

Toni Alho

APUVOIMALAITTEEN KUNNONVALVONTA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Jouko Laitinen
Marraskuu 2023

TIIVISTELMÄ

Toni Alho: Apuvoimalaitteen kunnonvalvonta
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Lokakuu 2023

Apuvoimalaite on lentokoneissa käytetty turbiinimoottori, jonka tarkoitus on tuottaa sähköä lentokoneen järjestelmille, sekä paineilmaa ilmastointia ja päämoottoreiden käynnistämistä varten. Apuvoimalaitetta käytetään usein vain lentokoneen ollessa maassa, kun päämoottorit eivät ole käynnissä, mutta sitä voidaan käyttää myös ilmassa hätätapauksen sattuessa kohdalle. Lentoturvallisuuden, kustannusten ja matkustajien tyytyväisyyden vuoksi apuvoimalaitteen luotettava toiminta on tärkeää ja sen vuoksi kunnonvalvonta ja ennakoiva kunnossapito on merkittävässä roolissa.

Tässä työssä on tutustuttu yleisesti käytettyihin apuvoimalaitteen kunnonvalvonnan menetelmiin ja muihin potentiaalsiin kunnonvalvonnan menetelmiin kirjallisuuden avulla. Työssä on esitetty myös apuvoimalaitteen käyttötilanteita, rakennetta, vikaantumismekanismeja ja yleisimpiä vikatiljoja. Näiden tietojen perusteella apuvoimalaitteissa käytettyjen kunnonvalvonnan menetelmien arvioiminen ja muissa sovelluksissa käytettyjen menetelmien arviointi on mahdollista.

Ennakoivaa kunnossapitoa varten tärkeimpänä ja hyödyllisimpänä parametrina pidetään yleisesti pakokaasun lämpötilaa. Myös öljyn monitorointi on tärkeässä roolissa, varsinkin pidemmillä lennoilla ETOPS-kelpoisuuden saavuttamisen vuoksi. Muita parametreja kuten vuodatusilmanpaine, voidaan tuoda tehostamaan ennakoivaa kunnossapitoa. Työssä on tutkittu myös värähtelymittauksia, iskusysäysmenetelmää ja akustista emissiota, sekä näiden menetelmien mahdollisuuksia apuvoimalaitteiden kunnonvalvonnassa. Työssä on arvioitu eri menetelmien hyötyjä ja puutteita, sekä kuinka laajasti vikaantumista voidaan eri menetelmillä havaita.

Avainsanat: Apuvoimalaite, APU, kunnonvalvonta, ennakoiva kunnossapito

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1.JOHDANTO	1
2.APUVOIMALAITE	3
2.1 Apuvoimalaitteen käyttö	3
2.2 Apuvoimalaitteen toimintaperiaate ja rakenne	4
3.APUVOIMALAITTEEN KUNNONVALVONTA	7
3.1 Kunnonvalvonta ja ennakoiva kunnossapito.....	7
3.2 Apuvoimalaitteissa käytetyt kunnonvalvontamenetelmät.....	8
3.2.1 Pakokaasun lämpötila ja polttoaineen virtaus.....	9
3.2.2 Öljyn lämpötilan, epäpuhtauksien ja määrän valvonta.....	11
3.2.3 Vuodatusilmanpaineen valvonta	14
3.2.4 Käynnistymis- ja sammumisaika	15
3.2.5 Imuaukon johdesiiven ja vuodatusilman säätöventtiilin valvonta .	16
3.2.6 Vaatimukset kunnonvalvonnalle ETOPS-kelpoisuuden saavuttamiseksi.....	16
3.3 Potentiaaliset kunnonvalvonnan menetelmät apuvoimalaitteissa	18
3.3.1 Värähtelymittaukset	18
3.3.2 Iskusysäysmenetelmä.....	19
3.3.3 Akustinen emissio	20
3.4 YHTEENVETO MENETELMISTÄ	21
4.YHTEENVETO.....	23
LÄHTEET	25

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AE	Akustinen emissio
APU	engl. Auxiliary power unit, apuvoimalaite
BCV	engl. Bleed control valve, vuodatusilman säätöventtiili
ETOPS	engl. Extended-range twin-engine operational standards, kaksimoottorisia lentokoneiden minimietäisyyttä kentästä koskeva standardi
GB	engl. Gear box, apuvoimalaitteen osio, joka välittää aksiaalisen voiman generaattorille
GPR	engl. Gaussian process regression, koneoppimisen menetelmä
IFSD	engl. In-flight shutdown, moottorin pysähtyminen lennon aikana
IGV	engl. Inlet guide vane, imuaukon johdesiipi
LC	engl. Load compressor, apuvoimalaitteen paineilmaa tuottava osio
MCD	engl. Magnetic chip detector, magneettinen lastunilmaisin
PBR	engl. Bleed pressure ratio, vuodatusilmanpainesuhde
PS	engl. Power section, Apuvoimalaitteen voimaa tuottava osio
RVM	engl. Relevance vector machine, koneoppimisen menetelmä
α	Valmistajan ilmoittamasta laskentamallista saatu arvo
θ	Ympäröivän lämpötilan ja kansainvälisen standardi-ilmakehän lämpötilan suhde
EGT_{peak}	Mitattu lämpötilan huippuarvo
EP	Korjattu lämpötilan huippuarvo
PT	paine APU:n LC-osiossa
P_{inlet}	Imuaukon paine
$PBR_{reference}$	Vertailtava vuodatusilmanpaineen arvo

1. JOHDANTO

Lentokoneen apuvoimalaitteella (APU) on tärkeä rooli modernissa lentokoneessa. Sen avulla pystytään vähentämään päämoottoreiden käyttöä, lisäämään matkustajien viihtyvyyttä ja se mahdollistaa lentokoneen operoinnin ilman maasta saatavaa ulkoista tukea. Päämoottoreiden vähäisempi käyttötarve näkyy pienempänä polttoaineen kulutuksena ja alhaisempina kunnossapitokustannuksina. Ilmailualalla turvallisuus on ensisijaisen tärkeää ja APU:n muiden hyötyjen lisäksi se parantaa myös lentoturvallisuutta. Se voi toimia erityisen tärkeässä roolissa hätätapauksissa, joissa päämoottorit lakkaavat toimimasta, kuten US Airwaysin lennolla 1549 vuonna 2009.

Kun huollon tarve voidaan ennustaa, helpottaa se huoltojen aikataulutusta ja kunnossapito-ohjelman laatimista. Lisäksi ei-odotettujen rikkoutumisien määrää onnistutaan ehkäisemään, kun laitteen kuntoon vaikuttavia tekijöitä tarkkaillaan. Kunnossapito-ohjelmaa laadittaessa tulee pohtia laajasti, mitä vaikutuksia APU:n vikaantuminen voi aiheuttaa ja minkälaisia panostuksia sen suhteen on kannattavaa tehdä.

Tämä kandidaatintyö on tehty kvalitatiivisen kirjallisuustutkimuksen muodossa, ja käsittelee modernien lentokoneiden apuvoimalaitteita ja niiden kunnonvalvontaa kunnossapitoa varten. Työssä perehdytään kunnonvalvontamenetelmiin, joita tyypillisesti käytetään lentokoneiden apuvoimalaitteissa. Tämän lisäksi tutustutaan muihin yleisesti tunnettuihin kunnonvalvonnan menetelmiin ja tutkitaan niiden soveltuvuutta apuvoimalaitteisiin. Työn tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- Mitkä ovat tyypilliset APU:n kunnonvalvonnassa käytetyt menetelmät?
- Mitä kunnonvalvonnan menetelmiä olisi mahdollista soveltaa APU:n kunnonvalvonnassa?

Luku 2 käsittelee apuvoimalaitteita yleisellä tasolla. Luvun tarkoitus on luoda tekstin lukijalle ymmärrys apuvoimalaitteen käyttötarkoituksesta ja miksi sen kunnossapito on tärkeää. Tämän lisäksi luvussa tutustutaan apuvoimalaitteen rakenteeseen, toimintaperiaatteeseen ja tyypillisimpiin vikatiloihin.

Luvussa 3 käsitellään kunnonvalvontaa erityisesti apuvoimalaitteen näkökulmasta. Luvussa tutustutaan apuvoimalaitteissa yleisesti käytettyihin kunnonvalvonnan menetelmiin ja vaatimuksiin, joita ilmailuala tuo mukanaan. Tämän lisäksi luvussa tarkastellaan

muiden yleisesti tunnettujen kunnonvalvonnan menetelmien soveltuvuutta apuvoimalaitteiden kunnonvalvontaan.

Luku 4 tiivistää työn aikaisemmissa luvuissa läpikäytyt asiat ja tarjoaa tutkimuskysymyksiin vastaukset. Tämän lisäksi luvussa tulee esille työtä rajoittaneet tekijät ja se, kuinka tutkimusta olisi mahdollista jatkaa eteenpäin.

