pohdintoja työhön liittyen sekä arvioidaan tutkielman onnistumista.

2. OHIVIRTAUSMOOTTORI

Ohivirtausmoottori on lentokoneissa yleisesti käytetty kaasuturbiinimoottorityyppi, jota voidaan pitää suoran suihkumoottorin ja potkuriturbiinimoottorin välimuotona (Wild 2018, luku 11.2.2). Ohivirtausmoottorit tuottavat työntövoimansa perinteisellä suoralla suihkumoottorilla, eli niin sanotulla perusmoottorilla sekä puhaltimella, minkä vuoksi niitä kutsutaan myös puhallinmoottoreiksi. Ne ohjaavat nimensä mukaisesti osan moottoriin tulevasta ilmasta perusmoottorin ohitse ja kyseinen ilmassa saa nopeuden lisäyksensä ainoastaan puhaltimella. (Koivisto & Jokinen 2008, s. 65–66; Rolls Royce 2015, s. 16) Nykypäivän modernit ohivirtausmoottorit tuottavat suurimman osan, jopa 85 %, työntövoimastaan puhaltimella eivätkä itse perusmoottorilla (Koivisto & Jokinen 2008, s. 66; Wild 2018, luku 11.2.2).

2.1 Rakenne

Ohivirtausmoottori koostuu viidestä pääkomponentista: puhaltimesta sekä perusmoottorin komponenteista eli ahtimesta, polttokammioista, turbiinista ja suihkuputkesta. Puhallin, ahdin ja turbiini ovat kiinnitettynä toisiinsa ahtimen käyttöakselin välityksellä. (Koivisto & Jokinen 2008, s. 63–66; Linke-Diesinger 2008, s. 1; Crane *et al.* 2018, s. 377–378; Wild 2018, luku 11.2) Näiden pääkomponenttien lisäksi ohivirtausmoottorin ympärille tulee toiminnan kannalta välttämättömien järjestelmien, muun muassa polttoaine- ja voitelujärjestelmän, komponentteja sekä muita kiinteitä rakenteita (Koivisto & Jokinen 2008, s. 91; Linke-Diesinger 2008, s. 2–3). Kiinteisiin rakenteisiin kuuluvat muun muassa ohivirtausmoottorin suojalevyt ja imurengas, jonka tehtävä on ohjata ilmavirta moottorin ahtimelle mahdollisimman häiriöttömästi (Koivisto & Jokinen 2008, s. 91–93; Rolls Royce 2015, s. 232).



Kuva 1. Kaksiakselisen ohivirtausmoottorin pääkomponentit sekä puhallinkanava (muokattu Aainsqatsi 2008)

Kuvassa 1 on esitetty tyypillisen kaksiakselisen ohivirtausmoottorin pääkomponentit sekä puhallinkanava, jonka suojalevyt muodostavat yleensä perusmoottorin ympärille (Koivisto & Jokinen 2008, s. 92). Useimmat moderneista ohivirtausmoottoreista ovat kaksiakselisia, eli niissä on erikseen korkea- ja matalapaineahtimet sekä -turbiinit. Korkeapaineahdin ja -turbiini on kiinnitetty toisiinsa korkeapaineakselin välityksellä, ja matalapaineahdin, -turbiini sekä puhallin on kiinnitetty toisiinsa matalapaineakselilla. (Rolls Royce 2015, s. 19) Puhallin on sijoitettu yleensä ohivirtausmoottorin eteen, jolloin se toimii osana matalapaineahdinta, mutta se voi olla myös sijoitettuna joissain ohivirtausmoottoreissa moottorin taakse (Koivisto & Jokinen 2008, s. 65–67; Wild 2018, luku 11.2.2).

Jotkut lentomoottorivalmistajat, muun muassa Rolls Royce, suosivat kolmiakselista ohivirtausmoottorirakennetta. Kolmiakselisissa ohivirtausmoottoreissa on edellä mainittujen komponenttien lisäksi keskipaineahdin ja -turbiini, jotka on kiinnitetty toisiinsa keskipaineakselin välityksellä. (Rolls Royce 2015, s. 19) Kolmiakselisen ohivirtausmoottorin matalapaineturbiini on yleensä kiinnitetty ainoastaan puhaltimeen, jolloin ensimmäinen perusmoottorin ahdinvaihe ja puhallin pyörivät eri akseleiden välityksellä (Koivisto & Jokinen 2008, s. 66; Rolls Royce 2015, s. 19). Tällöin käyttöakseleiden pyörimisnopeu-

det voidaan optimoida tarkemmin, joka mahdollistaa yhtä suuren työntövoiman tuottamisen kaksiakselisia ohivirtausmoottoreita lyhyemmällä ja kevyemmällä moottorilla (Rolls Royce 2015, s. 19).

2.2 Toiminta

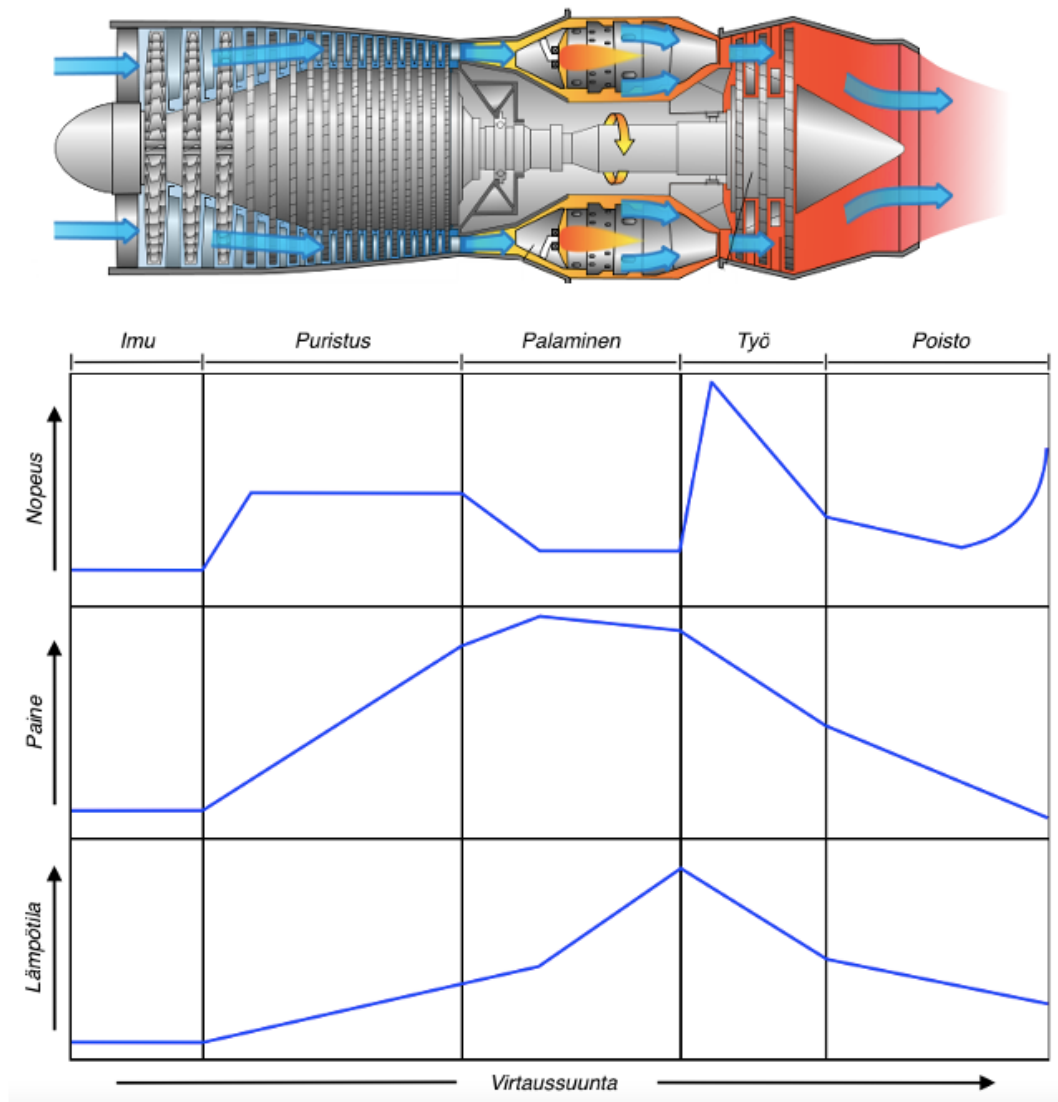
Ohivirtausmoottorin toimintaperiaate on samanlainen kuin perinteisellä suoralla suihku-moottorilla. Ainoana erona on se, että myös puhallin tuottaa työntövoimaa perusmoottorin lisäksi, joten virtauksia on kaksi (Koivisto & Jokinen 2008, s. 46–47; Crane *et al.* 2018, s. 377). Ohivirtausmoottorin perusmoottorin toiminta koostuu viidestä toimintavaiheesta:

1. imu
2. puristus
3. palaminen
4. työ
5. poisto (Koivisto & Jokinen 2008, s. 35).

Imuvaiheessa puhallin ja ahdin imevät imurenkaan ohjaamaa ilmaa ohivirtausmoottorin perusmoottoriin, jossa ahtimet puristavat sitä (Koivisto & Jokinen 2008, s. 36–37). Ahdinten tehtävänä onkin ohivirtausmoottorin puristusvaiheessa kasvattaa niiden läpi virtaavan ilman painetta, ja puhallin toimii usein myös osana ahdinta (Rolls Royce 2015, s. 18). Ahtimen puristaessa sisään virtaavaa ilmaa paineenkasvun lisäksi myös ilman nopeus ja lämpötila kasvavat (Koivisto & Jokinen 2008, s. 37; Rolls Royce 2015, s. 96–97). Tämä on havaittavissa kuvasta 2, jossa on esitetty perusmoottorissa virtaavien kaasujen nopeus-, paine- ja lämpötilavaihtelut eri toimintavaiheissa.

