

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Lentokonetekniikka

Tutkintotyö

Aki Penttinen

Eurostar – lentokoneen ohjaus ja vakavuus

Eurostar Aircraft control and stability

Työn ohjaaja: Linjanjohtaja Heikki Aalto

Työn teettäjä: Tampereen ammattikorkeakoulu

Tampere 2005

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka

Lentokonetekniikka

Aki Penttinen

Tutkintotyö

Työn ohjaaja: Linjanjohtaja Heikki Aalto

Työn teettäjä: Tampereen ammattikorkeakoulu

Kesäkuu 2005

Hakusanat: Eurostar, työntötko – ohjaus, vakavuus

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulun ilmailukerho ry. päätti hankkia syksyllä 2004 Tsekkiläisen, Evector aeroteknikin Eurostar EV-97 ultrakevyen lentokoneen rakennussarjan. Tarkoituksena on, että kone tehdään opiskelijaprojekteina.

Tämän työn tarkoituksena on rakentaa siihen työntötko-ohjaus ja tutkia sen toimintaa tarkemmin.

Lentokoneen pitää pystyä siirtymään lentotilasta toiseen ilman, että se vaatisi ylimääräistä taitoa tai voimaa missään käyttötilanteessa. Ultrakevyissä lentokoneissa ohjaussauvan ja ohjainpintojen väliseen ohjaukseen käytetään työntötkoja välittämään suoraa mekaanista yhteyttä.

Lentokoneen ohjauksen on toimittava luotettavasti kaikissa suunnitelluissa lentotiloissa. Työntötko ohjaus on hyvin luotettava tapa ohjata kevyttä ja hitaasti lentävää lentokonetta.

Työ tehtiin Tampereen ammattikorkeakoulun tiloissa vuoden 2005 kevään/kesän aikana.

Työn tuloksena saatiin selville, että Eurostar on oikein kuormattuna vakaa ja tasapainoinen kone ja, että koneen työntötko-ohjaus kestää hyvin ohjaajan aikaan saamia voimia.

TAMPERE POLYTECHNIC

Mechanical and product engineering

Aeronautical engineering

Engineering thesis

Aki Penttinen

Thesis supervisor: Heikki Aalto

Commissioning Company: Tampere Polytechnic

June 2005

Keywords: Eurostar, Hand control, Stability

ABSTRACT:

The Aviation Club of Tampere Polytechnic bought an ultralight aircraft Eurostar EV-97 in the autumn 2004, and the purpose of this thesis is to build a hand control system to this airplane and to analyse more accurately how it works.

The airplane must be able to change positions without requiring any extra skills or force under any circumstances. The control stick and the control surfaces of the ultralight airplane have a mechanical connection. This connection is made by using rods.

The airplane control has to work accurately in any flight operation. The hand control by using rods is a very reliable way to control a light and slow-moving airplane.

1. JOHDANTO	5
2. ULTRAKEVYET LENTOKONEET	6
2.1 Historiaa	6
3. EUROSTAR EV-97	7
4. MOMENTTI JA MOMENTTIVARSI	8
5. VAKAVUUS	9
5.1 Staattinen vakavuus	10
5.2 Dynaaminen vakavuus	11
5.3 Pituusvakavuus	12
5.4 Poikittainen vakavuus	14
5.5 Pystysuora vakavuus	16
6. PAINO JA TASAPAINO	18
6.1 Painon ja tasapainon hallinta	23
6.2 Vakavuuden ja tasapainon kontrollointi	25
7. SUUNNITTELUN PIIRTEET	26
8. OHJAUS	27
8.1 Ohjaussiivekkeet	28
8.2 Peräsin	29
8.3 Korkeusperäsin	30
9. OHJAUSJÄRJESTELMÄT	30
9.1 Ohjainjärjestelmien kuormat	31
9.2 Ohjainvoimat	32
10. EUROSTAR TYÖNTÖTANKO OHJAUKSEN ASENNUS	32
10.1 Työntötankojen ja vipuvarsien asennus	35
10.2 Työntötankojen varmuusluku	37
11.3 Työntötanko-ohjauksen säätö	39
12. VIRHETARKASTELU	41
13. OMAT POHDINNAT TYÖSTÄ	42
14. LÄHDELUETTELO	43

1. JOHDANTO

Tampereen ammattikorkeakoulun ilmailukerho ry. hankki syksyllä 2004 opetus- ja lentämistarkoituksiin Eurostar EV-97 -merkkisen ultrakevyen lentokoneen. Lentokoneen rakentaminen tehdään opiskeluprojektina, jossa lentokonetekniikan opiskelijat voivat yhdistävät tekniikan ja teorian.

Keveissä ja hitaasti lentävissä lentokoneissa ohjauksauvan ja ohjainpintojen väliseen ohjaukseen käytetään tavallisesti työntötankoja välittämään suoraa mekaanista yhteyttä.

Ilmailumääräykset (JAR) antavat tarkan määritelmän lentokoneen turvalliselle käyttäytymiselle eri lentotiloissa. Lentokoneen täytyy olla pituus- suunta- ja kallistusvakaa JAR 23.173 - JAR 23.181:n mukaan.

Lentokoneen ohjauksen on toimittava turvallisesti, ja koneella on pystyttävä liikehtimään kaikissa suunnitelluissa lentotiloissa. Lentokoneella on oltava myös mahdollista siirtyä lentotilasta toiseen ilman, että se vaatisi ylimääräistä taitoa tai voimaa missään käyttötilanteessa, eivätkä ohjainvoimat saisi olla käänteisiä missään normaaleissa lentotiloissa.

Näitä voidaan säätää ohjainpinnoilla, joita ohjataan työntötangoilla. Tässä työssä käydään läpi ohjausvoimia, jotka vaikuttavat koneen ohjaukseen sekä edellä mainittuja työntötankoja.

