



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

VILLE LEMPINEN
SUIHKUMOOTTORIN MONITOROINTIYKSIKÖN
TESTAUSJÄRJESTELMÄ
Diplomityö

Tarkastaja: professori Seppo Kuikka
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
8. huhtikuuta 2015

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Automaatiotekniikan koulutusohjelma

LEMPINEN, VILLE: Suihkumoottorin monitorointiyksikön testausjärjestelmä

Diplomityö, 58 sivua

Lokakuu 2015

Pääaine: Automaation ohjelmistotekniikka

Tarkastaja: Professori Seppo Kuikka

Avainsanat: Suihkumoottori, testaus, LabVIEW, signaaligenerointi

Tämä diplomityö tehtiin osana Patria Aviation Oy:n Hawk Mk 66 Engine Health Monitoring -projektia. Projektissa korvattiin uudella ratkaisulla moottorin syklejä aikaisemmin laskenut, vanhentumisongelmista kärsinyt moottorin sykli-laskentatietokone Engine Life Computer. Lentokoneen moottorin syklejä tallennetaan moottorin kulumisen tuntemisen ja huoltojen ajoittamisen vuoksi. Korvaavaksi järjestelmäksi suunniteltiin uusi moottorin kunnonvalvontajärjestelmä. Moottorin kunnonvalvontajärjestelmässä monitorointiyksikkö mittaa moottorin käyntiarvoja ja lähettää ne tehtävätietokoneelle tallentamista varten. Moottorin syklit lasketaan lennon jälkeen mitattujen arvojen perusteella.

Monitorointiyksikön käyttöönotto vaatii testausvalmiuden luomista, jotta voidaan varmistaa laitteen toiminnallisuus. Testausvalmiuden luomiseksi Hawk Upgrade järjestelmätestipenkkiin integroidaan kyky tuottaa monitorointiyksikön mittaamia signaaleja. Testausjärjestelmää käytetään kunnonvalvontajärjestelmän kehitysvaiheessa monitorointilaitteen testaamisessa sekä lentokoneen ohjelmiston kehityksessä ja integrointitestauksessa. Testausjärjestelmän tehtävänä on myöhemmin tunnistaa rikkoutunut laite ja varmistua lentokoneeseen asennettavien laitteiden toimivuus huollon jälkeen.

Työn tavoitteena oli luoda kyky tuottaa moottorin monitorointilaitteen mittaamia signaaleja kunnonvalvontajärjestelmän testaamiseen. Kunnonvalvontajärjestelmän toiminta testataan staattisilla signaaleilla ja dynaamisesti lennon aikaista toimintaa simuloiden.

Tämän diplomityön tuloksena Hawk Upgrade -järjestelmätestipenkkiin integroitiin laitteisto ja kehitettiin ohjelmisto, joilla voidaan testata moottorin monitorointiyksikköä ja sen toimintaa osana avioniikkajärjestelmää.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Automation Engineering

LEMPINEN, VILLE: Test system for jet engine monitoring device

Master of Science Thesis, 58 pages

October 2015

Major: Software Engineering in Automation

Examiner: Professor Seppo Kuikka

Keywords: Jet engine, testing, LabVIEW, signal generation

This Master of Science thesis was a part of Patria Aviation Oy Hawk Mk 66 Engine Health Monitoring program. In this program old Engine Life Computer was replaced due to obsolescence issues with Engine Health Monitoring system. Engine Health Monitoring system consists of Engine Monitoring Unit measuring engine parameters and sending them to Mission Computer to be recorded. Engine cycles are calculated from these parameters to gain better knowledge of engine wear and maintenance timing.

The deployment of Engine Monitoring Unit for flight use requires testing capability to ensure unit functionality. Testing system is used during the system development, unit testing and flight software development, testing and integration. After system deployments testing system is used in maintenance testing.

The aim was to generate signals that engine monitoring unit monitors for engine health monitoring system testing. System functionality is tested using static and dynamic signals simulating functionality during flight.

As a result of this thesis the engine signal generation hardware and software was integrated to Hawk Upgrade System Test Bench for engine health monitoring system testing.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty osana Hawk Mk 66 Engine Health Monitoring -projektia Patria Aviation Oy:n rahoittamana. Kiitän Eero Kovamäkeä minun palkkaamisestani tekemään tätä työtä ja Petri Kvistiä työn ohjaamisesta ja lukuisista parannusehdotuksista työhön. Kiitän myös koko muuta MSAA-tuoteryhmää neuvoista ja avusta tämän työn tekemisessä. TTY:n professori Seppo Kuikkaa kiitän työn tarkastamisesta ja hyvistä neuvoista työn rakenteen parantamiseksi.

Kiitos myös avopuolisolleni Emmille, perheelleni ja ystävälleni tuesta opintojeni ja tämän työn tekemisen aikana.

Tampereella 17.10.2015

Ville Lempinen

SISÄLLYS

1	Johdanto	1
1.1	BAe Hawk -suihkuharjoitushävittäjä	2
1.1.1	Moottori	3
1.1.2	Syklilaskentatietokone	5
1.1.3	Moottorin kunnonvalvontajärjestelmä	5
1.1.4	Tehtävätietokone	7
1.1.5	Suihkumoottorin syklilaskenta	7
1.2	Hawk Upgrade -järjestelmätestipenkki	8
1.2.1	HAMS-ohjelmisto	10
1.2.2	SSAM-järjestelmä	10
1.3	Monitorointiyksikön testaus	10
1.3.1	Laittevalmistajan laitetestaus	12
1.3.2	Patrian laitetestaus	12
1.3.3	Lentokoneohjelmistotestaus	13
1.3.4	Järjestelmän integrointitestaus	13
1.3.5	Ilmavoimien lentokoneen testaus	14
2	Moottorin monitorointiyksikkö	15
2.1	Toiminta	15
2.2	Monitoroitavat signaalit	16
2.2.1	Matalapaineahtimen kierrosnopeus	16
2.2.2	Korkeapaineahtimen kierrosnopeus	18
2.2.3	Kokonaislämpötila	19
2.2.4	Turbiinin suihkuputken lämpötila	20
2.2.5	Tehovivun asento	21
2.2.6	Polttoaineen virtausnopeus	21
2.2.7	Nopeus ja korkeus	22
2.2.8	Diskreettisiinaalit	23
2.2.9	Tehtävätietokone	23
3	SSAM-laitteisto	24
3.1	PXIe-laitteisto PXIe-1073	25
3.2	Ahtimien pyörimisnopeus	26
3.3	Polttoaineen virtausnopeus	27
3.4	Turbiinin suihkuputken lämpötila	27
3.5	Kokonaislämpötila ja tehovivun asento	28
3.6	Muut testauslaitteet	30
3.6.1	Diskreettirajapinta	30
3.6.2	RS-422	30
3.6.3	ARINC 429	30
3.7	Integrointi	31
3.8	SSAM-laitteiston kalibrointi	32

4	SSAM-Ohjelmisto.....	33
4.1	Vaatimukset.....	33
4.2	Rakenne.....	35
4.3	Toteutus.....	35
4.3.1	Signaaligenerointi	36
4.3.2	Staattinen toiminta	38
4.3.3	Dynaaminen toiminta.....	39
4.3.4	Tiedostojen luku ja kirjoitus	44
4.3.5	Häiriöiden lisääminen.....	46
4.4	X-Plane Plugin	47
4.4.1	XPluginStart().....	48
4.4.2	XPluginStop()	48
4.4.3	FlightLoopCallback().....	48
5	SSAM-järjestelmän Testaus.....	49
5.1	Järjestelmän testaus.....	49
5.2	Signaalien tarkkuusvaatimusten varmennus	50
5.3	Tyyppihyväksyntä	51
6	Johtopäätökset.....	52
6.1	Käyttökokemukset.....	52
6.2	Jatkokehitysajatukset.....	53
7	Yhteenveto	55
	Lähteet.....	56

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

AAP	Avionics Activation Panel, avioniikan käyttöpaneeli
ADTS	Air Data Test System
ARINC	Aeronautical Radio, Incorporated,
AGT	Aircraft Ground Test, lentokoneen maatesti
ALT	Altitude, painekorkeus
B	Kokonaislämpötilamittauksen laskukaavan lämpötilakerroin
BAe	British Aerospace
BFI	Back-up Flight Instrument, varalentolaite
CAS	Calibrated Airspeed, kalibroitu ilmanopeus
CBIT	Continuous Built-In Test,
csv	Comma Separated Values, taulukkomuotoisen datan tiedoston esitysmuoto
DAQ	Data Acquisition, tiedonkeruu
DAQmx	National Instrumentsin ohjelmallinen tiedonkeruujärjestelmä
ECA	Engine Control Amplifier, moottorin säätimen signaalivahvistin
EHM	Engine Health Monitoring, moottorin kunnonvalvonta
ELC	Engine Life Computer, syklilaskentatietokone
EMC	Electromagnetic Compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus
EMU	Engine Monitoring Unit, moottorin monitorointilaite
ETC	Engine Test Cell, moottorin koekäyttölaitteisto
FFR	Fuel Flow Rate, polttoaineen virtausnopeus
GE	General Electric
GSS	Ground Support System, maatikijärjestelmä
HAMS	Hawk Avionics Monitoring & Simulation, Hawk Upgrade järjestelmätestipenkin käyttöohjelmisto
HCL	Hawk Control Layer, ohjelmistotestausympäristön ohjausohjelmisto
HUD	Head-up Display, heijastusnäyttö
I/O	Input/Output
K	Kokonaislämpötilan laskukaavan anturin korjauskerroin
kS/s	kilosamples/second, tuhatta näytettä sekunnissa
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, National Instrumentsin kehittämä ohjelmointiympäristö
M'	Paikallinen Machin luku
MC	Mission Computer, tehtävätietokone
MDR	Mission Data Recorder, tehtävätalennin
MFD	Multi-Function Display , monitoiminäyttö

MIL-STD	Military Standard, sotilasstandardi
Mk	Mark, malli
NH	High Pressure Spool Speed, korkeapaineahtimen kierrosluku
NI	National Instruments
NL	Low Pressure Spool Speed, matalapaineahtimen kierrosluku
OAT	Outside Air Temperature, ulkoilman lämpötila
Obsolescence	Vanhentuminen komponenttien saatavuuden loppumisen vuoksi
OFF	Operational Flight Program, tehtävätietokoneen lentokoneohjelmisto
OTY	Ohjelmistotestausympäristö
PCIe	Peripheral Component Interconnect Express
PLA	Pilot Lever Angle, tehovivun asento
PXI	PCI eXtensions for Instrumentation, National Instrumentsin standardi PCI-väylän käyttöön instrumentoinnissa
PXIe	PCI express eXtensions for Instrumentation, National Instrumentsin standardi PCI express -väylän käyttöön instrumentoinnissa
RMMD	Removable Mass Memory Device, muistimoduuli
RS	Relight Switch, käynnistyskytkin
RS	Recommended Standard
Rt	Lämpötilasta riippuva vastusarvo
SIC/SCC	Simulation Interface Console/Simulation Computer Complex, Hawk testausjärjestelmän ristiinkytkentä- ja tietokonekaappi
SSAM	Signal Simulator and Monitor, tämän työn tuloksena syntyvä testausjärjestelmä
STB	System Test Bench, Hawk Upgrade -järjestelmän testijärjestelmä
T	Kokonaislämpötila
T'	Mitattu ulkolämpötila
TAT	Total Air Temperature, kokonaislämpötila
TGT	Turbine Gas Temperature, turbiinin suihkuputken lämpötila
UDP	User Datagram Packet
WCP	Weapon Control Panel, asejärjestelmän käyttöpaneeli
VISA	Virtual Instrument Software Architecture, National Instrumentsin kehittämä rajapinta testauslaitteille
WOW	Weight On Wheels, paino pyörillä -tilatieto
X-Plane	Laminar Researchin kaupallinen lentosimulaattoriohjelmisto
γ	Adiabaattivakio

1 JOHDANTO

Suomen Ilmavoimien käyttämien BAe (British Aerospace) Hawk Mk 66 -suihkuharjoitushävittäjien moottorinvalvontalaitteistolle on ilmennyt päivitystarvetta moottorin kunnonvalvontatarpeen kasvettua huoltokustannusten vähentämistarpeen myötä. Moottorin huoltotarpeen määrittämiseksi lasketaan moottorin syklejä. Aikaisemmin käytössä ollut moottorin syklilaskentatietokone ELC (Engine Life Computer) kärsii obsolescence- eli osien vanhentumisongelmista. Osa laitteista on jo rikki, eikä korjaamiseen tarvittavia osia enää valmisteta. Tämän takia moottorin kulumista seurataan vain tilastollisin menetelmin. Tilanteen korjaamiseksi syklilaskentajärjestelmä korvataan kokonaan uudella kunnonvalvontajärjestelmällä (EHM, Engine Health Monitoring).[1]

Moottorin kunnonvalvontajärjestelmällä kerätään lennon aikana moottorin käymistietoja, jotta ne saadaan tallennettua muistilaitteen (MDR, Mission Data Recorder) muistimoduulille lennonjälkeistä laskentaa varten. Tallennetusta datasta lasketaan moottorin valmistajan Rolls Roycen algoritmeilla moottorin syklejä. Näin saadaan seurattua tarkemmin moottorin kulumista kuin käyttämällä pelkästään tilastollisia menetelmiä. Tämän ansiosta moottorin huoltovälejä voidaan pidentää ja näin saavutetaan huomattavia säästöjä moottorin huoltokustannuksissa.[2]

Työn tavoitteena oli luoda järjestelmätestipenkkiin (STB, System Test Bench) kyky tuottaa monitorointiyksikön mittaamia signaaleja ja sen lukemia väyläsanomia moottorin monitorointiyksikön hyväksyntä- ja laitetestauksia varten. Järjestelmätestipenkkiin luotiin moottorin tuottamien signaalien generointitoiminto lisäämällä siihen sopiva signaaligeneraattoriyksikkö ja sitä ohjaava ohjelma.

Työssä käydään läpi mitattavia signaaleja lentokoneessa tuottavat anturit ja niiden toiminta, antureiden simuloinnissa tarvittavat signaaligeneraattorit ja niiden ohjaamiseen tehtävä ohjelmisto. Osa signaaleista saadaan testattua olemassa olevalla järjestelmällä, nämä järjestelmän osat kuvataan vain lyhyesti. Diplomityön tutkimusongelmaksi määritettiin mitä signaaligeneraattorilaitteita tarvitaan moottorin tuottamien signaalien generointiin ja millainen ohjelma valittujen signaaligeneraattorien ohjaamiseen tarvitaan.

Työn ohessa samassa projektissa järjestelmätestipenkkiin luotiin myös valmiudet EHM:n ohjelmisto- ja järjestelmätestausta varten. Niitä varten HAMS- (HAMS, Hawk Avionics Monitoring & Simulation) ja OTY-ohjelmistoon (OTY, Ohjelmiston Testausympäristö) integroitiin monitorointiyksikön simulaatiomalli, jolla voidaan korvata oikea laite testauksessa ja tuottaa sen tuottamia vastaavat sarjaväyläsanomat

tehtävätietokoneelle (MC, Mission Computer). Tämä rajattiin kuitenkin diplomityön ulkopuolelle.

1.1 BAe Hawk -suihkuharjoitushävittäjä

BAe Hawk on Suomen Ilmavoimien käyttämä suihkuharjoitushävittäjä. Suomen puolustusministeriö tilasi vuonna 1977 Hawk Mk 51 -koneita (Mk, Mark) hävittäjälentäjien koulutuskäyttöön. Osa koneista lennettiin Englannista Suomeen ja loput rakennettiin vuosina 1980 - 1985 Hallin Valmet Lentokoneiteollisuuden tehtaalla. Vuosina 1993 - 1994 Suomeen tilattiin Hawk Mk 51A -koneita. Mk 51 ja 51A eroavat toisistaan lähinnä rakenteidensa osalta.[3]

Suomen Ilmavoimat päätti vuonna 2007 ostaa Sveitsin ilmavoimien käytöstä poistamat Hawk Mk 66 -koneet, joilla varmistettiin koulutuskoneiden riittävyys aina 2030-luvulle asti. Mk 66 -koneita käytetään aiemmin hankittujen Mk 51- ja 51A- koneiden rinnalla. Ilmavoimien käytössä olevat Hawk Mk 66 -koneet on nykyaikaistettu uudella lasiohjaamoratkaisulla. Päivityksessä koneet nykyaikaistettiin uudella tehtävätietokoneella (MC, Mission Computer), uusilla MFD-näytöillä (MFD, Multi Function Display), HUD-heijastinnäytöllä (Head Up Display) ja tehtävänpurkuohjelmistolla.

Päivityksen myötä koulutettavalle ohjaajalle voidaan opettaa jo Hawkilla aikaisemmin Hornetilla koulutettuja asioita. Näin ollen on parannettu koulutuksen laatua ja saavutettu huomattavia säästöjä ohjaajakoulutuksen kustannuksissa.

Mk 66 eroaa Mk 51:stä muun muassa moottorinsa ja asejärjestelmänsä osalta. Mk 66 -koneita on yhdenmukaistettu Mk 51:n kanssa siten, että koneet olisivat ohjaajan kannalta mahdollisimman samankaltaisia. Mk 66 -koneissa on säilytetty Sveitsin käyttämä punavalkoinen maalaus, kun taas Mk 51 on maastokuvioitu ja Mk 51A on harmaa.[4]

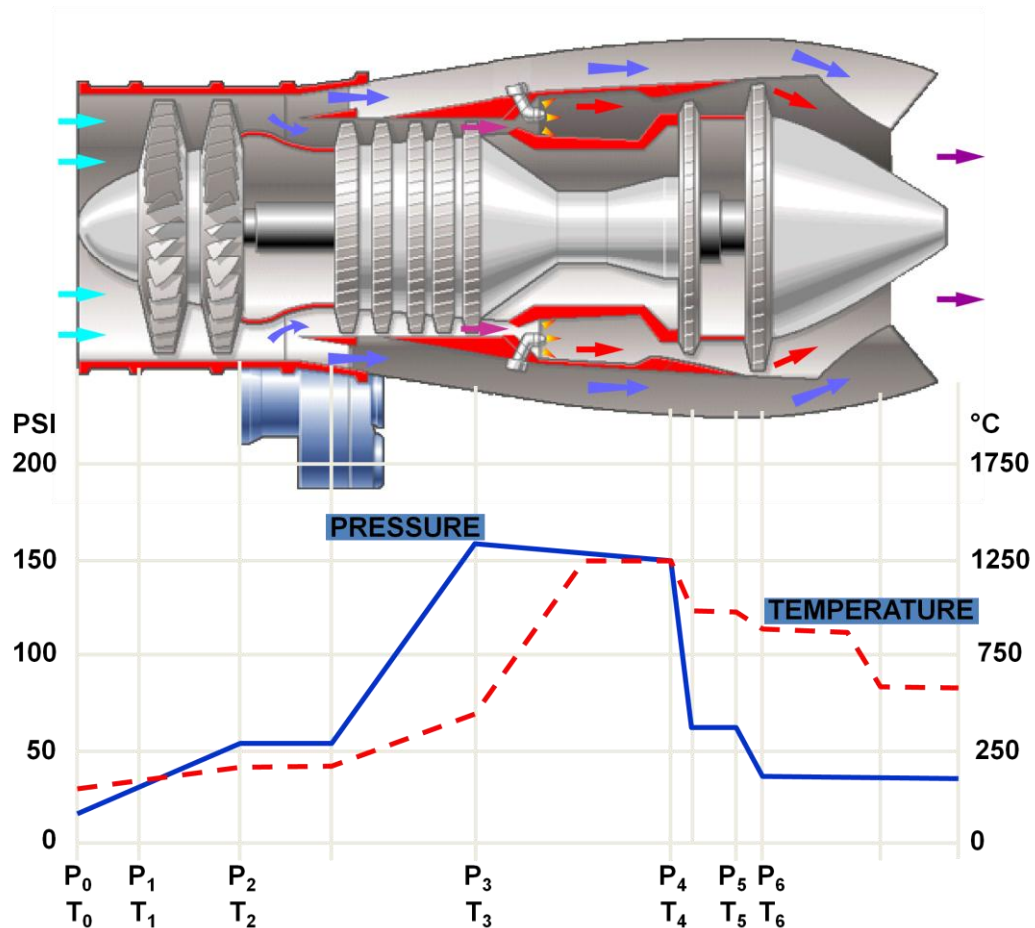
1.1.1 Moottori

Rolls Royce Turbomeca Adour kehitettiin alunperin SEPECAT Jaguar -hävittäjäpommittajaan 60-luvulla. Tähän päivään mennessä moottorin eri variaatiota on tuotettu yli 2800 kappaletta. Adour on rakenteeltaan yksinkertainen ja toimintavarma ohivirtausmoottori, eikä se ole kovin arka vieraille esineille käynnin aikana.[5][6]



Kuva 1 Rolls Royce Turbomeca Adour Mk.851 huoltotelineessä[6]

Hawk Mk 66:n voimanlähteenä käytetään moottorin versiota Mk861, kun taas vanhemmissa Mk 51- ja Mk 51A -koneissa käytetään saman moottorin Mk851-versiota (kuva 1). Mallien välillä suurin ero on Mk861:n suurempi ahtopaine, joka mahdollistaa suuremman tehon. Adour-moottorista on jälkipoltollisiakin versioita, mutta Hawkissa käytettävät versiot ovat jälkipoltottomia.[6]