Seuraavana siirrytään palamisvaiheeseen, jossa ahdinten ylipaineeseen puristama ilma virtaa polttokammioon. Polttokammiossa ilmaa ohjataan vaihteittain polttokammion lieskaputkiin, joissa palaminen tapahtuu (Koivisto & Jokinen 2008, s. 142; Rolls Royce 2015, s. 114–119; Wild 2018, luku 12.4). Ensin noin neljäsosa ilmasta ohjataan polttokammioon, jossa sen sekaan lisätään polttoainetta ja seos sytytetään (Koivisto & Jokinen 2008, s. 38, 146–147). Palamisen seurauksena syntyy palokaasuja, ja kuten kuvasta 2 nähdään, niiden tilavuus ja lämpötila kasvavat (Koivisto & Jokinen 2008, s. 37; Wild 2018, luku 12.4). Sytytettyyn seokseen lisätään tämän jälkeen lisää ilmaa, jotta palokaasujen lämpötila laskee eikä ole liian korkea palokaasujen virratessa polttokammioista eteenpäin (Koivisto & Jokinen 2008, s. 146; Rolls Royce 2015, s. 116). Ilman lisäämisellä vaihteittain lieskaputkeen on myös suuri merkitys ohivirtausmoottorin päästöjen vähentämisessä (Rolls Royce 2015, s. 126).

Palamisen jälkeen laajenneet kaasut johdetaan perusmoottorin turbiineille työvaihetta varten. Turbiinit saavat käyttövoimansa kaasujen paine- ja lämpöenergian muuttuessa turbiineja pyörittäväksi liike-energiaksi. Ohivirtausmoottorin turbiinit tuottavat perusmoottorin käyttövoiman, eli ne pyörittävät ahtimia ja puhallinta akselien välityksellä. (Koivisto & Jokinen 2008, s. 156; Rolls Royce 2015, s. 134; Wild 2018, luku 12.4) Lopulta kaasut johdetaan turbiinilta suihkupuutkeen, josta ne virtaavat moottorista ulos suurella nopeudella ympäröivän ilman sekaan ja tuottavat osan moottorin työntövoimasta (Koivisto & Jokinen 2008, s. 176–177; Wild 2018, luku 12.4). Tätä kutsutaan perusmoottorin virtaukseksi (Koivisto & Jokinen 2008, s. 46–47).



Kuva 2. Kaasujen nopeus-, paine- ja lämpötilavaihtelut perusmoottorin eri toimintavaiheissa (muokattu Dahl 2007; mukailen Koivisto & Jokinen 2008, s. 37)

Loput ohivirtausmoottorin työntövoimasta tuotetaan turbiinin pyörittämällä puhaltimella samoin kuten potkurikoneissa, eli puhaltimen lavat antavat niiden läpi kulkemalle ilma-

massalle lisänopeutta (Wild 2018, luku 11.2.2). Osa puhaltimen läpi virranneesta ilmassasta ohjataan puhallinkanavaan, jolloin tämä ilmassa ei kulje lainkaan perusmoottorin läpi. Puhallinkanavasta ilmassa voidaan moottorin rakenteesta riippuen joko ohjata suoraan moottorista ulos puhaltimen suihkusuuttimen kautta tai sekoittaa perusmoottorin kaasujen sekaan perusmoottorin suihkupuutuksessa (Koivisto & Jokinen 2008, s. 65–66; Rolls Royce 2015, s. 231). Puhallinkanavasta tulevaa ilmapvirtausta kutsutaan puhallinvirtaukseksi (Koivisto & Jokinen 2008, s. 46–47).

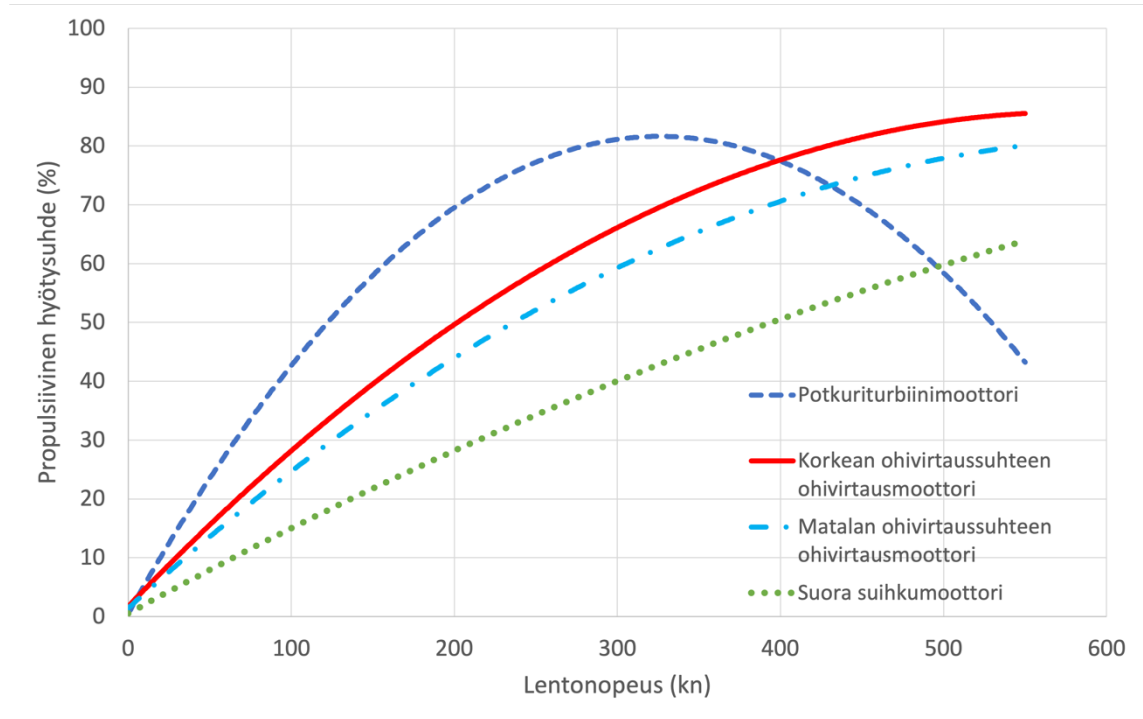
Ohivirtausmoottorit voidaan jakaa niiden ohivirtaussuhteen mukaan matalan, keskiuuren ja korkean ohivirtaussuhteen moottoreihin (Koivisto & Jokinen 2008, s. 66; Crane *et al.* 2018, s. 377). Ohivirtaussuhde tarkoittaa ohivirtausmoottorin puhallinkanavan ja perusmoottorin läpi virtaavan ilmassan suhdetta (Koivisto & Jokinen 2008, s. 73). Esimerkiksi ohivirtaussuhde 5:1 tarkoittaa siis sitä, että jokaista perusmoottorin lävitse virrannutta ilmakiloa kohden ohivirtauskanavassa virtaa viisi kiloa ilmaa. Näille luokille ei ole määritelty virallisia rajoja, mutta matalan ja keskiuuren ohivirtaussuhteen rajana pidetään yleensä ohivirtaussuhdetta 2:1. Keskiuuren ja korkean ohivirtaussuhteen rajana voidaan pitää ohivirtaussuhdetta 4:1. (Koivisto & Jokinen 2008, s. 66; Crane *et al.* 2018, s. 377)

Osalla nykypäivän uusimmista ohivirtausmoottoreista on yli 10:1 ohivirtaussuhde, ja niitä kutsutaan erittäin korkean ohivirtaussuhteen ohivirtausmoottoreiksi (Wild 2018, luku 11.2.2.1). Esimerkiksi Airbus A320neo -sarjan matkustajalentokoneissa käytetään CFM LEAP-1A -ohivirtausmoottoreita, joiden ohivirtaussuhde on 11:1, sekä Pratt & Whitney PW1000G -ohivirtausmoottoreita, joiden ohivirtaussuhde on 12:1 (CFM International 2017; Pratt & Whitney 2018). Erittäin korkeat ohivirtaussuhteet on pystytty saavuttamaan muun muassa käyttämällä kehittyntä siipitekniikkaa puhaltimen siipien suunnittelussa (Wild 2018, luku 11.2.2.1).

2.3 Käyttökohteet

Ohivirtausmoottori on nykypäivänä hyvin laajasti lentokoneissa käytetty turbiinimoottorityyppi. Lähes jokaisessa suuressa lentokoneessa, jota käytetään kaupallisessa lentoliikenteessä, on korkean ohivirtaussuhteen ohivirtausmoottorit (Crane *et al.* 2018, s. 377; Wild 2018, luku 11.2.2.1). Kaupallinen lentoliikenne tarkoittaa toimintaa, jossa jotain kuljetetaan ilma-aluksella maksua vastaan, eli tyypillisesti rahtia tai matkustajia. Suurelle lentokoneelle ei ole määritetty virallista rajaa, mutta sillä tarkoitetaan matkustajaliikenteessä usein lentokonetta, jossa on vähintään sata matkustajapaikkaa. Esimerkiksi Embraer E190 sekä Airbus A220-100 -matkustajalentokoneissa on noin sata matkustajapaikkaa ja niissä käytetään korkean ohivirtaussuhteen ohivirtausmoottoreita (Embraer

2017; Airbus 2021). Suuret kaupallisen lentoliikenteen lentokoneet operoivat tyypillisesti nopeusalueella 430–520 solmua eli noin 800–960 km/h. Korkean ohivirtaussuhteen ohivirtausmoottorit ovat polttoainetehokkain moottorityyppi kyseisellä nopeusalueella (Koivisto & Jokinen 2008, s. 75–76; Wild 2018, luku 12.8.1).