2. APUVOIMALAITE

Apuvoimalaite (APU, Auxiliary Power Unit) on turbiinimoottori, jota käytetään lentokoneissa, laivoissa ja erilaisissa maalla ajettavissa liikennevälineissä. Lentokoneissa APU sijaitsee rungon takaosassa, ja sen tarkoitus on tuottaa työntövoiman sijaan virtaa sähköjärjestelmille sekä paineilmaa ilmastointia ja päämoottoreita varten (Selcuk et al. 2014). APU:a käytetään usein vain lentokoneen ollessa maassa, mutta se voi olla lentäessä kriittisen tärkeässä asemassa hätätapauksissa. APU mahdollistaa lentokoneen järjestelmien käytön ilman, että päämoottorit ovat käynnissä mikä tekee lentokoneesta riippumattoman ulkoisista virran- ja voimanlähteistä. (Zuo 2014)

2.1 Apuvoimalaitteen käyttö

APU:a käytetään normaalisti useisiin eri toimintoihin lentokoneen ollessa maassa. APU:lla tuotetaan matkustamon ilmastointi ja sähkövirta lentokoneen järjestelmille. Lisäksi yksi APU:n päätehtävistä on tuottaa pneumaattinen voima päämoottoreiden käynnistämistä varten. Lentokentillä, joissa ulkoinen lähde on saatavilla, APU:a käytetään usein vain lyhyen aikaa moottoreiden käynnistämiseen ja tarpeen vaatiessa matkustamon ilmastointiin. Päämoottoreiden käynnistämisen jälkeen APU sammutetaan. (Scholz 2015)

Vaikka normaalisti APU on käytössä vain lentokoneen ollessa maassa, sillä voi olla myös tärkeä rooli lentokoneen ollessa ilmassa. Päämoottoreiden vikaantuessa ja sammussa myös niiden tuottama paineilma ja virta avioniikkajärjestelmille loppuu. APU voi siis tarjota kriittisen avun tilanteessa, jossa lentokoneen moottorit menettävät toimintakykynsä. Tällaisesta tilanteesta mahdollisesti tunnetuin esimerkki on vuonna 2009 US Airwaysin lennon 1549 pakkolasku Hudson-jokeen, jossa Airbus A320 törmäsi lintuparveen pian nousun jälkeen, minkä seurauksena molemmat moottorit sammuiivat. Tällä lennolla APU:n käynnistäminen ilmassa varmisti sähköisten järjestelmien toimimisen ja koneen lentämisen normal law -tilassa. Kaikki koneen kyydissä olleet selvisivät hengissä. (National transportation safety board 2010)

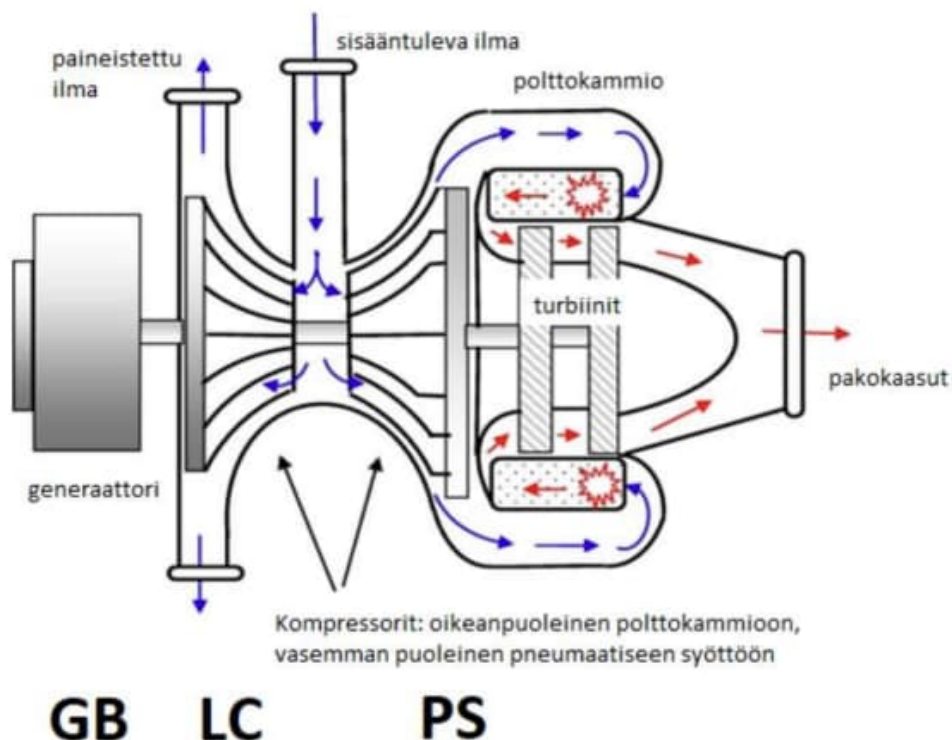
Mahdollisuus käyttää APU:a hätätilanteissa on myös vaatimus ETOPS-kelpoisuuden (Extended-range Twin-engine Operation Performance Standards) saavuttamiselle. ETOPS-kelpoisuutta tarvitaan pitkillä lennoilla, joilla lennon aikana lähimmälle varalas-

kukentälle on yli 60 minuutin matka. ETOPS-kelpoisuuden saavuttaminen tuo myös kunnossapitoon ja kunnonvalvontaan vaatimuksia, jotka koskevat myös APU:a. (AIR5317A 2018, s. 8) Näistä kunnonvalvontaan liittyvistä vaatimuksista kerrotaan lisää luvussa 3.

Lyhemmillä lennoilla, joilla lähin varalaskukenttä on saavutettavissa alle 60 minuutissa, APU ei ole pakollinen. Huolimatta tästä, suurin osa liikennelentokoneista on varastettu APU:lla. Scholz (2015) esittää julkaisussaan, että APU:a ei tarvita suurimpaan osaan lentokoneista ja sitä tulisi tarjota ainoastaan vaihtoehtoisena osana lentokonetta tilatessa. Scholz perustelee näkemystään lentokenttien tiukentuneilla rajoituksilla APU:n käyttöön, APU:n aiheuttamilla saasteilla ja APU:n aiheuttamista kustannuksista lyhyillä lennoilla.

2.2 Apuvoimalaitteen toimintaperiaate ja rakenne

APU on kaasuturbiini, jossa laajenevat kaasut tuottavat suihkumoottorista poiketen akselivoimaa työntövoiman sijasta. Tämä kaasuturbiinin sovellus tunnetaan nimellä turbii-nimoottori, ja se muistuttaa toimintaperiaatteelta hyvin paljon potkuriturbiinia. APU-moot-toreissa akselivoima hyödynnetään paineistetun ilman tuottamiseen ja generaattorin pyörittämiseen. Tyypillisen APU:n toimintaperiaatetta voidaan tarkastella kuvasta 2.



Kuva 1. Kaaviokuva apuvoimalaitteesta (Sforza 2014, s. 321).

Sisään tulevan ilman voidaan nähdä ohjautuvan kahdelle ahtimelle. Kuvan oikeanpuoleinen ahdin ohjaa paineistetun ilman polttokammioon, jossa se sytytetään polttoaineen

avulla. Tämän jälkeen purkautuvat palokaasut saavat turbiinit pyörimään, joka saa puolestaan generaattorin ja ahtimet pyörimään. Vasen ahdin paineistaa ilman pneumaattisia järjestelmiä varten. (Sforza 2014). APU voidaan jakaa kolmeen osioon: Power Sectioniin (PS), Load Compressoriin (LC) ja Gearboxiin (GB). PS on APU:n osio, joka tuottaa aksiaalisen voiman LC- ja GB-osioita varten. PS-osio koostuu ahtimesta, polttokammioista, turbiineista, laakereista ja hiilitiivisteistä. LC tuottaa paineilman pneumaattisia järjestelmiä varten, ja GB välittää aksiaalisen voiman generaattorille. (Peng et al. 2015)

APU toimii jatkuvalla samalla kierrosnopeudella huolimatta vaaditun sähköjärjestelmien virran tai pneumaattisen ilman määrästä eikä ohjaamomiehistö pysty säätämään kierrosnopeutta mitenkään. Jos APU:lta ohjataan suuri määrä paineistettua ilmaa ilmastointia varten, näkyy se korkeampana pakokaasun lämpötila-arvona. Jos pakokaasun lämpötila uhkaa nousta liian korkeaksi vuodatusilman määrän vuoksi, kuormaa ja täten myös pakokaasun lämpötilaa pienennetään kuormansäätöventtiilin avulla. (Sterkenberg et al. 2022, luku 2.2)

APU:n vikaantumisen ennustaminen on haastavaa sen monimutkaisen rakenteen ja vikaantumismekanismien vuoksi. Yhdenkin komponentin vikaantuminen voi aiheuttaa monen muun komponentin vikaantumisen. Jos vikaantumismekanismeista ei ole riittävästi ymmärrystä, huollon yhteydessä jokin vioittunut komponentti voi helposti jäädä vaihtamatta. Ymmärrys yleisimmistä vikatiloista ja vikaantumismekanismeista tulee täten olla pohjalla luotaessa APU:n kunnonvalvonta- ja kunnossapito-ohjelmaa. Yleisimpiä APU:n vikatiloja on esitetty alla olevassa taulukossa 1. Taulukon tiedot ovat peräisin China Southern Airlinesin ja Pratt & Whitney AeroPowerin tekemästä tutkimuksesta, jossa esitetään uusi lähestymistapa APU:n luotettavuuden mallintamiseen (Peng et al. 2015)

Taulukko 1. APU:n vikatilat (Peng et al. 2015).