2. ULTRAKEVYET LENTOKONEET

Ultrakevytlentokoneilla tarkoitetaan kaksipaikkaisia, yksimoottorisia lentokoneita, joiden suurin lentoonlähtömassa on pyörillä 450 kg ja joiden suurin sallittu sakkausnopeus on 65 km/h. Eurostarin tyhjäpaino on 275 kg ja maksimi lentoonlähtöpaino on 450 kg.

Ultrakevytlentokoneiden sekä harrasterakenteisten koneiden kevyimpien luokkien viralliset määräykset ja täsmennykset luokille on esitelty ilmailulaitoksen internet sivuilla.

Kone voi olla tehdasvalmisteinen, jolloin tehtaan osuus rakenteista on vähintään 51 %. Tästä seurauksena on, ettei koneen rakentajan tarvitse todentaa koneen lentokelpoisuutta. Kun koneen rakentaa kokonaan itse tai tehtaan valmistamista osista, jää tehtaan osuus silloin alle 49 %, jolloin lentokelpoisuuden todentaminen jää rakentajan vastuulle.

Alle 500 kg painavia koneita voidaan lentää nykyisellä ultra – B - lupakirjalla. Ultrakevytluokan kehitys Suomessa on ollut suhteellisen nopeaa johtuen suomen toimivista harraste- ja viranomaisorganisaatioista.

2.1 Historiaa

Kevytilmailua on vienyt eteenpäin toive päästä ilmaan edullisemmin, vapaammin ja turvallisemmin. Ilmailun historiasta löytyy henkilöitä, jotka todistavat, että suhteellisen kevyillä koneilla on lennetty jo vuosikymmeniä.

Moottoreiden kehitys erityisesti ultrakevyt-luokassa on ollut voimakasta. Pienet kaksitahtiset moottorit ovat teho-paino-suhteeltaan tarjonneet kevytilmailulle vahvan pohjan.

1980 oli vielä käytössä useita ultrakeveitä lentokoneita, mutta vuonna 1985 ilmestynyt Ikarus Fox antoi vauhtia ultrakevytilmailuun. Hyvänä ja vahvatekoisena koneena se saavutti suurta suosiota Suomessa ja se olikin monen ensimmäinen lentokone. Vuonna 1989 ilmestynyt amerikkalainen Rans Co:n kone saavutti Suomessa markkina-johtajuuden. Koneen rakentaminen rakennussarjasta kesti noin 200 työtuntia, ja suurin osa koneista rakennettiin itse.

Nelitahtinen matkalentoon soveltuva Euro- Cub ilmestyi markkinoille vuonna 1995, koneella oli loistavat lento- ja maasto ominaisuudetkin. Euro- Cubit pysyivät markkinoilla pitkään ja samalla pohjustivat nykyisten ultrakevyiden lentokoneiden tuleamista.

Komposiittirakenteiset, nelitahtiset ja hyvin aerodynaamiset kevytkoneet nostivat kevytilmailun uuteen nousuun vuonna 1997./7/

3. EUROSTAR EV-97

Ev-97 Eurostar mallia 2001 (kuva 1) on tarkoitettu normaaliluokan harraste- ja matkalentämiseen. EV-97 Eurostar on yksimoottorinen kokometallinen, kaksipaikkainen rinnakkain istuttava puolirakenteinen ultrakevyt alataso lentokone. Lentokoneessa on puolirakenteinen metallivahvisteinen rakenne, jossa on vahvat väliseinät sekä duralumiiniverhous. Rungon poikkileikkaus on suorakulmainen rungossa alaosasta ja ellipsi yläosasta. Laskuteline on kiinteä ja ohjattavalla nokkapyörällä. Lentokone on varustettu Rotax 912UL -nelitahtimoottorilla.



Kuva 1. Eurostar /10/

Koneessa oleva siipi on suorakulmainen. Siiven kärkiväli on 8,1 metriä ja siipipinta-ala $9,84 \text{ m}^2$. Lentokoneelle on hyväksytty kaikki normaalit lentoliikkeet ja jyrkät kaarrot max. 60 astetta, heilurikahdeksikko ja nousukäännös.

Korkeusperäsin on suorakulmion muotoinen ja se muodostuu kiinteästä vakaajasta ja korkeusperäsimestä, jossa on trimmilaippa. Korkeusvakaimen puolikuorirakenne koostuu duralumiinista tukikaarista, salosta ja verhouksesta. Sivuvakain on trapetsinmuotoinen evä, joka on asennettu rungon takaosaan. Peräsin on asennettu evään kahdella saranalla. Sivuvakaimen runko muodostuu metallilevystä tehdystä salosta ja duralumiiniverhouksesta.

4. MOMENTTI JA MOMENTTIVARSI

Kappale, joka on vapaa pyörimään, pyörii oman painopisteensä kautta. Aerodynamiikan termeillä sanottuna momentti on matemaattinen mitta lentokoneen suunnalle pyöriä painopisteen ympäri.

Lentokoneen suunnittelijat paikallistavat koneen painopisteen paikan edestä ja takaa noin 20 % päähän siiven aerodynaamisesta keskijänteestä. Jos linja on suunniteltu menemään horisontaalisesti läpi painopisteen, se ei aiheuta lentokoneelle pituuskallistusta, kun moottorin teho vaihtelee. Tällöin ei ole mitään erillistä momenttia työntövoimalle, jos moottoria sammutetaan tai käynnistetään. Kuitenkin suunnittelijat haluavat kontrolloida vastuksesta aiheutuvia voimia, mutta aina ei onnistuta saamaan vastusvoimien resultanttia menemään lentokoneen painopisteen kautta. Suunnittelussa tähtäimenä on tehdä momentit mahdollisimman pieniksi mukaan lukien vastus, työntövoima ja nostovoima. Koneen pyrstölle pyritään löytämään kunnollinen paikka, koska sillä pyritään saamaan lentokone pituussuunnassa tasapainoon kaikissa mahdollisissa olosuhteissa.