Kuva 3. Turbiinimoottorityyppien propulsiiviset hyötysuhteet (mukailen Koivisto & Jokinen 2008, s. 76; Wild 2018, luku 12.8.1)

Lentomoottoreiden polttoainetehokkuutta kuvataan propulsiivisella hyötysuhteella eli työntövoimahyötysuhteella. Tämä tarkoittaa moottorin tehokkuutta muuttaa polttoaineen energiaa kineettiseksi energiaksi eli työntövoimaksi. (Koivisto & Jokinen 2008, s. 75; Wild 2018, luku 12.8.1) Kuvassa 3 on esitetty lentokoneissa käytettyjen turbiinimoottorityyppien propulsiivisiä hyötysuhteita lentonopeuden funktiona. Kuten kuvasta 3 nähdään, potkuriturbiinimoottori tuottaa hyvän noin 80 %:n propulsiivisen hyötysuhteen pienemmillä lentonopeuksilla kuin suuret kaupallisessa käytössä olevat lentokoneet operoivat. Potkuriturbiinimoottorin toiminta perustuu pienen nopeuden lisäyksen antamiseen suu- ralle ilmassalle (Crane *et al.* 2018, s. 377). Suoran suihkumoottorin propulsiivinen hyötysuhde on taas huomattavasti huonompi nopeusalueella 430–520 solmua. Se tuot- taa suuren nopeuden lisäyksen pienelle ilmassalle, josta on hyötyä korkeilla ylisooni- silla nopeuksilla lentäessä (Koivisto & Jokinen 2008, s. 75–76; Crane *et al.* 2018, s. 377). Ohivirtausmoottori on kehitetty yhdistämällä edellä mainitut turbiinimoottorityypit, jolloin on saavutettu suurten kaupallisessa käytössä olevien lentokoneiden operointinopeuk- sille propulsiiviselta hyötysuhteeltaan hyvä moottori (Crane *et al.* 2018, s. 377; Wild

2018, luku 11.2.2). Ohivirtaussuhteella on myös suuri merkitys propulsiiviseen hyötysuhteeseen. Yleisesti voidaan sanoa propulsiivisen hyötysuhteen olevan sitä parempi mitä suurempi moottorin ohivirtaussuhde on. (Koivisto & Jokinen 2008, s. 75; Wild 2018)

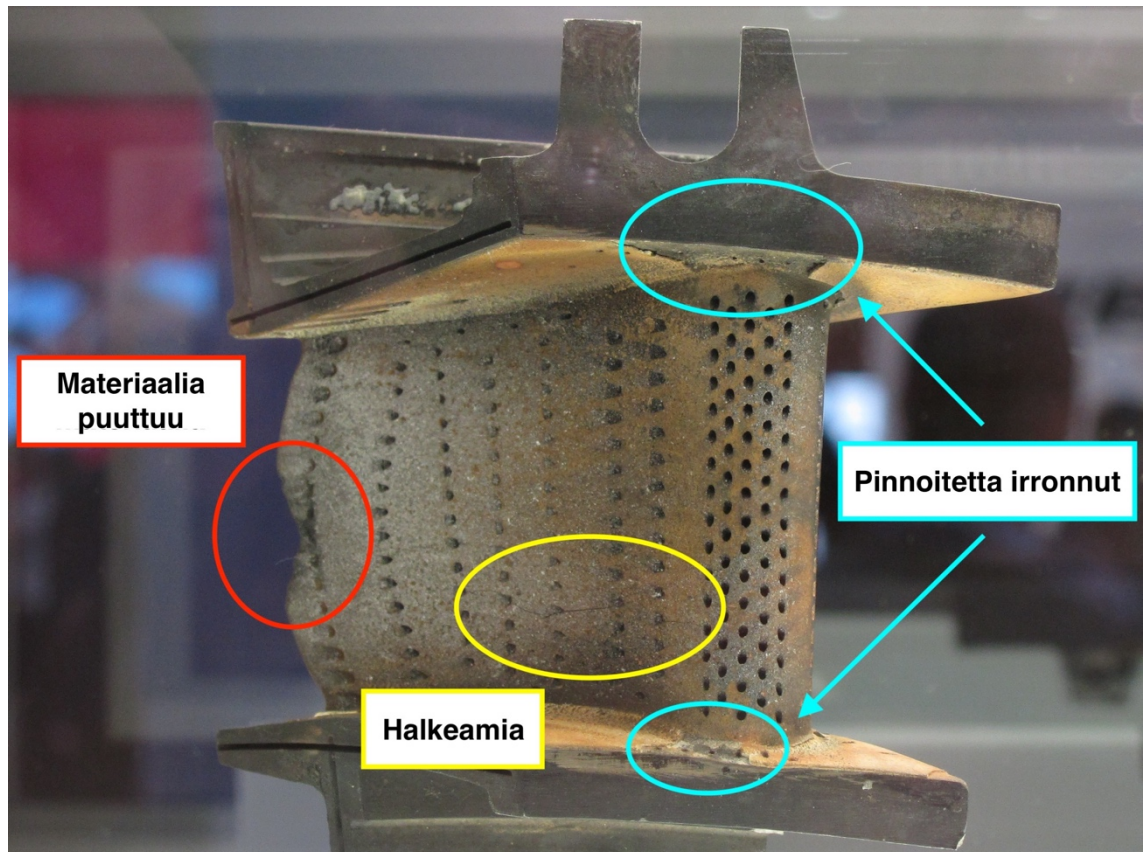
Korkean ohivirtaussuhteen ohivirtausmoottorit ovat myös hiljaisempia kuin matalan ja keskisuuren ohivirtaussuhteen ohivirtausmoottorit sekä suorat suihkumoottorit (Rolls Royce 2015, s. 16, 58; Crane *et al.* 2018, s. 377; Wild 2018, luku 16.0). Lentokoneissa käytettyjen turbiinimoottoreiden suurimmat melunlähteet ovat perusmoottorin virtaus sekä puhallin. Suorissa suihkumoottoreissa sekä pienen ja keskisuuren ohivirtaussuhteen ohivirtausmoottoreissa suurempi osa työntövoimasta tuotetaan perusmoottorin virtauksella. Tämä on ongelma erityisesti silloin, kun moottoreita käytetään täydellä teholla esimerkiksi lentoonlähtöjen aikana. Ohivirtaussuhdetta kasvattamalla perusmoottorin virtausta ja sen tuottamaa melua on voitu pienentää, koska perusmoottorin täytyy tällöin tuottaa vähemmän työntövoimaa. Ohivirtaussuhteita kasvattaessa ongelmaksi on muodostunut puhaltimen tuottama melu, joka aiheutuu puhaltimen siipien aiheuttamasta aerodynaamisesta vuorovaikutuksesta. Puhaltimen aiheuttamaa melua on kuitenkin pystytty vähentämään puhaltimen aerodynaamisen muotoilun sekä ohivirtauskanavassa ja imurenkaassa käytettävien melua absorboivien rakenteiden ja materiaalien avulla. (Rolls Royce 2015, s. 58–62)

3. OHIVIRTAUSMOOTTOREIDEN KUNNONVALVONTA

Kunnonvalvonta tarkoittaa järjestelmän toimintatilan määrittämistä erilaisia menetelmiä käyttäen. Sen avulla pyritään havaitsemaan poikkeavat tilanteet järjestelmän toiminnassa. (Ugechi *et al.* 2009, s. 177) Kaupallisessa ilmailussa turvallisuustason tulee olla hyvin korkea, ja siksi kunnonvalvontaa käytetään ohivirtausmoottoreiden turvallisen toiminnan takaamiseksi (Fedele *et al.* 2020, s. 8). Kunnonvalvonnan avulla voidaan myös tehdä huomattavia säästöjä ohivirtausmoottoreiden operointi- ja käyttökustannuksissa. Kunnonvalvontatiedon avulla voidaan esimerkiksi optimoida huoltojen sisältöjä ja ajankohtia, vähentää polttoainekustannuksia ja välttää odottamattomia vikoja. (Maclsaac & Langton 2011, s. 8, 227–228; Rolls Royce 2015, s. 252–254) Kunnonvalvontaa alettiin erityisesti hyödyntämään kaupallisten lentokoneiden moottoreissa 1970-luvulla, kun korkean ohivirtaussuhteen ohivirtausmoottoreiden käyttö alkoi yleistyä (Maclsaac & Langton 2011, s. 227; Volponi 2014, s. 2).

3.1 Käytetyt menetelmät

Ohivirtausmoottoreiden kunnonvalvontaa suoritetaan usein eri menetelmin. Ne voidaan jakaa karkeasti ihmisen suorittamiin sekä sensoreihin perustuviin menetelmiin. Ihmisen suorittamat kunnonvalvontamenetelmät ovat olleet hyvin pitkään osa ohivirtausmoottoreiden kunnonvalvontaa ja niitä käytetään myös nykypäivänä paljon. Tällaisia voivat olla muun muassa erilaiset laboratoriossa suoritettavat analyysit sekä ihmisen aistien avulla suoritettavat tarkastukset. (Wild 2018, luku 19.2.1) Yksi hyvin tyypillinen ja jo pitkään käytetty kunnonvalvontamenetelmä on ohivirtausmoottorin käyntiäänien kuuntelu (Crane *et al.* 2018, s. 533). Esimerkiksi moottorista kuuluva uliseva ääni voi olla merkki kulu-neesta laakerista. Vika on yleensä kehittynyt jo merkittävästi toimintakuntoa laskevaksi, kun normaalista poikkeavia ääniä ilmenee (Ugechi *et al.* 2009, s. 178).



Kuva 4. *International Aero Engines V2500 -ohivirtausmoottorin korkeapaineturbiinin siivessä havaittavia poikkeamia (muokattu Cleynen 2013)*

Ohivirtausmoottorin komponentit, jotka eivät ole näkyvillä, voidaan tarkastaa boroskoopilla. Boroskoopitarkastus on ihmisen suorittama visuaalinen kunnonvalvontamenetelmä, jonka tavoitteena on visuaalisesti tarkastaa ohivirtausmoottorin sisäisten komponenttien kunto. (CFM International 2003, s. 18; Rolls Royce 2015, s. 254) Tarkastuksessa pyritään havaitsemaan komponenteissa olevia alkavien vikojen merkkejä, joita voivat olla muun muassa komponentteihin syntyneet halkeamat sekä värinmuutokset (CFM International 2003, s. 134). Kuvassa 4 on korkean ohivirtaussuhteen International Aero Engines V2500 -ohivirtausmoottorin korkeapaineturbiinin siipi. Siivestä on irronnut pinnoitetta, sen takareunasta puuttuu materiaalia ja siihen syntynyt halkeamia käytön seurauksena. Nämä ovat tyypillisiä poikkeamia, jotka pyritään havaitsemaan boroskoopitarkastuksissa. (CFM International 2003, s. 134; Crane *et al.* 2018, s. 537–538) Myös muita ihmisen aisteja voidaan hyödyntää järjestelmän toimintatilan arviointiin ja poikkeavien tilanteiden havainnointiin.

Ihmisen aistihavaintoja käyttävissä kunnonvalvontamenetelmissä suurena ongelmana on se, että tarkastusta suorittavan henkilön kokemus on hyvin merkittävässä roolissa. Aistihavaintojen perusteella tehtävät johtopäätökset komponenttien ja järjestelmän kunnosta eivät myöskään ole kovinkaan luotettavia. (Ugechi *et al.* 2009, s. 178) Tämän

vuoksi sensoreilla suoritettavista kunnonvalvontamenetelmistä on tullut merkittävä osa nykypäivän modernien ohivirtausmoottoreiden ja muiden koneiden kunnonvalvontaa (Linke-Diesinger 2008, s. 6). Sensorit muun muassa mahdollistavat jatkuvan kunnonvalvontatiedon saannin ja inhimilliset tekijät eivät vaikuta niiltä saatavan kunnonvalvontatiedon luotettavuuteen (Ugechi *et al.* 2009, s. 178). Nykypäivänä käytetyt huolto-ohjelmat vaativat jatkuvaa kunnonvalvontatietoa ohivirtausmoottoreilta ollakseen mahdollisimman tehokkaita, ja sen vuoksi modernit ohivirtausmoottorit ovatkin varustettu usein eri sensorein (Linke-Diesinger 2008, s. 6).