Kuva 2 Suihkumoottorin toimintaperiaate, lämpötila ja paine[6]

Moottorin toiminta perustuu kaasun palaessa tuottamaan työntövoimaan (kuva 2). Ilmanottoaukosta sisään tulevasta ulkoilmasta osa johdetaan matalapaineahtimelle ja osa ohivirtauskanavaan. Adour on matalaohivirtausmoottori, jossa ohivirtauskanavaan johdetaan ilmaa suhteella 0.75:1. Sisään tulevan ilman lämpötila voi vaihdella -70 ja 40 °C:n välillä. Matalapaineahdin nostaa sisääntulevan ilman lämpötilan ulkoilman lämpötilasta noin neljään sataan asteeseen ja paineen ulkoilman 101 kPa:sta 400 kPa:iin. Korkeapaineahdin ei nosta juurikaan ilman lämpötilaa, mutta nostaa paineen edelleen 1400 kPa:iin. Paineistettu ilma johdetaan polttokammioon, jossa sen sekaan sekoitetaan polttoaine ja seos poltetaan. Ilman lämpötila nousee yli tuhanteen asteeseen. Palokaasut johdetaan korkeapaineahtimen ja matalapaineahtimen turbiinin läpi. Korkeapaineahdin pyörii kymmeniä kierroksia minuutissa ja matalapaineahdin noin 10 000 kierrosta minuutissa. Ahtimien jälkeen ohivirtauskanavaan johdettu ilma sekoitetaan pakokaasuihin, jolloin suihkutupkeen jää huomattavasti viileämpi kaasuseos. [6][7][8]

Suihkumoottorin osien korkeat ympäristö- ja mittatarkkuusvaatimukset tekevät niistä erittäin kalliita. Moottorin pienetkin osat maksavat tuhansia euroja. Suurimmat osat maksavat jopa satoja tuhansia euroja ja yhdessä huollossa joudutaan usein vaihtamaan useita osia. Huoltojen kalleuden vuoksi moottorin syklejä mitataan, jotta moottorille tehdyt huollot voidaan minimoida vastaamaan moottorin todellista kulumista.[6]

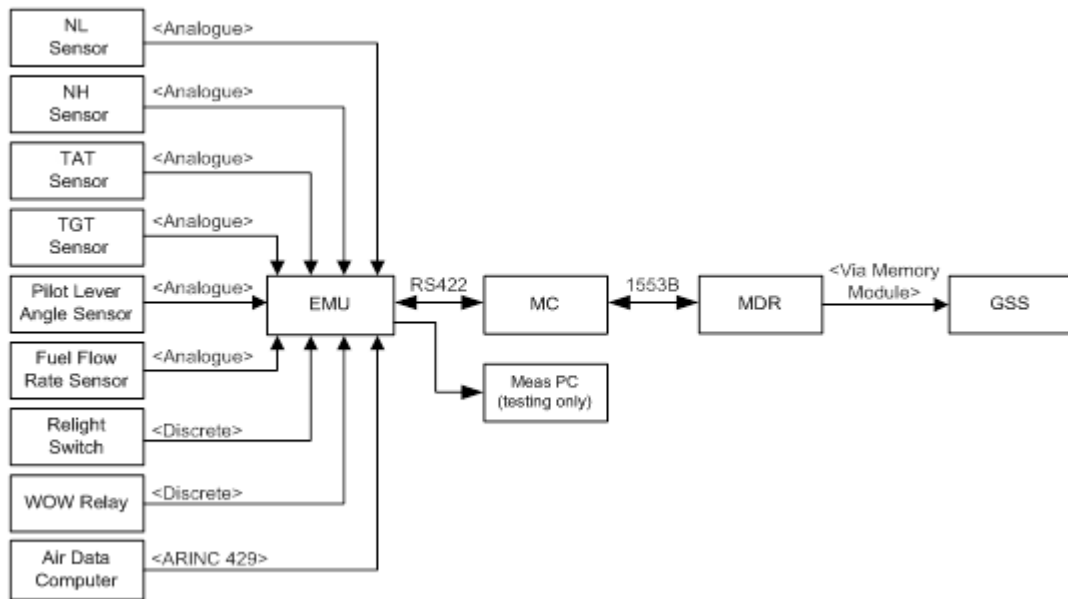
1.1.2 Syklilaskentatietokone

Syklilaskentatietokone (ELC, Engine Life Computer) on vastannut aiemmin Hawk Mk 66:n moottorin syklilaskennasta. Syklilaskentajärjestelmä on koostunut syklilaskentatietokoneesta ja siihen liittyvistä antureista, joilla se mittasi moottorin korkea- ja matalapaineahtimen kierrosnopeutta, turbiinin lämpötilaa (TGT, Turbine Gas Temperature) ja ulkolämpötilaa. Syklilaskentatietokone laskee moottorin syklit lennon aikana mittaamansa datan perusteella. Näin moottorin kuluminen voidaan tarkistaa maassa suoraan yksikön LED-näytöltä. [7]

Syklilaskentatietokonetta ei kuitenkaan voida käyttää, sillä niiden toimintakunnosta ei ole varmuutta puutteellisen testauskyvyn takia. Myöskään laitteen käyttämä syklilaskenta-algoritmi ei sellaisenaan vastaa Ilmavoimien tarvetta, sillä tietokoneiden syklilaskenta-algoritmi on tehty Sveitsin ilmavoimien käyttöön. Suomen ja Sveitsin Ilmavoimien syklikertymät eivät vastaa toisiaan erilaisen lentoprofiilin vuoksi. Sveitsissä etäisyydet harjoitusalueelle ovat pienemmät ja korkeuserot suuret, kun taas Suomessa lentoharjoittelu tapahtuu useimmiten harjoitusalueella, joille pitää ensin lentää siirtymälentona. Laitteet kärsivät vanhenemisongelmasta, koska niiden korjaamisessa tarvittavia komponentteja ei ole enää varastoissa eikä niitä löydy enää markkinoiltakaan. Osa laitteista onkin tällä hetkellä toimintakyvyttömiä.[9][10]

1.1.3 Moottorin kunnonvalvontajärjestelmä

Syklilaskentatietokoneen korvaajaksi suunniteltiin moottorin kunnonvalvontajärjestelmä (EHM, Engine Health Monitoring). Järjestelmä koostuu vanhan syklilaskentajärjestelmän antureista, monitorointiyksiköstä (EMU, Engine Monitoring Unit) ja uutena anturina lentokoneeseen asennettavasta tehovivun asentoanturista (PLA, Pilot Lever Angle). Näiden lisäksi järjestelmä tallentaa muista valmiina lentokoneessa olevista antureista moottorin polttoaineen virtausnopeuden, moottorin käynnistyskytkimen tilan ja paino pyörillä -diskreetin tilan. Monitorointiyksikkö mittaa antureiden arvoja ja lähettää ne aikaleimojen kera tehtävätietokoneelle, joka puolestaan lähettää ne edelleen tehtävätallentimelle (MDR, Mission Data Recorder).[2]



Kuva 3 EHM-järjestelmän tietovirtojen lohkokaavio[2]

Tehtävätallennin tallentaa tiedot siirrettävälle muistivälineelle (RMMD, Removable Mass Memory Device), jolla moottorin käyntiarvot viedään maatikijärjestelmään (GSS, Ground Support System) muiden tallennettujen lentoarvojen mukana. Maatikijärjestelmässä moottorin lentoarvoista lasketaan moottorin lennon aikana keräämät syklit. Järjestelmän lohkokaavio on kuvassa 3. Mitattavat signaalit on kuvattu tarkemmin kappaleessa 2.2. Edellä mainittujen lisäksi järjestelmään jätettiin tulevaisuuden varaukseksi toinen väyläliityntä, josta moottorin tiedot voitaisiin välittää mahdolliselle erilliselle moottorinäytölle ohjaajan nähtäväksi.

Monitorointilaite puskuroi tietoja omaan haihtumattomaan muistiinsa aina sähköjen ollessa päällä, jotta myös moottorin käynnistymisen ja sammutuksen aikaisista tapahtumista jää lokitieto. Tehtävätietokone on päällä vain moottorin pyörittäessä generaattoria. Monitorointilaite lähettää tietoja tehtävätietokoneelle aina muistivälineen ollessa kykenevä vastaanottamaan, eli aina kun tehtävätietokone on päällä, muistiväline on paikallaan ja valmis vastaanottamaan tietoja.

Anturidatan lisäksi monitorointilaite laskee omia käynnistymiskertojaan, jotta moottorin sammutuksen aikana mitatut arvot osataan yhdistää oikeaan lentoon sillä ne voidaan lähettää tehtävätietokoneelle vasta seuraavalle lennolle lähtiessä kun tehtävätietokone taas käynnistetään.

1.1.4 Tehtävätietokone

Hawkissa käytetään CMC Electronics FV-4000 tehtävätietokonetta. Sama tehtävätietokone on käytössä sekä Mk 51- että Mk 66 -koneissa. Tehtävätietokone toimii lentokoneen avioniikkajärjestelmän keskuksena. Kaikki lasiohjaamopäivityksen avioniikkalaitteet, kuten näytöt ja radiot liittyvät tehtävätietokoneeseen ja toimivat sen ohjaamana. Tehtävätietokone suorittaa lentokoneohjelmistoa (OFP, Operational Flight Program).

1.1.5 Suihkumoottorin syklilaskenta

Suihkumoottorien huoltovälien määrittämiseen käytetään syklilaskentaa. Moottorille lasketaan syklimäärä, jonka se kestää varmasti hajoamatta. Matkustajakoneiden moottoreilla yhtenä lentosyklinä pidetään yhden nousun ja laskeutumisen muodostamaa lentoa, jossa ennen ilmaan nousua moottorit lämmitetään käyttölämpötilaan, nousun aikana lennetään täydellä moottoriteholla ja itse matka lennetään vakioteholla. [8]

Sotilaskäytössä moottorit kokevat huomattavasti vaihtelevampia rasituksia kuin matkustajalentokoneiden tapauksessa. Lentotehtävän aikana saatetaan lentää useita kertoja täydellä teholla. Jälkipolttimella varustetuilla moottoreilla moottorin kuluminen on vielä vaihtelevampaa, sillä jälkipoltolla lentäminen saattaa kuluttaa moottoria useita kertoja enemmän kuin ilman jälkipolttoa. Tämän vuoksi erilaisille kuormitustilanteille lasketaan vastaavuus perussykleissä, jolloin sotilaslentokoneidenkin moottorien kulumista voidaan ennustaa. [11]

Hawkin tapauksessa syklilaskenta suoritetaan moottorin valmistajan Rolls Roycen toimittamien algoritmien mukaisesti. Syklilaskennan algoritmin tarkastamiseksi ja parantamiseksi lennolta tallennetaan myös apuparametreina lentokoneen nopeus ja korkeus, tehovivun asento sekä polttoaineen virtausnopeus.

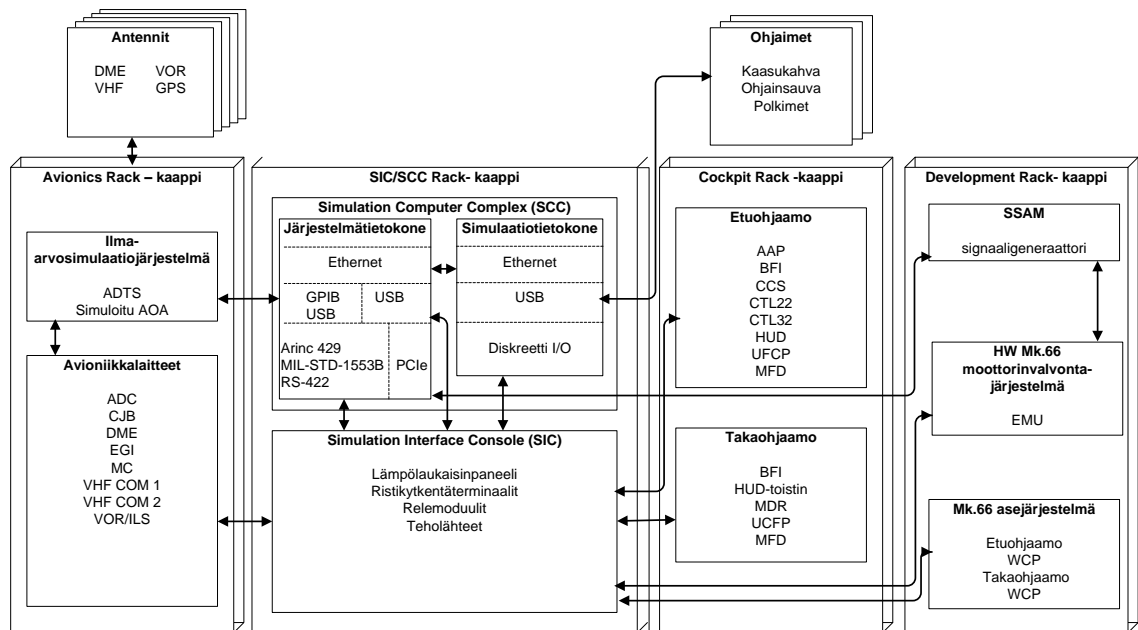
1.2 Hawk Upgrade -järjestelmätestipenkki

Hawkin avioniikkajärjestelmän testipenkki STB (kuva 4) on testausjärjestelmä Hawkien lasiohjaamopäivityksen avioniikkalaitteille. Testipenkkiä käytetään laitteiden huoltotarkastuksissa, Hawkin lento-ohjelmiston kehityksessä ja testaamisessa, vianhaussa, avioniikan järjestelmätestaamisessa sekä integrointitestauksessa.



Kuva 4 Hawk Upgrade Järjestelmätestipenkki

STB koostuu laitteet yhteen kytkevästä SIC/SCC-kaapista (SIC/SCC, Simulation Interface Console/Simulation Computer Complex), laitetilojen avioniikkalaitteita sisältävästä avioniikkakaapista (Avionics Rack), lentokoneen ohjaamon laitteet sisältävästä ohjaamokaapista (Cockpit Rack) sekä alkuperäisen lasiohjaamopäivityksen jälkeen jatkokehitettyjä laitteita sisältävästä kehityskaapista (Development Rack). Testipenkin rakenne on esitetty kuvassa 5.[12]



Kuva 5 Järjestelmätestipenkin rakenne

SIC/SCC-kaappi sisältää järjestelmää ohjaavan järjestelmätietokoneen ja lentosimulaatiomallia ajavan simulaatiotietokoneen. Järjestelmätietokoneessa on väyläkortit käytettäville lentokoneväylille ARINC 429 (ARINC, Aeronautical Radio, Incorporated), MIL-STD-1553 (MIL-STD, Military Standard) ja RS-422 (RS, Recommended Standard). Simulaatiotietokoneessa on kolme diskreetti-I/O-moduulia (I/O, Input/Output) lentokonejärjestelmän diskreettien signaalien tuottamiseen ja monitorointiin.

Avioniikkakaappi (Avionics Rack) sisältää radiot ja kytkennät katolla oleville antennille, tehtävätietokoneen ja ilma-arvotietokoneen sekä ilma-arvosimulaatiojärjestelmän ilma-arvotietokoneen testaamista varten.

Ohjaamokaappi (Cockpit Rack) sisältää nimensä mukaisesti ohjaamon sisältämät laitteet, kuten heijastusnäytön, avioniikan käyttöpaneelin (AAP, Avionics Activation Panel) ja varalentolaitteet (BFI, Backup Flight Instrument).

Kehityskaappi (Development Rack) sisältää kehityksessä olevat laitteet. Kaapissa on asevalintapaneelit (WCP, Weapon Control Panel), moottorinvalvontayksikkö sekä tässä työssä esiteltävä SSAM-signaaligeneraattori.

1.2.1 HAMS-ohjelmisto

HAMS (Hawk Avionics Monitoring & Simulations) on testipenkin laitteistoa käyttävä ohjelmisto. HAMS koostuu HAMS Applicationista (kuva 6), HAMS Clientista ja HAMS Pluginista.



Kuva 6 HAMS Applicationin pääkäyttöliittymä

HAMS Application -ohjelmaa ajetaan Järjestelmätietokoneella, ja sen tehtävänä on ohjata simuloituja avioniikkalaitteita joko käyttäjän käyttöliittymästä määrittämällä ohjauksilla tai Simulaatiotietokoneen tuottamilla ohjauksilla. Ohjelma sisältää myös sarjaväylä- ja diskreettimonitointitoiminnallisuudet. HAMS Client -ohjelmaa ajetaan Simulaatiotietokoneella ja sen tehtävänä on käyttää diskreetti-I/O-moduuleja. HAMS Plugin välittää lentoparametreja Laminar Researchin valmistamasta kaupallisesta X-Plane lentosimulaattoriohjelmasta HAMS Applicationille.

1.2.2 SSAM-järjestelmä

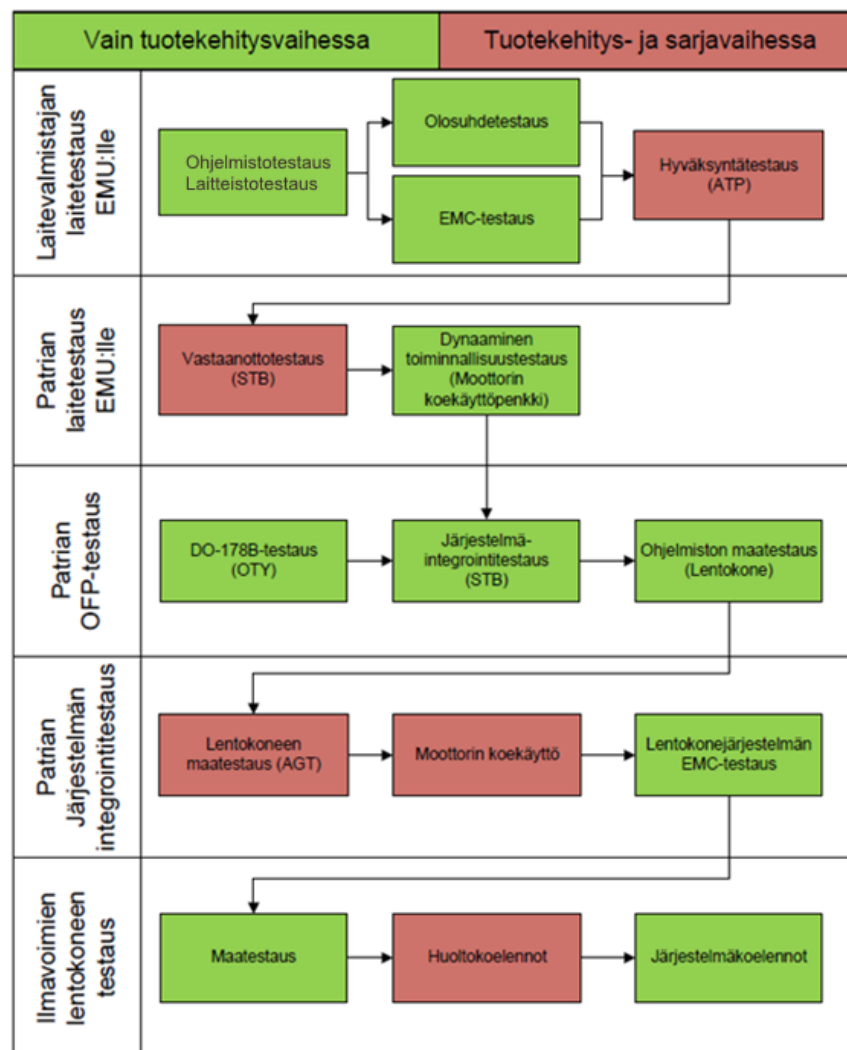
SSAM (Signal Simulator and Monitor) on tämän työn puitteissa tehtävä STB-ympäristöön lisätty testausjärjestelmä. Järjestelmä koostuu signaaligeneraattorilaitteistosta, SSAM-ohjelmasta ja SSAM-liitännäisestä. SSAM-ohjelma ohjaa signaaligeneraattorilaitteistoa, joko käyttäjän syötteiden tai lentosimulaattorin tuottamien lentoarvojen perusteella. SSAM-plugin on liitännäinen X-Plane -ohjelmaan, joka lähettää lentosimulaation tuottamia lentoarvoja SSAM-ohjelmalle. Laitteisto kuvataan tarkemmin luvussa 3 ja ohjelma luvussa 4.

1.3 Monitorointiyksikön testaus

Ilmailutuotteen kehityksessä valmiin tuotteen pitää vastata tarkasti asetettuja vaatimuksia, erityisesti turvallisuusvaatimuksia. Tämän vuoksi ilmailutuotteet kehitetään usein V-mallin mukaisesti, jolloin vaatimusten verifiointi pysyy helppona. Ilmailutuotteen tilaaja määrittää tuotteelle asiakasvaatimukset, joiden pohjalta järjestelmälle laaditaan ylemmän tason järjestelmävaatimukset. Järjestelmävaatimusten

perusteella laaditaan alemman tason laitteisto- ja ohjelmistovaatimukset, joiden perusteella järjestelmä testataan. Vastaavasti testauksessa varmennetaan ensin laitteisto- ja ohjelmistovaatimukset, joiden jälkeen voidaan varmentaa järjestelmävaatimusten toteutuminen. Tätä vaihetta kutsutaan järjestelmän verifiointiksi. Verifiointin jälkeen asiakas varmentaa asiakasvaatimusten toteutumisen ja järjestelmän toiminnan tehtäväkelpoisuuden, eli validoi järjestelmän toiminnan.