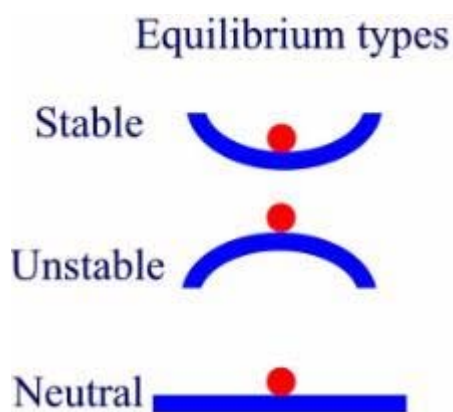
Lentäjällä ei ole muuta mahdollisuutta vaikuttaa lentokoneeseen vaikuttaviin voimiin kuin ohjata nostovoiman keskipistettä muuttamalla kohtauskulmaa. Tämä muutos vaikuttaa välittömästi muihin vaikuttaviin voimiin, joten lentäjä ei voi muuttaa yhden voiman paikkaa muuttamatta samalla muiden voimien keskinäistä suhdetta. Esimerkiksi ilmannopeuden muutos vaikuttaa nostovoimaan, jolloin vastus muuttuu erilaiseksi, ja samalla muuttuu ylös- tai alaspäin suuntautuva peräsinvoima.

Voimat kuten turbulenssi ja puuskat vaikuttavat lentokoneeseen liikuttamalla sitä, lentäjä reagoi tähän aiheuttamalla vastakkaisen ohjausvoiman vastatoimenpiteenä puuskan tai turbulenssin aiheuttamalle muutokselle.

Joissakin lentokoneissa käytetään trimmiä painopisteen paikan muutoksille, kun käytetään erilaisia kuormituksia. Trimmiä käytetään tasapainottamaan kone, jonka tasapaino muuttuu kun polttoainetta kuluu ja kuormattaessa/purettaessa lastia tai matkustajia. Korkeusperäsimen säätölevy ja säädettävät korkeusvakaajat saavat aikaan kompromissin painopisteen muutokselle edellyttäen että, lentäjä trimmaa kuormituksen vaihtelut./2/

5. VAKAVUUS

Lentokone on tasapainossa, jos se on levossa tai tasaisessa liikkeessä. Olemassa on erilaisia tasapainolajeja; jos kappale palaa tasapainoasentoonsa poikkeutuksensa jälkeen, on se vakaa. Kun kappale pyrkii pois tasapainoasemasta jatkamaan liikettä poikkeutuksensa jälkeen, on se epävakaa. Kappaleen jäädessä paikoilleen tasapaino on neutraali (Kuva 2).



Kuva 2. Tasapainon esiintymismuotoja./9/

Lentomekaniikassa vakavuustarkastelua sanotaan tasapainon olemassaolon ja laadun selvittämiseksi. Vakavuus jaetaan yleisesti staattiseen ja dynaamiseen osaan. Staattista vakautta tarkasteltaessa koetaan selvittää, pyrkiikö kone tasapainoasemaan vai siitä pois päin poikkeutuksen jälkeen. Toisin sanoen: kun koneen ohjaaja kääntää ohjaussauvasta vasemmalle, jatkaako kone kääntymistä vasemmalle vai palautuuko alkuperäiseen suuntaansa. Dynaaminen vakavuustarkastelu huomioi koko liikkeen. Dynaamisesti tilanne on epävakaa, kun lentokone hakee koko ajan ns. suuntaansa, eli lentokoneen tasapainoaseman ympärillä on häiriöitä, jotka voimistuvat koko ajan.

Vakavuustarkastelussa lentokoneen momentti määritetään lentokoneen painopisteen mukaan. Momentti sijaitsee lentokoneen aerodynaamisessa keskiössä.

Vakavuustarkastelu jaetaan pitkittäiseen ja poikittaiseen liikkeeseen staattisen ja dynaamisen tarkastelun lisäksi. Käsiohjauksella ohjattavissa lentokoneissa vakavuus tarkastelut tehdään vain kahdessa tapauksessa. Tilanteessa, jossa ohjaimet on lukittuina, niiden asento ei muutu ohjainpintojen saranamomenttien muuttuessa. Ohjaimien ollessa vapaina ohjainpinnat asettuvat niin, että saranamomentti on nolla. Korkeusvakaajan teho tasapainottavana osana kasvaa, jos sen kokoa kasvatetaan tai etäisyyttä painopisteestä lisätään, kun taas rungolla on taas vakautta vähentävä osuus. Painopisteen sijainti on keskeinen ilma-aluksen ohjattavuuden ja hallittavuuden kannalta. Jos painopiste siirtyy sallittujen rajojen ulkopuolelle esimerkiksi väärän kuormauksen tai ylikuorman takia, ilma-alus joutuu lentoalueelle, jota valmistaja ei ole tutkinut ja josta ei ole tarkkaa tietoa. Tällöin kone voi rikkoutua ilmassa, tai sen lento-ominaisuudet muuttuvat olennaisesti, jolloin sen hallinta saattaa vaikeutua ratkaisevasti.