3.2 Tyypillisiä valvottavia kohteita ja suureita

Ohivirtausmoottoreissa on useita toiminnan kannalta kriittisiä kohteita ja suureita, joita tulee valvoa jatkuvasti. Näitä ovat muun muassa moottorin käyttöakselien pyörimisnopeudet sekä polttoaine- ja voitelujärjestelmät. (Rolls Royce 2015, s. 253; Wild 2018, luku 19.7.2) Niiltä saatavaa kunnonvalvontatietoa tallennetaan ja siirretään analysoitavaksi, sekä näytetään ohjaamon mittareilla moottoreiden toimintatilan valvomiseksi (Volponi 2014, s. 3). Seuraavaksi esitellään viisi tyypillistä kohdetta ja suuretta, joita valvotaan ohivirtausmoottoreissa.

3.2.1 Polttoainejärjestelmä

Yksi kriittisimmistä valvottavista järjestelmistä ohivirtausmoottorissa on polttoainejärjestelmä, koska perusmoottori tarvitsee polttoainetta tuottaakseen työntövoimaa (Linke-Diesinger 2008, s. 67). Ohivirtausmoottorin polttoainejärjestelmän päätehtävänä on syöttää ja annostella sopivan lämpötilan ja paineen omaavaa polttoainetta (Linke-Diesinger 2008, s. 70; Crane *et al.* 2018, s. 471–472). Polttoainetta syötetään moottorin polttokammioon sekä muihin tarpeisiin, muun muassa voitelujärjestelmän öljyn jäähdytykseen (Linke-Diesinger 2008, s. 70–72). Polttoainejärjestelmän toimintaa tulee mitata jatkuvasti sensoreiden avulla, jotta lentokoneen lentäjät voivat valvoa sen toimintaa lennon aikana ohjaamon mittareista (Volponi 2014, s. 3). Yleisiä polttoainejärjestelmässä seurattavia suureita ovat polttoaineen virtaus, lämpötila, paine ja määrä (Volponi 2014, s. 3, 12).

Kaupallisessa lentoliikenteessä käytettävät lentokoneet operoivat hyvin kylmissä oloissa. Laajasti käytetyn Jet A-1 -polttoaineen jähmettymispiste on noin -50 °C. (Linke-Diesinger 2008, s. 67; Crane *et al.* 2018, s. 467) Polttoaineeseen voi muun muassa muodostua jääkiteitä lämpötilan laskiessa jähmettymispisteen alle, jolloin polttoaineen syöttö voi häiriintyä. Tämän vuoksi polttoainetta tulee pystyä lämmittämään. (Linke-Diesinger 2008, s. 68; Crane *et al.* 2018, s. 467–469) Jos polttoaineen syöttö häiriintyy

ohivirtausmoottorille, palamisvaihetta ei tapahdu perusmoottorissa, jolloin turbiinit eivät saa käyttövoimaa ja työntövoiman tuotto loppuu (Linke-Diesinger 2008, s. 67).

3.2.2 Voitelujärjestelmä

Voitelujärjestelmä on hyvin kriittinen osa ohivirtausmoottorin toiminnan kannalta. Sen tehtävänä on erityisesti pienentää kitkaa ja jäähdyttää liikkuvia osia, jotka koskettavat toisiaan ohivirtausmoottorissa. (Linke-Diesinger 2008, s. 49; Wild 2018, luku 4.3) Voitelujärjestelmissä käytetään yleisesti erilaisia öljyjä. Tyypillisiä voitelukohteita ohivirtausmoottorissa ovat esimerkiksi laakerit ja hammaspyörät. (Linke-Diesinger 2008, s. 49; Crane *et al.* 2018, s. 437–438) Voitelujärjestelmän toiminta perustuu voiteluainekalvon muodostamiseen toisiinsa nähden liikkuvien metallipintojen välille, jolloin kosketuspintojen välinen kitka pienenee (Linke-Diesinger 2008, s. 49; Wild 2018, luku 4.3). Jos voiteluainekalvoa ei muodosteta liikkuvien osien välille esimerkiksi voitelujärjestelmässä olevan tukoksen vuoksi, voi aiheutua tehohäviöitä ja liikkuvat osa voivat kulua normaalia enemmän (Wild 2018, luku 4.3).

Voitelujärjestelmän kunnonvalvontaan käytetään ihmisen suorittamia menetelmiä sekä sensoreita, koska järjestelmän tilasta tulee saada reaaliaikaisesti tietoa. Sensoreilla valvottavia suureita on useita, muun muassa öljyn lämpötila, paine, määrä ja virtaus voitelujärjestelmässä (Linke-Diesinger 2008, s. 61–62; Volponi 2014, s. 11; Crane *et al.* 2018, s. 454–455). Ohivirtausmoottoreiden voitelujärjestelmissä käytetään muun muassa lastuilmajaisia, joiden tehtävänä on ilmaista, jos voiteluaineessa havaitaan metallihiukkasia (Rolls Royce 2015, s. 254; Crane *et al.* 2018, s. 532–533). Esimerkiksi rikkoontuneesta tai kuluneesta komponentista voi irrota metallisia lastuja voiteluaineeseen sekaan, jotka lastuilmajaisin pyrkii havaitsemaan ja keräämään magneetin avulla (CFM International 2003, s. 18; Linke-Diesinger 2008, s. 62–63; Wild 2018, luku 19.7.2).

Voiteluainetta voidaan myös vuodattaa voitelujärjestelmästä ulos sen analysointia varten. Voiteluaineen analysoinnissa pyritään havaitsemaan mahdolliset vieraspartikkelit tai muut poikkeamat voiteluaineen ominaisuuksissa eri menetelmin. (Crane *et al.* 2018, s. 456) Myös voitelujärjestelmän öljynkulutusta tulee seurata, koska normaalia suurempi öljynkulutus on usein merkki osien kulumisesta. Kun ohivirtausmoottorin öljynkulutus ei ole enää hyväksytyjen rajojen sisällä, tulee suorittaa huoltotoimenpiteet, joilla öljynkulutus saadaan palautettua hyväksytylle tasolle. Kuluneet tiivisteet ovat yksi tyypillinen syy korkealle öljynkulutukselle. (Linke-Diesinger 2008, s. 62)

3.2.3 Värähtely

Värähtely on yksi monipuolisimmista valvottavista suureista pyöriviä komponentteja sisältävissä koneissa kuten ohivirtausmoottoreissa (Ugechi *et al.* 2009, s. 178). Ohivirtausmoottoreiden kunnonvalvonnassa värähtelyn seuraamisella on hyvin suuri merkitys, koska sen avulla pystytään havaita useita erilaisia koneen vikatilanteita (Ugechi *et al.* 2009, s. 179; Wild 2018, luku 19.7.2). Normaalista poikkeava värähtely on usein merkki jonkin pyörivän komponentin epätasapainosta, minkä vuoksi ohivirtausmoottoreiden värähtelyä seurataan jatkuvasti useilla värähtelysensoreilla. Epätasapainoa voivat aiheuttaa muun muassa kuluneet laakerit ja palojen lohkeamiset ahdinten, turbiinien tai puhaltimen siivistä. (Linke-Diesinger 2008, s. 124; Volponi 2014, s. 11)

Värähtelykunnonvalvonnassa on tärkeää tunnistaa ohivirtausmoottorille tyypillisen värähtelyn parametrit, joita voivat olla esimerkiksi värähtelyn amplitudi, nopeus sekä kiihtyvyys. Tämän jälkeen voidaan asettaa raja-arvot hyväksytylle värähtelylle. Tämä tarkoittaa siis sitä, että esimerkiksi värähtelynopeudelle asetetaan tietty maksiminopeus hyväksytyyn värähtelyyn rajaksi. (Ugechi *et al.* 2009, s. 179–180) Hyväksytyyn värähtelyn raja-arvot määrittää tyypillisesti lentomoottorivalmistaja. Kyseiset raja-arvot on ilmoitettu lentokoneen lentokäsikirjassa. (Crane *et al.* 2018, s. 533)

Tämän jälkeen ohivirtausmoottorissa olevien useiden värähtelysensoreiden värähtelydataa verrataan asetettuihin värähtelyraja-arvoihin. Useissa ohivirtausmoottoreissa on värähtelyvalvontatietokone, joka saa jatkuvasti signaaleja moottorin värähtelysensoreilta. Värähtelytietokone suodattaa värähtelydatasta normaalin värähtelyn parametrit pois ahdinten pyörimisnopeuksien perusteella ja ilmoittaa, jos normaalista poikkeavaa värähtelyä havaitaan. (Linke-Diesinger 2008, s. 124–125) Värähtelytiedon avulla pystytään myös paikantamaan ja tunnistamaan ohivirtausmoottorissa olevia vikatilanteita ennen tarkastuksia. Jokainen mekaaninen vika tuottaa omanlaisensa värähtelyn, joten värähtelyn parametreja voidaan verrata aiemmin tapahtuneiden vikaantumisten värähtelytietoon ja tunnistaa näin yhtäläisyydet (Ugechi *et al.* 2009, s. 179).

3.2.4 Ahdinten pyörimisnopeudet

Ohivirtausmoottoreiden ahdinten pyörimisnopeuksia valvotaan sensoreiden avulla. Niissä tapahtuvat normaalista poikkeavat muutokset voivat olla merkkejä erilaisista vikatilanteista. (Volponi 2014, s. 3) Vikaantumisesta voi indikoida muun muassa se, että ahdinten pyörimisnopeudet eivät pysy vakaana, vaan ne vaihtelevat itsestään. Esimerkiksi

saastunut polttoaine voi aiheuttaa ahdinten pyörimisnopeuksien vaihtelun. Yllättäen laskevat ahdinten pyörimisnopeudet voivat olla merkki polttoaineen syötön keskeytymisestä. (Crane *et al.* 2018, s. 547) Myös moottoriin lentäneet vierasesineet voivat aiheuttaa ahdinten pyörimisnopeuksien muutoksia (Crane *et al.* 2018, s. 540). Ahdinten pyörimisnopeuksia voidaan myös kutsua käyttöakseleiden tai roottorien pyörimisnopeuksiksi, koska ne ovat kiinnitettynä toisiinsa ja niiden pyörimisnopeudet ovat täten samat (Koivisto & Jokinen 2008, s. 89, 125; Linke-Diesinger 2008, s. 19; Crane *et al.* 2018, s. 392).