Ilmailutuotteen testaus on suunniteltava ja dokumentoitava. Suunnittelussa tulee käydä ilmi testattavat suureet, testauslaitteisto, testauksen suorittava henkilöstö ja siltä vaadittava pätevyys sekä testaustapa. Testaus on tehtävä myös käyttöolosuhteissa, eli testauksessa tulee ottaa huomioon olosuhdevaatimukset, kuten lämpötila, värinä, kosteus ja sähkömagneettinen yhteensopivuus (EMC, Electromagnetic Compatibility). Ilmailutuotteen ensimmäisen sarjalaitteen testaus on laajempi ja kattavampi kuin tuotteen käytön aikainen laitetestaus. Moottorin monitorointijärjestelmän testaussuunnitelma on kuvattu kuvassa 7. Testaussuunnitelman neljä ensimmäistä kohtaa sisältävät toiminnan verifiointia ja viimeinen kohta validointia.[13]



Kuva 7 Monitorintiyksikön sarjalaitteen testaus[13]

1.3.1 Laitevalmistajan laitetestaus

Laitevalmistaja suorittaa laitteelle omat ohjelmisto- ja laitteistotestauksensa olosuhdetestien ja EMC-testauksen lisäksi. Ohjelmisto- ja laitteistotestaus sisältää moduuli-, alijärjestelmä- rajapintatestaukset, joilla valmistaja varmentaa laitteen vaatimuksien mukaisuuden.

Laitteen tulee pysyä toimintakuntoisena koko Hawkin toiminta-alueella, mikä varmistetaan olosuhdetesteillä. Olosuhdevaatimukset sisältävät vaatimuksia lämpötilan, kosteuden, kiihtyvyyden, värinän ja EMC:n osalta. EMC-vaatimusten osalta monitorointilaitteen kelpoisuus verifioidaan standardin MIL-STD-461 mukaisilla testiproseduureilla, muiden olosuhdevaatimusten osalta kelpoisuus verifioidaan standardien MIL-STD-810 ja DO-160 mukaisilla testiproseduureilla. Hyväksyntätestauksessa laitteen toiminnallisuus tarkastetaan laajemmin kuin tuotannonaikaisessa testauksessa. [13]

1.3.2 Patrian laitetestaus

Moottorin monitorointiyksikön laitetestaus tehdään pääosin Hawk järjestelmätestipenkissä. Järjestelmätestipenkkiin luodaan kyky tuottaa ja simuloida kaikkia monitorointiyksikön käyttämiä signaaleja.

Laitteen vastaanottotestauksessa todennetaan laitteen toiminta testaamalla sen käyttäytyminen tunnetuissa tilanteissa, jolloin laitteen tulee tuottaa oikeanlainen vaste, eivätkä sen tuottamat signaalit saa häiritä toisten laitteiden toimintaa. Laitteille suoritetaan vastaava laitetestaus niiden saapuessa asiakkaalta vikailmoituksen kera, jolloin varmistetaan vikakuvaus korjausta varten, ja uusien tai huollettujen laitteiden saapuessa laitevalmistajalta.

Ensimmäisen sarjatuotantoyksilön laitetestaus tehdään tarkemmin kuin tuotantovaiheessa. Sen aikana todennetaan vaatimuksien toteutumista analysoimalla monitorointiyksikön toiminnallisuutta ja vertaamalla sen mittaamia arvoja vaatimuksia vasten. Erityisesti testauksen aikana todennetaan kommunikaatioprotokolla monitorointiyksikön ja tehtävätietokoneen välillä, sekä monitorointiyksikön kyky lukea monitoroitavia signaaleja vaaditulla tarkkuudella.

Dynaaminen toiminta testataan Linnavuoressa moottorin koekäyttöpenkissä (ETC, Engine Test Cell). Siinä varmistetaan järjestelmän toiminta oikean moottorin kanssa käymällä läpi kunnonvalvontajärjestelmän toiminta moottorin tehoasunnoilla 60, 70, 80, 90 ja 100 %. Testauksessa varmennetaan, että monitorointilaitteen mittaamat arvot vastaavat koekäyttöpenkin antureiden näyttämiä arvoja. Samalla varmistetaan, ettei

monitorointiyksikkö häiritse moottorin ohjauselektroniikkaa. Maatestauksen jälkeen varmistetaan muistivälineelle tallennetun datan vastaavan tuotettuja arvoja.[13]

1.3.3 Lentokoneohjelmistotestaus

Ohjelmistotestauksessa testataan lentokoneohjelmiston toiminnallisuus. Ohjelmistotestauksessa tehtävätietokoneen kanssa toimivan laitteiston sijaan käytetään laitteen simulaatiomallia.

Järjestelmätestipenkissä ohjelmistotestaukseen on tehty HAMS:sta erillinen, täysin python-skripteillä ohjattava versio HCL (Hawk Control Layer). HCL:llä saadaan automatisoitua ohjelmistotestauksen aikana suoritettavat testitapaukset, joten testaajan ei tarvitse erikseen asettaa lentokonejärjestelmää testitapauksen vaatimaan tilaan kaikkiin kymmeneen tuhansiin lentokoneohjelmiston varmentamiseen tarvittaviin testitapauksiin. Jokainen ohjelmiston vaatimus pitää varmentaa testitapauksella, ja jokaisen testitapauksen tulee varmentaa jonkin ohjelmistovaatimuksen toteutuminen. Lentokoneessa käytettävän ohjelmiston laatuohjeistus DO-178B asettaa lento-ohjelman ohjelmoinnille ja testaukselle vaatimuksia.

Järjestelmätestauksessa testataan tehtävätietokoneen ohjelmiston ja laitteiston toiminta. Järjestelmän integrointitestausta suoritetaan samaan tapaan testauspenkissä, mutta nyt simuloitujen mallien sijaan käytetään oikeita avioniikkalaitteita testauksessa. Integrointitestausta testataan laitteiden yhteistoiminta tehtävätietokoneen ja toistensa kanssa. Järjestelmätestauksessa käytetään signaalien tuottamiseen oikeita laitteita, joille tuotetaan signaaligeneraattoreilla lentokonejärjestelmää vastaavat signaalit. Ohjelmiston maatestaukset suoritetaan vastaavasti kuin integrointitestausta, mutta testauspenkin sijaan lentokoneella koneen ollessa maassa ja signaalien tullessa oikeilta lentokoneeseen asennetuilta antureilta. [13]

1.3.4 Järjestelmän integrointitestausta

Lentokoneen maatestauksessa (AGT, Aircraft Ground Test) järjestelmän toiminta varmistetaan lentokoneen ollessa maassa kytkettynä maasähköihin. Testauksessa todennetaan verkoston ja lentokonelaitteiston toiminta.

Moottorin koekäytössä lentokone on moottorin koekäyttöhallissa kytkettynä koekäyttäjärjestelmään. Koekäyttäjärjestelmällä saadaan tallennettua testien aikana moottorin käyntiparametrit myös monitorointilaitteesta riippumatta, minkä ansiosta monitorointilaitteen tallentamien parametrien tarkkuus voidaan mitata. Koekäytön aikana ajetaan moottoria ja muuta järjestelmää tunnetulla tavalla kuormittava profiili ja varmennetaan järjestelmän toiminta sitä vasten.

Lentokonejärjestelmän EMC-testauksessa varmennetaan, ettei uusi järjestelmä häiritse lentokonejärjestelmän muuta laitteistoa eikä vaikuta sen toimintaan, eikä muu järjestelmä häiritse kunnonvalvontajärjestelmää.[13]

1.3.5 Ilmavoimien lentokoneen testaus

Ilmavoimien maatestauksessa varmennetaan uudestaan järjestelmän toiminta ja liitännät maasähköihin kytkettynä. Näin varmistetaan järjestelmän toiminta ennen koelennolle lähtöä.

Koelentoilla varmistetaan järjestelmän ja lento-ohjelmiston toiminta lennon aikana. Koelentojen aikana varmistetaan erityisesti järjestelmän tehtävällisyys. Koelentojen jälkeen järjestelmälle voidaan hakea tyyppihyväksyntää. Tyyppihyväksynnän myötä järjestelmä voidaan ottaa palveluskäyttöön.[13]

2 MOOTTORIN MONITOROINTIYKSIKKÖ

Moottorin monitorointiyksikkö (kuva 8) mittaa ja tallentaa moottorin käynnin aikana antureidensa ja ilma-arvotietokoneen tilaa. Monitorointilaitteen tulee kyetä mittaamaan arvoja koko Hawk Mk 66:lle hyväksytyllä suorituskyvyalueella.



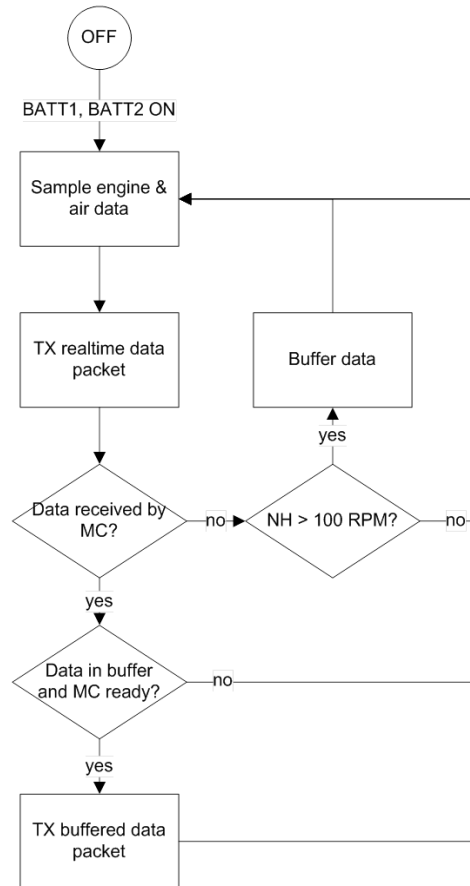
Kuva 8 Moottorin monitorointiyksikkö

2.1 Toiminta

Monitorointiyksikkö mittaa tarkastelemansa arvot 125 ms -välein ja lähettää ne tehtävätietokoneelle kahta sarjaväylää pitkin. Tämän lisäksi monitorointiyksikkö suorittaa jatkuvaa itsetestausta 500 ms -välein ja lähettää itsetestauksen CBIT-tulokset (CBIT, Continuous Built In Test) pääväylää pitkin tehtävätietokoneelle. Järjestelmä tarkistaa itsetestauksessa anturien sähköisistä kytkennöistä, onko niihin tullut mittausalueen ulkopuolisia arvoja tai onko anturi irti.

Monitorointiyksikkö aloittaa monitorointidatan puskuroimisen vasta kun moottorin matalapaineahtimen pyörimisnopeus saavuttaa 100 1/s, jotta puskuriin tulisi arvoja vain moottorin ollessa käynnissä, eikä myös ahtimen pyöriessä maassa tuulessa. Koska tehtävätietokoneen käynnistymisessä menee useita sekunteja, tallennetaan monitoroidut

arvot puskuriin silloin, kun tehtävätietokone ei pysty niitä vastaanottamaan. Puskuroituja viestejä lähetetään pääväylää pitkin tehtävätietokoneelle silloin, kun tehtävätietokone pystyy niitä vastaanottamaan. Järjestelmän toiminnan vuokaavio on kuvassa 9.



Kuva 9 Monitoroinnin vuokaavio[14]

Monitorointiyksikön toinen väylä on lisätty tulevaisuuden varana ja testausta varten järjestelmään. Toiselle väylälle lähetetään jatkuvasti lentoarvoviestejä sekä itsetestauksen tulos.[2][14]

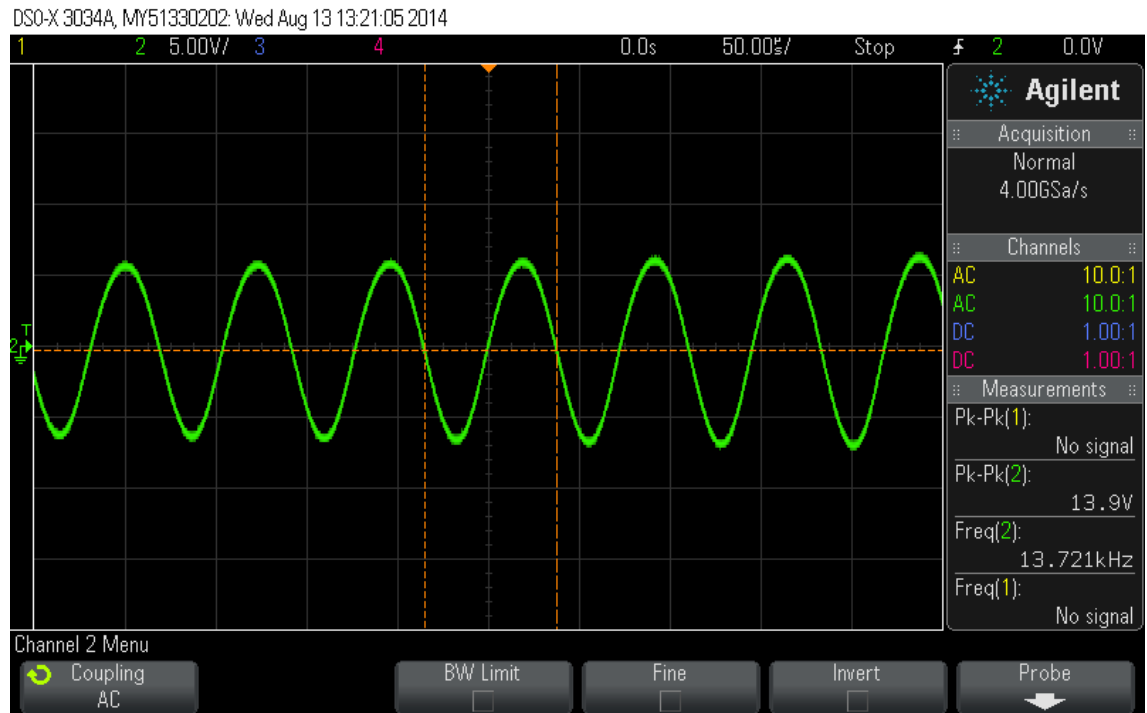
2.2 Monitoroitavat signaalit

Moottorin kunnonvalvontajärjestelmä tallentaa seuraavissa alikappaleissa esiteltyjen signaalien arvoja.

2.2.1 Matalapaineahtimen kierrosnopeus

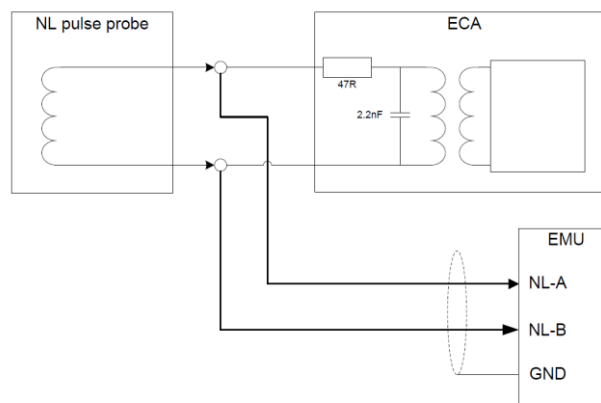
Matalapaineahtimen kierrosnopeus (NL, Low Pressure Spool Speed) mittaa ensimmäisen vaiheen ahtimen kierrosnopeutta. Ahtimen tuottama pulssinopeus voi

nousta 20400 pulssiin sekunnissa. Kierrosnopeutta mitataan moottorin runkoon asennetuilla magneettiantureilla, jotka tuottavat moottorin pyöriessä siniaaltomaista aaltomuotoa moottoriin kiinnitetyn käämin kulkiessa anturin ohi moottorin pyörimisnopeuden taajuudella ja maksimissaan 30 voltin huipusta huippuun - amplitudilla. Amplitudi riippuu suoraan pyörimisnopeudesta. Esimerkkisignaali on kuvassa 10.



Kuva 10 Oskilloskooppikuva matalapaineahtimen kierrosnopeussignaalista testipenkissä

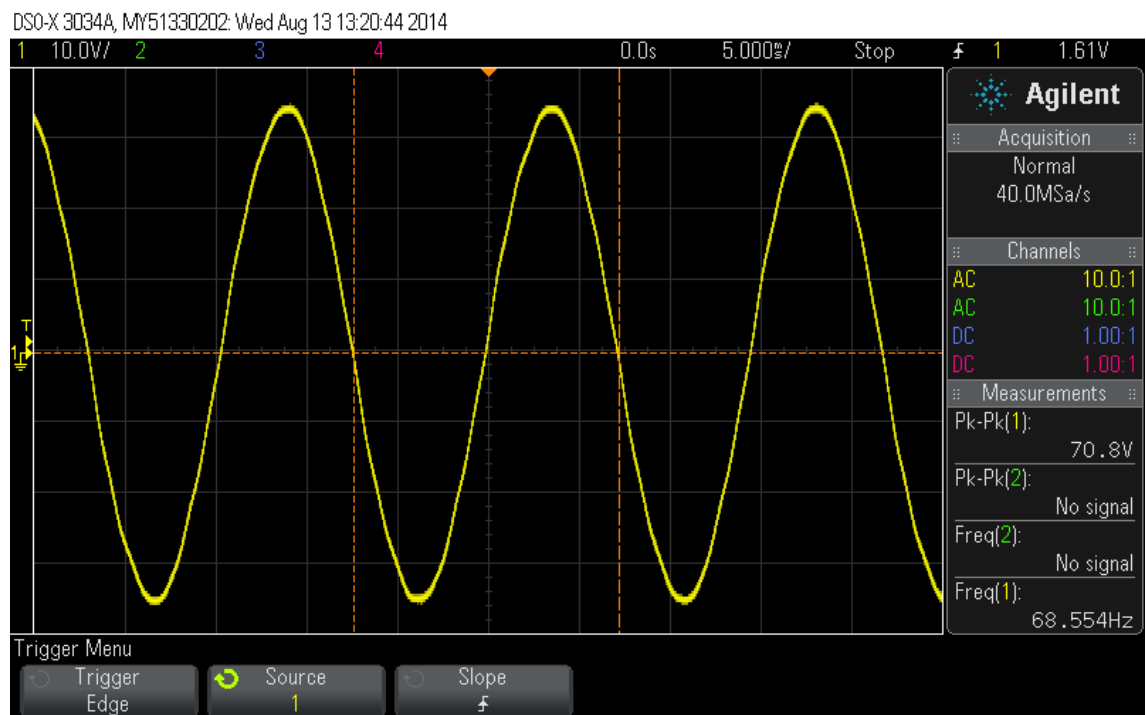
Lentokonejärjestelmässä ahtimen kierrosnopeus luetaan moottoriohjaimen (ECA, Engine Control Amplifier) sisääntulosta. Signaali haaroitetaan kunnonvalvontajärjestelmän verkostoon. KytKentä on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11 Matalapaineahtimen kierrosnopeuden mittauksen periaatekuva[14]

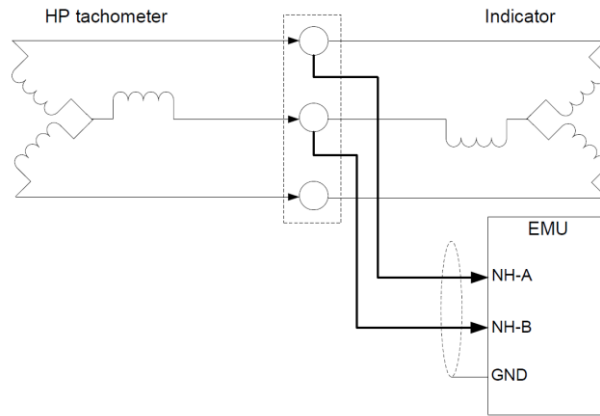
2.2.2 Korkeapaineahtimen kierrosnopeus

Korkeapaineahtimen kierrosnopeus (NH, High Pressure Spool Speed) mittaa toisen vaiheen ahtimen kierrosnopeutta. Korkeapaineahdin pyörii huomattavasti matalapaineahdinta pienemmällä kierrosnopeudella, sen pulssinopeus voi nousta 81 pulssiin sekunnissa. Korkeapaineahtimen pyörimisnopeutta mitataan moottorin runkoon asennetuilla pulssiantureilla, jotka tuottavat moottorin pyöriessä siniaaltomaista aaltomuotoa moottorin pulssinopeuden taajuudella ja maksimissaan 60 voltin huipusta huippuun -amplitudilla. Kuvassa 12 on oskilloskooppikuva signaalista.