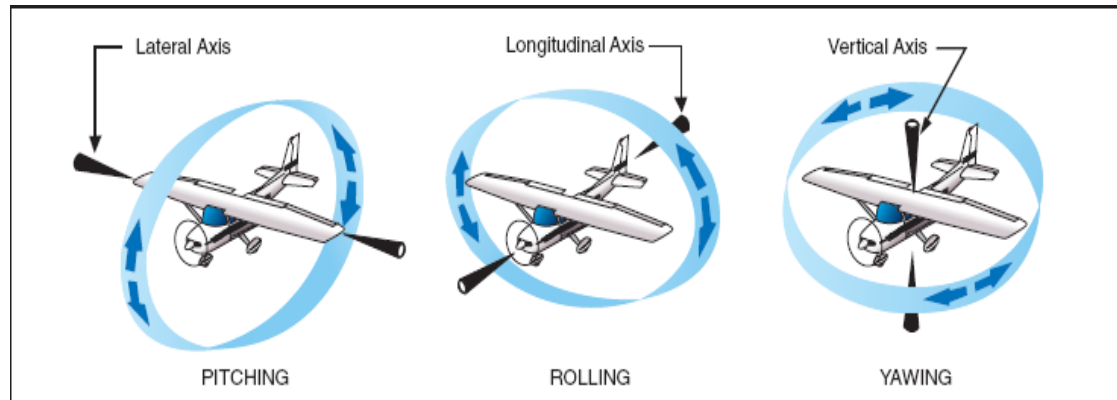
Epävakaasti lentävä kone voi olla väärin kuormattu, mikä aiheuttaa koneen painopisteen siirtymisen. Lentokoneessa painopisteen on sijaittava aerodynaamisen keskiön etupuolella.

Myös muissa lentotiloissa ja varsinkin laskussa lentokone käyttäytyy eri tavalla painavampana kuin kevyempänä. Painava kone pyrkii laskussa ylinopeudelle, ja koneen pysäyttämiseen tarvitaan pidempi matka./2/

5.1 Staattinen vakavuus

Staattisesti tapahtuva suunta- ja kallistusvakaumus on sama kuin staattinen poikittaisvakaumus. Suuntavakautta tutkitaan samalla tavalla kuin pitkittäisvakautta, eli konetta poikkeutetaan akselin ympäri. Lentokone on helppo saada suuntavakaaksi suunnittelemalla lentokoneeseen useampi sivuvakaaja. Lentokoneen runko vaikuttaa vakautteen heikentävästi kun taas siiven geometria ja koneen painopisteen paikka eivät vaikuta juuri asiaan. Sivutuulella lennettäessä kone joudutaan oikaisemaan yleensä sivuperäsintä käyttämällä. Lentäessään lentokone pystyy liikkumaan mihin suuntaan tahansa, ja sitä täytyy pystyä ohjaamaan joka suuntaan. Lentokonetta

suunniteltaessa insinöörit joutuvat tekemään kompromissin ohjattavuuden, liikehtimiskyvyn ja vakauden välillä. Yleensä ongelmia ilmaantuu, koska lentokone pystyy liikkumaan kolmen-akselin mukaan (kuva 3). Liian vakaa kone on huono liikehtimään, ja liian epävakaa kone on vaikea ohjattava./2/



Kuva 3. Lentokoneen akselit /2/

5.2 Dynaaminen vakavuus

Staattinen vakavuus on rajoittunut siihen, että lentokone voidaan trimmiä käyttämällä saada lentämään suoraan. Dynaaminen vakavuus on kokonaisvaltainen suunta lentokoneen osoittamasta suunnasta sen jälkeen, kun sen tasapaino on häiriintynyt. Aika näyttäisi olevan hyvin tärkeä osa: jos aikaa kuluu yhdellä jaksolla, tai heilahtelua kestää 0,5 – 2 min, sitä kutsutaan phugoid - liikkeeksi, ja se on helposti korjattavissa. Pitkittäisessä phugoid - heilahteluliikkeessä kohtauskulma pysyy vakiona, vaikka ilmantoisuus nousee ja laskee. Luotettava asema yhtenevässä phugoid - liikkeessä on suotavaa, mutta ei vaadittavaa. Phugoid - liike voidaan estää staattisesti vakaalla lentokoneella, ja tällä on suuri vaikutus lentokoneen trimmausmahdollisuuksille. Phugoid - liike voi olla hyvin pitkä ja rauhallinen jolloin lentäjä ei välttämättä huomaa edes koko liikettä.

Jos aikajakso on 2 – 5 sekuntia, kyseessä on short - period heilahtelu liike, ja se on yleisesti hyvin hankala liike, jopa mahdoton pilotin kontrolloida. Tässä liikkeessä pilotti voi helposti vahvistaa liikettä. Tämän liikemuodon on oltava itsestään vaimeneva.

Short period - liike on vaarallinen, koska se saattaa saada aikaan rakenteiden pettämistä jos heilahtelua ei ole vaimennettu välittömästi. Short period liike vaikuttaa lentokoneeseen ja ohjauspintoihin samalla tavalla. Tällä tarkoitetaan pyörrettä, tärinää lentokoneessa tai flutter - ilmiötä ohjauspinoilla. Flutter - ilmiöllä tarkoitetaan kovaa tärisevää tilaa, joka voi vaurioittaa konetta. Periaatteessa short period -liike on kohtauskulman muutos ilman että ilmannopeus muuttuu. Short period liikkeessä ohjaus pinnat tärisevät niin nopeasti, ettei lentokone ehdi reagoida.

Testilennolla koelentäjä testaa näitä liikkeitä kriittisellä nopeudella V_{ne} , kääntämällä nopeasti ja terävästi ohjaussauvasta tai liikuttamalla peräsintä, ja tarkkailee koneen käyttäytymistä./2/

5.3 Pituusvakavuus

Suunniteltaessa lentokonetta kannattaa pyrkiä kehittämään toivottua kulmaa vakaudelle kaikkien kolmen akselin ympärillä. Vaakasuoran akselin suhteen pitkittäisesti vakaa on tarkoituksellisesti kaikkein vaikuttavin, mikä johtuu muuttuvasta lento-olosuhteista.