Ahdinten pyörimisnopeuksia merkitään yleisesti kirjaimella N. Alaindeksin numero kertoo minkä ahtimen nopeus on kyseessä. Ahdinten numerointi alkaa matalapaineahtimesta ja päättyy korkeapaineahtimeen. Eli kolmiakselisen ohivirtausmoottorin tapauksessa N₁ tarkoittaa matalapaineahtimen, N₂ keskipaineahtimen ja N₃ korkeapaineahtimen pyörimisnopeutta. Kaksiakselisessa ohivirtausmoottorissa on vain kaksi ahdinta ja täten myös vain pyörimisnopeudet N₁ matalapaineahtimelle ja N₂ korkeapaineahtimelle. (Koivisto & Jokinen 2008, s. 124–125; Linke-Diesinger 2008, s. 19) Ahdinten pyörimisnopeuksille on asetettu maksimirajat, joiden ylittämisen estävät lentokoneissa käytettävät moottorin ohjauksyksiköt. Erityisesti puhallin sekä ahtimet voivat vahingoittua, jos maksimipyörimisnopeudet ylitetään. (Crane *et al.* 2018, s. 541)

3.2.5 Palokaasut

Ohivirtausmoottorin palokaasujen lämpötilaa seurataan jatkuvasti sensoreilla. Lyhytaikainenkin lämpötilarajan ylitys voi lyhentää ohivirtausmoottorin komponenttien elinikää merkittävästi tai vaurioittaa niitä. (Linke-Diesinger 2008, s. 123; Volponi 2014, s. 3) Esimerkiksi turbiinin siivet voivat jopa sulaa, jos polttokammioista turbiinille virtaavien palokaasujen lämpötila on liian korkea (Rolls Royce 2015, s. 128–130). Tämän vuoksi turbiinin sisääntulolämpötila onkin yksi tärkeimmistä valvottavista lämpötiloista ohivirtausmoottorissa (Linke-Diesinger 2008, s. 123).

Palokaasujen lämpötilan seuraamisella voidaan havaita useita eri moottorin vikatilanteita. Esimerkiksi polttoaineen syöttöön liittyvä vikatilanne voi ilmetä siten, että polttoainevirtaus kasvaa mutta palokaasujen lämpötila laskee (Volponi 2014, s. 2; Crane *et al.* 2018, s. 547). Palokaasujen lämpötilan ja polttoainevirtauksen tulisi olla normaalitoiminnassa suoraan verrannollisia toisiinsa. Yleisesti voidaan todeta, että 10 °C:n nousu palokaasun lämpötilassa tulisi vastata 1 %:n nousua polttoainevirtauksessa (Wild 2018, luku 19.7.2). Jos taas palokaasujen lämpötila nousee tavallista korkeammalle, kertoo se yleensä riittämättömästä ilman saannista (Crane *et al.* 2018, s. 547).

3.3 Sensoreilta saatavan kunnonvalvontatiedon siirtäminen

Ohivirtausmoottoreiden sensoreilta saatavaa kunnonvalvontatietoa on esitetty lentokoneen ohjaamon mittareilla jo vuosikymmeniä, jotta lentäjät pystyvät seuraamaan moottoreiden toimintatilaa lennon aikana (Linke-Diesinger 2008, s. 121–122). Lentäjien lisäksi kyseistä tietoa tarvitaan ohivirtausmoottoreiden kunnossapitoa varten (Rolls Royce 2015, s. 252). Ennen lentoarvotallentimien käyttöä lentäjät kirjasivat mittareiden lukemia lentokupongille ennalta määrätyissä vaiheissa lentoa tai havaittuaan poikkeavan lukeman jossain mittarissa. Tämä lentokuponki luovutettiin lennon jälkeen moottoreiden huollosta vastaavalle henkilöstölle. Tyypillisiä lentokupongille kirjattavia arvoja olivat muun muassa moottorin värähtelytasot, ahdinten pyörimisnopeudet, polttoaineen virtaus sekä voiteluöljyn lämpötila ja paine. (Volponi 2014, s. 3)

1970-luvulla elektroniset kunnonvalvontajärjestelmät yleistyivät suurimmissa kaupallisen lentoliikenteen lentokoneissa. Lentokupongeja ei tarvinnut enää täyttää, koska elektroninen kunnonvalvontajärjestelmä tallensi kunnonvalvontatiedot automaattisesti lennon aikana. Lennon jälkeen tallennettu kunnonvalvontatieto pystyttiin siirtämään analysoitavaksi kunnossapitojärjestelmiin. 1980-luvulla kaupallisissa lentokoneissa siirryttiin digiaikakauteen ja sen myötä langattoman tiedonsiirron käyttö yleisty. Tämä mahdollisti kunnonvalvontatiedon välittämisen langattomasti lentokoneesta maahan. (Volponi 2014, s. 3)

Nykypäivänä kunnonvalvontatietoa siirretään reaaliaikaisesti lentokoneesta maahan radiotaajuuksien ja satelliittiyhteyksien välityksellä. Kunnonvalvontatieto kerätään ensin sensoreilta ohivirtausmoottorin kunnonvalvontayksikölle, josta se siirretään lentokoneen tiedonsiirtojärjestelmälle. (Rolls Royce 2015, s. 262; Wild 2018, luku 19.7.2) Tiedonsiirtojärjestelmä lähettää kerätyn kunnonvalvontatiedon maa-asemille, josta kunnonvalvontatieto siirretään ohivirtausmoottoreiden kunnonvalvonnasta vastaavalle henkilöstölle analysoitavaksi (Rolls Royce 2015, s. 199; Wild 2018, luku 19.7.2).

4. SENSOREILTA SAATAVAN KUNNONVALVONTATIEDON KÄYTTÖ

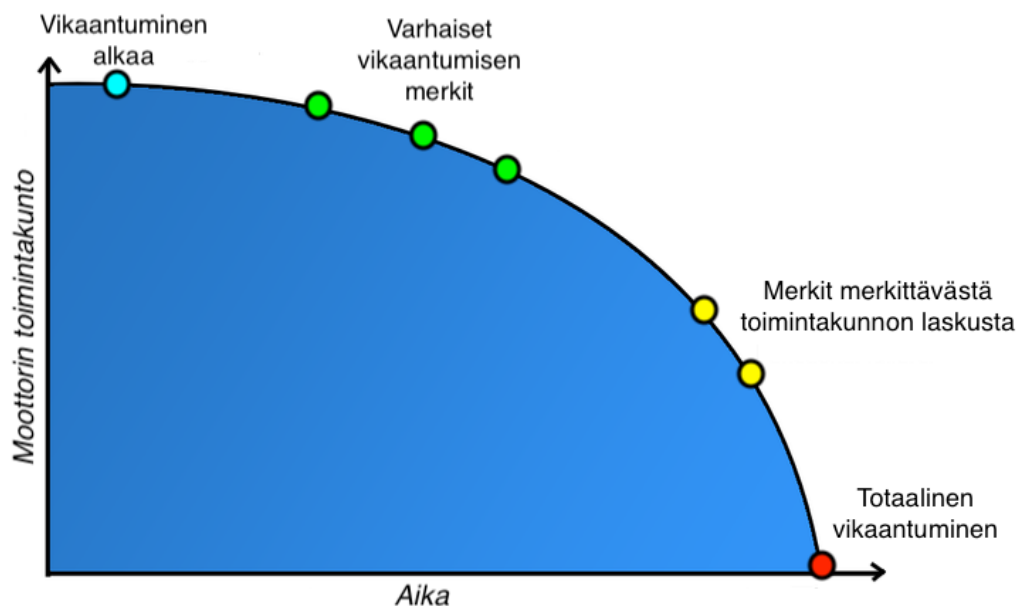
Kaupallisessa lentoliikenteessä käytettyjen lentomoottoreiden huoltaminen on muuttunut huomattavasti korkean ohivirtaussuhteen ohivirtausmoottoreiden yleistyttyä (Volponi 2014, s. 2). Esimerkiksi useista tietyin väliajoin suoritettavista huoltotoimenpiteistä on tullut sensoreilta saatavan kunnonvalvontatiedon perusteella suoritettavia (Rolls Royce 2015, s. 252; Wild 2018, luku 19.4). Myös turhan huoltotyön määrää ja kustannuksia on pystytty vähentämään sensoreilta saatavan kunnonvalvontatiedon avulla (Rolls Royce 2015, s. 252–254).

4.1 Kunnossapitostrategiat

Nykypäivänä kaupallisessa käytössä olevien lentokoneiden ohivirtausmoottoreita huolletaan pääsääntöisesti prediktivisen kunnossapitostrategian mukaan (Rolls Royce 2015). Tätä edelsi ennaltaehkäisevän kunnossapitostrategian käyttö, jonka tavoitteena on suorittaa huoltoimenpiteet ennen kuin vikaantuminen tapahtuu (Stamboliska *et al.* 2015, s. 12; Fedele *et al.* 2020, s. 4). Ennaltaehkäisevä kunnossapitostrategia perustuu siihen, että moottorin käyttömäärällä ja vikaantumisen todennäköisyydellä oletetaan olevan suora yhteys toisiinsa (Ugechi *et al.* 2009, s. 177–178). Tämä tarkoittaa siis sitä, että moottorin komponenttien odotetaan olevan luotettavia tietyn ennalta määritetyn välin verran, jonka jälkeen niiden luotettavuus alkaa merkittävästi laskea. Tämän välin, esimerkiksi lentotuntimäärän, tullessa täyteen komponenteille suoritetaan huolto-ohjelman mukaiset huoltotoimenpiteet. Huoltotoimenpiteet suoritetaan myös, jos tarkastuksissa havaitaan kriteerien mukaisia merkkejä komponentin luotettavuuden laskusta, esimerkiksi halkeamia. (Stamboliska *et al.* 2015, s. 12–14)

Ennaltaehkäisevä kunnossapitostrategia ei siis ota huomioon moottoreiden yksilöllisiä eroja vaan se olettaa, että kaikki samantyyppiset moottorit käyttäytyvät samalla tavalla. Ongelmana ennaltaehkäisevässä kunnossapitostrategiassa onkin se, että huoltoja voidaan tehdä turhan aikaisin mutta myös liian myöhään (Ugechi *et al.* 2009, s. 177–178; Fedele *et al.* 2020, s. 4). Liian aikaisen huoltamisen on todettu parantavan järjestelmän luotettavuutta vain vähän tai ei ollenkaan, ja pahimmassa tapauksessa huoltotoimenpide voi itse olla huollon jälkeen ilmaantuvan vian aiheuttaja (Ugechi *et al.* 2009, s. 177–178). Odottamattomat vikaantumiset sekä liian usein tehtävät huollot aiheuttavat hyvin suuria kustannuksia, minkä vuoksi prediktivisen kunnossapitostrategian käyttö on yleistynyt kaupallisessa lentoliikenteessä (Kraft *et al.* 2014, s. 1; Volponi 2014, s. 18).