Kuva 12 Oskilloskooppikuva korkeapaineahtimen kierrosnopeussignaalista moottorin pyöriessä maksimiteholla testipenkissä

Korkeapaineahtimen kierrosnopeussignaali haaroitetaan ohjaamon moottorinäytöltä monitorointilaitteelle. KytKentä on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13 Korkeapaineahtimen kierrosnopeuden mittauksen periaatekuva[14]

2.2.3 Kokonaislämpötila

Kokonaislämpötilaa (TAT, Total Air Temperature) mittaa Pt100-tyyppinen platinaresistanssianturi (kuva 14). Anturi sijaitsee koneessa keulassa.



Kuva 14 Kokonaislämpötila-anturi

Ulkolämpötilasta saadaan kokonaislämpötila korjaamalla ilman anturiin pysähtymisen aiheuttama lämpeneminen pois arvosta käyttämällä seuraavaa kaavaa:

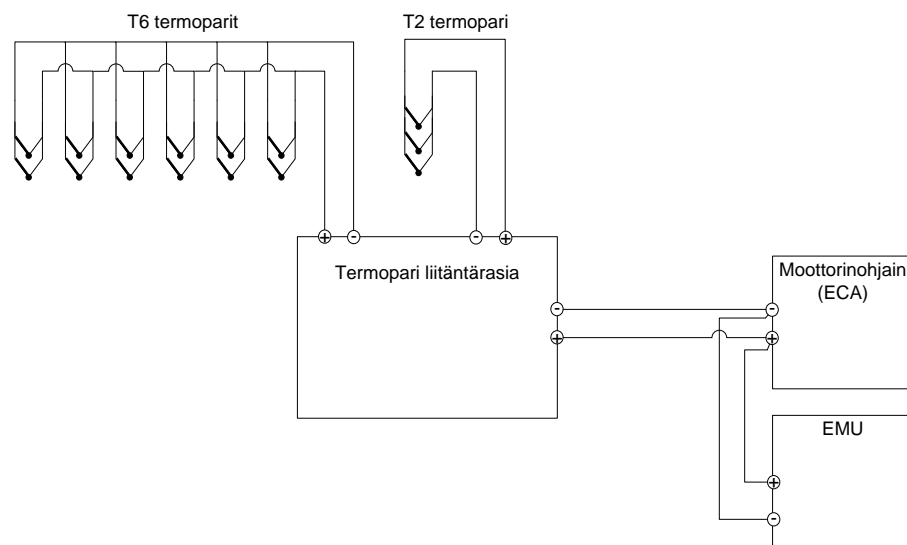
$$T = \frac{T'}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} KM'}$$

Kokonaislämpötilan laskukaavassa T' on mitattu ulkolämpötila, γ on ilman adiabaattivakio, K on anturin korjauskerroin ja M' on paikallinen Machin luku. Korjauskertoimella saadaan korjattua lentokoneen rakenteesta anturiin aiheutuva ilmavirta.[15]

Hawkin käyttöalueella ulkolämpötila voi vaihdella -70 ja 100 asteen välillä. Lämpötila voi laskea ilmatilan yläosissa käyttöalueen alarajalle ja mitattu lämpötila voi helteellä matalalla lentäessä nopeassa vauhdissa nousta käyttöalueen ylärajalle. Tämän vuoksi anturilla mitattavaksi lämpötila-aluevaatimukseksi on asetettu -90 - 120 °C.[7]

2.2.4 Turbiinin suihkuputken lämpötila

Turbiinin suihkuputken lämpötilaa (TGT, Turbine Gas Temperature) mitataan seitsemällä turbiiniin kiinnitetyllä K-tyypin nikkeli-kromi/nikkeli-alumiini - termoparilla. Lämpötilan mittauksen kytkentä on esitetty kuvassa 15. Lämpötila saadaan mittaamalla matalapaineturbiinin jälkeisten kaasujen lämpötila (T6) ja matalapaineahtimen jälkeisten kaasujen lämpötila (T2). T2-termopari on kytketty vastakkaisella polariteetilla termoparin liityntärasiasa kuin T6-termopari ja termoparien vastakkaiset jännitteet saattavat liityntärasian ulostuloksi turbiinin lisäämän lämpötilan. Vähennyslasku suoritetaan moottorin tarkemman, ulkolämpötilasta riippumattoman, ohjauksen saavuttamiseksi.



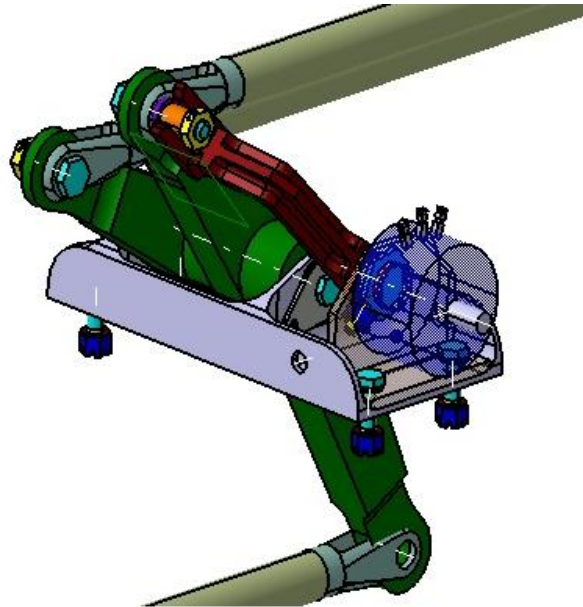
Kuva 15 Turbiinin lämpötilalisan mittauskytkentä[14]

Monitorointiyksikkö mittaa lämpötilasignaalin moottoriohjaimen (ECA, Engine Control Amplifier) liityntäpisteistä. Monitorointiyksikön moottorin lämpötilasisääntulo on korkeaimpedanssinen, jottei monitorointi vaikuttaisi moottoriohjaimen lämpötilamittaukseen.

Turbiinin suihkuputken lämpötila voi nousta täydellä teholla 670 asteeseen, mutta lämpötilaa mitataan alueella 0 - 1200 °C mahdollisten yllämpöjen tunnistamiseksi. Termoparin jännite vaihtelee välillä 0 - 49828 μ V.[16]

2.2.5 Tehovivun asento

Tehovivun asentoanturi (PLA, Pilot Lever Angle) asennetaan moottorin tehoasetusvivun akselille mittaamaan sen asentoa. Anturina käytetään potentiometriä State Electronics 5401R100L50SS. Asentoanturi asennuspaikassaan on esitetty kuvassa 16.

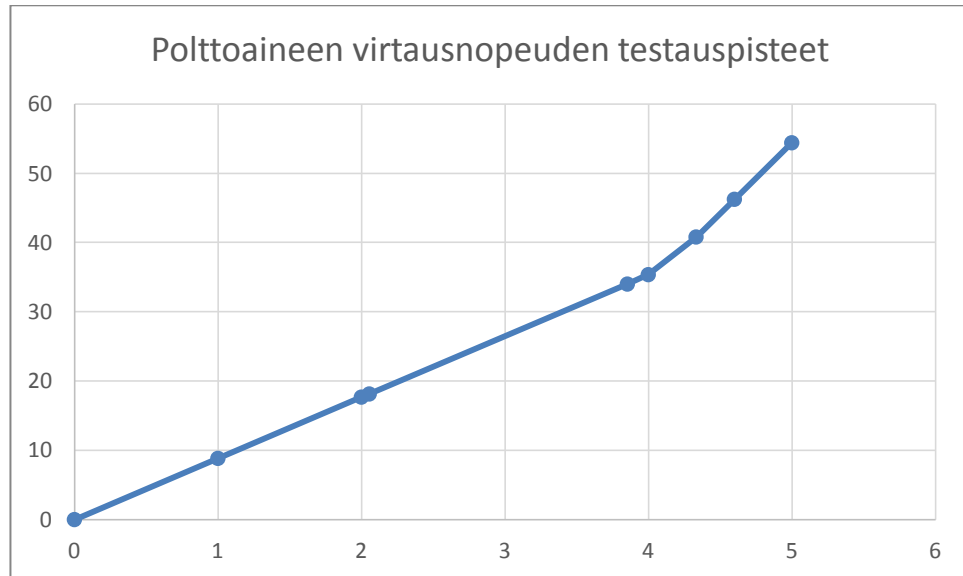


Kuva 16 Tehovivun asentoanturi asennettuna kaksihaaraiseen kulmavipuun[14]

Potentiometrin resistanssialue on matala, 0 - 100 Ohm, jotta signaaliin virta olisi riittävän suuri eikä signaaliin kertyisi häiriötä. Käytännössä potentiometrin mitta-arvoina on tehovivun kulkiessa ääripäästä ääripäähän 40 - 60 Ohm. Tehovivun asentoa mitataan sykli-laskenta-algoritmin parantamiseksi.

2.2.6 Polttoaineen virtausnopeus

Polttoaineen virtausnopeus (FFR, Fuel Flow Rate) mitataan polttoaineputkesta Intertechnique TM 128-401 -massavirtausnopeuslähettimellä. Polttoaine pyörittää lähettimen läpi virratessaan lähettimen turbiinia, joka pyörittää samalla magneettia, joka indusoi käämiin jännitepulssein jokaisella pyörimiskierroksella. Tämän jännitteen perusteella voidaan päätellä tilavuusvirta lähettimen läpi. Polttoaineen tiheyden mittaaminen nojaa lentokonepolttoaineen dialektrisen vakion muutoksien mittaamiseen. Anturin sisällä on metallilevyjä, jotka yhdessä polttoaineen kanssa muodostavat kondensaattorin. Tämän kondensaattorin kapasitanssi mittaamalla saadaan selville polttoaineen tiheys. Polttoaineen tilavuusvirta- ja tiheystieto johdetaan virtausnopeusnäyttöön lentokoneen etuohjaamoon, jossa signaalit yhdistetään polttoaineen massavirtaukseksi, näytetään mittarilla lentäjälle ja lähetetään takaohjaamon polttoaineenvirtausnopeusmittarille. [7][17]



Kuva 17 Polttoaineen virtausnopeusnäytön testausohjeen testauspisteet[17]

Polttoaineen virtausnopeuden ja jännitteen välille on määritetty virtausnopeusnäytön testausohjeessa mittauspisteet. Mittauspisteet on esitetty kuvassa 17.

Moottorin kunnonvalvontajärjestelmä mittaa polttoaineen virtausnopeuden etuohjaamon virtausnopeusnäytön takaohjaamolle lähtevästä signaalista. Mitattava signaali on differentiaalinen tasajännitesignaali, jonka offset-taso on 8 ± 1 V maapotentiaalisiin suhteen ja jännitetaso 0 - 6 V.

2.2.7 Nopeus ja korkeus

Kunnonvalvontajärjestelmä tallentaa kalibroidun ilmanopeuden (CAS, Calibrated Airspeed) ja painekorkeuden (ALT, Altitude). Kunnonvalvontajärjestelmä tallentaa tiedot myös tehtävätietokoneen ollessa pois päältä, kun aikaisemmin nopeus ja korkeus on jäänyt tallentamatta tehtävätietokoneen käynnistyessä uudelleen lennon aikana. Monitorintyksikkö saa lentokoneen nopeus- ja korkeustiedon ilma-arvotietokoneen lähettämästä ARINC 429 -väyläsanomasta.

Ilma-arvotietokone mittaa lentokoneen ilmanopeuden ja painekorkeuden pitotstaattisella putkella. Pitot-putki sijaitsee lentokoneen rungon ulkopuolella paikassa, jossa ilman virtaus on mahdollisimman laminaarinen, Hawkissa se on koneen keulassa. Pitot-putkessa on reikiä, joita pitkin ilman paine kohdistuu mittaavaan anturiin. Anturi mittaa staattista ja dynaamista ilmanpainetta. Staattisesta ilmanpaineesta saadaan selville lentokoneen korkeus. Lentokoneen nopeus saadaan selville dynaamisen ja staattisen ilmanpaineen erona.[15]

Ilma-arvotietokone lähettää tiedot ARINC 429 -väylää pitkin. ARINC 429 on yleinen siviililentokoneissa käytettävä dataväylä. ARINC 429 -väylän liikenne koostuu 32-bittisistä viesteistä, ja fyysisenä väylänä toimii kierretty parikaapeli bipolaarisella bittikoodauksella.[18]

2.2.8 Diskreettisygnalit

Valvontayksikkö tallentaa lentokoneen paino-pyörillä- (WOW, Weight on Wheels) ja käynnistyskytkimen tilatiedon (RS, Relight Switch). Valvontayksikkö lukee nämä tiedot diskreettisygnaliltaan, joka kytketään maapotentiaalin tilatiedon ollessa aktiivisena ja käyttöjännitteeseen (+28 V) tilan ollessa pois päältä.

Valvontayksikkö tallentaa diskreettisygnaalien tilatiedon lennon seurantaan ja sykliilaskenta-algoritmin parantamista varten. Tallennettujen signaalien perusteella saadaan entistä helpommin nähtyä moottorin käynnistyshetki sekä lentokoneen nousu- ja laskeutumishetket.

2.2.9 Tehtävätietokone

Tehtävätietokoneen tehtävä moottorin kunnonvalvontajärjestelmässä on tallentaa monitorointiyksikön tuottamat sanomat muistimoduulille. Monitorointiyksikkö lähettää lukemansa arvot tehtävätietokoneelle RS-422 -väylää pitkin.

Monitorointiyksikkö lähettää monitoroidut tiedot tehtävätietokoneelle kahta RS-422 -väylää pitkin. Toinen on pääväylä, jota pitkin lähetetään monitoroidut arvot tehtävätietokoneelle ja toinen on testausta ja tulevaisuuden järjestelmiä varten. Väylän toiminta testataan tarkkailemalla monitorointiyksikön ja tehtävätietokoneen välistä liikennettä sarjaväylämonitorilla.

3 SSAM-LAITTEISTO

Edellisessä luvussa kuvattujen signaalien tuottamisesta laitteistolle tulee taulukkojen 1, 2, 3 ja 4 mukaiset vaatimukset.[19]

Taulukko 1 Moottorin ahtimien pyörimisnopeussignaalin mittaamisen vaatimukset monitorointilaitteelle

	Korkeapaine	Matalapaine
Taajuus [Hz]	100..20400	9..81
Amplitudi [V]	0,1..30	1,0..60
Tarkkuus [%]	0,1	0,1
Muutosnopeus [Hz/s]	6800	35

Taulukko 2 Monitorointilaitteen mittaamien lämpötilasignaalin mittaamisen vaatimukset

	Todellinen lämpötila	Turbiinin lämpötila
Lämpötila [°C]	-90..120	0..1200
Tarkkuus [°C]	1	1
Muutosnopeus [°C/s]	10	75

Taulukko 3 Moottorin tehovivun asennon mittaamisen vaatimukset

	Tehovivun asento
Vastus [Ohm]	0..100
Tarkkuus [%]	1

Taulukko 4 Polttoaineen virtausnopeussignaalin mittaamisen vaatimukset monitorointilaitteelle

	Polttoaineen virtausnopeus
Jännite [V]	0..6
Tarkkuus [%]	1

Suurimman rajoitteen toteutukselle asetti matalapaineahtimen pyörimisnopeussignaalin simulointi. Korkea jännite ja suuri taajuus yhtäaikaaisesti ei onnistunut useimmalta vaihtoehdolta. Yhdeksi mahdolliseksi vaihtoehdoksi löydettiin ruotsalainen suurjännitesignaali generaattori FLC Electronics WFG600, joka kykenee tuottamaan analogista signaalia 100 voltin amplitudiin asti[20]. Vaihtoehto hylättiin kalliin hinnan vuoksi, sillä sen lisäksi olisi pitänyt hankkia kaikille muille signaaleille erikseen generaattorit. Toinen pohdittu vaihtoehto oli käyttää pienjännitesignaali generaattorin kanssa signaalivahvistinta. Vaihtoehto hylättiin signaalivahvistimien lisäämän virheen vuoksi.

Testaukseen käytettäväksi laitteistoksi valittiin National Instrumentsin valikoimasta PXIe-laitteisto, sen hyvän soveltuvuuden tarvittavien signaalien tuottamiseen, pienen hinnan ja hyvän integroituvuuden muuhun laitteistoon vuoksi. Käytettäväksi vaihtoehdoksi valikoitui PCIe-väylään kytkettävä PXIe-kehikko, johon voitiin hankkia tarvittavanlaisia signaaleja generoivat moduulit ja National Instrumentsin PXIe-moduulivalikoimasta löytyi eristetyillä jänniteulostuloilla varustettu PXIe-4322, jolla saatiin kanavia sarjaan kytkemällä tuotettua riittävän suurta jännitettä riittävän suurella taajuudella. Kehikkoon asennettavien moduulien valikoimasta löytyi sopivat moduulit muidenkin signaalien tuottamiseen.

3.1 PXIe-laitteisto PXIe-1073

PXIe-laitteisto (PXIe, PCI express eXtensions for Instrumentation) koostuu tietokoneeseen liitettävästä kytkentämoduulista, kytkentäkaapelista ja PXIe-kehikosta (kuva 18). Kytkentämoduulilla saadaan kytkettyä tietokoneen ja PXIe-kehikon välinen PXIe-kaapeli tietokoneen PCIe-väylään. PXIe-kehikossa on viisi PXIe-moduulipaikkaa ja niiden tarvitsema virtalähde ja muu ohjauselektronikka. PXIe-kehikko ja siihen liitetyt moduulit näkyvät tietokoneelle sisäisenä PCIe-laitteena. Tämän vuoksi PXIe-laitteistoa käytettäessä järjestelmätietokone tulee käynnistää PXIe-kehikon virtanapista, jolloin kehikko tunnistautuu PCIe-laitteeksi tietokoneelle. PXIe-kehikko käyttää 230 VAC -verkkovirtaa.[21]



Kuva 18 PXIe-1073 -asennuskehikko [22]

Kehikko asennettiin järjestelmätestipenkin 19”-kehikkoon asennuskiskoilla. Kehikolle ja siihen asennetuille moduuleille sekä niitä ohjaavalle ohjelmalle annettiin nimeksi SSAM, Signal Simulator and Monitor.

PXIe-kehikko ja I/O-moduulit ovat National Instrumentsin tuotteita, joten niiden kanssa käytetään NI VISA -ajureita. NI VISA (VISA, Virtual Instrument Software Architecture) on NI:n yritysstandardi mittauslaitteiden konfigurointiin ja

ohjelmoimiseen. VISA-ajureita käyttäessä ei tarvitse tietää kuin laitteelle määritelty nimi, jotta sen resursseja voi muokata ja käyttää ohjelmassa.[23]

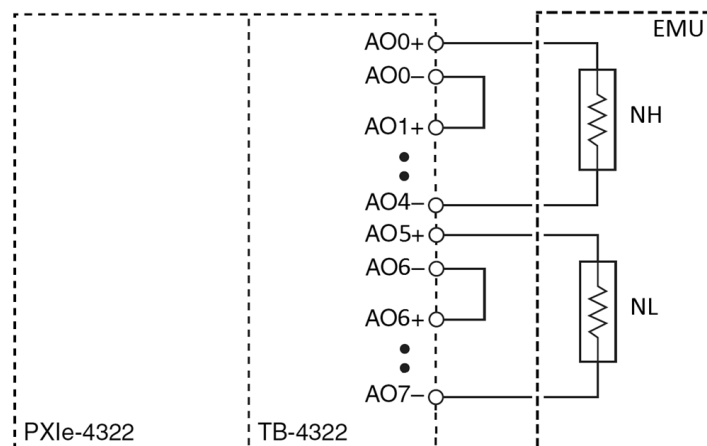
3.2 Ahtimien pyörimisnopeus

Ahtimien pyörimisnopeussignaalien tuottamiseen valittiin NI PXIe-4322 (kuva 19). PXIe-4322 on kahdeksankanavainen jännite- ja virtalähde, joka kykenee tuottamaan 16 voltin amplitudilla signaalia yhteen kanavaan 250 kS/s -nopeudella.



Kuva 19 PXIe-4322 -signaalimoduuli[24]

Moduulin kanavia voidaan kytkeä sarjaan, jolloin saadaan tuotettua korkeita jännitteitä. Näin ollen matalapaineahtimen signaalin generointiin tarvittava 30 voltin huipusta huippuun amplitudi saatiin tuotettua kytkemällä 3 kanavaa yhteen ja korkeapaineahtimen signaalin generointiin tarvittava 60 voltin huipusta huippuun amplitudi kytkemällä 5 kanavaa yhteen (kuva 20). Moduulia käyttämällä voitiin täyttää ahtimen signaalien tuottamisen vaatimukset (taulukko 1).