Pituusvakavuus on ominaisuus, joka tekee lentokoneen vakaaksi sen vaakasuoran akselin suhteen. Se vaikuttaa pituuskallistukseen, kun nokkaa lennettäessä nostetaan ylöspäin tai lasketaan alaspäin. Pituussuunnassa epävakaalla koneella on pyrkimys syöksyä tai nousta asteittain, välillä jopa hyvinkin jyrkästi, joskus sakkaukseen asti. Jos lentokone on pituussuunnassa epävakaa, siitä tulee vaikea ja joskus vaarallinen lentää.

Staattinen pitkittäisvakavuus tai epävakavuus riippuu kolmesta asiasta:

1. Siiven sijainnista painopisteen suhteen.
2. Korkeusperäsimen pintojen suhteesta painopisteen paikkaan.
3. Pyrstön koosta.

Vakautta analysoitaessa pitää huomioida, että runko on vapaa pyörimään painopisteen ympäri.

Staattisesti pituusvakaassa koneessa, siiven ja pyrstömomenttien täytyy olla tasapainossa. Jos momentit ovat alussa tasapainossa ja lentokoneen nokka nousee äkillisesti ylös, siiven ja pyrstön momentit muuttuvat jolloin niiden aiheuttama yhteenlaskettu voima alkaa lisätä epävakautta. Mutta se myös palauttaa momenttia, joka käänöksessä tuo nokkaa alaspäin. Samalla lailla, jos lentokone on nokka alaspäin, vaikuttavien momenttien muutos tuo nokan jälleen ylös.

Epäsymmetrisillä lentopinnoilla on usein taipumusta muuttaa etummaisesta ja takimmaisesta paineakeskiön paikkaa kohtauskulman muuttuessa. Paineakeskiö vaikuttaa liikkuvan eteenpäin nostaa kohtauskulmaa ja liikkuvan perää kohti laskien kohtauskulmaa.

Tämä myös aiheuttaa sen, että lentokoneen nokka tulee raskaaksi, jolloin se vaatii kevyen alaspäin suuntautuvan voiman vakaajalla pitämään lentokoneen tasapainossa ja nokan jatkuvasti pienessä laskussa. Kompensaationa raskaalle nokalle edellytyksenä on vaakasuoran vakaajan lievä negatiivinen kohtauskulma. Sen aiheuttama alaspäin suuntautuva voima, sen lisäksi että se pitää perän alhaalla, toimii myös vastapainona raskaalle nokalle.

Alaspäin suuntautunut turbulenssi osuu vakaajan yläpinnalle ja aiheuttaa alaspäin vaikuttavan paineen, mikä tietyllä nopeudella on tarpeeksi aiheuttamaan tasapainon. Mitä nopeammin lentokone lentää, sitä suurempi on alaspäin suuntautunut turbulenssi, ja sitä suurempi on alaspäin suuntautunut voima vakaajasta. Lentokoneissa, joissa on asennon korjaava vakaaja, ovat lentokoneen valmistajat asettaneet vakaajalle kulman, jolla saavutetaan paras vakavuus tai tasapaino lennon aikana suunnitellulle nopeudelle.

Jos lentokoneen nopeutta lasketaan, ilmavirta siiven yli laskee. Tuloksena alentuneesta ilmavirrasta on, että alaspäin suuntautunut turbulenssi vähenee, jolloin ilmavirta aiheuttaa vähemmän alaspäin suuntautunutta voimaa vakaajasta. Tämä korostaa lentokoneen nokan raskautta aiheuttaen koneen nokan painumisen alaspäin. Tässä tapauksessa, kun lentokoneen on nokka alhaalla, siiven kohtauskulman pienenessä, vastus vähenee, lentonopeuden kasvaessa. Lentokoneen jatkaessa lentoaan nokka alhaalla, ja sen nopeuden kasvaessa, alaspäin suuntautunut voima vakaajasta alkaa jälleen lisääntyä. Pyrstöä kuitenkin painetaan taas alaspäin, ja nokka nousee ylöspäin.

Nousun jatkuessa ilmanopeus jälleen laskee aiheuttaen pyrstössä alaspäin suuntautuvan voiman vähenemistä, kunnes nokkaa lasketaan vähän. Lentokoneen

ollessa dynaamisesti vakaa nokka ei laske niin alas kuin ensimmäisellä kertaa. Lentokone vaatii tarpeeksi vauhtia asteittaiseen syöksyyn, mutta nousu ei ole niin jyrkkä kuin aiempi. Muutaman vähenevän värähtelyn jälkeen, jolloin lentokoneen nokka nousee ja laskee, lentokone asettuu paikoilleen nopeudella, jossa pyrstössä alaspäin vaikuttava voima vastustaa lentokoneen taipumusta syöksyä. Kun nämä olosuhteet on saavutettu, lentokone alkaa uudestaan olla tasapainoisessa lennossa ja jatkaa vakaata lentoa niin kauan kuin korkeus ja lentonopeus eivät muutu.

Samanlainen vaikutus saadaan aikaan vähentämällä kaasua. Alaspäin suuntautuva turbulenssi vähenee, jolloin voimaa ei ole tarpeeksi pitämään vakaajaa alhaalla. Tällöin voima sallii painovoiman vetää nokkaa alaspäin. Tämä on hyväksyttävä piirre, koska lentokone luonnostaan yrittää saavuttaa lentonopeuden ja luonnollisen tasapainon.