Komponentti	Vikaantumisien määrä (kpl)	Vikaantumisien prosentuaalinen osuus kaikista vikaantumisista (%)
Turbiini	165	41
Vaihdelaatikko	88	22
Ahdini	41	10
Laakeri	39	10
Hiilitiiviste	31	8
Polttokammio	14	3
Muut	19	7
Yhteensä	407	100

Taulukosta 1 voidaan nähdä PS-osiossa ilmaantuvien vikatilojen käsittävän yli 50% vikaantumisista. Turbiinin vikaantumiset ovat ylivoimaisesti yleisimpiä niiden osuuden ollessa peräti 41% kaikista vikaantumisista. Turbiinin hajoaminen voi ilmaantua kuitenkin jonkin muun komponentin vikaantumisen vuoksi. Esimerkiksi laakerin vioittuminen voi

olla seurausta vahingoittuneen turbiinisiiven aiheuttamasta värähtelystä. (Peng et al. 2015)

3. APUVOIMALAITTEEN KUNNONVALVONTA

APU:n kunnonvalvonta on melko tuore aluevaltaus ilmailualalla ja sen suosio on alkanut kasvamaan 2000-luvun alkupuolella. Suosion kasvu juontaa juurensa lentokelpoisuuden saavuttamiselle ETOPS-lennoille. ETOPS-kelpoisuuden lisäksi halu vähentää viivästyksiä kannustaa laadukkaaseen kunnonvalvontaan. Vanhemmissa lentokoneissa kunnonvalvonta on ollut rajoittunutta, mutta uuden teknologian koneissa kunnonvalvonnan odotetaan olevan hyvällä tasolla koneeseen asennettujen antureiden vuoksi. Teknologian kehittyminen mahdollistaa myös uusien menetelmien käyttämisen kunnonvalvonnassa ja ennakoivassa kunnossapidossa. (AIR5317A 2018, s. 8-12)

3.1 Kunnonvalvonta ja ennakoiva kunnossapito

Kunnossapitostrategiat voidaan jakaa yleisesti ottaen korjaavaan, ehkäisevään ja ennakoivaan kunnossapitoon. Korjaavassa kunnossapidossa laitteelle ei tehdä mitään kunnossapitotoimenpiteitä ennen kuin se rikkoutuu. Ehkäisevässä kunnossapidossa huolto- toimet perustuvat säännöllisyyteen ja niiden välinen aika on lyhempi kuin laitteen odotettu aika vikaantumisien välillä. Kunnossapidon lähestymistapaa, jossa vikaantuminen pyritään ennustamaan ja kunnossapitotoimenpide pyritään suorittamaan optimaalisessa ajankohdassa, kutsutaan ennakoivaksi kunnossapidoksi. Ennakoiva kunnossapito tunnetaan myös nimellä kuntoon perustuva kunnossapito ja se perustuu laitteen kunnonvalvontaan. Kunnonvalvonnan tavoitteena on kerätä tietoa laitteen sen hetkisestä kunnosta ja suorituskyvystä, mitä voidaan käyttää hyödyksi laitteen tulevaisuuden kunnon arviointiin. (Randall 2010, s. 2-3) Kunnonvalvonnan avulla saadaan havaittua välittömästi normaalista poikkeavat parametrit, minkä ansiosta laitteen laajemmat vikaantumiset ja häiriöaika onnistutaan estämään. Ennakoivalla kunnossapidolla ei voida reaali maailmassa kuitenkaan poistaa täysin korjaavaa ja ehkäisevää kunnossapitoa, vaikka sen tuomisella kunnossapito-ohjelmaan saavutetaankin lukuisia hyötyjä (Mobley 2002, s. 5, 60).

Kunnossapito-ohjelman tavoitteena on minimoida laitteen tarpeeton häiriö- ja huoltoaika. Laitteen häiriö- ja huoltoaika voi olla joko suunniteltua tai suunnittelematonta. Jos häiriö- ja huoltoaika on suunniteltua, laitteelle tehdään kunnossapito-ohjelman mukaisia ennalta tiedettyjä kunnossapitotoimenpiteitä. Suunnittelematon häiriö- ja huoltoaika tarkoittaa laitteen vikaantumista, jota kunnossapito-ohjelma ei osaa ennustaa. Molemmissa tapauksissa, suunnitellussa ja suunnittelemattomassa, ennakoivalla kunnossapidolla saadaan vähennettyä laitteen sammuksissa olevaa aikaa. Korjaavien ja ehkäisevien kun-

nossapitotehtävien tarvetta onnistutaan vähentämään ja tarpeettomia kunnossapitotoimenpiteitä saadaan eliminoitua. Ennakoivan kunnossapidon hyötyjen saavuttaminen riippuu vahvasti, kuinka se on toteutettu. Ennakoivan kunnossapidon hyödyt menetetään, jos vikaantumisen ennustamista ei voida toteuttaa tarpeeksi luotettavasti. (Mobley 2002, s. 16, 60)

3.2 Apuvoimalaitteissa käytetyt kunnonvalvontamenetelmät

APU:n kunnossapidon kustannukset ovat suhteellisen korkeita ja niiden pieneminen vaikuttaisi edukkaasti lentoyhtiöitä. Oikein toteutetun APU:n ennakoivan kunnossapidon ja kunnonvalvonnan avulla lentoyhtiöt saisivat toivomaansa taloudellista hyötyä, unohtamatta korkeampaa tasoa lentoturvallisuudessa. Ennakoiva kunnossapito voi perustua tieto-ohjautuvaan tai malliin perustuvaan metodiin. Malliin perustuvan metodin tarkoituksena on rakentaa malli perustuen fysiikan lakeihin, mikä kuvaa APU:n käyttäytymistä tarkasti. Tämänkaltaisen mallin luominen on kuitenkin käytännössä todella haastavaa APU:n rakenteen ja vikaantumismekanismien vuoksi. (Liu et al. 2019)

Tieto-ohjautuva lähestymistapa pohjautuu tilastolliseen teoriaan ja koneoppimiseen käyttäen kunnonvalvontadataa hyväkseen. Tieto-ohjautuvan metodin etuna on se, että ymmärrys APU:n mekanismeista ei tarvitse olla niin syvää kuin aiemmin mainitussa metodissa, kunhan kerätty data on tarpeeksi laadukasta. Tieto-ohjautuvaa mallia varten datan kerääminen on nykyisin helppoa kehittyneen sensoriteknologian vuoksi. Tieto-ohjautuvan lähestymistavan käyttämisen suosio monimutkaisiin sovelluksiin näyttääkin lupavammalta koko ajan. (Liu et al. 2020)

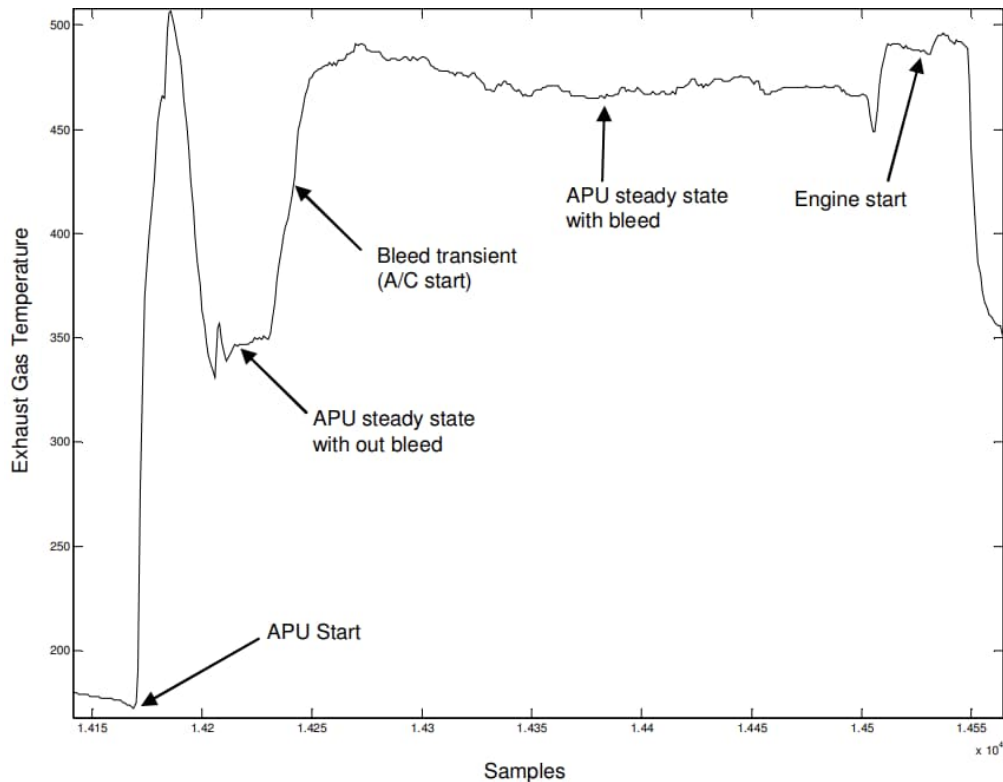
Seuraavat aliluvut käsittelevät APU:n kunnonvalvonnassa yleisimmin nähtyjä ja käytettyjä menetelmiä. Esitellyt menetelmät pohjautuvat vahvasti standardiin AIR5317A, joka ohjeistaa APU:n parempaan kunnossapitoon ja siitä saataviin hyötyihin. Aliluvuissa käsitellään menetelmien etuja, puutteita, mittaustapoja ja kustannuksia. Aliluvuissa käsitellään myös esimerkitapauksena maailman suurimman apuvoimalaitteiden valmistajan yhdysvaltalaisen Honeywellin valmistamaa 131-9A -apuvoimalaitetta. 131-9A esiteltiin vuonna 1995 ja sen jälkeen niitä on toimitettu yli 15 000 kappaletta. Luvussa 2 mainitulla US Airwaysin lennolla 1549 käytössä ollut APU oli 131-9A. (Honeywell 2020)

3.2.1 Pakokaasun lämpötila ja polttoaineen virtaus

Pakokaasun lämpötilatietoa käytetään hyödyksi monissa aiemmissä tutkimuksissa ehdotetuissa ratkaisussa APU:n ennakoivaa kunnossapitoa varten. Pakokaasun lämpötila on yksi tärkeimmistä valvottavista parametreista APU:n kunnonvalvonnassa. Koko APU:n vikaantumisen ennustaminen voi pohjautua pakokaasun lämpötilan ennustamiseen. (Liu et al. 2019) Menetelmän hyöty perustuu pakokaasun lämpötilan kykyyn kertoa turbiinin suorituskyvystä (Xi et al. 2017). Turbiinin suorituskyvyn valvominen on erityisen tärkeää, sillä Peng et al. mukaan 41 % APU:n vikaantumisista johtuu turbiinin vioittumisesta. Äkillinen pakokaasun lämpötilan kohoaminen voi myös viestiä tukkeutuneesta imuaukosta, tai polttokammion tai ahtimen vikaantumisesta (AIR5317A 2018, s. 28). Peng et al. mukaan nämä edellä mainitut vikatilat kattavat yli 50 % kaikista vikatiloista.