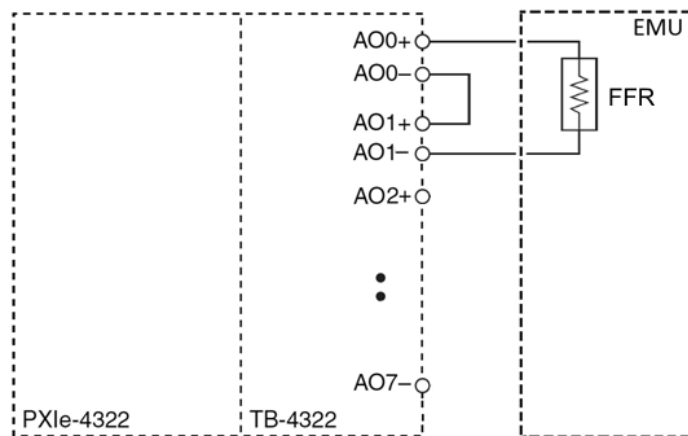


Kuva 20 Ahtimen pyörimisnopeussignaalien kytkeytyminen PXIe-4322:een

Ahtimien pyörimisnopeussignaalien jännite ylittää pienjännittdirektiivin rajan 50 VAC. Tämän vuoksi laitteeseen tuli varoitustarrat kertomaan käyttäjälle laitteiston sisältävän korkeajännitteisiä osia ja jännitteiset osat on suojattu siten, ettei niihin voi koskea avaamatta laitetta.[25]

3.3 Polttoaineen virtausnopeus

Polttoaineen virtausnopeussignaali on 8 voltin potentiaalilla mitattu 0 - 6 V signaali. Tämän vuoksi signaalitaso on 8 ja 14 voltin välillä ja se tuotetaan toisella PXIe-4322 -moduulilla kytkemällä kaksi ulostulokanavaa sarjaan (kuva 21). Toiseen kanavaan syötetään 8 voltin pohjasignaali ja toiseen kanavaan varsinainen 0 - 6 V virtausnopeussignaali.

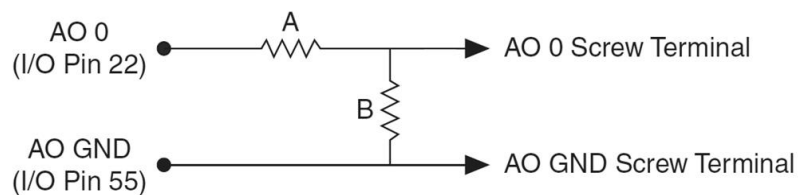


Kuva 21 Polttoaineen virtausnopeuden kytkentäkuva

3.4 Turbiinin suihkuputken lämpötila

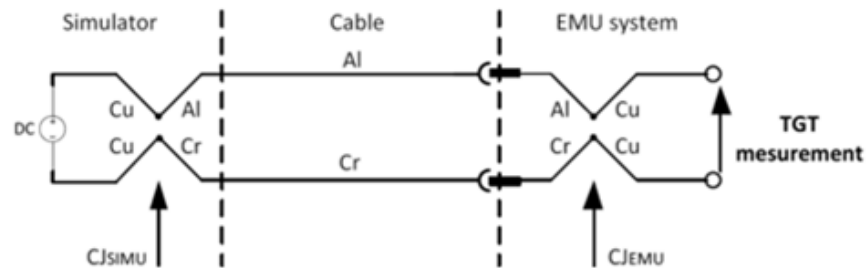
Turbiinin suihkuputken lämpötilan tuottamiseen valittiin PXI-6229 yleisjänniteliityntämoduuli. PXI-6229 on yleismallinen I/O-moduuli, jossa on 4 ± 10 V analogiaulostuloa ja 32 analogiasisääntuloa 16 bitin resoluutiolla. Näiden lisäksi moduulissa on 48 digitaali-I/O-liityntää.[26]

Suihkuputken lämpötilasignaali on K-tyyppin termoparisignaali, joten sen mitattava jännitealue käytettävällä lämpötila-alueella on 0 - 48 mV. PXI-6229:n resoluutio on $3100 \mu\text{V}$. Kun signaali tuotetaan 1:200-jännitteenjakokytkennällä (kuva 22) tulee resoluutioksi $15 \mu\text{V}$. 10 V ulostulolla mitattavaksi signaaliksi tulee 50 mV, joka vastaa $1232 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilaa.[12]



Kuva 22 Turbiinin suihkuputken lämpötilasignaalin tuottamisessa käytettävä jännitteenjakokytkentä[14]

Signaalin tuotossa huomioitiin signaaligeneraattorin kytkentärasiassa kupari - termopari -liitos (kuva 23). Liitoksen kohdalle syntyy termoparin mittauspiste, joka pitää kylmäpisteenä kompensoida mittauksessa. Kylmäpisteen lämpötilaa asetusarvosta vähentämällä ei tule huomioitua termoparin epälinearisuutta. Termoparin lämpötilan aiheuttamat jännitemuutokset ovat 600 asteen ympäristössä pienempiä kuin 0 ja 1200 asteen ympäristössä. Tämän vuoksi suoraan kylmäpisteen lämpötilan vähentäminen tuotettavasta lämpötilasta ei riitä, vaan kylmäpisteen indusoima jännite tulee vähentää signaaligeneraattorin tuottamasta jännitteestä. Tällöin kylmäpiste ei aiheuta offset-virhettä lämpötilan tuottamiseen.



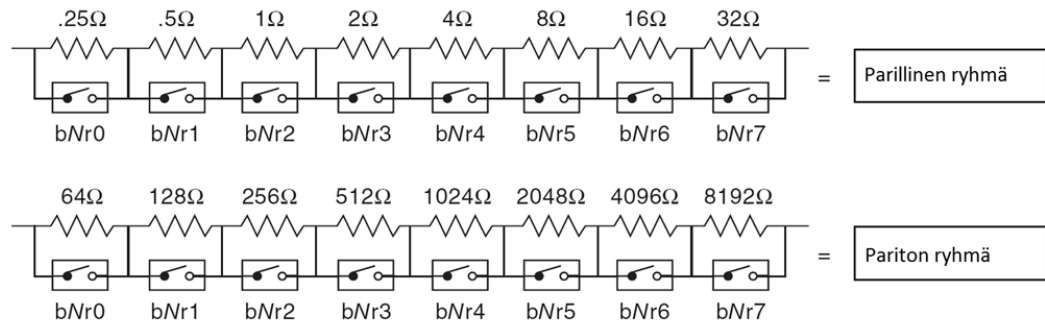
Kuva 23 Turbiinin suihkupunken lämpötilasignaalin kytkentäkuva testijärjestelmässä[27]

PXI-6229:n sisääntuloilla varmennetaan monitorointilaitteen kokonaislämpötilan ja tehovivun asennon mittaus. Signaalien varmennus onnistuu mittaamalla resistanssien yli oleva jännite mittauksen aikana. Jännitteen mittauksella saadaan selville tuottaako monitorointilaitte oikeaa jännitettä resistanssien mittaukseen, ja näin selvitettyä toimiiko mittauspiiri oikein.

3.5 Kokonaislämpötila ja tehovivun asento

Tehovivun asento on resistanssi, jonka arvo määräytyy potentiometrin vastusjaosta arvojen ollessa välillä 0-100 Ohm. Todellinen lämpötilasignaali on resistanssi, jonka arvo muuttuu lämpötilan funktiona käytettävällä -90 - 120 °C alueella 56 - 160 Ohm välillä. Resistanssien tuottamiseen harkittiin digitaalista potentiometriä, sähkökomponenttia jonka resistanssiarvoa voidaan vaihtaa sähköisellä ohjauksella. Tutkittujen digitaalisten potentiometriä pienin tuottama vastus on yli 5 kOhm, eli niillä ei saatu tuotettua riittävän pieniä resistanssiarvoja.

National Instrumentsin PXIe-valikoimasta valittiin resistanssien tuottamiseen vastusmoduuli PXIe-2727. Moduuli koostuu yhdeksästä kanavasta, jotka koostuvat kuudestatoista vastuksesta. Kanavaan voidaan asettaa vastusarvo 0,25 Ohmista 16320 Ohmiin. Vastukset on koottu kahteen vastusryhmään, joista toisessa on pienet vastukset ja toisessa suuret (kuva 24). Vastukset valitaan muuttamalla vastuksien välisien releiden ohjauksia. Vastuskytkentä tapahtuu 250 μ s ajassa, mikä täyttää reilusti vaaditun nopeuden.[28]



Kuva 24 PXIe-2727-resistanssimoduulin yhden kanavan vastuspankkien periaatekuva

Vastusarvoja vaihdetaan muuttamalla kytkettyjen releiden tilaa. Jokaiseen vastukseen liittyy releet, joilla se valitaan käyttöön tai pois käytöstä. Käytettävän anturin resistanssi muuttuu todellisen lämpötilan mukaan kaavalla

$$R_T = 100 + 0,3924(T - 1,45(0,01T - 1)(0,01T) - B(0,01T - 1)(0,01T)^3)$$

jossa R_T on vastusarvo, T on kokonaislämpötila ja B on vakio, jonka arvo on 0 kun $T \geq 0$ °C ja 0,1 kun $T < 0$ °C. Kokonaislämpötilasignaali tuotetaan yhdellä vastuskanavalla. Tehovivun asentosignaali tuotetaan kahdella vastuskanavalla. Kanavia ohjataan siten, että niiden vastusten kokonaisarvo on 100 Ohm.

3.6 Muut testauslaitteet

Muut testauksessa tarvittavat signaalirajapinnat löytyvät jo valmiiksi testauspenkin laitteistosta.

3.6.1 Diskreettirajapinta

”Paino pyörillä”- ja käynnistyskytkin-diskreettisignaalit saadaan tuotettua HAMS:n diskreettirajapinnalla tai vaihtoehtoisesti järjestelmätestipenkin etupaneeliin fyysisillä kytkimillä (kuva 25).



Kuva 25 Diskreettikytkimet järjestelmäpaneelin etulevyssä

Käynnistyskytkin on järjestelmätestipenkin paneelissa. Diskreettirajapintana laitteiden toimintaa simuloitaessa toimii NI PCI-6528, 48 porttinen digitaali-IO-kortti maksimissaan 60 voltin jännitteen kytkennällä ja kanavien välisellä eristyksellä. Diskreettirajapintaa saadaan ohjattua HAMS Applicationin pääkäyttöliittymästä staattisesti ja dynaamisesti X-Plane-simulaation ohjauksien perusteella. Monitorointilaitte voidaan testata niitä käyttämällä.

3.6.2 RS-422

Sarjaväylien testaamiseen järjestelmätestipenkissä on Moxa Technologiesin CP-118U PCIe-sarjaväylämoduuli, johon monitorointiyksikön sarjaväylät on kytketty. Sarjaväylien toiminta testataan HAMS:n monitorointitoiminnolla.

3.6.3 ARINC 429

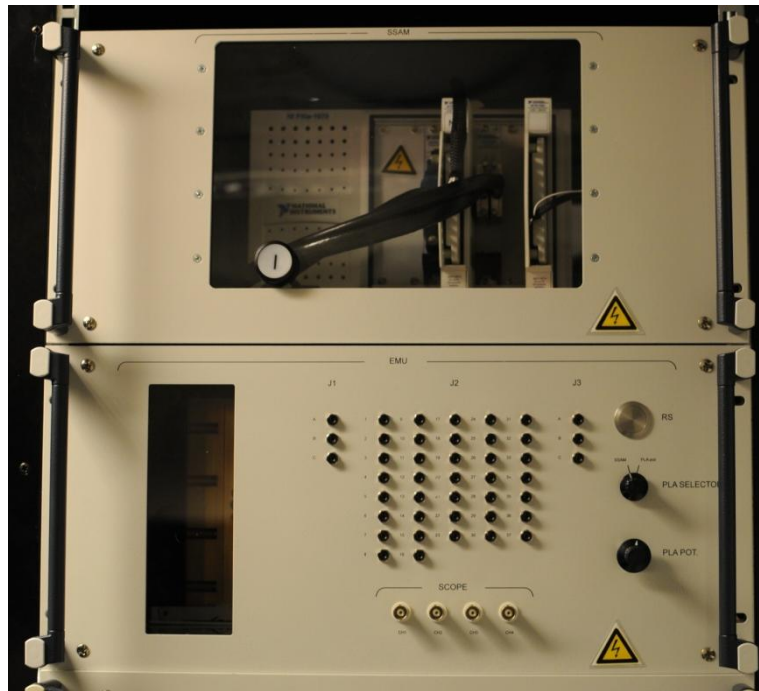
Kalibroitu lentonopeus CAS ja painekorkeus ALT saadaan tuotettua ARINC 429 -väylälle joko oikealla ilma-arvotietokoneella (ADC, Air Data Computer) tai HAMS:n ilma-arvotietokonesimulaatiomallilla. Molemmilla voidaan testata staattisesti ja dynaamisesti. HAMS:n toiminta on käyty läpi kappaleessa 1.2.1. Oikeaa ilma-arvotietokonetta voidaan ohjata Air Data Simulator -ohjelmalla, joka ohjaa GE Sensing ADTS 403 -painesimulaatiojärjestelmää (GE, General Electric)(ADTS, Air Data Test

System). Ohjelmalla voidaan tuottaa painesimulaatiojärjestelmään staattisia ohjauksia käyttöliittymästä ja dynaamisia ohjauksia X-Plane-simulaation perusteella.[29]

Simuloitu ilma-arvotietokone käyttää liityntänä järjestelmätietokoneen GE CEI-830 ARINC 429 -liityntäkorttia. Monitorointiyksikkö lukee ARINC 429 -väylältä ilma-arvotietokoneen tuottamat nopeus- ja korkeustiedot. Väylän toiminta testataan lähettämällä HAMS-ohjelmiston ilma-arvotietokonesimulaatiolla tai oikealla ilma-arvotietokoneella viestejä väylälle ja tarkkailemalla monitorointilaitteen tehtävätiетokoneelle lähettämiä viestejä.

3.7 Integrointi

SSAM-laitteisto asennettiin STB:n kehityskaappiin (kuva 26). Näin tuotettujen signaalien ei tarvitse kulkea pitkää matkaa mittaaville laitteille. Laitteiston ja ohjelman vaatimuksena on, ettei se saa häiritä STB:n tai siihen kytketyn avioniikkalaitteiston toimintaa.



Kuva 26 SSAM:n paikka järjestelmätestipenkissä. Ylemmässä laatikossa on signaaligenerointilaitteisto, alemmassa moottorin monitorointilaitte. Oikeassa reunassa näkyy moottorin käynnistyskytkin (RS)

SSAM-ohjelmisto asennettiin järjestelmätietokoneelle käytettävyyden vuoksi. Tällöin testaajan ei tarvitse vaihtaa tietokonetta kesken testauksen uusia arvoja syöttäessään. SSAM-ohjelmisto ei käytä samoja resursseja muun ohjelmiston kanssa, joten integrointi ei vaadi kuin ohjelman ja PXIe-kytkentäliittymän asentamisen tietokoneeseen.

SSAM-laitteisto ei liity muuhun avioniikkajärjestelmään muuten kuin virransyötön osalta, joten sen integrointi vaatii sulakkeiden kestävyuden varmistamisen ja EMC:n testaamisen. Testipenkin 16 ampeerin sulake kestää hyvin uuden laitteiston lisäkuorman.

3.8 SSAM-laitteiston kalibrointi

Signaaligenerointilaitteet tulee kalibroida tuottamaan tarkasti vaadittua signaalia laitteiden ja monitorointilaitteen välisien johtimien resistanssista huolimatta. Tämän vuoksi laitteet tulee kalibroida määräajoin. Erityisesti lämpötilan ja tehovivun asennon generointi tulee kalibroida, koska sen tuottavan moduulin sisäisten vastusten resistanssiarvot saattavat vaihdella hieman ikääntymisen myötä. Tämän vuoksi ohjelmaan lisättiin resistansseille kalibrointikertoimet. Kalibrointi on ohjeistettu myös SSAM-järjestelmän testausohjeeseen, jotta testattava järjestelmä on kalibroitu testausta aloitettaessa.

Turbiinin suihkuputken kylmäpisteen kompensointimittaus on myös kalibroitava johtimien resistanssimuutosten aiheuttaman virheen poistamiseksi. Lämpötilamittaus kalibroidaan mittaamalla kytkentärasian lämpötila tarkalla lämpömittarilla ja vertaamalla mitattua arvoa siihen. Mittaukseen lisätään erotuksen suuruinen kalibrointitermi.

Muiden signaalien kalibrointi suoritetaan mittaamalla tuotettava signaali STB:n etupaneelin liityntäpisteistä kalibroidulla mittarilla. Mittaus suoritetaan viidestä pisteestä, jonka jälkeen mittaustuloksista tehdään excelillä kuvaaja, johon sovitetaan suora. Suoran kulmakerroin ja vakio-termi toimivat kalibrointikertoimena ja -vakiona. Kalibrointi-arvot ovat taulukossa 5. Mikäli laitteistoa ei saada tällä menettelyllä kalibroitua tuottamaan riittävän tarkasti vaadittua signaalia, lähetetään laitteisto valmistajalle kalibroitavaksi.[30]

Taulukko 5 Kalibroinnin korjausarvot

Signaali	Korjauskerroin	Korjausvakio
Kokonaislämpötila	0,9930	0,2705
Turbiinin lämpötila	1,0045	0
Tehovivun asento	1,0007	-0,60
Kylmäpisteen kompensointi	-	0,4

4 SSAM-OHJELMISTO

PXIe-moduulien ohjaamiseen kehitettiin SSAM-ohjelmisto, Signal Simulator And Monitor, sillä signaaligeneraattorin ominaisuuksien integrointi HAMS:iin nähtiin tarpeettoman työlääksi operaatioksi HAMS:n melko hitaan tilakonerakenteen ja täysin erilaisen toiminnallisuuden vuoksi.

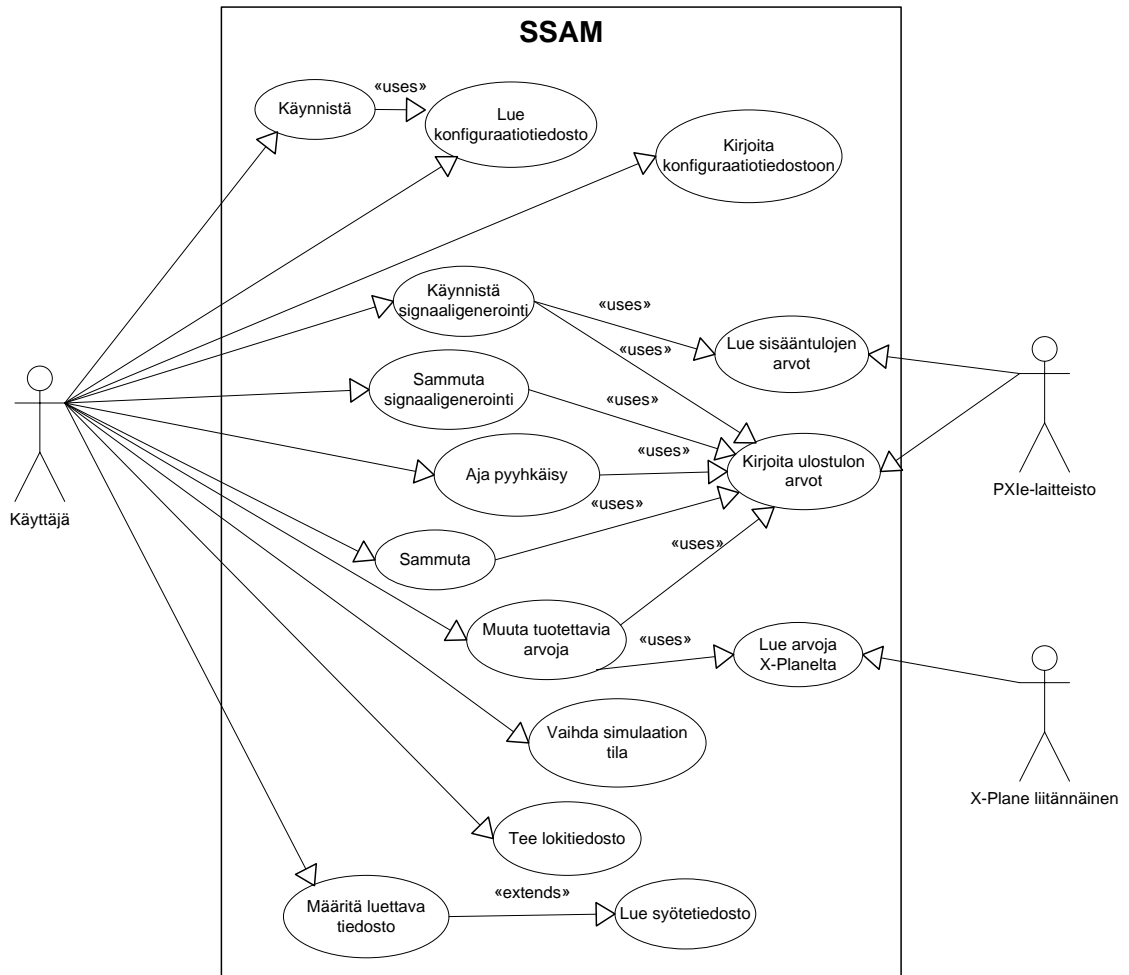
Ohjelman toteutuksen kuvauksessa on käytetty UML-kaavioiden lisäksi SA-menetelmien (SA, Structured Analysis) tarjoamia työkaluja. LabVIEW:llä toteutettujen ohjelmien Dataflow-periaatteen vuoksi ohjelman suoritus on rinnakkaista ja ohjelman osien tarkka suoritusjärjestys hankala ennustaa[31].

Ohjelman nimeä ei haluttu kytkeä liikaa moottorin kunnonvalvontajärjestelmään mahdollisten tulevien laajennuksien varalta. Näin ohjelman toimintaa voidaan laajentaa muidenkin järjestelmien testaamiseen.