Prediktiivisen, eli kuntoon perustuvan kunnossapitostrategian keskeinen ajatus on valvoa ohivirtausmoottorin tilaa jatkuvasti ja analysoida kunnonvalvontatietoa (Rolls Royce 2015, s. 252–253). Tämä mahdollistaa tulevan vian ilmenemisajan ennustamisen, ja jatkuvan kunnonvalvonnan avulla alkavien vikojen merkit huomataan mahdollisimman aikaisin (Stamboliska *et al.* 2015, s. 14–15). Tulevan vikaantumisaajan ennustamisen ja jatkuvan kunnonvalvonnan ansiosta huoltotoimenpiteet suoritetaan ohivirtausmoottorin kunnon perusteella eikä tietyin huoltovälein. Tällöin huollot suoritetaan juuri oikeaan aikaan, jolloin kalliit vikaantumiset ja liian aikaiset komponenttien vaihdot voidaan välttää. (Ugechi *et al.* 2009, s. 178; Stamboliska *et al.* 2015, s. 14–15)



Kuva 5. Ohivirtausmoottorin vikaantumisen käyttäytyminen (mukailien Ugechi *et al.* 2009, s. 178; muokattu Malhotra 2021)

Kuvassa 5 on esitetty ohivirtausmoottorin tyypillisen vikaantumisen käyttäytyminen. Ohivirtausmoottoreiden, kuten muidenkin koneiden, vikaantuminen ei tyypillisesti ole äkillistä, vaan niissä ilmenee yleensä merkkejä siitä, että totaalinen toiminnan estävä vika on kehittymässä (Stamboliska *et al.* 2015, s. 53). Kuvasta 5 nähdään, että moottorissa on havaittavissa vikaantumisen merkkejä ennen kuin totaalinen vikaantuminen tapahtuu. Prediktiivisessä kunnossapitostrategiassa hyödynnettävän kunnonvalvonnan tavoitteena on havaita varhaiset vikaantumisen merkit (Rolls Royce 2015, s. 252). Varhaisia vikaantumisen merkkejä voivat olla esimerkiksi ohivirtausmoottorin värähtelytaajuuden muutokset tai voiteluaineanalyysissä havaittavat korkeammat partikkelipitoisuudet (Linke-Diesinger 2008, s. 63; Stamboliska *et al.* 2015, s. 54).

Kun ohivirtausmoottorin alkaa esimerkiksi pitämään normaalista poikkeavaa ääntä tai kuumenemaan normaalia enemmän, on moottorin toimintakunto laskenut jo merkittävästi (Ugechi *et al.* 2009, s. 178–179; Stamboliska *et al.* 2015, s. 54). Varhaiset vikaantumisen merkit havaittua saadaan yleensä tarpeeksi aikaa suunnitella, aikatauluttaa ja suorittaa vian korjaavat huoltotoimenpiteet. Tällöin kehittyvä vika saadaan korjattua ennen kuin siitä kehittyä moottorin toimintakunta merkittävästi laskeva tai toiminnan estävä vika. (Stamboliska *et al.* 2015, s. 14–15, 54)

4.2 Reaaliaikainen kunnonvalvontatieto

Ohivirtausmoottoreiden sensoreilta saatavalla reaaliaikaisella kunnonvalvontatiedolla on suuria etuja erityisesti kaupallisen aikataulunmukaisen operoinnin näkökulmasta. Reaaliaikaisen sensoreilta saatavan kunnonvalvontatiedon avulla on mahdollista tunnistaa esimerkiksi poikkeavan tilanteen aiheuttaja ennen maassa suoritettavia tarkastuksia (Chen *et al.* 2012, s. 768–769). Sen avulla voidaan myös aikatauluttaa kunnan perusteella suoritettavia huoltotoimenpiteitä sekä tehdä päätöksiä erilaisten lisätarkastusten tai -huoltotoimenpiteiden tekemisestä (Wild 2018, luku 19.7.2; Fedele *et al.* 2020, s. 4).

Reaaliaikaista kunnonvalvontatietoa voidaan verrata tietokantaan, johon on kirjattu ylös erilaisten poikkeavien tilanteiden parametreja tai oireita sekä niiden aiheuttajat (Chen *et al.* 2012, s. 768). Näin vikatilanne pystytään paikallistamaan tai tunnistamaan etukäteen, jolloin tarvittavien huoltotoimenpiteiden määrittämiseen ja suorittamiseen ei kulu niin paljon aikaa. Esimerkiksi huoltotoimenpiteissä tarvittavat välineet ja komponentit voidaan varata valmiiksi lentokoneen saapumispaikalle, jolloin ohivirtausmoottorin huoltoon kuluu kokonaisaikaa saada lyhennettyä. (Chen *et al.* 2012, s. 765–766; Qing & Dan 2015, s. 8–9) Ajallinen säästö ei ole välttämättä lentokoneyksilön tasolla suuri, mutta kokonaisen lentokonelaivaston kohdalla siitä voi muodostua hyvinkin huomattava.

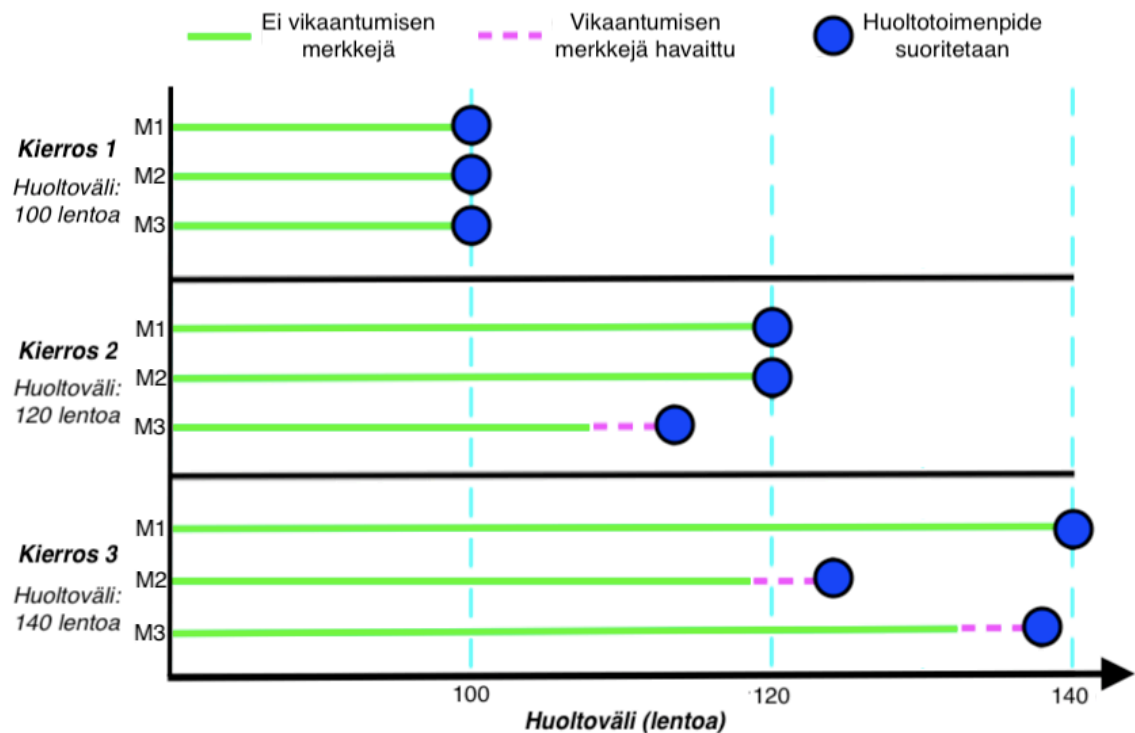
Reaaliaikaisen kunnonvalvontatiedon perusteella voidaan myös tehdä päätös muualle kuin määräkentälle laskeutumisesta, jos moottoreissa havaitaan vikaantumisen merkkejä lennon aikana. Tällöin voidaan valita laskeutumispaikka esimerkiksi sillä perusteella, missä ohivirtausmoottorin tarkastus ja mahdollinen korjaus on paras suorittaa.

Esimerkiksi helmikuussa 2021 Helsinki-Vantaan lentoasemalta Tokiota kohti lähteneen Boeing 787-9 Dreamliner -matkustajalentokoneen moottorin värähtelysensorit havaitsivat normaalista poikkeavaa värähtelyä. Kyseinen Boeing 787-9 oli varustettu kahdella korkean ohivirtaussuhteen General Electric GEnx-1B -ohivirtausmoottorilla. Lentoa olisi voitu jatkaa normaalisti lentokäsikirjan värähtelyraja-arvojen mukaan, mutta koneen lentäjät päättivät palata takaisin Helsinki-Vantaan lentoasemalle. Lentäjät laskivat lisäksi

koneen lentonopeutta ja -korkeutta huomattavasti, koska lentokoneen moottorissa mahdollisesti olleen vian ei haluttu kasvavan suuremmaksi. Helsinki-Vantaan lentoasemalle palaamisen jälkeen lentokoneen teknisessä tarkastuksessa havaittiin oikean moottorin puhaltimen siivestä lohjonneen pala pinnoitetta. Tämä aiheutti moottorissa epätasapainoa ja ilmeni poikkeavana värähtelynä. (Onnettomuustutkintakeskus 2021)

4.3 Huoltojen optimointi

Sensoreilta saatavalla kunnonvalvontatiedolla on suuri merkitys ohivirtausmoottoreiden huoltojen aikataulutuksen ja sisällön kannalta (Rolls Royce 2015, s. 261). Samantyyppisiltä ohivirtausmoottoreilta kerätyn kunnonvalvontatiedon perusteella pystytään esimerkiksi tunnistamaan, kuinka tietty ohivirtausmoottorityyppi käyttäytyy sen vikaantuessa. Huoltojen optimoimiseen käytettäviä malleja ja menetelmiä on hyvin monia. Tapauksissa, joissa kunnonvalvontatietoa ei ole kerätty vielä tarpeeksi vikaantumisten tunnistamiseksi, voidaan käyttää Willinghamin (2016) esittämää menetelmää huoltojen optimoimiseen.