APU:n pakokaasun lämpötilaa mitataan termopareilla. Esimerkiksi Honeywellin valmistamassa APU:ssa, joka on käytössä Boeing 747-100/200/300 koneissa, termoparit ovat sijoitettu radiaalisesti turbiinin pakoaukkoon. Termopareja on 12 ja ne ovat K-tyyppin termopareja. (Skliros et al. 2020) Termoparit soveltuvat käytettäväksi olosuhteissa, joissa anturin on kestävä korkeita lämpötiloja ja anturin on oltava pienikokoinen (Nokeval 2021). Termoelementtien tarkkuus on tyypistä riippuen $\pm 1-3^{\circ}\text{C}$. K-tyyppin termoelementti kykenee mittaamaan lämpötilaa noin -200°C - $+1100^{\circ}\text{C}$ ja se on yleisin käytetty termoelementtityyppi. (Säätö 2021)

Pakokaasun lämpötilaa mitataan erilaisissa APU:n käyttötilanteissa, jolloin lämpötilatieto voi viestiä erilaisista vikaantumistiedoista. Kuvassa 2 on tyypillinen profiili APU:n pakokaasun lämpötilalle



Kuva 2. Tyypillinen APU:n pakokaasun lämpötilan käyrä. Pystyakselilla pakokaasun lämpötila ja vaak akselilla näytteiden määrä. (Vianna et al. 2014)

Kuvasta 2 voidaan nähdä pakokaasun lämpötilan käyvän hetkellisesti korkealla APU:n käynnistyksen aikana ennen kuin se laskee ja tasoittuu tyhjäkäyntiarvoon. Käynnistyksen aikaista huippuarvoa voidaan käyttää hyväksi kunnonvalvonnassa ja kohonnut huippuarvo voi viitata erilaisiin ongelmiin. Korkea huippuarvo voi kertoa joko tukkeumasta imuaukossa tai mahdollisesti ahtimen, polttokammion tai turbiinin vikaantumisesta. APU:n käynnistyttyä sen ollessa vielä kuormittamattomassa tilassa, normaalia korkeampi pakokaasun lämpötila viestii usein turbiinin vioittumisesta. Jos pakokaasun lämpötila on tämän lisäksi korkea myös kuormitetussa tilassa, ongelma turbiinissa on erittäin todennäköinen. Tällaisessa tapauksessa voidaan olla myös varmoja sensoreiden toimivan oikein ja niistä saatavan datan olevan totuudenmukaista. (AIR5317A 2018, s. 15)

Polttoaineen virtaus on pakokaasun lämpötilan ohella yksi tärkeimmistä parametreista APU:n kunnonvalvonnassa. Nämä kaksi parametria liittyvätkin toisiinsa olennaisesti. Kohonnut pakokaasun lämpötila johtuu kasvaneesta polttoainevirtauksesta turbiinin ja ahtimen tehon heikentyessä. Polttoaineen virtausta ei yleisesti ottaen mitata erikseen, mutta lukema voidaan saada laskemalla. (AIR5317A 2018, s. 20)

Pakokaasun lämpötilan ja polttoainevirtauksen trendi tulisi luoda APU:n käyttötuntien ollessa 20-50 tuntia. On huomioitava kuitenkin, että huollon yhteydessä APU:n luonne voi muuttua ja täten myös trendi on selvitettävä uudestaan. Trendi APU:n suorituskyvylle

voidaan myös saada testitilassa, jossa olosuhteet tunnetaan ja niitä voidaan myös hallita. Lisäksi APU:n kuormitusta tulisi vaihdella ja mikäli mahdollista, dataa polttoaineen virtauksesta ja pakokaasun lämpötilasta kerätä käyttötuntien funktiona. (AIR5317A 2018, s. 20)

Lentokoneet operoivat eri puolilla maailmaa, minkä vuoksi myös olosuhteet vaihtelevat laajasti. Suuret erot ilman lämpötilassa vaikuttavat myös suuresti kaasuturbiinin suorituskykyyn. Erilaisissa olosuhteissa saatu data on korjattava kansainvälisen standardi-ilmakehän meren pinnan tasoon, jotta siitä saadaan vertailukelpoista. Esimerkiksi korjattu pakokaasun lämpötilan huippuarvo EP APU:n käynnistyksen aikana saadaan kaavalla:

$$EP = \frac{EGT_{peak}^{\alpha}}{\theta} \quad (1)$$

jossa EGT_{peak} on mitattu lämpötilan huippuarvo, α on valmistajan ilmoittamasta laskentamallista saatu arvo ja θ on ympäröivän lämpötilan ja kansainvälisen standardi-ilmakehän lämpötilan suhde. (Yang et al. 2018)

Honeywell käyttää kaikissa valmistamissaan apuvoimalaitteissa pakokaasun lämpötilatrendiä kunnonvalvonnan menetelmänä. Mallissa 131-9A voidaan seurata yleistä pakokaasun lämpötilatrendiä, mutta myös käynnistymishetken huippuarvoa voidaan seurata. Tätä jälkimmäistä mahdollisuutta ei ole saatavissa kaikkiin Honeywellin apuvoimalaitteisiin. (Honeywell 2016)

3.2.2 Öljyn lämpötilan, epäpuhtauksien ja määrän valvonta

Öljyn lämpötilaa tarkkaillaan APU:n öljyn jäähdytysjärjestelmän tai generaattorin vikaantumisen havaitsemiseksi. Kasvanut öljyn lämpötila voi viitata tukkeutuneeseen ilman- tai öljynjäähdyttimeen johtuen liasta tai roskista imuaukossa. Öljyn lämpötilaa tarkkaillaan usein vastuslämpötila-antureilla. Öljyn lämpötilan tarkkailuun ei ole välttämätöntä seurata trendiä, mutta hälytysraja olisi hyvä olla olemassa. Tämän avulla ilman- tai öljynjäähdyttimen tarkastus ja tarvittavat huoltotoimet voidaan toteuttaa hyvissä ajoin ennen rikkoutumista. (AIR5317A 2018, s. 22) Honeywellin 131-9A -APU:ssa öljyn lämpötilan seuraaminen on osa kunnonvalvontaa (Honeywell 2016).

Paine-eroja öljynsuodattimissa, riippuen sijainnista ja voitelujärjestelmän kokoonpanosta, voidaan käyttää hyödyksi laakeri-, vaihde- tai generaattorivian havaitsemiseen. Kahdella generaattorilla varustetulla APU:lla on usein omat öljynsuodattimet ja paineen

alenemat näiden suodattimien välillä tulisi olla samat. Eroavaisuudet paineen alenemisessä voivat viestiä toisen generaattorin hajoamisesta. Tämän menetelmän huonona puolena on kuitenkin se, että suodatin ei välttämättä kerää kaikkia epäpuhtauksia. Nämä voitelujärjestelmään jääneet epäpuhtaudet aiheuttavat virheellistä tietoa paineen alenemasta ja täten viestivät aiheettomasti ongelmista generaattorissa. (AIR5317A 2018, s. 23)

Öljyn epäpuhtauksien monitorointi tavoittelee nopeasti etenevien vikaantumisen havaitsemisen. Monet uudet tehtaalta tulleet APU:t saattavat sisältää valmistusprosessin tai uusien komponenttien kontaktin jäljiltä epäpuhtauksia. Myös osien kuten esimerkiksi rat- taiden tai laakereiden kuluminen voi aiheuttaa metallilastujen päätyminen voiteluaineen joukkoon. Monitorointi voidaan toteuttaa samalla tavalla kuin päämoottoreissakin. Epäpuhtauksien havaitsemiseen on useita eri menetelmiä: ferriittisten ja ei-ferriittisten hiukkasten havaitseminen, hiukkasten määrän laskeminen ja koon määrittäminen. (AIR5317A 2018, s. 25; Wild 2018, luku 19.7.2) Taulukossa 2 on esitetty käytetyimmät ja tehokkaimmat menetelmät epäpuhtauksien havaitsemiseen hiukkasen kokoon perustuen.

Taulukko 2. *Menetelmät metallilastun havaitsemiseen koon perusteella (AIR1828c, s. 26).*

<i>Menetelmä</i>	<i>Lastun koko (µm)</i>
<i>Magneettinen lastunkerääjä</i>	<i>50-1000</i>
<i>Sähköinen lastunilmaisin</i>	<i>50-1000</i>
<i>Ferrografia</i>	<i>1-100</i>
<i>Spektrometrinen analyysi</i>	<i><10</i>

Suurempien hiukkasten havaitsemiseen magneettinen lastunkerääjä, sähköinen lastunilmaisin ja öljynsuodattimen tarkastaminen ovat hyviä keinoja. Magneettiset lastunkerääjät ovat olleet käytössä jo kunnonvalvonnan keinona pitkään ja sitä käytetään edelleen laajasti ilmailualalla. (AIR1828C, s. 9) Magneettiset lastunkerääjät ovat yleisesti ottaen pysyviä magneetteja asetettuna öljyvirtaan ja ne tarkastetaan säännöllisin väliajoin riippuen valvottavalle laitteelle annetuista suosituksista (Mishra et al. 2017). Etuna tässä ratkaisussa on yksinkertaisuus ja alhaiset kustannukset. Huonoja puolia ovat tarve rutiinomaisille tarkastuksille, mahdolliset kunnossapidon aiheuttamat ongelmat jatkuvasta öljyjärjestelmään tunkeutumisesta ja vaatimus ammattitaidolle näytteen tulkitsemisessa. (Showalter et al. 2012)

Sähköisiä lastunilmaisimia käytetään paljon helikoptereissa, joissa moottoreiden nopeudet ovat suuria ja laakereiden vikaantuminen kehitty nopeasti. Etuna magneettisiin lastunkerääjiin verrattuna on mahdollisuus jatkuvaan reaaliaikaiseen valvontaan. Haittana

tässä on kuitenkin muut kuin vikaantumiseen liittyvät epäpuhtaudet, jotka voivat viestiä vikaantumisesta virheellisesti ja aiheettomasti. (Showalter et al. 2012)