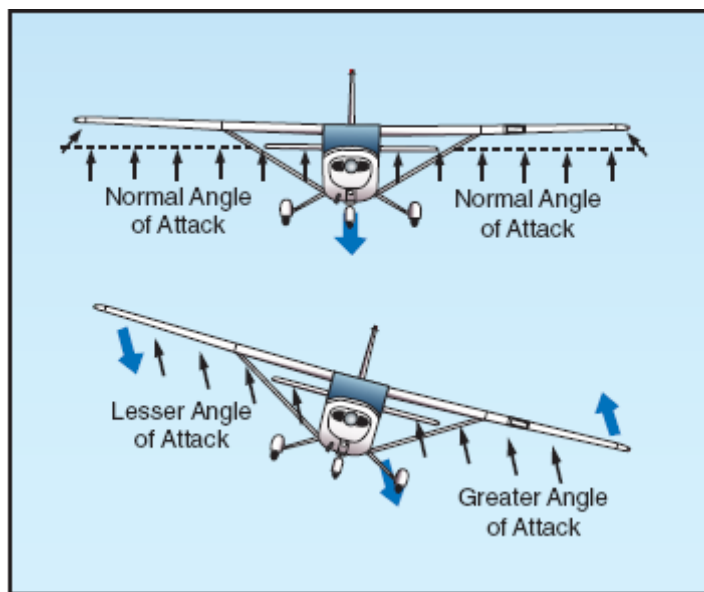
Moottorin teholla tai kaasulla voi olla myös epävakautta lisäävä vaikutus, koska moottorin tehon lisääminen voi saada nokan nousemaan. Lentokoneiden suunnittelija voi kompensoida tämän sallimalla ”työntölinjan”, jossa työntövoiman vaikutussuora on painopisteen yläpuolella. Tässä tapauksessa työntövoimaa lisättäessä sen aiheuttama momentti vähentää pyrstössä alaspäin vaikuttavaa voimaa. Toisaalta myös erittäin alhainen työntölinja pyrkii lisäämään nokka ylös -vaikutusta./2/

5.4 Poikittainen vakavuus

Lentokoneen pitää olla vakaudeltaan hyvä pituusakselin suhteen. Tällä pyritään vakauttamaan poikittaista tai kallistuksen vaikutusta, kun toinen siipi on alempana kuin toinen. On olemassa neljä pääsuunnittelukohtaa jotka tekee lentokoneen poikittaisesti vakaaksi: V-kulma, rungon vaikutus, nuolikulma ja painon jakautuminen.

Kaikkein yleisin toimenpide valmistaa poikittaisesti vakaa kone on kiinnittää siipi 1-3 asteen v-kulmaan. Toisin sanoen siivet kiinnitetään runkoon niin, että ne muodostavat pienen v:n. Perusteena kallistus vakavuudelle on, että poikittaiset tasapainotuskuormat tehdään siivillä. Nostovoiman vaikuttaessa epätasaisesti siipiin alkaa, lentokone kallistumaan pitkittäisakselin mukaan. V-kulma sekoittaa nostovoiman tasapainoa, joka luodaan siiven kohtauskulmalla lentokoneen pitkittäisakselin suhteen.

Jos hetkittäinen tuulen puuska vaikuttaa siipen nostaen sitä jolloin toinen siipi laskee, lentokone kallistuu. Lentokoneen ollessa kallistunut ilman, että se kääntyy, se näyttää olevan sivuluisussa tai liukuvan alaspäin alemmaa siipeä kohti. Koska siivet ovat v-kulmassa, ilma osuu paljon suuremmalla kohtauskulmalla alempaan siipeen kuin ylempään (kuva 4). Tämä lisää nostovoimaa alemmassa siivessä ja vähentää nostovoimaa ylemmässä siivessä ja auttaa lentokonetta säilyttämään alkuperäisen korkeutensa, tämä onnistuu kun kohtauskulma ja molemmat siivet ovat yhtenäiset.



Kuva 4. Siiven v-muoto poikittaisessa vakavuudessa./3/

V-kulman vaikutus on tuottaa vaakamomenttia jolloin lentokone palautuu poikittaisesti tasapainoiseen lentoon, kun sivuluisua esiintyy.

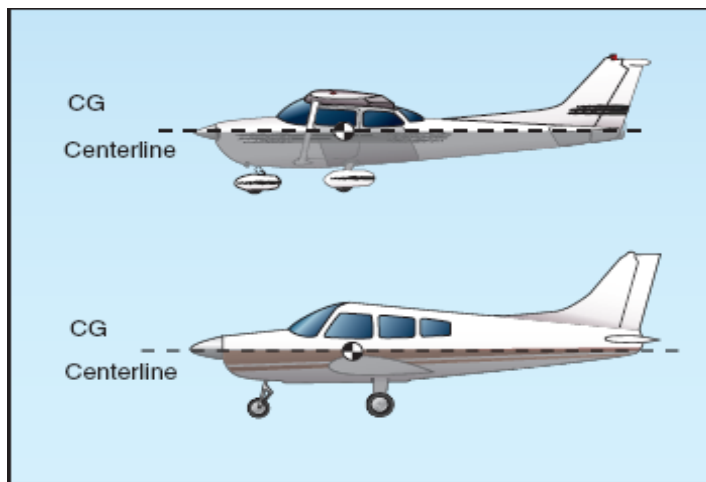
Vaikuttava voima voi liikuttaa alemmaa siipeä liian ylös, jolloin vastakkainen siipi menee alaspäin. Jos näin tapahtuu, koko prosessi toistuu vähentäen poikittaista värähtelyä, kunnes tasapaino siipien välillä löytyy.

Liiallisella v-kulmalla on haitallinen vaikutus kallistusohjaukselle. Lentokone voi olla niin vakaa vaakasuunnassa että se vastustaa kaikkia tarkoituksellisia kaarre-liikkeitä. Tästä syystä lentokoneilta jotka, vaativat nopeaa kallistusta, on yleensä vähemmän v-kulmaa kuin niillä koneilla, jotka on suunniteltu vähemmän liikehtimiskykyisiksi.