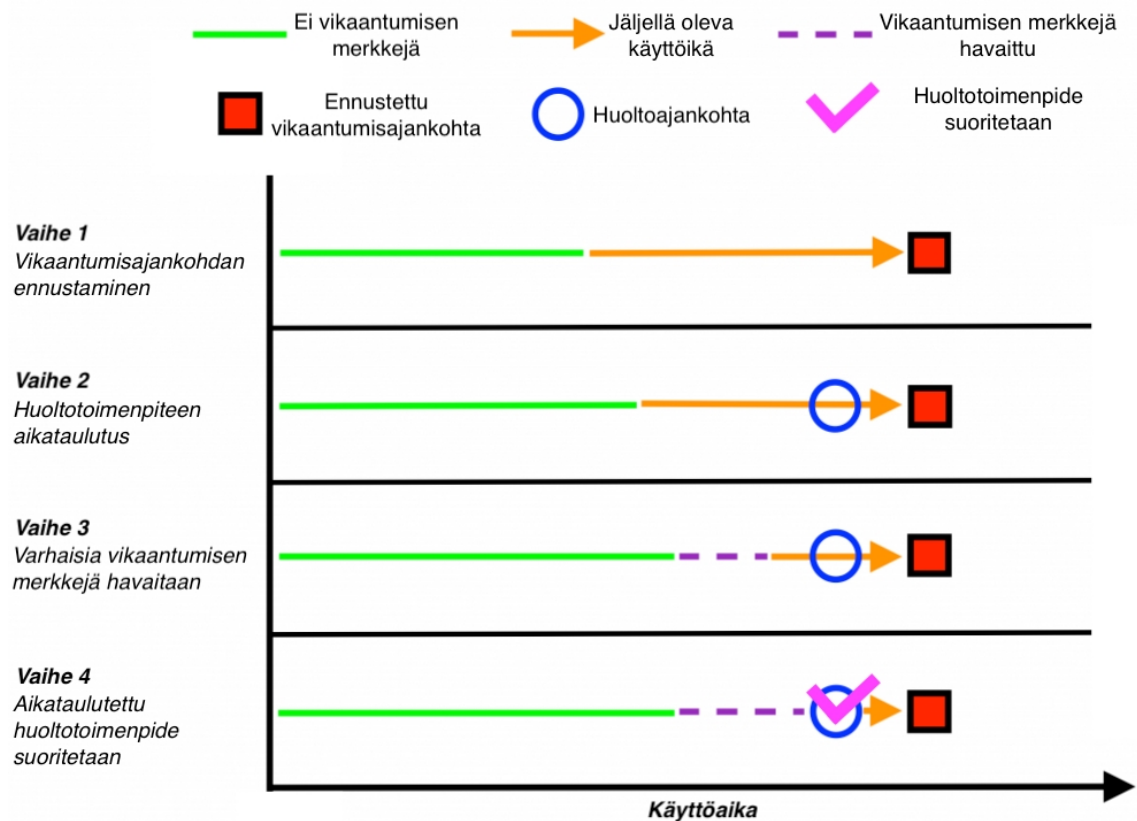
Kuva 6. Ohivirtausmoottorin huoltojen optimointi (mukaihen Willingham 2016)

Willinghamin (2016) esittämän menetelmän periaate on esitetty kuvassa 6. Kyseisessä tapauksessa valvottavista kohteista, eli ohivirtausmoottoreilta, ei ole vielä saatu kerättyä tarpeeksi kunnonvalvontatietoa, jotta tiedettäisiin kuinka vikaantuminen ilmenee. Tämän vuoksi huoltotoimenpide suoritetaan tietyin huoltoväleihin, jota kasvatetaan joka käyttö-

kierroksen jälkeen. Huoltotoimenpide suoritetaan myös, jos reaaliaikaisen kunnonvalvontatiedon perusteella havaitaan poikkeamia, jotka voivat olla mahdollisesti varhaisia vikaantumisen merkkejä. Kuvan 6 esimerkissä huoltoväliksi on asetettu ensin 100 lentoa, jota kasvatettiin tämän jälkeen 120 ja 140 lentoon. (Willingham 2016)

Menetelmän tavoitteena on kehittää kunnonvalvontatiedon perusteella malli, jolla kohteen kunto voidaan määrittää. Jokaisen käyttökierron jälkeen mallia parannetaan kierroksella kerätyn kunnonvalvontatiedon perusteella. Tässä esimerkissä kunnonvalvontatietoa kerättiin kolmelta samanlaiselta ohivirtausmoottorilta, jotka on merkitty kuvaan 6 tunnuksin M1, M2 ja M3. Huoltovälien pidentämistä vaiheittain jatketaan niin pitkään, että kehitettyyn malliin ollaan tyytyväisiä. Tällöin huoltovälit voidaan poistaa, jolloin huollot suoritetaan ainoastaan mallilla tehtävän kunnon määrittämisen sekä reaaliaikaisen kunnonvalvontatiedon perusteella. Tavoitteena on siis saavuttaa tilanne, jossa aikataulutettuja huoltoimenpiteitä ei enää ole sekä oppia kuinka vikaantuminen ilmenee reaaliaikaisessa kunnonvalvontatiedossa. (Willingham 2016)

Kunnonvalvontatiedon avulla on myös mahdollista kehittää malleja, joilla voidaan ennustaa ohivirtausmoottorin komponenttien jäljellä oleva käyttöikä (Lei 2016, s. 6; Behera *et al.* 2019, s. 842). Näitä malleja hyödynnetään kunnon perusteella suoritettavien huoltoimenpiteiden suunnittelussa. Niiden avulla voidaan päättää, mikä on paras aika suorittaa tarvittavat huoltotoimenpiteet. Ne myös mahdollistavat huollon valmisteluiden tekemisen hyvissä ajoin. (Lei 2016, s. 6) Näin voidaan välttää turhia huoltotoimenpiteitä, parantaa turvallisuutta sekä vähentää polttoaineen kulutusta ja päästöjä (Kraft *et al.* 2014, s. 1; Volponi 2014, s. 11–12).



Kuva 7. Huoltotoimenpiteiden aikataulutus ja suorittaminen jäljellä olevan käyttöiän ennustavan mallin avulla (Stamboliska et al. 2015, s. 15)

Kuvassa 7 on esitetty yksi tapa, kuinka huoltotoimenpiteitä voidaan aikatauluttaa ja suorittaa jäljellä olevan käyttöiän ennustavan mallin avulla. Vaiheessa 1 ennustetaan, mikä on huollettavan komponentin jäljellä oleva käyttöikä, eli kuinka pitkään sitä voidaan käyttää ennen kuin se tulee vikaantumaan. Toinen vaihe on huoltotoimenpiteen aikatauluttaminen. Huoltotoimenpide tulee suorittaa ennen ennustettua vikaantumisajankohtaa. (Stamboliska et al. 2015, s. 15; Lei 2016, s. 6) Kun huoltoajankohta on päätetty, moottoria käytetään siihen saakka ja se huolletaan. Moottorissa saattaa myös ilmetä varhaisia vikaantumisen merkkejä ennen kyseistä ajankohtaa. Jos varhaiset vikaantumisen merkit ilmenevät poikkeavan aikaisin, tulee huoltotoimenpiteet suorittaa aiemmin, jotta totaalisista vikaantumista ei ehdi tapahtua.

Nykypäivänä useiden koneiden kunnonvalvonnassa hyödynnetään digitaalisia kaksosia. Ne ovat koneesta tehtyjä virtuaalisia malleja, jotka pyrkivät käyttäytymään samoin kuten vastaava fyysinen kone (Belov et al. 2020, s. 2; Liu et al. 2020, s. 444). Jotta digitaalisen kaksosen käyttö vastaisi mahdollisimman hyvin fyysisen koneen käytöstä, tarvitsee se menneitä ja reaaliaikaista kunnonvalvontatietoa (Liu et al. 2020, s. 444). Digitaaliset kaksoset kehittyvät jatkuvasti reaaliaikaisen kunnonvalvontatiedon perusteella

(Hehenberger & Bradley 2016, s. 66). Digitaalisten kaksosten avulla voidaan muun muassa ennustaa ohivirtausmoottorin jäljellä oleva käyttöikä sekä tehdä muita simuloitteja. Näiden simulointien avulla voidaan esimerkiksi hankkia tietoa ohivirtausmoottorin toiminnasta erilaisissa poikkeavissa tilanteissa. Tämä mahdollistaa esimerkiksi ohivirtausmoottorin käyttämisen totaaliseen vikaantumiseen saakka ilman, että syntyy vaaratilannetta ja merkittäviä korjauskustannuksia. Näiden simulointien avulla pystytään keräämään kunnonvalvontatietoa, jota voidaan myöhemmin hyödyntää esimerkiksi alkavan vian tai vian aiheuttajan tunnistamisessa. (Belov *et al.* 2020, s. 2)

5. YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää, kuinka modernien ohivirtausmoottoreiden kunnonvalvontaa suoritetaan ja hyödynnetään huoltojen optimoimisessa nykypäivänä. Työn aiheen taustoittamiseksi, myös ohivirtausmoottoreiden perusteita käsiteltiin. Työssä pyrittiin vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin: kuinka ohivirtausmoottoreiden kunnonvalvontaa suoritetaan ja kuinka sensoreilta saatavaa kunnonvalvontatietoa käytetään huoltojen suunnittelussa.

Ohivirtausmoottori on kaasuturbiinimoottori, joka on kehitetty yhdistämällä suora suihkumoottori ja potkuriturbiinimoottori. Suurin osa modernien ohivirtausmoottoreiden työntövoimasta tuotetaan turbiinin pyörittämällä puhaltimella eikä turbiinimoottorin kaasuvirtauksella kuten ennen. Ohivirtausmoottorit ovat yleisin tehonlähde suurissa kaupallisissa lentokoneissa nykypäivänä, koska ne ovat polttoainetehokkain moottorityyppi käytetyllä nopeusalueella. Ohivirtausmoottorit tulevat olemaan vielä useita vuosia kaupallisten lentokoneiden vallitseva tehonlähde erityisesti pitemmillä matkoilla, koska korvaavien tehonlähteiden suoritusarvot ovat vielä nykypäivänä heikot. Tämän vuoksi ohivirtausmoottoreiden kehittämistä tullaan jatkamaan.