Ferrografiaa voidaan suorittaa kahdella eri tekniikalla, jotka vastaavat eri vaatimuksiin. DR-ferrografia (direct reader) soveltuu hyvin kulumisen vakavuuden valvontaan. Analyttinen ferrografia soveltuu kulumisen tyyppin määrittämiseen. Analyttiseen ferrografiaan voidaan siirtyä, kun DR-ferrografia indikoi epätyypillisestä kulumisesta. (AIR1828C, s. 46-47; Tandon et al., s. 130)

Spektrometrinen analyysi perustuu moottorista otettuihin öljynäytteisiin ja niistä havaittavien lastujen pitoisuuden kasvamisen seuraamiseen (Showalter et al. 2012). Tuntemus moottorin materiaaleista on erityisen tärkeässä asemassa, jotta näytteen seasta löytyneiden lastujen alkuperä voidaan paikantaa (Marsden & Becker 2002, s. 1). Myös spektrometrinen analyysi vaatii säännöllisiä tarkastuksia, eikä valvontaa voida suorittaa reaaliaikaisesti. Pyrkimys reaaliaikaiseen kunnonvalvontaan ja datan saamiseen ilman erillisiä tarkastuksia tekevät spektrometrisestä analyysistä epäkiinnostavan menetelmän tulevaisuuden kannalta. (Showalter et al. 2012)

Vikatilat voivat olla sellaisia, että ne tuottavat vain tietyn kokoisia hiukkasia, tai tuottavat edetessään suurempia tai pienempiä hiukkasia. Hiukkasen koko ei kuitenkaan ole yksiselitteinen asia. Hiukkasen koko määritetään usein sen suurimman dimension mukaan, eikä ota huomioon hiukkasen massaa tai muotoa. Useamman menetelmän käyttö epäpuhtauksien havaitsemiseen voi helpottaa huomattavasti niiden vikatilojen havaitsemisen, jotka tuottavat epäpuhtauksia, joiden koko vaihtelee laajasti. Hiukkasten koon ja määrän perusteella voidaan muodostaa aikajana epäpuhtauksien havaitsemiselle ja tämän avulla luoda trendi epäpuhtauden havaitsemisesta hajoamiseen (AIR5317A 2018, s. 24).

Voitelujärjestelmässä olevat epäpuhtaudet voivat aiheuttaa laajoja korjaustoimenpiteitä ja aiheuttaa suunnittelemattomia huoltoja. Reaaliaikainen epäpuhtauksien monitorointi mahdollistaa vikaantumisen havaitsemisen mahdollisimman ajoissa. Huolimatta reaaliaikaisen monitoroinnin hyödyistä, sen korkeat kustannukset jarruttavat lentoyhtiöiden halukkuutta panostaa siihen. (AIR5317A 2018, s. 24)

Öljyn kulutusta seuraamalla voidaan havaita vuoto öljyjärjestelmässä tai APU:n heikentyneestä suorituskyvystä johtuva kasvanut kulutus. Öljyn kulutus tulee suhteuttaa APU:n operointitunteihin lentotuntien tai lentojen määrän sijaan. Useimpiin APU:ihin on asennettu öljymäärämittari, jonka avulla voidaan tarkistaa visuaalisesti järjestelmässä olevan öljyn määrä. Öljymäärämittarin perusteella tehtävä tarkastus sisältää kuitenkin kaksi

haastetta: mittarin tarkkuus ja tarve dokumentoida tarkastuksen tulokset sekä lisätyn öljyn määrä. Sen vuoksi anturilla varustettu APU, jonka avulla käyttäjä voi seurata öljyn määrää, helpottaa huomattavasti öljyn määrän seuranta. Öljyn kulutuksen seuraaminen on myös vaatimus ETOPS-kelpoisuudelle. Öljyn kulutuksen seuraaminen voidaan yhdistää osaksi päämoottoreiden öljyn kulutuksen monitorointiohjelmia. (AIR5317A 2018, s. 24; Boeing)

3.2.3 Vuodatusilmanpaineen valvonta

APU:n suorituskyvyn heikkeneminen tai vikaantuminen voidaan havaita valvomalla vuodatusilmanpainetta. Vuodatusilmanpaineen laskenut arvo voi johtua monesta syystä, kuten esimerkiksi vikaantuneesta ahtimesta tai turbiinista. Vikaantumisen alkaessa vuodatusilmanpainesuhde alkaa laskemaan vähitellen. Ulkoisesta syystä johtuva vikaantuminen eli tilanne, jossa vieras esine päätyy APU:n sisään, vuodatusilmanpaine laskee merkittävästi. Vuodatusilmanpainesuhde PBR (Bleed Pressure Ratio) voidaan laskea ja normalisoida ympäröivien olosuhteiden ja nopeuden vaihtelujen vuoksi kaavalla:

$$PBR = \frac{(PT/P_{inlet})}{PBR_{reference}}, \quad (2)$$

jossa PT on APU:n LC-osiossa, P_{inlet} imuaukon paine ja $PBR_{reference}$ vertailtava paineen arvo. (AIR5317A 2018, s. 23)

Kuten aiemmin mainittu, pakokaasun lämpötilatietoa pidetään APU:n kunnonvalvonnassa tärkeimpänä valvottamana parametrina ja APU:n vikaantumista onkin ennustettu pelkästään sen perusteella. Liu et al. (2020) tutkimuksen mukaan tuomalla vuodatusilmanpaine- ja vaihdelaatikon öljylämpötilatieto pakokaasun lämpötilatiedon vierelle parantaa vikaantumisen ennustuksen tarkkuutta. Tutkimuksessa hyödynnettiin Airbus A320-sarjan koneita ja niiden apuvoimalaitteita. Tutkimuksessa ennustamiseen on käytetty GPR (Gaussian Process Regression) ja RVM (Relevance Vector Machine) -menetelmiä, jotka ovat koneoppimisen menetelmiä. Tutkimuksessa saatujen ennusteiden tarkkuus on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. *Koneoppimismenetelmillä saatujen tuloksien tarkkuus eri parametreillä (Liu et al. 2020)*

GPR	RVM	
<i>Pakokaasun lämpötila</i>	<i>Pakokaasun lämpötila</i>	Tarkin ennuste
<i>Vaihdelaatikon öljyn lämpötila</i>	<i>Vaihdelaatikon öljyn lämpötila</i>	
<i>Vuodatusilmanpaine</i>	<i>Vuodatusilmanpaine</i>	
<i>Pakokaasun lämpötila</i>	<i>Pakokaasun lämpötila</i>	Epätarkin ennuste
<i>Vuodatusilmanpaine</i>	<i>Vuodatusilmanpaine</i>	
<i>Pakokaasun lämpötila</i>	<i>Pakokaasun lämpötila</i>	
<i>Vaihdelaatikon öljyn lämpötila</i>	<i>Pakokaasun lämpötila</i>	
<i>Pakokaasun lämpötila</i>	<i>Pakokaasun lämpötila</i>	
	<i>Vaihdelaatikon öljyn lämpötila</i>	

Taulukosta voidaan nähdä kumman tahansa, vuodatusilmanpaineen tai öljyn lämpötilatiedon tuominen pakokaasun lämpötilatiedon vierelle tuo ennustukseen täsmällisyyttä käytettäessä GPR-menetelmää, mutta tarkin tulos saavutettiin ottamalla molemmat tiedot mukaan tarkasteluun. RVM-menetelmällä tarkimpaan tulokseen päästiin niin ikään tuomalla sekä vuodatusilmanpaine- ja vaihdelaatikon öljylämpötilatieto pakokaasun lämpötilatiedon rinnalle. Myös pelkän vuodatusilmanpaineen tuominen pakokaasun lämpötilatiedon ohelle antoi tarkemman tuloksen kuin huomioimalla pelkkä pakokaasun lämpötila. (Liu et al. 2020)

3.2.4 Käynnistymis- ja sammumisaika

APU:n käynnistymisaikaa voidaan käyttää hyväksi sen kunnonvalvonnassa. Myös seuraamalla aikaa, joka kuluu siihen, että APU on valmis tuottamaan paineilmaa tai sähköä, voidaan havaita merkkejä hajoamisesta. Käynnistymisajan pitkittyminen voi kasvaa tietyn moottorin kohdalla esimerkiksi 60 sekunnista 90 sekuntiin ja tämä viittaa todennäköiseen vikaantumiseen. Tällaisessa tapauksessa vika liittyy luultavimmin vahingoittuneeseen ahtimeen, turbiiniin tai ilmausventtiiliin. (AIR5317A 2018, s. 22)

Yksi syy päämoottoreiden kasvaneeseen käynnistämisaikaan voi olla vikaantunut APU. Jos tiedetään päämoottoreiden olevan hyvässä kunnossa, päämoottoreiden käynnistämiseen kuluvan ajan valvominen voi olla hyvä työkalu kunnonvalvonnassa. Lentäjien voi olla vaikea havaita kasvaneita käynnistymisaikoja, vaikka muutokset olisivat merkittäviä. Tämä johtuu siitä, että lentäjät lentävät eri koneyksilöillä ja jopa konetyypeillä, joissa APU:t käyttäytyvät yksilöllisesti. Seuraamalla käynnistymisajan trendiä, mahdollinen vikaantuminen voidaan huomattavasti aikaisemmin kuin lentohenkilöstö muuten huomaisi. (AIR5317A 2018, s. 22)

Käynnistymisajan lisäksi APU:n sammumisaikaa seuraamalla voidaan saada viitteitä esimerkiksi laakerin, vaihteiston tai jonkin muun mekaanisen osan vahingoittumisesta.