Siiven toimiessa tuulessa siiven v-kulma vähentää sivuluisua, ja kun siipi on poissa tuulen vaikutuksesta, sen vaikutus kasvaa sivuluisussa. Nuolikulmaisella siivellä on vaikutusta vain, jos tuulen osa on kohtisuoraan siiven johtoreunaan. Jos siipi toimii positiivisesti vakionostovoimalla, siipi johon vaikuttaa tuuli, lisää nostovoimaa, ja

siipi johon tuuli ei vaikuta, vähentää nostovoimaa. Taaksepäin oleva nuolenmuotoinen siipi tuottaa positiivisen v-kulmavaikutuksen, ja eteenpäin oleva nuolenmuotoinen auttaa negatiivisessa v-kulman vaikutuksessa.

Lennon aikana lentokoneen rungon sivuprofiili ja pystysuora sivuvakaaja reagoivat ilmavirtaan hyvin paljon samaan tapaan kuin laivan köli. Sillä on samanlainen vaikutus lentokoneen vaaka- kuin pitkittäisakseliinkin. Sivuttaissuunnassa vakaat lentokoneet ovat rakenteeltaan sellaisia, että suurempi osa rungosta on keskipisteen ylä- ja takapuolella (Kuva 5).



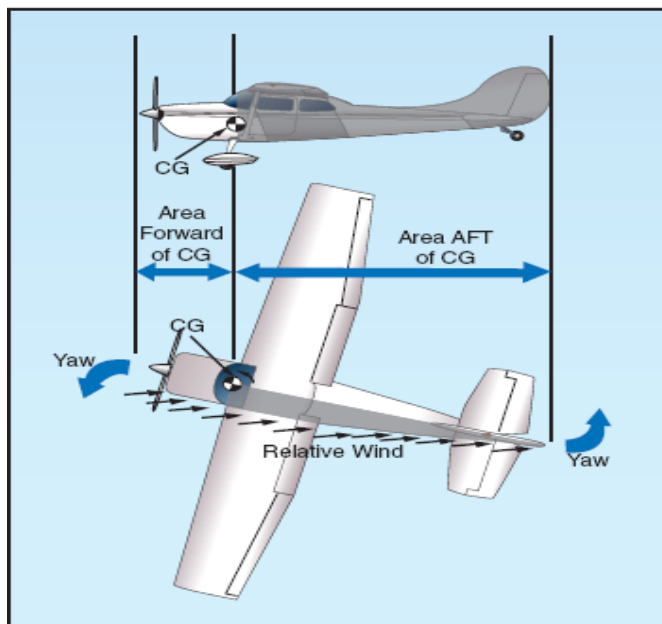
Kuva 5. Tummennettu alue on rungon alue sivuttaisesti vakaassa koneessa./3/

Kun lentokone liikkuu puolelta toiselle, lentokoneen painon, ilmavirran ja paineen yhdistelmä vasten rungon yläosaa vaikuttaa lentokoneeseen saaden koneen takaisin suoraan./3/

5.5 Pystysuora vakavuus

Lentokoneen pysty akselin suuntaista vakautta kutsutaan suuntavakaudeksi. Suuntavakaas on kaikkein helpoimmin saavutettava vakaas lentokoneen suunnittelussa. Pystysuora sivuvakaaja ja lentokoneen takarungon painopiste ovat pääosatekijät, jotka saavat lentokoneen toimimaan kuin tuuliviiri tai nuoli, osoittamaan koneen nokan tuulen suuntaan.

Otetaan esimerkiksi tuuliviiri, josta voidaan nähdä, että jos puhaltaa täysin samansuuruinen tuuli edestäpäin kuin takaapäinkin, ovat silloin viiriin kohdistuvat voimat tasapainossa, jolloin viiri liikkuu vähäsen tai ei ollenkaan. Sen vuoksi, jos on tarpeellista saada suurempi pinta, pyrstön saranapistettä siirretään sitä eteenpäin. Samalla tavoin lentokoneessa, suunnittelijan täytyy varmistaa positiivinen suuntavakavuus tehden rungon sivupinnan kokonaisalue suuremmaksi pyrstöä kohti kuin painopisteen etupuolella (Kuva 6).



Kuva 6. Runko ja evä pystysuorassa vakaudessa/3/

Jotta saadaan enemmän positiivista vakautta sivuille kuin rungolle, edellytetään pystysuoran sivuvakaajan lisäämistä. Sivuvakaaja käyttäytyy saman lailla kuin höyhenet nuolessa, se pitää yllä suoraa lentoa. Kuten tuuliviiri tai nuoli, mitä kauempana perässä sivuvakaaja sijaitsee ja mitä suurempi on sen koko, sitä suurempi on lentokoneen suunta vakavuus.

Kun lentokone lentää suoraan ja sivusta tulee tuulenpuuska aiheuttaen lentokoneelle pienen kiertoliikkeen sen pysty akselin suhteen, koska kun lentokone kääntyy oikealle, ilma osuu vasemmalle puolelle sivuvakaajaan kulmassa. Tämä aiheuttaa painetta sivuvakaajan vasemmalle puolelle, joka vastustaa kääntymisen liikettä ja hidastaa lentokoneen kääntymistä. Näin tehdessään se toimii jokseenkin samalla lailla kuin tuuliviiri, lentokoneen kääntyessä suhteellisesti tuuleen. Alkuperäinen muutos lentokoneen lentosuunnassa on pääasiassa lievästi suunnan muutosta jäljessä. Sen

vuoksi lentokoneen oikealle suuntautuneen lievän kääntymisen vuoksi vaikuttaa pieni momentti kun lentokone liikkuu sen alkuperäistä reittiä, kun pituusakseli osoittaa lievästi oikealle.