4.1 Vaatimukset

SSAM-järjestelmälle ei tehty erillisiä järjestelmävaatimuksia, vaan järjestelmä- ja laitteistovaatimukset sisällytettiin STB:n järjestelmä- ja laitteistovaatimuksiin. SSAM-ohjelmistolle laadittiin omat ohjelmistovaatimukset.

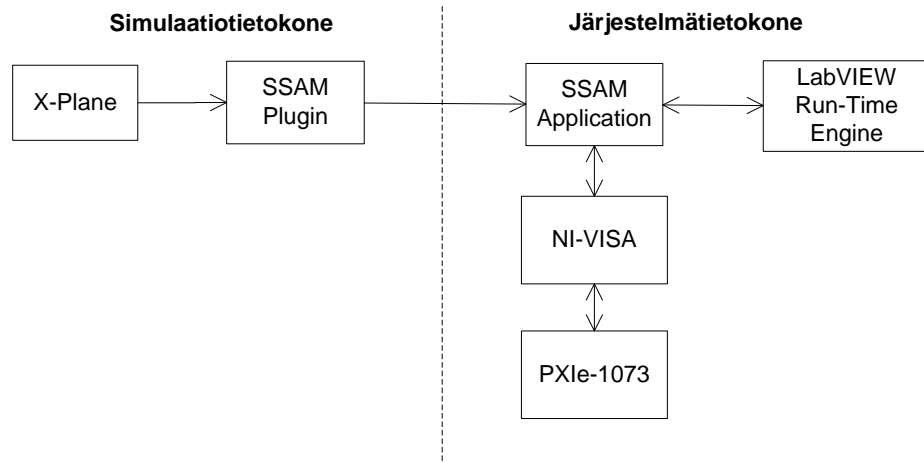
Suurin osa ohjelmiston vaatimuksista kohdistuu tuotettaviin signaaleihin. Tuotettavien signaalien vaatimukset on esitetty taulukoissa 1, 2, 3 ja 4. Signaalivaatimuksien lisäksi ohjelmalle on käyttövaatimuksia, ohjelman tulee kyetä tallentamaan tuotettu signaali tiedostoon ja toistamaan tuotettu signaali tuon tiedoston perusteella. Kuvassa 27 on esitetty vaatimuksista johdetut käyttötapaukset.



Kuva 27 SSAM-ohjelmiston käyttötapauskavio

4.2 Rakenne

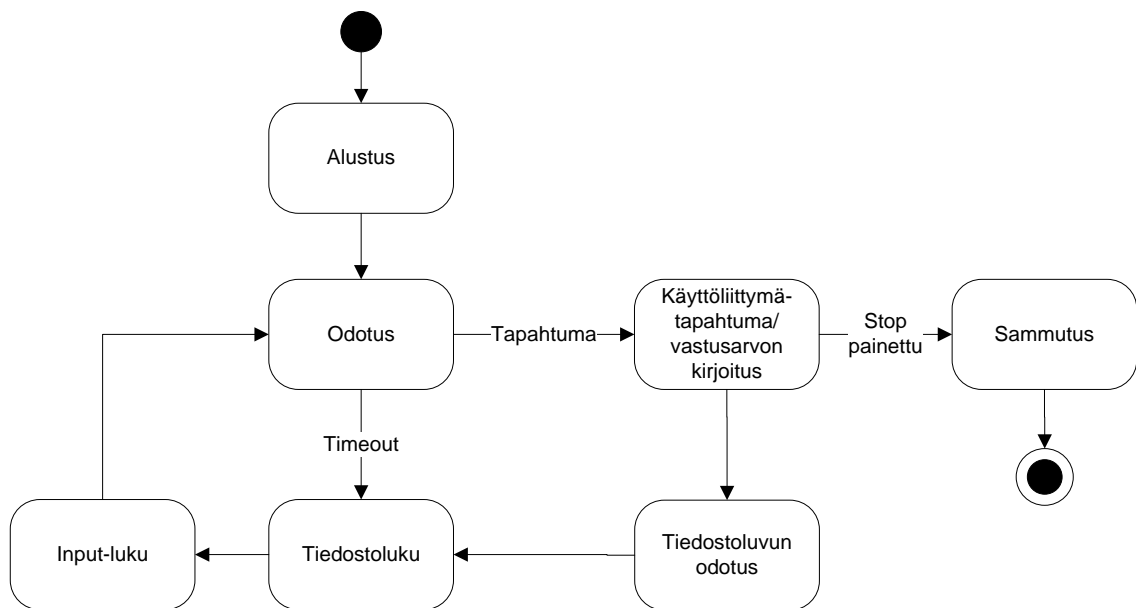
SSAM-ohjelmisto koostuu kahdesta osasta, varsinaisesta ohjelmasta, joka ohjaa signaaligeneraattoria, sekä SSAM-liitännäisestä, joka lähettää X-Plane - lentosimulaatiolta lentoarvoja SSAM-ohjelman syötteeksi. Rakenne on esitetty kuvassa 28.



Kuva 28 SSAM-ohjelmiston jakautuminen testipenkin tietokoneille ja yhdyntäkohdat muihin ohjelmiin

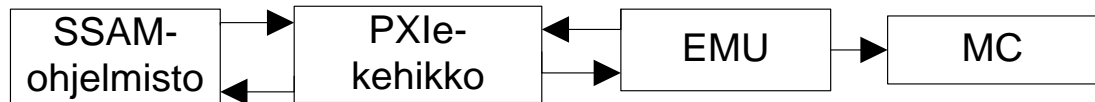
4.3 Toteutus

SSAM-ohjelma koostuu kuudesta while-silmukkarakenteesta. Käyttöliittymäsilmukassa (kuva 29) ajetaan ohjelman alustustoiminnot, käsitellään käyttöliittymätapahtumat, luetaan signaalisääntulojen arvot, luetaan testitiedosto ja kirjoitetaan lokitiedostoon.



Kuva 29 SSAM ohjelman käyttöliittymäsilmukan tilakaavio

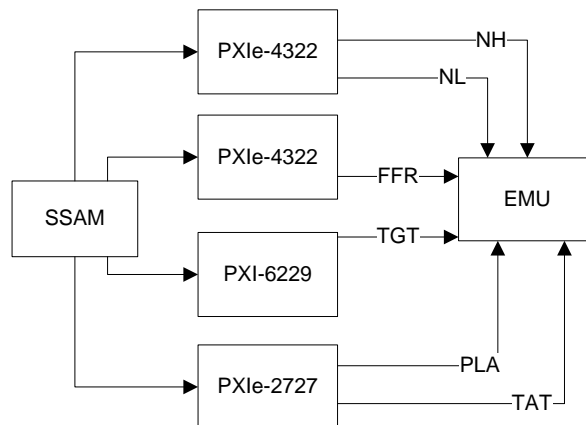
Pyyhkäisytoiminnolle on oma while-silmukka, jossa ohjelma näytteistää kolmioaaltoa luodakseen signaalin pyyhkäisyn ulostuloon. UDP-pakettien lukemiseen X-Planelta on oma silmukka, jossa luetaan paketti, jäsennetään paketin sisältämä data ja kirjoitetaan data tietovarastoon. Kolme while-silmukkaa kirjoittaa signaalia PXIe-1073:n signaalipuskuriin signaalimoduulien tuotettavaksi. Molemmille PXIe-4322-moduuleille on oma silmukkansa ja PXI-6229 moduulille on omansa. Signaalit kirjoitetaan erillisissä silmukoissa signaalipuskurin kirjoituksen ajoitusvirheiden välttämiseksi. PXIe-2727-moduulin vastusarvot kirjoitetaan moduulille käyttöliittymäsilmukassa, koska moduulin arvojen päivittäminen kestää useita millisekunteja ja käyttöliittymäsilmukan suorituksessa on hyvin aikaa vastusarvojen päivittämiseen. Tuotettaviin signaaleihin voidaan lisätä häiriöitä. Häiriöt lisätään signaalien tuottamisen yhteydessä. Moottorin monitorointilaitteen testauslaitteiston toimintaperiaate on esitetty kuvassa 30.



Kuva 30 SSAM:n järjestelmäkuva

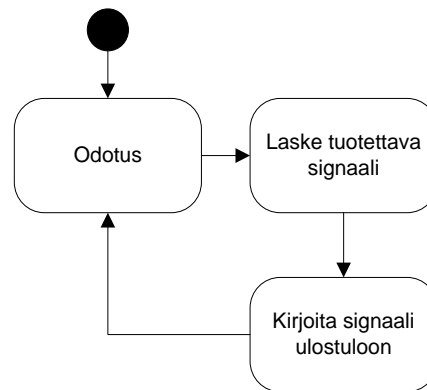
4.3.1 Signaaligenerointi

SSAM-ohjelma ohjaa kolmea erillistä signaaliulostulomoduulia. Jokaisen moduulin ohjaukseen luotiin erillinen DAQmx-tehtävä, joka sisältää ohjattavan moduulin kanavien tiedot. Signaalien jakautuminen eri DAQmx-tehtäville on esitetty kuvassa 31.



Kuva 31 SSAM-järjestelmän signaalit

Kuvassa 32 on PXIe-4322 ja PXI-6229 -tehtävien generointisilmukan tilakaavio. Tehtäville luodaan signaalipuskuri, johon ohjelma kirjoittaa tuotettavan signaalin. Ohjelma odottaa signaalipuskuriin vapautuvan tilaa ja tämän jälkeen laskee seuraavaksi tuotettavan aaltomuodon ja lisää siihen mahdolliset häiriösignaalit. Laskettu aaltomuoto kirjoitetaan ulostulopuskuriin.



Kuva 32 Signaalien generoinnin tilakaavio

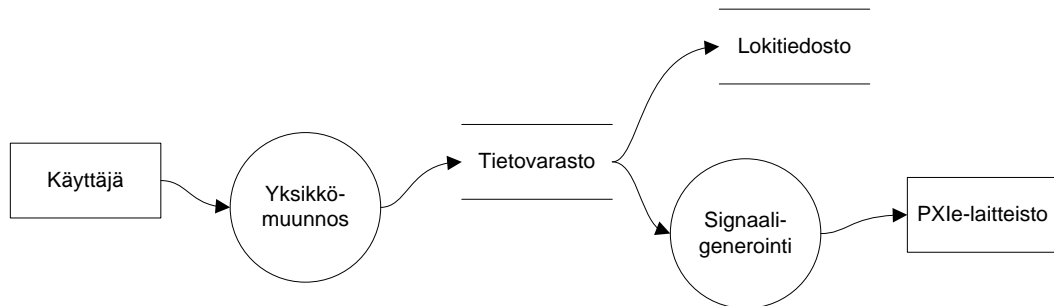
Ensimmäisen PXIe-4322-moduulin DAQmx-tehtävä sisältää kolme kanavaa matalapaineahtimen kierrosnopeussignaalin tuottamiseen ja viisi kanavaa korkeapaineahtimen kierrosnopeussignaaleille. Signaalien tuottamiseen käytetään useita kanavia, jotta kanavia yhteen kytkemällä saadaan tuotettua tarvittava jännite, matalapaineahtimelle 30 V ja korkeapaineahtimelle 60 V. Toisen PXIe-4322-moduulin ohjaustehtävä sisältää yhden kanavan polttoaineen virtausnopeussignaalin referenssijännitteen tuottamiseen ja yhden kanavan varsinaisen virtausnopeussignaalin tuottamiseen. PXI-6229-moduulin ohjaustehtävä sisältää yhden kanavan moottorin turbiinin lämpötilajännitesignaalin tuottamiseen.

Signaalit ovat pääosin siniaaltosignaaleja, joten signaalit tuotetaan LabVIEW:n aaltomuototietotyypinä. Ahtimen kierrosnopeussignaalien aaltomuoto on mahdollista vaihtaa siniaallosta kolmio-, kanti-, tai sahalaita-aalloksi. Jokaisella tehtävällä on PXIe-laitteistolla oma signaalipuskuri, jota täytetään tarvittaessa. Signaaleja tuotetaan samalla syklillä jokaiselle tehtävälle, mutta yhdessä silmukassa jokaisen tehtävän puskuria päivitettäessä saattaa yhden tehtävän puskuri tyhjentyä, jolloin DAQmx lopettaa tehtävän ja signaalin tuottaminen loppuu virheilmoitukseen. Tämän vuoksi jokaisen DAQmx-tehtävän täytyy tuottaa signaalia omassa erillisessä silmukassaan.

Koska signaalinen generointi on erotettu käyttöliittymäsilmukasta, ovat tuotettavien signaalien asetusarvot tietovarastossa, jota käyttöliittymäsilmukassa muokataan ja josta signaalien generointisilmukoissa luetaan tuotettavat arvot. Tietovaraston käyttö on kuvattu seuraavissa alikappaleissa.

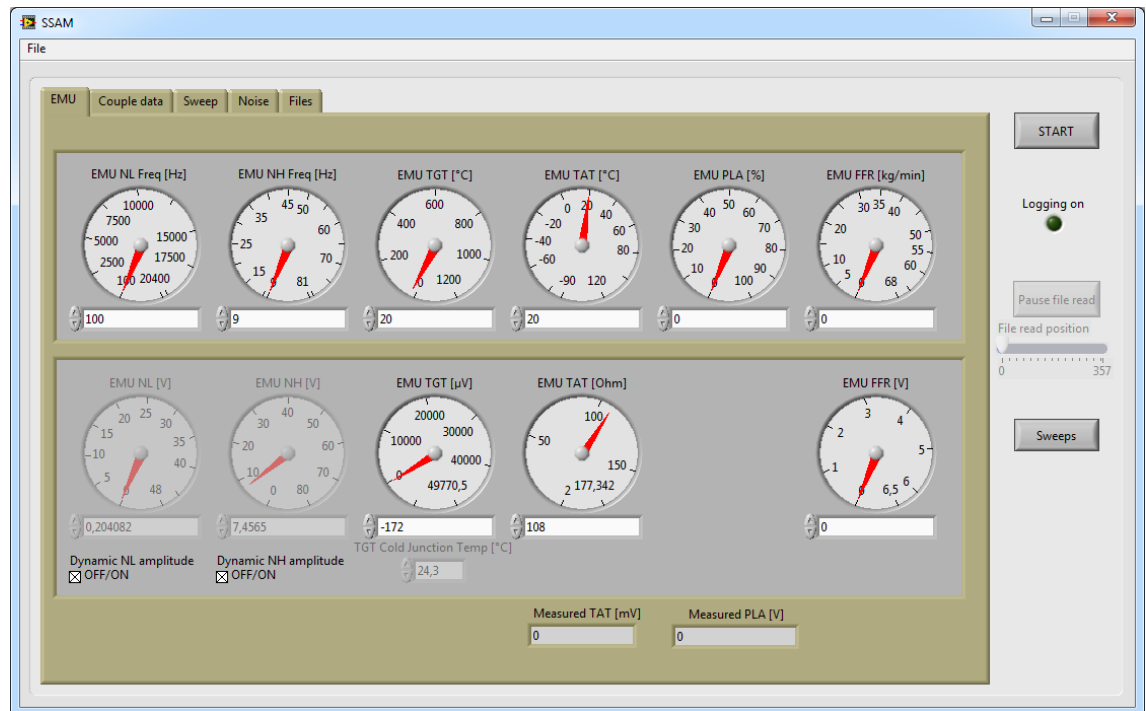
4.3.2 Staattinen toiminta

SSAM-ohjelman pääasiainen toiminta laitetestauksen aikana on staattista toimintaa, jossa järjestelmä asetetaan tuottamaan haluttua signaalia moottorin monitorointiyksikölle ja tämän jälkeen varmistetaan monitorointiyksikön toiminta tilanteessa. Nämä käyttötapaukset onnistuvat signaaleja suoraan käyttöliittymästä ohjaamalla. Kuvassa 33 on esitetty staattisen toiminnan tietovirtakaavio.



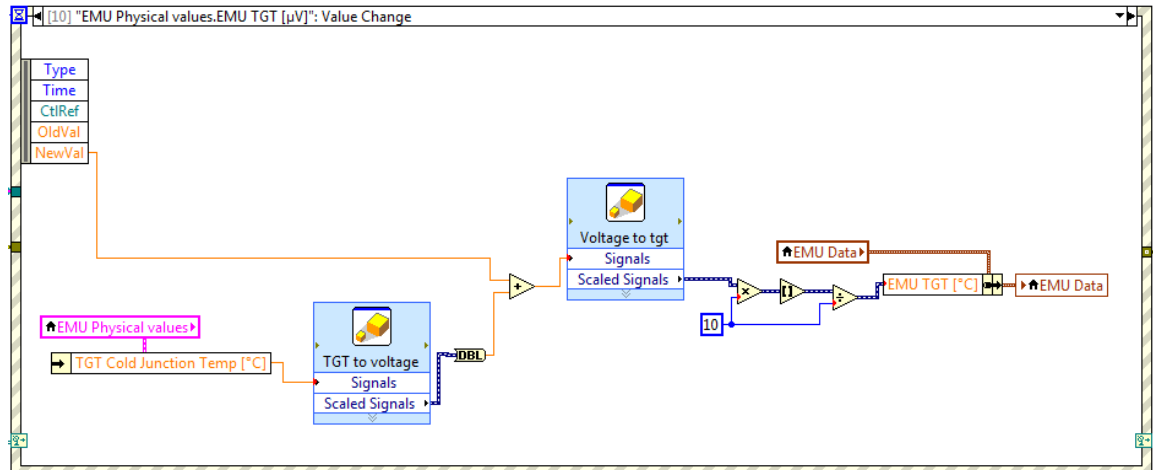
Kuva 33 Staattisen toiminnan tietovirtakaavio

Ohjelmassa on tapahtumakäsittelijät käyttöliittymätapahtumien käsittelyyn, jotta saadaan muutettua käyttäjän käyttöliittymässä muuttama arvo myös tuotettavan arvon signaalin ohjaimen ja tuotettavan arvon muutos yksikölliseen ohjaimen. Arvojen muutos tehdään luvussa 2.2 esitellyillä kaavoilla. Käyttöliittymäohjaimista arvot kirjoitetaan signaaligeneraattorille ja lokitiedostoon. Staattinen ohjaus toimii SSAM:n pääkäyttöliittymästä (kuva 34) ohjaamalla.



Kuva 34 SSAM-ohjelman pääkäyttöliittymä

Käyttöliittymään voi lukea arvot myös lataamalla konfiguraatiodoston valitsemalla File-valikosta Load Config -toiminnon. Toiminto lataa kaikkiin ohjelman käyttöliittymäelementteihin tiedostossa asetetut arvot. Toiminto helpottaa huomattavasti laitetestausta, sillä tällöin testaajan ei testejä ajaessaan tarvitse kuin ladata testiä vastaava konfiguraatiodosto. Tiedosto luodaan valitsemalla File-valikosta Save Config.

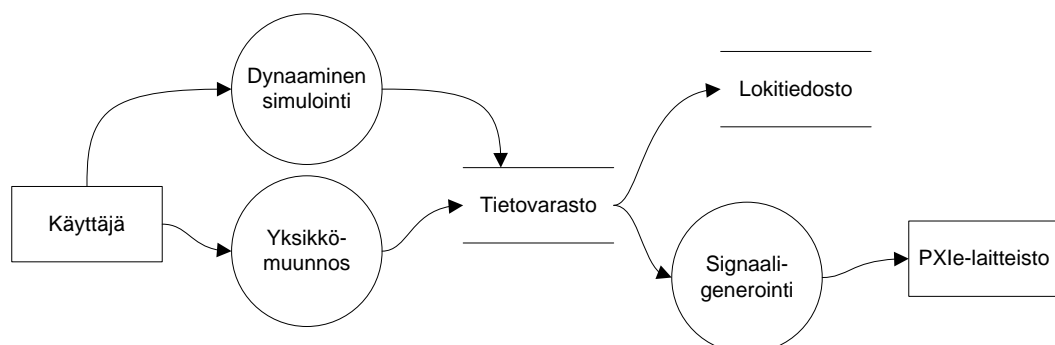


Kuva 35 Termoparisignaalin tuoton kylmäpisteen kompensointi

Turbiinin lämpötilan asetusarvoon tehdään signaalimoduulin ja K-tyyppin termoparikaapelin välisessä rajapinnassa olevan kylmäpisteen kompensointi. Kylmäpiste voidaan asettaa käsin tai mitata ohjelmallisesti kytkentärasiasa olevalta lämpöanturilta. Kylmäpiste kompensoidaan vähentämällä tuotettavasta jännitteestä kylmäpisteen lämpötilaa vastaava jännite (kuva 35). Jännite lasketaan K-tyyppin termoparijännitetaulukon mukaisesti[32].