Laakerista tai muusta viasta johtuva vika nopeuttaa sammumisajaa ja tekee sammumisprosessista epäsulavan ja äkkinäisen. Sammumisajan huomattava nopeutuminen voi olla niin ikään vaikeasti havaittavissa lentäjien toimesta, sillä heillä on samanaikaisesti paljon muutakin tehtävää. Tämän vuoksi sammumisajan trendin valvominen kerätyn datan perusteella parantaa kykyä havaita vikaantumisen ajoissa. (AIR5317A 2018, s. 23)

3.2.5 Imuaukon johdesiiven ja vuodatusilman säätöventtiilin valvonta

Imuaukon johdesiipi eli IGV (Inlet Guide Vane) on APU:n siipi, joka kontrolloi APU:n läpi kulkevaa ilmapirtta. Vuodatusilman säätöventtiili eli BCV (Bleed Control Valve) on puolestaan APU:n sisäinen venttiili, joka säätelee pneumaattisille järjestelmille toimitettavaa ilmapirtta. APU:n kunnonvalvonnassa seurataan IGV:n asentoa ja sen trendiä. Honeywellin valmistamissa apuvoimalaitteissa IGV:n seuranta on mahdollista kaikissa malleissa. (AIR5317A, s. 23; Honeywell 2016)

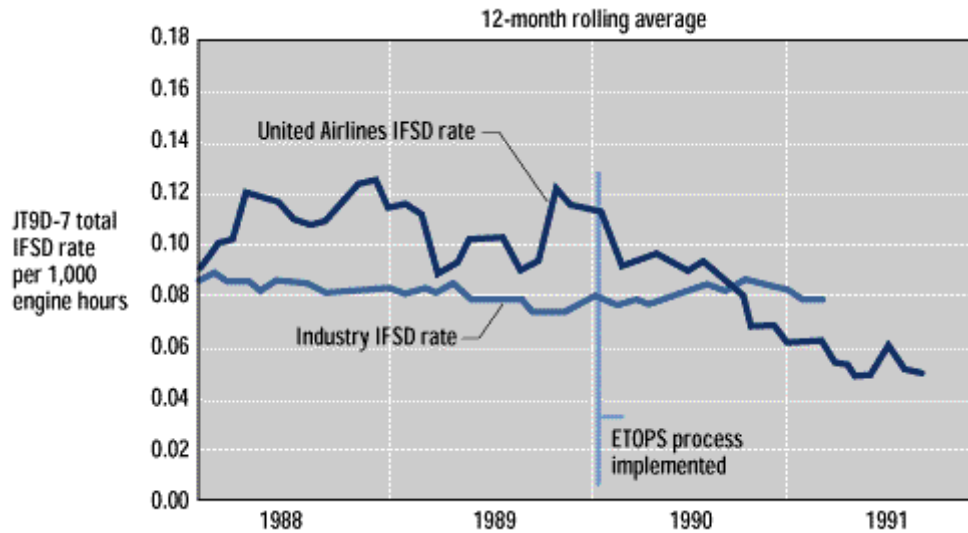
APU:n tuottaessa paineilmaa, se sulkee IGV-järjestelmien tai BCV-järjestelmän suoja-mekanismina pakokaasun noustessa yli sallitun rajan. Tämä ilmiö tunnetaan nimellä IGV- tai BCV-supistus. Supistuksen tapahtuessa, vika voi johtua lukuisista eri syistä ja se voi olla turbiinissa, polttokammiossa, ahtimessa tai LC-osiossa. Jos supistuminen tapahtuu kuitenkin pakokaasun lämpötilan ollessa normaalilla tasolla, vika on todennäköisesti LC-osion komponentissa. (AIR5317A 2018, s. 23)

3.2.6 Vaatimukset kunnonvalvonnalle ETOPS-kelpoisuuden saavuttamiseksi

Kuten luvussa 2 mainittiin, ETOPS-kelpoisuuden saavuttaminen vaatii myös APU:n kunnonvalvontaa. Pääasiassa kelpoisuuden saavuttaminen tarkoittaa öljyn määrän monitorointia. Jos mitatut arvot ovat hyväksytyissä rajoissa, lento voidaan suorittaa normaalisti ETOPS-lentona. Mikäli arvot eivät ole hyväksytyissä rajoissa, ongelma on korjattava ennen kuin lento voidaan suorittaa. (Boeing, AIR5317 2018)

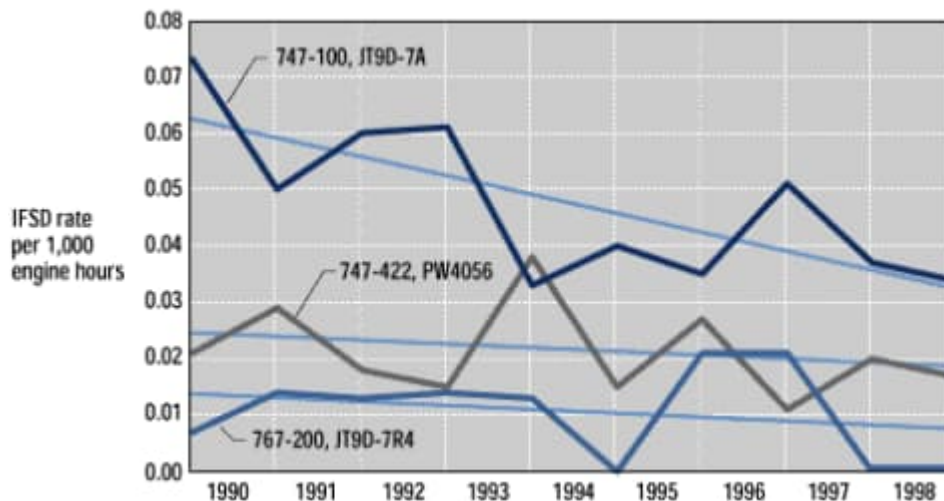
ETOPS-kelpoisuuden vaatimien huoltotoimien suorittaminen on todettu parantavan lentokoneiden luotettavuutta. Monet lentoyhtiöt ovat vakuuttuneita näiden huoltotoimien tarjoamista eduista ja käyttävät ETOPS-huoltofilosofiaa koko laivastoonsa, vaikka sitä ei välttämättä edes vaadittaisi. Lisääntyneen lentoturvallisuuden lisäksi myös kannattavuuden on todettu paranevan. Kuvassa 3 on esitetty United Airlinesin IFSD-suhteen (in-flight

shutdown) kehittymistä Boeing 747- koneiden moottoreissa ottaessa käyttöön ETOPS-huoltotoimet. IFSD-suhteella tarkoitetaan moottorien lennonaikaisten sammumisten ja lentotuntien välistä suhdetta. IFSD suhde on ilmoitettu sammutusten määrä suhteutettuna 1000 lentotuntiin. (Boeing)



Kuva 3. United Airlinesin IFSD-suhteen kehittyminen (Boeing).

Kuvasta 3 voidaan nähdä selkeästi IFSD-suhteen laskevan trendin alkavan samanaikaisesti ETOPS-huoltoprosessin alkaessa. IFSD-suhteen kehittymistä voidaan tarkastella kuvasta 4, kun ETOPS-huoltotoimet otettiin käyttöön yhtiön 747- ja 767-200 -laivastoihin.



Kuva 4. United Airlinesin 747- ja 767-200 -laivastojen IFSD-suhteen kehittyminen soveltaessa ETOPS-huoltofilosofiaa (Boeing).

Kuvasta voidaan kaikkien kolmen konemallin IFSD-suhteen laskevan ja luotettavuuden tason paranevan. Myös Trans World Airlines on tunnistanut ETOPS-huoltotoimien hyödyn luotettavuuden kannalta ja käyttänyt niitä myös muihin kuin ETOPS-lentoihin lentäviin koneisiin. (Boeing)

3.3 Potentiaaliset kunnonvalvonnan menetelmät apuvoimalaitteissa

Seuraavat aliluvut käsittelevät kolmea kunnonvalvonnan menetelmää, jotka eivät ole yleisesti käytössä APU:n kunnonvalvonnassa. Esitettävät menetelmät ovat muilla aloilla tunnettuja menetelmiä erilaisten laitteiden ja koneiden kunnonvalvonnan yhteydessä, ja menetelmät ovat valittu siten, että niitä olisi mahdollisuus soveltaa myös järkevästi APU:n kunnonvalvontaan.

3.3.1 Värähtelymittaukset

Kaikissa koneissa on havaittavissa värähtelyä silloinkin, kun kone on hyvässä kunnossa. Jokaisella koneella on omanlaisensa värähtelytaajuus. Värähtely voidaan linkittää koneen jaksollisiin tapahtumiin, kuten esimerkiksi pyöriviin akseleihin, hammaspyöriin tai pyöriviin sähkökenttiin. Yleisesti ottaen värähtelyn valvominen on suosituin kunnonvalvonnan menetelmä, koska sillä on monia etuja verrattuna muihin menetelmiin. Esimerkiksi öljyanalyysin verrattuna, värähtelyanalyysillä saadaan todennäköisemmin selvitettyä vikaantunut komponentti. (Randall 2010, s.6)

Kaikissa kaasuturbiineissa tärkeimmät liikkuvat osat ovat roottoreita, akseleita sekä niiden laakereita. Kaasuturbiinin ollessa käytössä, osat liikkuvat suhteellisen korkealla nopeudella ja vioittuminen voi aiheuttaa liikkuvaan osaan epätasapainoa. Epätasapainon kasvu tarkoittaa myös kasvanutta rasiitusta koneen rakenteessa. Sen lisäksi, että epätasapaino kasvaa vahingoittuneessa osassa, se voi saada aikaan haitallista värähtelyä myös koneen muissa osissa. (ARP1839 2015, s. 6)