Kunnonvalvonnan rooli kaupallisessa ilmailussa on nykypäivänä hyvin merkittävä. Nykypäivänä ohivirtausmoottoreiden ylläpidossa käytetyt kunnossapitostrategiat vaativat jatkuvaa kunnonvalvontatietoa ollakseen mahdollisimman tehokkaita. Tämän vuoksi erityisesti sensoreilla suoritettavan kunnonvalvonnan merkitys on kasvanut hyvin suureksi. Ne mahdollistavat jatkuvan luotettavan kunnonvalvontatiedon saannin. Sensoreita käytetään ohivirtausmoottoreissa muun muassa värähtelyn ja palokaasujen lämpötilan valvomiseen.

Nykypäivänä ohivirtausmoottoreiden kunnonvalvontaan käytetään pääsääntöisesti prediktiivistä kunnossapitostrategiaa. Prediktiivisen kunnossapitostrategian tavoitteena on vähentää turhia huoltoja suorittamalla huoltotoimenpiteet ohivirtausmoottorin kunnon perusteella ennen vikaantumista eikä tietyin väliajoin. Huoltopäätösten tekemiseen käytetään ohivirtausmoottoreiden sensoreilta saatavaa reaaliaikaista kunnonvalvontatietoa sekä malleja, joiden avulla voidaan ennustaa tuleva vikaantumisaika.

Kandidaatintyössä saatiin vastattua asetettuihin tutkimuskysymyksiin, mutta suhteellisen pintapuolisesti. Erityisesti sensoreilta saatavan kunnonvalvontatiedon käyttöä käsiteltiin hyvin suppeasti. Työssä onnistuttiin kuitenkin antamaan yleiskatsaus nykypäivänä käy-

tettyjen ohivirtausmoottoreiden kunnonvalvontaan. Suurimpana ongelmana työtä tehdessä oli sopivien lähteiden löytäminen. Lähteiden etsimistä vaikeutti erityisesti se, että lähes kaikki ilmailuun liittyvä kirjallisuus ja tutkimus on englanninkielistä. Tämän vuoksi sopivien hakusanojen ja -lausekkeiden keksiminen oli hankalaa. Myös ilmailuun liittyvien sanojen kääntäminen englannista suomeksi oli ajoittain ongelmallista, koska käännökset olivat usein virheellisiä kyseisessä kontekstissa.

Tulevissa tutkimuksissa voitaisiin keskittyä työssä käsiteltyjen pienempien kokonaisuuksien käsittelyyn. Esimerkiksi digitaalisten kaksosten käyttö ohivirtausmoottoreiden kunnonvalvonnassa voisi olla hyvinkin ajankohtainen tutkimuksen aihe. Tulevaisuudessa ohivirtausmoottoreiden kunnonvalvonnan merkitys tulee varmasti kasvamaan entisestään ja keskittymään erityisesti koneoppimista hyödyntävien digitaalisten mallien käyttöön. Ohivirtausmoottoreiden kunnossapitojärjestelmistä tulee näin entistä autonomisempia, jolloin ne todennäköisesti analysoivat kunnonvalvontatiedon ja määrittävät tarvittavat kunnossapitotoimenpiteet itsestään. Ihmisen tehtäväksi jää siis järjestelmän määrittämien kunnossapitotoimenpiteiden suorittaminen.

LÄHTEET

Aainsqatsi K. (2008). Turbofan operation lbp.svg. Wikimedia Commons. Saatavissa (viitattu 29.3.2021):
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Turbofan_operation_lbp.svg

Airbus (2021). A220 FAMILY: PURPOSE BUILT FOR EFFICIENCY. Airbus. 3 p. Saatavissa:
<https://www.airbus.com/content/dam/corporate-topics/publications/backgrounders/En-Airbus-A220-Facts-and-Figures.pdf>

Behera, S., Choubey, A., Kanani, C. S., Patel, Y. S., Misra, R. & Sillitti, A. (2019). Ensemble Trees Learning Based Improved Predictive Maintenance Using IIoT for Turbofan Engines. Proceedings of the 34th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing. Association for Computing Machinery. pp. 842–850. Saatavissa:
<https://doi.org/10.1145/3297280.3297363>

Belov, S., Nikolaev, S. & Uzhinsky, I. (2020). Hybrid Data-Driven and Physics-Based Modeling for Gas Turbine Prescriptive Analytics. International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power. 19 p. Saatavissa:
<https://doi.org/10.3390/ijtp5040029>

CFM International (2003). TRAINING MANUAL CFM56-ALL BORESCOPE INSPECTION. CFM International. 215 p. Saatavissa:
<https://www.manualslib.com/manual/1589534/Cfm-Cfm56-Series.html>

CFM International (2017). LEAP overview. CFM International. 22 p. Saatavissa:
https://www.cfmaeroengines.com/wp-content/uploads/2017/09/Brochure_LEAPfiches_2017.pdf

Chen, D., Wang, X. & Zhao, J. (2012). Aircraft Maintenance Decision System Based on Real-time Condition Monitoring. Procedia Engineering. Vol. 29, pp. 765–769. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.038>

Cleyen, O. (2013). Repair process for a V2500 high-pressure turbine guide vane (1).jpg. Wikimedia Commons. Saatavissa (viitattu 1.5.2021):
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Repair_process_for_a_V2500_high-pressure_turbine_guide_vane_\(1\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Repair_process_for_a_V2500_high-pressure_turbine_guide_vane_(1).jpg)

Crane, D., Foulk, J. L. & Scoggins, D. (2018). Powerplant, Fourth Edition. Aviation Supplies & Academics, Inc. 787 p. Saatavissa:
<http://libproxy.tuni.fi/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&Aut>

hType=cookie,ip,uid&db=e000xww&AN=1898883&site=ehost-live&scope=site

Dahl, J. (2007). Jet engine.svg. Wikimedia Commons. Saatavissa (viitattu 27.4.2021):
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jet_engine.svg

Embraer (2017). E190. Embraer. 2 p. Saatavissa:
https://www.embraercommercialaviation.com/wp-content/uploads/2017/06/Embraer_spec_E190_web-EN.pdf

Fedele, L., Vito, L. Di & Ramundo, F. E. (2020). Increasing Efficiency in an Aeronautical Engine through Maintenance Evaluation and Upgrades: Analysis of the Reliability and Performance Improvements under Financial Issues. *Energies*. MDPI AG. 17 p. Saatavissa: <http://doi.org/10.3390/en13123059>

Hehenberger, P. & Bradley, D. (2016). *Mechatronic Futures: Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers*. Springer International Publishing. 259 p. Saatavissa: <http://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1>

Koivisto, R. & Jokinen, J. (2008). *Suihkumoottorit*. Opetushallitus. 208 s.

Kraft, J., Sethi, V. & Singh, R. (2014). Optimization of Aero Gas Turbine Maintenance Using Advanced Simulation and Diagnostic Methods. *Journal of engineering for gas turbines and power*. ASME. 10 p. Saatavissa: <http://doi.org/10.1115/1.4027356>

Lei, Y. (2016). *Intelligent Fault Diagnosis and Remaining Useful Life Prediction of Rotating Machinery*. Elsevier Science & Technology. 367 p. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/C2016-0-00367-4>

Linke-Diesinger, A. (2008). *Systems of Commercial Turbofan Engines: An Introduction to Systems Functions*. Springer Berlin / Heidelberg. 239 p. Saatavissa: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=372847>

Liu, M., Wang, B. & Liu, D. (2020). A Digital Twin Modeling Method for Turbofan Engine Real-time Test Data Analysis and Performance Monitoring. *11th International Conference on Prognostics and System Health Management*. pp. 444–449. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/PHM-Jinan48558.2020.00086>

Maclsaac, B. & Langton, R. (2011). *Gas Turbine Propulsion Systems*. John Wiley & Sons, Incorporated. 350 p. Saatavissa: <http://doi.org/10.1002/9781119975489>

Malhotra, M. (2021). Electronic Maintenance P-F Curve.png. Wikimedia Commons. Saatavissa (viitattu 27.4.2021):
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electronic_Maintenance_P-F_Curve.png

Onnettomuustutkintakeskus (2021). L2021-E1 Liikennelentokoneen paluu Helsinki-

Vantaan lentoasemalle teknisen syyn vuoksi 21.2.2021. 7 s. Saatavissa: https://www.turvallisuustutkinta.fi/material/collections/20210309135118/7Og65d7zt/L2021-E1_Liikennelentokoneen_paluu_Helsinki-

[Vantaan_lentoasemalle_teknisen_syyn_vuoksi_21.2.2021.pdf](https://www.turvallisuustutkinta.fi/material/collections/20210309135118/7Og65d7zt/L2021-E1_Liikennelentokoneen_paluu_Helsinki-Vantaan_lentoasemalle_teknisen_syyn_vuoksi_21.2.2021.pdf)

Pratt & Whitney (2018). PW1000G-JM POWERING THE AIRBUS A320NEO. Pratt & Whitney. 2 p. Saatavissa: <https://prattwhitney.com/-/media/project/pw/pw-internet/pwu/pwu/products/commercial/pw1100g-jm.pdf?rev=635c7adfad9e43d686692f2e68c16cdd>

Qing, L. & Dan, F. (2015). The aircraft service life and maintenance early warning management based on configuration. First International Conference on Reliability Systems Engineering (ICRSE). 9 p. Saatavissa: <https://www.doi.org/10.1109/ICRSE.2015.7366518>

Rolls Royce (2015). Jet Engine, 5th Edition. John Wiley & Sons. 288 p. Saatavissa: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpJEE00001/jet-engine-5th-edition/jet-engine-5th-edition>

Stamboliska, Z., Rusiński, E. & Moczko, P. (2015). Proactive Condition Monitoring of Low-Speed Machines. Springer International Publishing. 186 p. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10494-2>

Ugechi, C. I., Ogbonnaya, E. A., Lilly, M. T., Ogaji, S. O. T. & Probert, S. D. (2009). Condition-Based Diagnostic Approach for Predicting the Maintenance Requirements of Machinery. Engineering. Vol. 01, pp. 177–187. Saatavissa: <https://doi.org/10.4236/eng.2009.13021>

Volponi, A. J. (2014). Gas Turbine Engine Health Management: Past, Present, and Future Trends. Journal of engineering for gas turbines and power. ASME. Vol. 136(5), p. 20. Saatavissa: <https://doi.org/10.1115/1.4026126>

Wild, T. W. (2018). Aircraft Powerplants, Ninth Edition. McGraw-Hill Education. Saatavissa: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781259835704>

Willingham, D. (2016). Predictive Maintenance, Prognostics and Health Monitoring. The MathWorks, Inc. Saatavissa (viitattu 1.5.2021): <https://se.mathworks.com/videos/predictive-maintenance-with-matlab-120998.html>