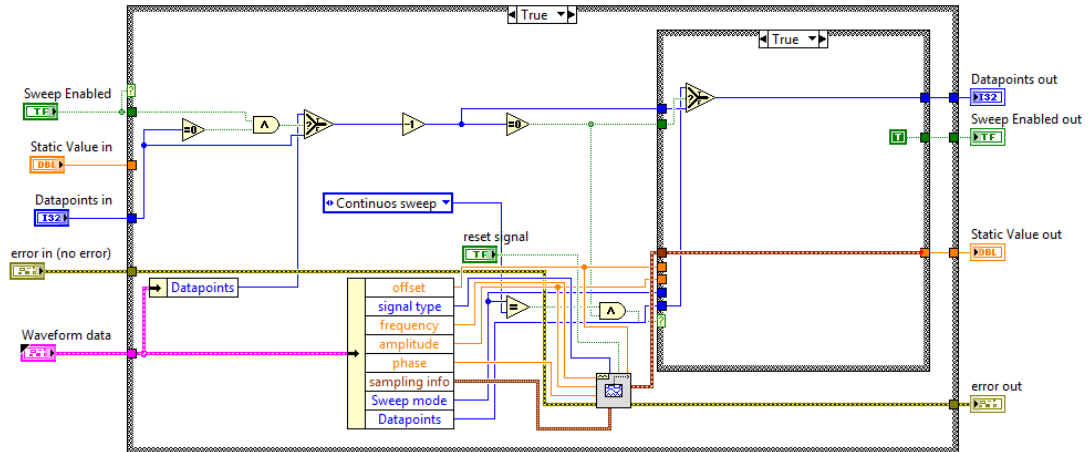
4.3.3 Dynaaminen toiminta

SSAM-järjestelmän saa tuottamaan signaalia dynaamisesti joko ohjelmallisina pyyhkäisyinä tai lentosimulaattorin tuottaman datan perusteella. Dynaamisen toiminnan tietovirta on esitetty kuvassa 36.

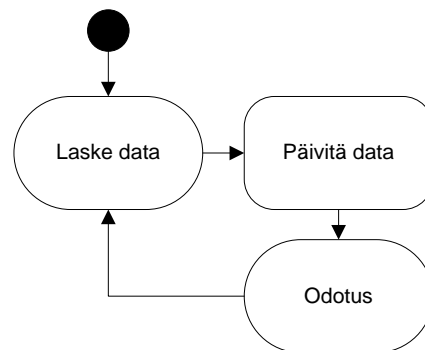


Kuva 36 Dynaamisen simuloinnin tietovirtakaavio

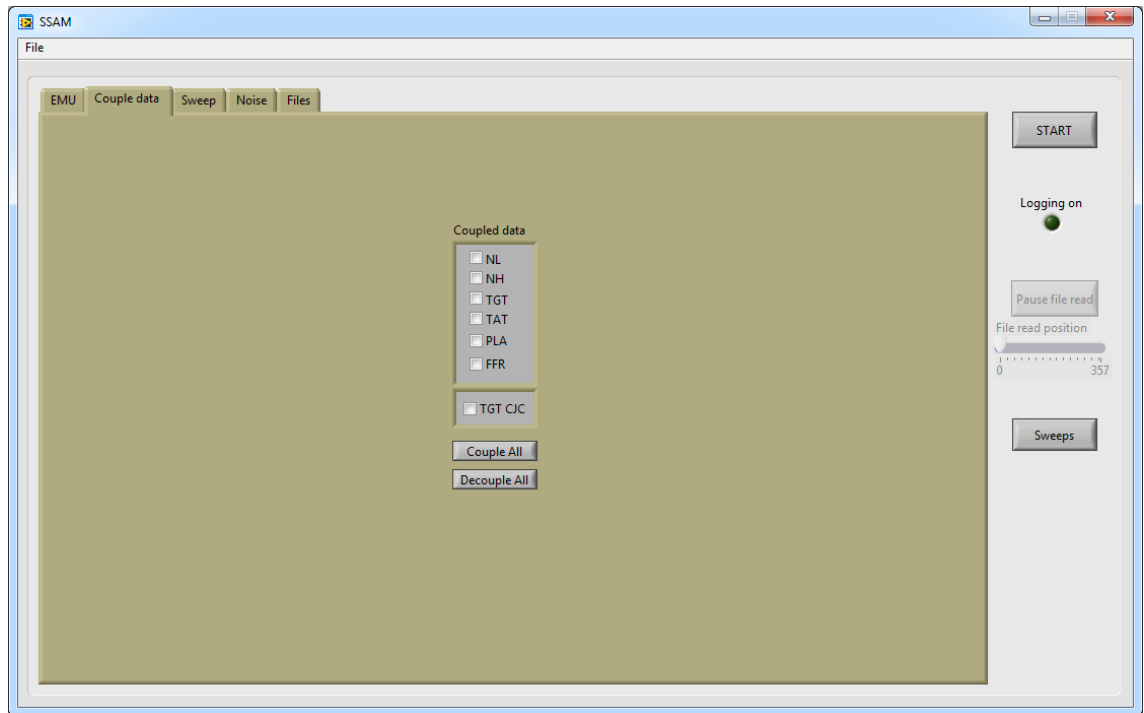
Pyyhkäisyn tuotto on esitetty kuvassa 39. Pyyhkäisyä tuottaessaan ohjelma näytteistää laskettua kolmioaaltoa millisekunnin välein. Näyte on suoraan pyyhkäisyn seuraava signaaligeneraattorilla tuotettava arvo. Näytteen laskemisen jälkeen ohjelma tarkistaa jatketaanko pyyhkäisyn tuottamista. Pyyhkäisyt tuottavan silmukan tilakaavio on kuvassa 40.



Kuva 39 Signaalin pyyhkäisyn tuotto

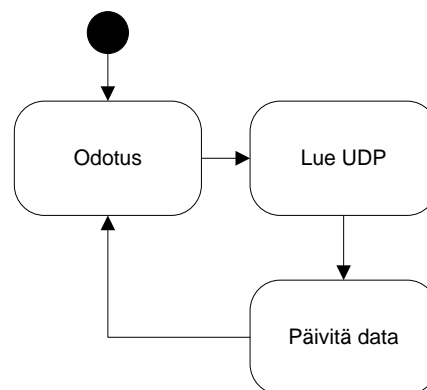


Kuva 40 Pyyhkäisyjen tuottamisen tilakaavio



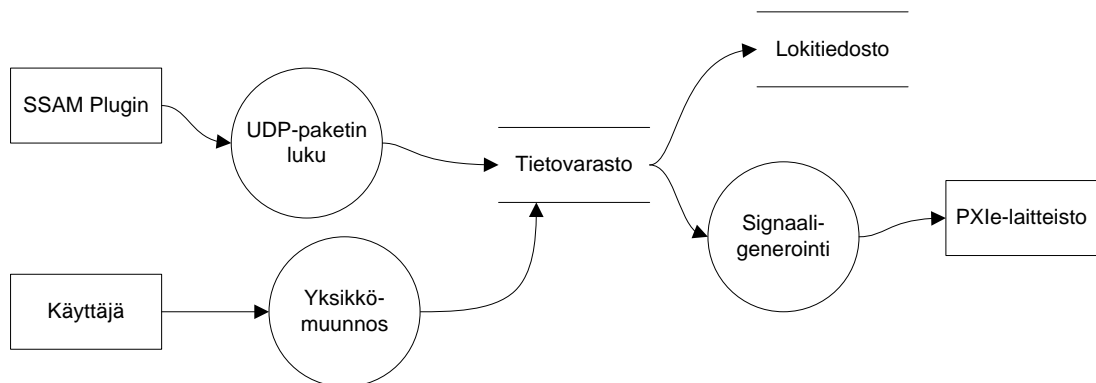
Kuva 41 Signaalien tuottamisen kytkeminen lentosimulaattorilta luettaviksi

Ohjelma voi tuottaa arvoja dynaamisesti myös lentosimulaattorin tuottaman datan perusteella (kuva 41). Tällöin SSAM-ohjelma lukee SSAM-pluginin lähettämät lentoarvot, muuttaa ne X-Planen tuottamasta muodosta omaan signaalimuotoon ja asettaa ne signaaligeneroinnin käyttämiksi parametreiksi. Ohjelma lukee lentosimulaattorin lähettämät parametrit omassa silmukassa (kuva 42), koska X-Planen parametrien lähetysväli vaihtelee ruudunpäivitysnopeuden mukana.



Kuva 42 X-Planen UDP-pakettien lukemisen tilakaavio

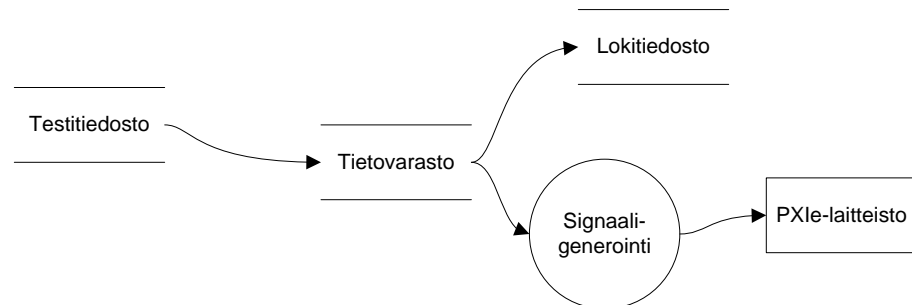
Toiminnon tietovirtakaavio on esitetty kuvassa 43. Tuotettavan arvon ollessa kytkettynä lentosimulaattorilta luettavaksi on sen ohjain harmaannutettuna. Näin käyttäjä näkee suoraan ettei voi sitä ohjata lentosimulaattorin ollessa käytössä.



Kuva 43 Lentosimulaattorilta signaaliarvojen lukemisen tietovirtakaavio

Molemmat arvojen dynaamisen tuottamisen mahdollistavat toiminnot suoritetaan omassa silmukassa. Tämän vuoksi niiden yhtäaikaisesta käytöstä aiheutuu ajoitusongelmia, sillä molemmat varaavat muutettavat muuttujat omaan käyttöönsä niitä muuttaessaan. Koska molempia toiminnallisuuksia ei tarvita yhtäaikaisesti, kiellettiin niiden yhtäaikainen käyttö muuttamalla pyyhkäisyn tai lentosimulaattoridatan lukemisen aloitus Disabled and grayed out -tilaan, jolloin valintaelementti näkyy käyttöliittymässä harmaannutettuna eikä sitä voi valita.

Ohjelma lukee tuotettavien arvojen tietovarastosta signaalien arvot ja tallentaa ne LabVIEW:n taulukkotiedostoon, joka on csv-muotoinen (csv, comma separated values). Tiedostoon tallennetaan ahtimen pyörimisnopeuksien taajuus ja amplitudi, turbiinin lämpötilan arvo, kokonaislämpötilan arvo, tehovivun asennon arvo sekä polttoaineen virtausnopeuden arvo.

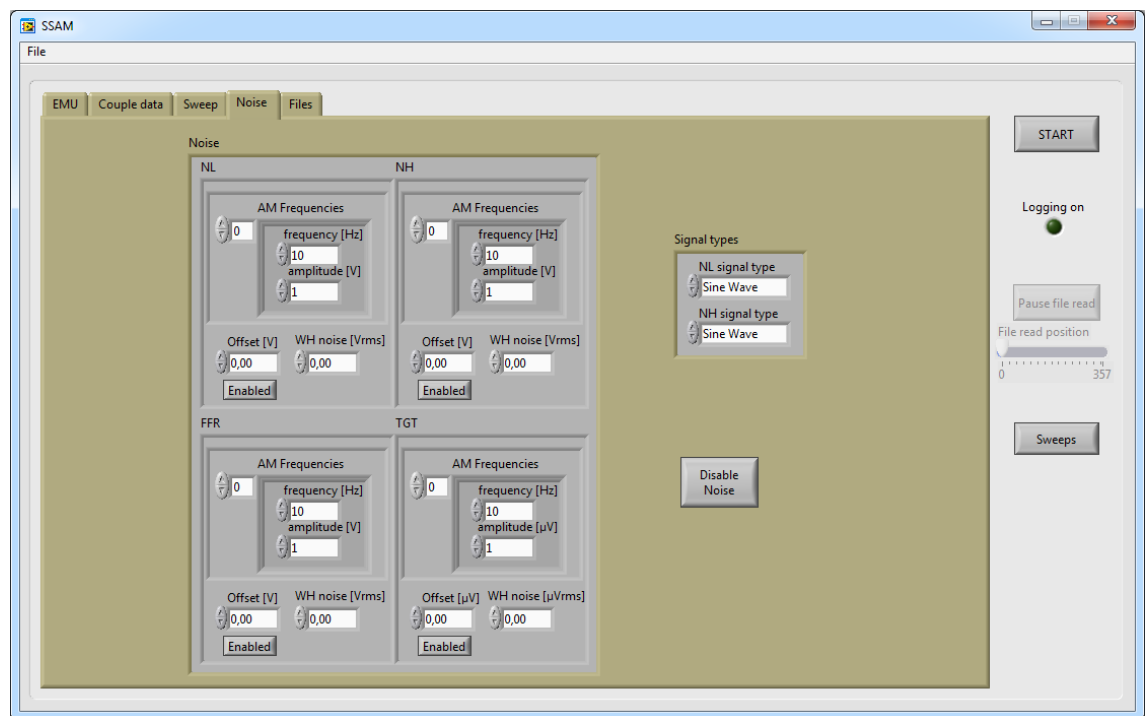


Kuva 45 Tiedostosta signaaliarvojen lukemisen tietovirtakaavio

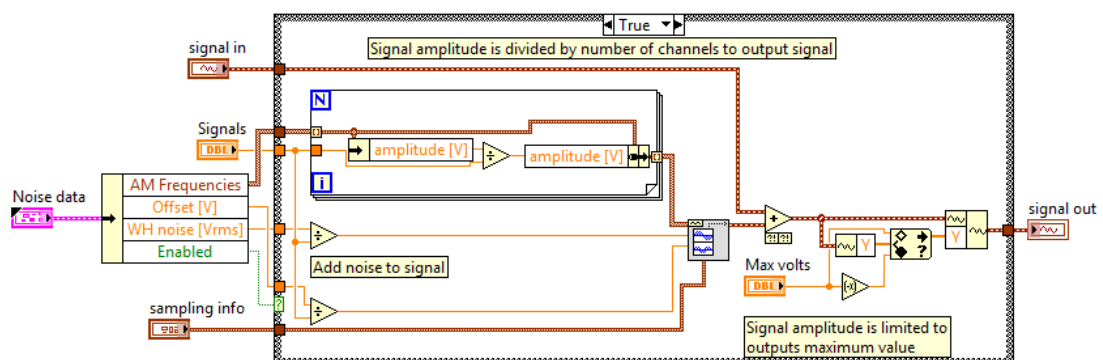
Ohjelman arvojen tiedostosta lukeminen toimii vastaavasti kuin tiedostoon kirjoittaminenkin. Käyttöliittymäilmukassa luetaan tiedostosta kirjoitetut arvot ja asetetaan ne signaaligeneraattorilla tuotettavien arvojen tietovarastoon (kuva 45). Tiedostosta luettaessa aikaleimat jätetään huomiotta. Signaalien arvojen ohjaimet ovat tällöin harmaannutettuina käyttöliittymässä.

4.3.5 Häiriöiden lisääminen

Tuotettaviin jännitesignaaleihin, eli matala- ja korkeapaineahtimen pyörimisnopeuteen, turbiinin lämpötilaan ja polttoaineen virtausnopeuteen, voidaan lisätä häiriöitä signaalin tuottamisvaiheessa. Signaaleihin voidaan lisätä amplitudimodulaatiolla sinisignaaleja, tasajännitevirhettä ja kohinaa. Häiriöiden lisäämiseen on käyttöliittymässä oma välilehti, joka on kuvassa 46.



Kuva 46 Käyttöliittymän häiriösivu



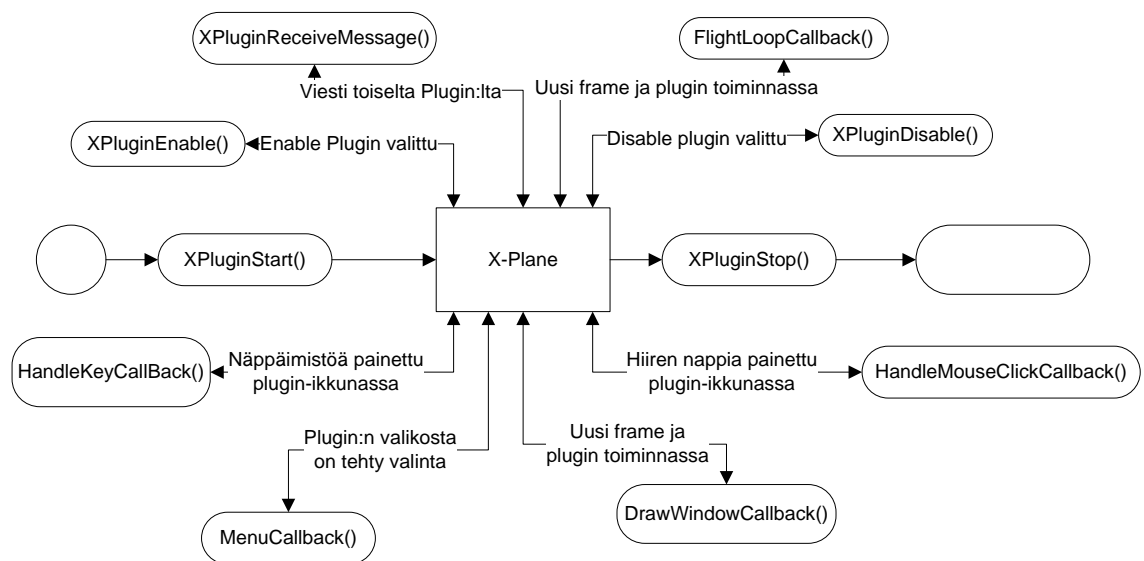
Kuva 47 Häiriösignaalin lisääminen tuotettavaan signaaliin

Häiriöt tuotetaan luomalla LabVIEW:n Tones and Noise Waveform VI:llä häiriöaaltomuoto, joka sisältää käyttöliittymästä määritetyt häiriömuodot. Häiriöaaltomuoto lisätään tuotettavaan aaltomuotoon kuvan 47 mukaisesti. Häiriöllinen signaali kirjoitetaan signaalipuskuriin aivan kuten häiriöttömätkin signaalit.

4.4 X-Plane Plugin

X-Plane liitännäinen SSAM-plugin lähettää dynaamisen toiminnan aikana lentosimulaattorin tuottamia lentoarvoja. Liitännäinen käynnistyy lentosimulaattorin mukana ja lähettää jokaisella simulaattorin toimintakierroksella simulaattorin tietovarastosta lentoarvot UDP-pakettina asetustiedostossa määritettyyn IP-osoitteeseen ja -porttiin.[33]

SSAM-plugin toteuttaa X-Planen liitännäisrajapinnan (kuva 48). Koska rajapinnan funktioista vain XpluginStart()-, XpluginStop()- ja FlightLoopCallback()-funktioita käytetään liitännäisen toiminnassa, vain niille tehdään toteutus.



Kuva 48 X-Plane pluginin tilakaavio

SSAM-plugin lähettää lentosimulaation taulukon 7 mukaisia parametreja jokaisella simulaation sykliä taulukon 8 mukaisena UDP-pakettina.

Taulukko 7 SSAM pluginin lähettämät ja näyttämät parametrit

Parametri ryhmä	Parametri numero	Kuvaus	Yksikkö
1	1	Matalapaineahtimen pyörimisnopeus	%
1	2	Korkeapaineahtimen pyörimisnopeus	%
1	3	Kokonaislämpötila	°C
1	4	Turbiinin suihkuputken lämpötila	°C
1	5	Polttoaineen virtausnopeus	kg/min
1	6	Tehovivun asento	%

Taulukko 8 UDP-paketin rakenne

"DATA%"	Ryhmännumero	Parametrit	...	Ryhmännumero	Parametrit
---------	--------------	------------	-----	--------------	------------

4.4.1 XPluginStart()

XPluginStart() alustaa liitännäisen tarvitsemat resurssit, lähetettävien parametrien viitteet, avaa UDP-kannan, alustaa UDP-pakettiin otsikon "DATA%" ja rekisteröi FlightLoopCallback()-funktion. Funktio lukee liitännäisen alustustiedostosta portin, johon data lähetetään, sekä kertoimen turbiinin suihkuputken lämpötilan lähetettävälle arvolle. Kertoimella arvo muutetaan Hawkin suorituskykyalueelle, jolloin sitä voidaan käyttää suoraan asetusarvona SSAM-ohjelmistossa.

4.4.2 XPluginStop()

XPluginStop() vapauttaa XPluginStart()-funktion varaamat resurssit ja sammuttaa liitännäisen.

4.4.3 FlightLoopCallback()

Funktio lukee lähetettävien parametrien viitteet ja kokoaa niistä lähetettävän UDP-paketin. Lähetettävät arvot ovat float-tyyppisiä. Jotta lähetettävät arvot saadaan verkon tavujärjestykseen, pitää niiden tavujärjestys kääntää muuttamalla arvo char-tilukoksi ja kääntämällä sen tavujärjestys. FlightLoopCallback()-funktio ajetaan aina lentosimulaattorin päivittäessä tilaansa, eli aina näytönpäivityksen yhteydessä.