Värähtelyn valvontaa voidaan karkeasti sanottuna suorittaa kahdella eri tavalla. Ensimmäinen tapa perustuu värähtelyn voimakkuuden eli kokonaistason kasvamisen valvomiseen. (Mikkonen et al. 2009, s. 281) Kokonaistason valvominen on yksinkertaisin värähtelyn valvontamenetelmä (PSK 5706, s. 2). Muuttunut kokonaistaso voi viitata esimerkiksi koneen kunnan, operointiympäristön tai kuormitustason muutokseen (Moblely 1999). Värähtelyn kokonaistason valvonnan huono puoli on sen epäherkkyys vikojen havaitsemiseen, minkä vuoksi muiden menetelmien tuominen kokonaistason valvonnan vierelle on kannattavaa (PSK 5706, s. 2). Toinen tapa on taajuusanalyysi, jota käytetään vian jo ilmaannuttua. Taajuusanalyysin tarkoituksena on selvittää vikaantunut osa ja tämän avulla voidaan välttää laitteen turhia huoltoja. (Mikkonen et al. 2009, s. 281)

Värähtelymittaukset eivät ole toistaiseksi olleet APU:n kunnonvalvonnassa kovin tyypillisesti käytetty menetelmä. Syy tähän on aikaisemmat kokemukset, joissa värähtelymittausjärjestelmät ovat olleet heikosti suunniteltuja. Lisäksi värähtelymittausjärjestelmän toteuttaminen kasvattaa kustannuksia ja painoa. (AIR5317A 2018, s. 24-25)

Teknologian kehittymisen myötä värähtelyn valvonnan tarkkuus on kuitenkin noussut. Oikein sijoitetut anturit, jotka havaitsevat tietyn komponentin värähtelyä tietyllä taajuusalueella, mahdollistavat tarkimman ja aikaisimman vian havaitsemisen. Värähtelymittaus on sovellettavissa lähes kaikkiin amplitudia kasvattavien vikatilojen havaitsemiseen. (AIR5317A 2018, s. 24) Huolimatta värähtelymittausten epäsuosiosta APU:n kunnonvalvonnassa, suihkumoottoreissa ja potkuriturbiineissa värähtelyn valvonta on yleisesti käytetty kunnonvalvonnan menetelmä. (Moblely 2002, s. 116). Randallin mukaan antureiden pysyvällä asennuksella ja jatkuvalla valvonnalla maksimoidaan värähtelymittauksen edut, mutta haittapuoliakin on tässä järjestelyssä olemassa. Nämä hyödyt ja haitat ovat esitetty taulukossa.

Taulukko 4. *Jatkuvan värähtelyvalvonnan hyödyt ja haitat (Randall 2010, s. 6-7).*

Hyödyt	Haitat
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Nopea reagointikyky äkillisiin muutoksiin värähtelytasossa</i> • <i>Paras tapa suojata laitetta äkillisesti ilmaantuvilta vialta</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Antureiden asennuksesta aiheutuvat suuret kustannukset</i> • <i>Anturit täytyy asettaa jo suunnittelu- vaiheessa laitteeseen, modifikaatiot olisivat kohtuuttomia</i> • <i>Yksinkertaiset valvontaparametrit eivät anna kovin aikaista indikaatiota vikaantumisesta</i>

Huolimatta värähtelyvalvonnan eduista, siitä löytyy myös puutteita. Värähtelymittauksella ei kyetä saamaan dataa esimerkiksi sähkölaitteista, lämpöhäviöistä tai voiteluai- neen kunnosta. Tämän vuoksi kunnonvalvonnassa ei voida tukeutua vain värähtelymit- tauksiin, vaan useamman menetelmän käyttäminen on avainroolissa onnistuneessa kunnonvalvonnan toteutuksessa. (Moblely 2002, s. 114)

3.3.2 Iskusysäysmenetelmä

Iskusysäysmenetelmä on kunnonvalvonnan menetelmä, joka sopii erityisesti laakerei- den kunnonvalvontaan. Laakereiden kunnan heikentyessä, liikkuvien pintojen välille syn- tyy pieniä kuoppia ja epätäydellisyyksiä. Tämän vuoksi pintojen välisessä vuorovaiku- tuksessa laakeriin syntyy mekaanisia rasitusaaltoja ja iskupulsseja. Syntyneet iskupuls- sit ovat ultraäänitaajuuksia ja ne voidaan havaita pietsosähköisillä antureilla, joilla on vahva resonanssitaajuusominaisuus. Muista kuin pyörivistä laakereista johtuvat taajuu-

det suodatetaan pois elektronisesti ja suurin normalisoitu iskun arvo kertoo laakerin kunnon. Parhaimmillaan iskusysäysmenetelmä on, kun se toteutetaan yleisten värähtelytasomittausten rinnalla. Alla olevassa taulukossa on esitetty tietoja, joiden avulla laakerin kuntoa voidaan arvioida. (Tavner 2008, s.187; Tandon et al. 2007)

Taulukko 5. *Laakerin kunnon arviointi iskupulssin ja yleisen värähtelytason trendin perusteella (Tavner 2008, s. 188).*

Yleinen värähtelytason trendi	Iskupulssin trendi	Laakerin kunto
<i>Matala ja nouseva</i>	<i>Pysyy alhaisena</i>	<i>Ei vauriota</i>
<i>Matala ja nouseva</i>	<i>Matala, mutta nousee samassa suhteessa yleisen värähtelytason kanssa</i>	<i>Vaurio todennäköinen</i>
<i>Matala ja nouseva</i>	<i>Korkea, mutta vakio</i>	<i>Laakeri vaurioitunut. Värähtelytason nousu aiheutunut muusta ongelmasta</i>

Taulukosta voidaan nähdä, että iskupulssin arvon trendin ja yleisen värähtelytason noustessa samassa suhteessa laakeri on vioittunut. Jos iskupulssin arvo on korkea ja värähtelytason trendi on nouseva, laakeri on viallinen, mutta värähtelytason nousu viestii muista ongelmista. Mikäli iskupulssin arvon trendi on matala, laakeri on kunnossa.

3.3.3 Akustinen emissio

Akustisen emission (AE) avulla voidaan tutkia ja arvioida erilaisia vikaantumisprosesseja. Akustisen emission hyöty verrattuna moneen muuhun kunnonvalvonnan menetelmään on se, että havaittujen AE-signaalien avulla voidaan tunnistaa erilaiset vauriomekanismit toisistaan. Lisäksi havainto alkaneesta vikaantumisesta saadaan aikaisemmin kuin esimerkiksi värähtelymittauksilla. Akustinen emissio perustuu ilmiöön, jossa materiaalit vapauttavat energiaa ohimenevän elastisen aallon muodossa plastisen muodonmuutoksen, halkeaminen muodostumisen ja halkeamien laajenemien vuoksi. AE-signaalien avulla voidaan havaita tehokkaasti ja aikaisessa vaiheessa APU:n ahdin- sekä turbiinisiipien vauriot. AE-parametrit antavat varoituksen kriittisessä ajan kohdassa siipien halkeamien tullessa vaiheeseen, jossa epävakaa leviäminen alkaa. Epävakaa leviäminen voi aiheuttaa vakavia vaurioita moottoriin. (Zhang et al. 2018)

Akustinen emissio on korkeataajuinen valvontamenetelmä. Korkeataajuisella valvontamenetelmällä tarkoitetaan menetelmää, jossa mitataan 20 kHz taajuudella tapahtuvaa värähtelyä. Akustista emissiota mitatessa mitattavat taajuudet ovat usein yli 50 kHz. Tämän taajuusalueen alapuolella pinta-aaltojen osuus on vähäisempää ja muun muassa

ominaisvärähtely korostuu. Mittaukset toteutetaan pietsosähköisillä antureilla, joiden resonanssitaajuudet ovat valittu sopivasti. Mittaussignaalin laatua voidaan parantaa suodattamalla resonanssitaajuuden ulkopuoliset taajuuskomponentit pois. (PSK 5706, s. 7)

3.4 YHTEENVETO MENETELMISTÄ

Taulukkoon 6 on koottu edellä esitetyt kunnonvalvonnan menetelmät. Taulukossa on näkyvissä myös komponentti, jonka vikaantumiseen menetelmä todennäköisesti viittaa, sekä kuinka suuri osuus menetelmällä on ainakin mahdollisuus havaita. Numerot perustuvat luvussa 2 esitettyyn taulukkoon 1.

Taulukko 6. Yhteenveto kunnonvalvonnan menetelmistä. Mukana myös vikaantumisien prosentuaalinen osuus, joka menetelmällä voidaan havaita.

Menetelmä	Komponentti, johon havainto voi viitata	Vikaantumisien prosentuaalinen osuus, joka menetelmällä voidaan havaita
<i>Pakokaasun lämpötila ja polttoaineen virtaus</i>	<i>Polttokammio, ahdin, imuaukko, turbiini</i>	>54
<i>Öljyn monitorointi</i>	<i>laakeri, vaihteisto, generaattori, ilman- tai öljynjäähdytin</i>	>20
<i>Vuodatusilmanpaineen valvonta</i>	<i>Ahdin, turbiini, polttokammio, vuodatusilmajärjestelmä</i>	>54
<i>Käynnistymis- ja sammumisajan valvonta</i>	<i>Ahdin, turbiini, vuodatusilman säätöventtiili laakeri, vaihdelaatikko</i>	>83
<i>Imuaukon johdesiiven ja vuodatusilman säätöventtiilin valvonta</i>	<i>Ahdin, turbiini, polttokammio, vuodatusilmajärjestelmä</i>	>54
<i>Värähtelymittaukset</i>	<i>Ahdin, turbiini, laakeri, vaihdelaatikko</i>	>83
<i>Iskusysäysmenetelmä</i>	<i>Laakeri</i>	>10
<i>Akustinen emissio</i>	<i>Ahdin, turbiini</i>	>51

Taulukosta voidaan nähdä, että teoriassa käynnistymis- ja sammumisaikaa seuraamalla olisi mahdollista havaita jopa yli 83 % kaikista vikaantumisista, mutta pakokaasun lämpötilan valvontaa pidetään kuitenkin yleisesti parempana menetelmänä. Myös värähtelymittausten avulla olisi teoriassa mahdollista havaita yli 83 % kaikista vikaantumisista ja sen vuoksi sen soveltumisen tutkiminen apuvoimalaitteisiin olisi aiheellista. Taulukosta on helppo havaita, että usean menetelmän avulla on mahdollista havaita suhteellisesti paljon vikaantumisia. Tämän vuoksi usean menetelmän yhdistäminen olisi kaikkein tehokkainta luotettavuuden saavuttamiseksi.

4. YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää lentokoneen apuvoimalaitteen merkittävimmät käytössä olevat ja potentiaaliset kunnonvalvonnan menetelmät. Työssä tutustuttiin APU:n rakenteeseen ja tyypillisimpiin vikatiloihin ja miten eri viat voidaan kunnonvalvontamenetelmin havaita. Työ käsitteli jo yleisesti käytössä olevien menetelmien sekä muualla käytössä olevien menetelmien etuja, haittoja ja soveltuvuutta APU:n kunnonvalvontaan.

Hyvin toteutetun kunnonvalvonnan ja ennakoivan kunnossapidon avulla kyetään säästämään kustannuksissa, vähentämään lentojen viivästyksiä ja parantamaan lentoturvallisuutta. Myös ETOPS-kelpoisuuden saavuttamisen kannalta kunnonvalvonta on tärkeässä roolissa myös APU:n kohdalla. APU:n kunnonvalvontaan panostaessa onkin tärkeä pohtia minkälaisissa olosuhteissa ja lennoilla kyseinen lentokone operoi ja mikä on APU:n todellinen tarve kyseisillä lennoilla.

APU:n kunnonvalvonnassa yleisesti käytettyjä menetelmiä ovat pakokaasun lämpötilan seuraaminen, öljyn kunnonvalvonta, vuodatusilmanpaineen ja vuodatusilmaventtiin valvonta, imuaukon johdesiiven asennon seuranta ja käynnistymis- sekä sammumisaikojen seuranta. Monet tutkimuksissa ehdotetut koneoppimisen ratkaisut APU:n kunnonvalvonnan parantamiseen pohjautuvat vahvasti pakokaasun lämpötilatietoon, jota muut parametrit tukevat.

Potentiaalisista kunnonvalvonnan menetelmistä työssä tutkittiin värähtelymittausten, iskusysäysmenetelmän ja akustisen emission soveltuvuutta APU:n kunnonvalvontaan. Niiden suosio on toistaiseksi ollut todella olematonta APU:n kunnonvalvonnassa, vaikka muissa sovelluksissa ne ovat yleisesti käytettyjä. Erityisesti värähtelymittausten ja akustisen emission avulla voisi olla mahdollisuus havaita huomattava osuus alkavista vikaantumisista ja täten ne voisivat tarjota uusia mahdollisuuksia APU:n kunnonvalvontaan. Menetelmien soveltuvuuden tarkempi tutkiminen olisi apuvoimalaitteen kohdalla käytännön tasolla aiheellista, sillä kyseisten menetelmien soveltuvuudesta apuvoimalaitteisiin kirjallisuudessa on saatavilla hyvin rajoitetusti tietoa.

Vaikka tutkimuksessa onnistuttiin vastamaan tutkimuskysymyksiin, saatujen tulosten laatuun on suhtauduttava varauksella. Taulukossa 6 esitetyt tulokset ja erityisesti tulokset koskien potentiaalisia menetelmiä voivat olla epäluotettavia. Esimerkiksi värähtelymittaukset olisivat taulukon mukaan yksi tehokkaimmista ja kattavimmista menetelmistä,

vaikka pakokaasun lämpötilaa pidetään yleisesti tärkeimpänä valvottavana tietona. Taulukon mukaan myös käynnistymis- ja sammumisaikaa voitaisiin pitää parhaimpana menetelmänä.

Useaa menetelmää käyttämällä voidaan havaita useiden eri komponenttien vikaantumisia, minkä vuoksi usean eri menetelmän käyttäminen tarjoaa luonnollisesti kattavimman turvan vikaantumisien havaitsemiseen. Tutkimusta tulisi jatkaa käytännön tasolla selvittämällä, minkä menetelmien ja parametrien yhdistelmällä saavutetaan luotettavin tieto APU:n vikaantumisesta. Tämän jälkeen eri menetelmien kustannuksia tulisi tutkia ja millä menetelmien kombinaatiolla saavutetaan tarpeeksi luotettava ja kustannustehokas ratkaisu.

LÄHTEET

AIR1828C (2018). A guide to oil system in aircraft gas turbine engines, SAE International

AIR5317A (2018). A guide to APU health management, SAE International

ARP1839 (2015). A guide to aircraft turbine engine vibration monitoring systems, SAE International

Boeing. ETOPS-maintenance on non-ETOPS airplanes. viitattu 12.4.2021, saatavissa: https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/aero_07/etops.html#sb_fig01

Honeywell (2016), Trend monitoring, viitattu 20.4.2021, saatavissa: <https://aerospace.honeywell.com/content/dam/aero/aero/en-us/documents/learn/services/maintenance-and-service-plans/brochures/C61-1543-000-000-TrendMonitoring-bro.pdf>

Honeywell (2020), Honeywell Upgrade For 131-9A Auxiliary Power Unit Increases Time-On-Wing While Lowering Fuel Burn, viitattu 17.4.2021, saatavissa: <https://www.honeywell.com/us/en/press/2020/10/honeywell-upgrade-for-131-9a-auxiliary-power-unit-increases-time-on-wing-while-lowering-fuel-burn>

Liu, L., Guo, Q., Wang, L., & Liu, D. (2020). In-situ remaining useful life prediction of aircraft auxiliary power unit based on quantitative analysis of on-wing sensing data. *Advances in Mechanical Engineering*

Liu, X., Liu, L., Wang, L., Guo, Q., & Peng, X. (2019). Performance Sensing Data Prediction for an Aircraft Auxiliary Power Unit Using the Optimized Extreme Learning Machine

Marsden P, Becker A. (2002). A Replacement Database for the CH - 47D Spectrometric Oil Analysis Program, 72p.

Mikkonen, H. (2009). *Kuntoon perustuva kunnossapito. Käsikirja*. Helsinki: KP-Media OY, 606 s.

Mobley, R. K. (1999) *Vibration Fundamentals*. San Diego: Elsevier.

Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance*. 2nd edition, ButterworthHeinemann, 438p.

National Transportation Safety Board (2010). *Loss of Thrust in Both Engines After Encountering a Flock of Birds and Subsequent Ditching on the Hudson River, US Airways Flight 1549, Airbus A320-214, N106US, Weehawken, New Jersey, January 15, 2009*, 213p.

Nokeval. Anturit, viitattu 1.4.2021, saatavissa: <https://nokeval.com/fi/mittauslaitteet/anturit/>

Randall, R. B. (2010). *Vibration-based condition monitoring: industrial, automotive and aerospace applications*. 1st edition, John Wiley & Sons, 289p.

Peng, W., Shaonian, W. & Lulu, W. (2015). Gas Turbine APU Reliability Modeling and Failure Forecasting, *Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS) Vol. 2015-*. 5p.

PSK 5706 (2015). *PSK Standardisointi*. 4. painos. 11 s.

Scholz, D. (2015). *An optional APU for passenger aircraft*, CEAS, 14 p.

Sforza, P. M. (2014). *Commercial airplane design principles*. 1st edition, Butterworth-Heinemann, 598p

- Showalter S, Pingalkar S, Pasha S. (2012) Oil debris monitoring in aerospace engines and helicopter transmissions. 1st International Symposium on Physics and Technology of Sensors (ISPTS-1). IEEE; 2012. pp. 1–2
- Skliros, C., Ali, F., & Jennions, I. (2020). Experimental Investigation and Simulation of a Boeing 747 Auxiliary Power Unit. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 142(8)
- Sterkenburg, R. & Wang, P. H. (2022) *Standard aircraft engines handbook*. 1st edition. New York: McGraw-Hill.
- Säättö. Lämpötilan mittaus, viitattu 1.4.2021, saatavissa: <https://saato.fi/tekniset-artikkelit/lampotilan-mittaus/>
- Tandon, N., G.S. Yadava, and K.M. Ramakrishna. "A Comparison of Some Condition Monitoring Techniques for the Detection of Defect in Induction Motor Ball Bearings." *Mechanical systems and signal processing* 21, no. 1 (2007): 244–256.
- Tandon, N. & Parey, A. (n.d.) 'Condition Monitoring of Rotary Machines', in *Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing*. London: Springer London. pp. 109–136.
- Vianna, W., Gomes, J., Galvão, R., Yoneyama, T., & Matsuura, J. (2014). Health monitoring of an auxiliary power unit using a classification tree. *Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society 2011, PHM 2011*, 293– 299.
- Wild, T. W. (2018) *Aircraft Powerplants*, Ninth Edition. 9th edition. New York, N.Y: McGraw-Hill Education.
- Xi Chen, Hong Wang, Jiayang Huang, & He Ren. (2017). APU Degradation Prediction Based on EEMD and Gaussian Process Regression, 2017 International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC), 2017-08, p.98-104
- Yang, C., Yang, C., Lou, Q., Lou, Q., Liu, J., Liu, J., Yang, Y., Yang, Y., Cheng, Q., & Cheng, Q. (2018). Particle filtering-based methods for time to failure estimation with a real-world prognostic application. *Applied Intelligence (Dordrecht, Netherlands)*, 48(8), pp.2516–2526
- Zuo, Y. (2014). Analysis of Gas Turbine Engines Auxiliary Power Units, *Applied mechanics and materials*. Vol 533, pp.13–16.