5 SSAM-JÄRJESTELMÄN TESTAUS

Testausjärjestelmä testataan vaatimuksia vastaan. Koska järjestelmätestipenkkiä, ja SSAM:ia sen osana, käytetään lentokonelaitteiden toimintakunnon tarkastukseen, tulee järjestelmätestipenkki tyyppitarkastaa. Tyyppitarkastusta varten järjestelmän tulee olla testattu, dokumentoitu ja järjestelmän konfiguraation tulee olla hallittu riittäväällä tarkkuudella.[34]

5.1 Järjestelmän testaus

Ohjelmisto ja laitteisto testattiin SSAM-testausohjeen mukaisesti. Testauksessa käytiin läpi laitteiston ja ohjelmiston toiminta ja vaatimusten vastaavuus ja ohjelman yhteistoiminta muiden testauspenkin ohjelmien kanssa. Koska ohjelmalla on liitäntä ja yhteisiä resursseja vain X-Planen kanssa, ei muiden ohjelmien kanssa toimintaa tarvitse varmentaa kuin käynnistämällä ne ohjelman toiminnan aikana.

SSAM-järjestelmästä testattiin signaalien generointikyky ja -tarkkuus, ohjelman toimintojen toimivuus käyttöliittymän ja X-Plane -liittymän osalta, sekä tiedoston luonti ja lukeminen. Pyyhkäisyjen ja häiriön tuoton toiminta testattiin tarkkailemalla muutosnopeutta oskilloskoopilla. Testauksen toiminnalliset osiot menivät läpi ja järjestelmä täytti sille asetetut vaatimukset. Signaalien tarkkuus on kuvattu seuraavassa kappaleessa.

5.2 Signaalien tarkkuusvaatimusten varmennus

Ahtimien pyörimisnopeussignaalien tarkkuusvaatimukset varmennettiin mittaamalla oskilloskoopilla signaalin keskiarvo ja keskihajonta, tulokset ovat esitetty taulukossa 9. Tuotetut arvot vastaavat hyvin tarkkaan vaatimuksia.

Taulukko 9 Järjestelmän tuottamien ahtimen pyörimisnopeussignaalien tarkkuus

Signaali	Asetus	Keskiarvo	Keskihajonta	Virhe[%]
Matalapaineahdin	1000 mHz	999,98 mHz	1,3162 mHz	0,0
	500 Hz	500 Hz	126,72 Hz	0,0
	9400 Hz	9402,7 Hz	45,919 Hz	0,0
	13000 Hz	13002 Hz	64,810 Hz	0,0
	16700 Hz	16700 Hz	22,744 Hz	0,0
Korkeapaineahdin	1 Hz	1,00 Hz	1,4105 mHz	0,0
	32 Hz	32 Hz	5,2434 mHz	0,0
	55 Hz	54,998 Hz	11,863 mHz	0,0
	81 Hz	80,99 Hz	13,331 mHz	0,0
	100 Hz	100 Hz	14,569 mHz	0,0

Resistanssisignaalien mittaustulokset ovat esitetty taulukossa 10. Tehovivun nolla-arvolla tuleva suurempi heitto hyväksytään, sillä PXIe-2727:n resistanssi on pienimmillään 2 Ohm[28], ja tehovivun käytettävä arvoalue on 40-60 Ohm. Muuten signaalit täyttävät tarkkuusvaatimukset.

Taulukko 10 Resistanssisignaalien tarkkuus

Signaali	Asetusarvo [Ohm]	Mitattu arvo[Ohm]	Virhe[%]
Tehovivun asento	0	1,5	1,5
	25	24,8	-0,2
	50	50,0	0,0
	75	75,5	0,5
	100	100,2	0,2
Ilman lämpötila	63,8	63,8	0,0
	94	94,3	0,2
	100	100,3	0,2
	123,7	123,7	0,0
	146,9	146,8	-0,1

Jännitesignaalien osalta mittaustulokset on esitetty taulukossa 11. Polttoaineen virtausnopeudessa ei havaittu lainkaan poikkeamaa asetusarvoon. Turbiinin suihkupuutken lämpötila mitattiin millivolttimetrillä.

Taulukko 11 Jännitesignaalien tarkkuus

Signaali	Asetusarvo	Mitattu arvo	Virhe[%]
Polttoaineen virtausnopeus	8,0 V	0,0 V	0,0
	10,0 V	10,0 V	0,0
	11,85 V	11,85 V	0,0
	12,33 V	12,33 V	0,0
	13,0 V	13,0 V	0,0
Turbiinin suihkupuutken lämpötila	-3,242 mV	-3,235 mV	0,0
	0,0 mV	0,007 mV	0,0
	10,151 mV	10,150 mV	0,0
	34,543 mV	34,545 mV	0,0
	48,805 mV	48,803 mV	0,0

5.3 Tyypin hyväksyntä

Järjestelmätestipenkkiä käytetään tyypin hyväksyttävän lentokonejärjestelmän testaamiseen. Tämän vuoksi koko testausjärjestelmä, ja SSAM sen osana, on tyypin hyväksyttävä lentoteknisenä maalitteena. Hyväksynnän tarkoituksena on osoittaa järjestelmän täyttävän sille asetetut vaatimukset, niin toiminnallisuuden kuin turvallisuudenkin osalta. Hyväksyntä edellyttää järjestelmän olevan testattu ja dokumentoitu, järjestelmällä tulee olla viranomaisen edellyttämät hyväksynnit, järjestelmälle pitää olla käytön vaatimat käyttöohjeet tehtynä ja sen rakenteen tulee olla muutostenhallinnan alaisena.[35]

Järjestelmätestipenkki, ja SSAM sen osana, sai tyypin hyväksynnän 24.9.2015.[36]

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Hawk Upgrade -järjestelmätestipenkkiin saatiin integroitua siitä puuttuvien ja moottorin monitorointilaitteen testauksessa tarvittavien signaalien generointikyky. Testausjärjestelmällä saatiin testattua monitorointilaitteen ja kunnonvalvontajärjestelmän toiminta.

Moottorin tuottamat signaalit saatiin tuotettua tarkasti National Instrumentsin PXIe-laitteiston ja järjestelmätestipenkin valmiin laitteiston yhdistelmällä. Laitteiston ohjaamiseen kehitetyllä SSAM-ohjelmistolla saadaan ohjattua laitteistoa käyttäjäystävällisesti. SSAM-ohjelman toiminta on jaettu useaan while-silmukkaan eri laitteiden välisen toiminnan ajoitusten helpomman hallinnan vuoksi.

6.1 Käyttökokemukset

Ohjelman tekemisen aikana saatiin käyttäjiltä paljon kommentteja ohjelman toiminnan kehittämiseksi ja niiden ansiosta ohjelmasta saatiin melko helppokäyttöinen. Ohjelman kehitysaikainen versio oli hyödyllinen myös monitorointilaitteen testauksen kehittämisessä, sillä sen avulla saatiin tuotettua herätteitä monitorointilaitteelle ja prototyypilaitteelle.[36] [37]

SSAM:n käyttöä haittaa järjestelmätietokoneen sammutusvaatimus järjestelmän käynnistämiseksi. Tämä estää muun testauksen ohessa tehtävät pikakokeilut, koska järjestelmätietokoneen sammuttamisen jälkeen testaus jouduttaisiin mahdollisesti aloittamaan alusta. Ohjelman käyttöliittymäänkin jäi joitain käyttöä helpottavia asioita huomioimatta. Signaalien arvojen asetusikkunan inkrementointi voisi toimia kuten LabVIEW:n ohjaimilla, eli inkrementointi voisi muuttaa kursorin kohdan viereistä arvoa. Nyt asetusikkuna on toteutettu graafisen näytön lisänäytönä, jossa inkrementointi muuttaa arvoa aina yhden askeleilla. Ohjelman käyttöliittymä on kuitenkin helppokäyttöinen ja selkeä, oleellinen tieto löytyy pääkäyttöliittymältä ja ohjelma on käytettävissä myös ilman erillistä opastusta. [37]

Ohjelman laitetestauksessa testaajan ei tarvitse käyttää ohjelmasta muuta kuin Load Config -toimintoa ja varmistaa monitorointilaitteen mittaavan arvot riittävän tarkasti oikein. Laitetestaajan mukaan ohjelma toimii laitetestauksessa hyvin.[38][39]

Ohjelmalla saatiin tuotettua monitorointilaitteelle vikatiloja, signaaleja saatiin tuotettua myös arvoalueiden ulkopuolelta ja vastussignaalit saadaan katkaistua.

Monitorointilaitteen puskuritoiminnon testaamisessa pyyhkäisyjen tuottaminen osoittautui hyödylliseksi toiminnoksi, sillä saatiin tuotettua toistuvasti muuttuva data puskuriin, jolloin puskuria purettaessa vikatilanteet nähtiin selvästi.

Ohjelman käytössä huomattiin yhteensopivuusongelma toiseen PCIe-laajennuskoteloon asennetun CP-116E-A -sarjaliikennekortin kanssa. Ongelma johtui laajennuskoteloon asennetusta Firewire-moduulista, jota käytetään tehtävätallentimen datan purkuun. Ongelma ratkaistiin siirtämällä tehtävätallennuksen purku käytettäväksi toisella tietokoneella, sillä muistimoduulin datan purku tehdään muutenkin muualla kuin järjestelmätestipenkissä, eikä muistimoduulin tyhjentämiseen käytettävä ohjelma toimi enää järjestelmätietokoneen Windows 7 -käyttöjärjestelmän kanssa.

Laitetestaukseen saavutettiin valmius ja prototyyppilaitteesta löydettiin vikoja jo testausjärjestelmän kehitysvaiheessa. NI DAQmx on alun opettelun jälkeen helppokäyttöinen rajapinta aaltomuotosignaalien ohjelmalliseen tuottamiseen ja siten hyvä valinta testausjärjestelmän pohjaksi.

6.2 Jatkokehitysajatukset

Jatkokehitysajatuksina järjestelmää voitaisiin parantaa seuraavanlaisin toimin:

Turbiinin lämpötilan tuoton tarkkuutta on mahdollista parantaa ottamalla käyttöön erillinen lämpötilamittaus suoraan lämpöpäri - kupari -liitospisteen kylmäpisteestä. Nyt käytetty ratkaisu, jossa kylmäpiste kompensoidaan käyttämällä liitospisteen lämpötilana kytkentärasian omaa lämpötilamittausta aiheuttaa pienen offset-virheen, joka pitää korjata omalla kompensointiarvolla.

PXI-6229 -moduulissa on 32 analogiasisääntuloa, joista käytetään nyt vain neljää. Niitä voidaan jatkossa ottaa käyttöön esimerkiksi lisäämällä ohjelmaan oskilloskooppitoiminnallisuus. Ohjelmaan voidaan lisätä graafinäyttö näyttämään sisääntulojen mitattua signaalia ja signaalia voidaan käsitellä monipuolisesti käyttämällä LabVIEW:n lukuisia signaalinkäsittelyfunktioita.

Ohjelmaan voidaan lisätä myös lisää tuotettavia signaaleja. PXIe-2727 -moduulin vastuskanavista on nyt käytössä kolme yhdeksästä. PXI-6229 -moduulin analogiaulostuloista on käytössä kaksi neljästä. Moduulin digitaaliulostulot ovat kaikki käyttämättä. Toisen PXIe-4322 -moduulin kahdeksasta analogiaulostulosta on käytössä kaksi. Käytettyyn kehikkoon jäi yksi vapaa moduulipaikka, johon voidaan lisätä vielä yksi uusi moduuli. Ohjelman rakenne suunniteltiin modulaariseksi helpottamaan uusien tuotettavien signaalien lisäämistä. Käyttöliittymään on helppo lisätä välilehtiä uusien signaalien esittämiseen eikä uusi liityntämoduuli ei vaadi ohjelmistolle muuta merkittävää muutosta kuin ohjaavan silmukan lisäämisen ohjelmaan.

Monitorointilaitteen testausta voitaisiin automatisoida luomalla testiohjelmistoon mahdollisuus ajaa testitapauksia automaattisesti. Testitapaukset voitaisiin suorittaa tuottamalla signaaligeneraattorin ulostuloon automaattisesti testitapauksen mukainen ulostulo ja lukea sarjaväylältä monitorointilaitteen mittaama arvo, jolloin testi voitaisiin hyväksyä suoraan jos luettu arvo on sallituissa rajoissa. Tämän ansiosta laitteen testaajan ei tarvitsisi laitetta testatessa kuin käynnistää testitapaukset ja testauksen lopuksi tarkistaa testiraportista, että kaikki testit menivät läpi.

7 YHTEENVETO

Tässä työssä suunniteltiin ja toteutettiin järjestelmä, jolla saadaan tuotettua ja simuloitua Hawk Mk 66:een asennettavan moottorin monitorointilaitteen mittaamia signaaleja monitorointilaitteen ja kunnonvalvontajärjestelmän testaukseen. Signaaligenerointijärjestelmälle annettiin nimeksi SSAM, Signal Generator and Monitor. SSAM-järjestelmä integroitiin Hawk Mk 66:n järjestelmätestipenkkiin.

SSAM-järjestelmällä tuotetaan useita erilaisia signaaleja. Moottorin matala- ja korkeapaineahtimen kierrosnopeussignaali ovat korkeataajuuksisia ja suuriamplitudisia siniaaltoja. Kokonaislämpötilasignaali ja tehovivun asento ovat resistansseja. Turbiinin lämpötilasignaali on K-tyyppin termoparisignaali. Polttoaineen virtausnopeus on 8 voltin potentiaalın päältä mitattu 6 voltin jännite. Kaikki järjestelmän tuottamat signaalit saatiin tuotettua National Instrumentsin PXIe-laitteistolla. Laitteisto koostuu signaaligeneraattorimoduuleista, joita voidaan lisätä järjestelmään tarpeen mukaan.

Työssä suunniteltiin ja ohjelmoitiin LabVIEW-ohjelma käyttämään signaaligeneraattorilaitteistoa. Laitteistona käytettiin PXIe-kehikkoon asennettavia signaaligeneraattorimoduuleita, joilla testisignaalit tuotetaan. Ohjelma suunniteltiin modulaariseksi tukemaan mahdollisesti kehikkoon tulevaisuudessa lisättäviä lisämoduuleita.

Työssä tehty testausjärjestelmä täytti sille asetetut vaatimukset ja tavoitteet. Järjestelmällä saatiin tuotettua signaaleja vaatimusten asettamalla tavalla ja testattua moottorin kunnonvalvontajärjestelmää laboratorio-olosuhteissa. Kunnonvalvontajärjestelmällä tehtävien testauksien ollessa pääasiassa laitehuoltoon liittyviä laitetestauksia, hyötyisi testausjärjestelmä suuresti jatkokehityskohteeksi esitetystä automatisoidusta testausmahdollisuudesta.

LÄHTEET

- [1] Patria Aviation Oy, Korvaavan moottorin valvontajärjestelmän kartoitus, 52122.0 29.11.2011, 22 s
- [2] Patria Aviation Oy, Hawk Mk66 EHM SYRS Järjestelmän vaatimusmäärittely 56219.1 PVM
- [3] Ilmavoimat, BAE Hawk Mk 51 ja 51A Fact Sheet, 7.2.2014, 3 s, saatavilla [http://www.puolustusvoimat.fi/wcm/1b5ced004135d19bae6bef8fcb266289/Kone_tyyppifactsheet+HW51+\(nettiversio\).pdf?MOD=AJPERES](http://www.puolustusvoimat.fi/wcm/1b5ced004135d19bae6bef8fcb266289/Kone_tyyppifactsheet+HW51+(nettiversio).pdf?MOD=AJPERES)
- [4] Ilmavoimat, Hawk Mk 66 Fact Sheet, 6.2.2015, 2 s, saatavilla [http://www.puolustusvoimat.fi/wcm/ab8bb780407035278714efd19395723e/Konetyyppifactsheet+HW66+\(nettiversio\).pdf?MOD=AJPERES](http://www.puolustusvoimat.fi/wcm/ab8bb780407035278714efd19395723e/Konetyyppifactsheet+HW66+(nettiversio).pdf?MOD=AJPERES)
- [5] Rolls Royce, Adour tuotesivu, <http://www.rolls-royce.com/customers/defence-aerospace/products/trainers/adour.aspx#adour-overview>, viitattu 13.4.2015
- [6] Patria Aviation Oy, HW Mk 66 Tyypikoulutus I/2014, Moottoriosuus, 2014, 130 s
- [7] British Aerospace (Military Aircraft), Limited 1989 Hawk Mk.66 Aircraft Aircraft Servicing Manual, 1989
- [8] Macmillan/McGraw-Hill, Aircraft Powerplants 7th Edition 1994 694 s.
- [9] Patria Aviation Oy, HW Mk 51 / Mk 66 Tyypikoulutus I/2014, Sähkö- ja avioniikkaosuudet, 2014, 162 s
- [10] Patria Aviation Oy, Tuotetukitilanne ELC:lle P/N 0731 KEL-04-111 Hawk Mk66 moottorin ja rakenteen seurantajärjestelmä, 50651.0, 15.06.2011
- [11] Warsaw Military University of Technology, Institute of Aviation, Chachurski, Glowacki& Szczeciński, Methods of counting aircraft turbine engines operating cycles, Varsova 2011, saatavilla http://ilot.edu.pl/prace_ilot/public/PDF/spis_zeszytow/217_2011/01.%20Chachurski%20R.,%20G%C5%82owacki%20P.,%20Szczeci%C5%84ski%20S..pdf
- [12] Patria Aviation Oy, STB Laitteiston suunnitteludokumentti, Hawk STB Extension, 19340W74.041, 4.11.2014, 130 s
- [13] Patria Aviation Oy, Järjestelmätestaus- ja todentamisprosessin kuvaus Hawk Mk66 EHM, 56795.2, 2.9.2014, 15 s

- [14] Patria Aviation Oy, Hawk Mk66 EHM Laitteiston suunnitteludokumentti (HDD), 60989.1, 12.06.2015
- [15] William Gracey, Measurement of Aircraft Speed and Altitude, A Wiley-Interscience publication, 1981, 262 s
- [16] Smith Industries, Turbine Gas Temperature Indicator General and Technical information, 1984, 14 s
- [17] Faure-Herman, Repeater Indicator General and Technical Information, Faure-Herman, 1996, 32s
- [18] GE Intelligent Platforms, ARINC Protocol tutorial, 2010, 15 s
- [19] Patria Aviation Oy, Requirement Specification, Engine Monitoring Unit (EMU), Hawk Mk66 EHM, 56140.5, 6.10.2014, 22 s
- [20] FLC Electorics AB, WFG600 tuotesivu, viitattu 14.4.2014, saatavissa <http://flcelectronics.com/generators.html>
- [21] National Instruments, NI PXIe-1073 tuotesivu, viitattu 13.4.2015, <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/fi/nid/207401>
- [22] National Instruments, PXIe-1073 tuotokuva, viitattu 13.4.2015, http://sine.ni.com/images/products/us/01051208_1.jpg
- [23] National Instruments, NI VISA tuotesivu, viitattu 13.4.2015, <http://www.ni.com/visa/>
- [24] National Instruments, PXIe-4322 tuotokuva, viitattu 13.4.2015, http://sine.ni.com/images/products/us/01221301_m.jpg
- [25] Sähköinfo Oy, SFS 6002 käytännössä, 2014, 20. painos, 88 s
- [26] National Instruments, NI PXI-6229 tuotesivu, <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/fi/nid/14137>, viitattu 13.4.2015
- [27] Creative Electronic Systems SA, sähköposti, François Dausser, Findings of FAI EMU, 4.8.2015
- [28] National Instruments, PXIe-2727 tuotesivu, viitattu 13.4.2015, <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/fi/nid/209993>
- [29] Petri Kvist, Ilma-arvojen simuloiminen lentokonejärjestelmälle, diplomityö, 9.3.2010, 58 s

- [30] Patria Aviation Oy, Tekninen ohje, SSAM ohjelmiston kalibrointiohje, MA-TO-AUG-020, Patria Aviation Oy, 25.8.2015, 16 s
- [31] National Instruments, Going with (data) flow, National Instruments, viitattu 22.7.2015, <http://www.ni.com/newsletter/51770/en/>
- [32] British Standards, International thermocouple reference tables, Part 4. Nickel-chromium/nickel -aluminium thermocouples Type K, BS 4937, 1973
- [33] X-Plane Plugin SDK User's Manual, viitattu 13.4.2015, saatavilla <http://www.xsquawkbox.net/xpsdk/phpwiki/index.php?Documentation>
- [34] Ilmailulaki, 7.11.2014/864, 7 § Sotilasilmailua koskevat tarkennukset ja poikkeukset, saatavilla <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20140864>
- [35] PVLOGOHJEK, Sotilasilmailun tukeutumismateriaalin käyttöönhyväksyntä, Järjestelmäkeskus, Ilmajärjestelmäosasto, 15.6.2015
- [36] Ilmavoimien järjestelmäkeskus, Ilmajärjestelmäosasto, TYYPITARKASTUSTODISTUS N:O 127/2015 JÄRJESTELMÄTESTAUSPENKILLE (STB), 24.9.2015
- [37] Keskustelu, järjestelmäinsinööri Jani Repo, Patria Aviation Oy, 9.9.2015
- [38] Patria Aviation Oy, Tekninen ohje, Engine Monitoring Unit (EMU) P/N PEMU-7010CA testausohje, MA-TO-AUG-018, 17.9.2015, 14 s
- [39] Keskustelu, asentaja Timo Heikkinen, Patria Aviation Oy, 9.9.2015