Lentokone ollessa hetkittäisesti sivuttaisessa luisussa on tarpeellista, että lentokonetta käännetään osittain takaisin oikeaan lentosuuntaansa.

Suuntaan palautuminen on jokseenkin hidasta, ja se keskeytyy kun lentokone pysähtyy liukumasta. Kun se pysähtyy, lentokone lentää eri suuntaan kuin mikä koneen oikea suunta on. Lentokone ei palaudu itsestään alkuperäiseen suuntaansa vaan lentokoneen lentäjän täytyy ohjata kone oikeaan suuntaansa.

Lievä parannus suuntavakaudelle voidaan saavuttaa nuolikulmalla. Keveissä ja hitaissa lentokoneissa nuolikulma auttaa aerodynaamisen keskiön paikallistamisessa oikeassa suhteessa painopisteeseen. Pituussuunnassa vakaa lentokone on rakennettu aerodynaamisen keskiön ollessa painopisteen takana.

Rakenteellisista syistä, siipiä ei aina voi kiinnittää runkoon siihen kohtaan johon haluaisi. Jos siivet asennetaan liian eteen ja oikeaan kulmaan runkoon nähden, aerodynaaminen keskiö ei ole tarpeeksi etäällä halutun pitkäikäisvakauden saavuttamiseksi. Rakentamalla nuolimuoto siipiin voidaan nostovoimakeskiötä siirtää taaemmaksi. Nuolimuodon suuruudella ja siiven paikalla saadaan keskiö oikeaan paikkaan.

Siiven apu staattiseen suuntavakauteen on yleensä pientä. Nuolisiipi auttaa aikaan - saamaan vakautta riippuen nuolimuodon suuruudesta, mutta apu on suhteellisen pientä kun sitä verrataan muihin osatekijöihin. /2/

6. PAINO JA TASAPAINO

Lentokoneen suoritusarvoihin vaikuttaa koneen paino. Oikein kuormattuun lentokoneeseen verrattuna ylipainoisella lentokoneella on mm. pienempi nousunopeus, suurempi sakkausnopeus sekä pienempi lentonopeus. Lentokoneen liian raskas kuormittaminen voi vähentää vaarallisesti sen suoritusarvoja ja lisätä riskiä rakenneaurioille, jos lentäessä kohtaa turbulenssia tai tekee huonon laskeutumisen.

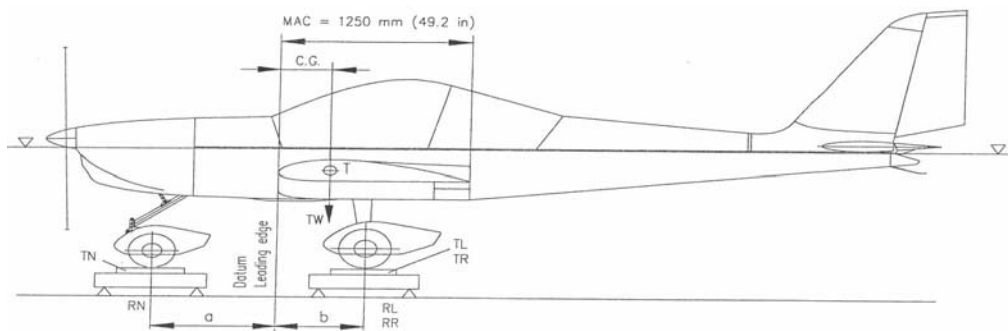
Lentokoneiden valmistajat tekevät jatkuvia testejä selvittääkseen turvallisia rajoja lentokoneen kuormaamiselle.

Kaikkein tärkeimmät rajat ovat kuormituskertoimet ja maksimi- lentoonlähtöpaino. Vaaditut kuormituskertoimet Euroopassa ovat +4, -2 ja maksimi- lentoonlähtöpaino on 450 kg.

Konetta kuormatessa täytyy huomioida se, että lentokone on tasapainossa sallituissa rajoissa. Sillä ei ole merkitystä, kuinka paljon lentokoneeseen kuormataan matkatavaroita, vaan sillä minne matkatavarat sijoitetaan. Lentokoneen tasapainon voi määrittellä paikallistamalla lentokoneen painopisteen, joka on kuvitteellinen piste josta ripustamalla lentokone on tasapainossa.

Painopisteen paikka on kriittinen lentokoneen vakaudelle ja korkeusperäsimen vaikutukselle, koska jos painopiste siirtyy liikaa nokkaa kohti, tarvitaan suurempia korkeusperäsimen poikkeutuksia lentokoneen saamiseksi jälleen tasapainoon. Heikko tasapaino lentokoneen kuormituksessa voi aiheuttaa vakavia ohjausongelmia. Näitä ongelmia voidaan välttää mittaamalla painopisteen paikka ja varmistamalla, että se on annetuissa rajoissa. Painopisteen rajat edessä ja takana on mitattu painopisteen sijaintipaikasta, jolloin lentokone pystyy toimimaan annetulla painolla.

Lentokoneen painopisteen paikka määritetään etäisyytenä siiven aerodynaamisen keskijänteen etureunasta. Lyhyesti sanottuna painopiste on keskijänteestä mitattu suure. Painopisteen on kuitenkin sijaittava aerodynaamisen keskiön etupuolella. Eurostarin sallittu painopistealueen etureuna sijaitsee 250 mm määritellystä painopistealueen keskipisteestä (kuva 7.) ja takareuna 425 mm keskipisteestä./3/



Kuva 7. Eurostarin painopiste C.G ja painopiste alueen eturaja./4/

Eurostarin työohjeen mukaan painopiste C.G voidaan määrittää myös yhtälöllä 1.

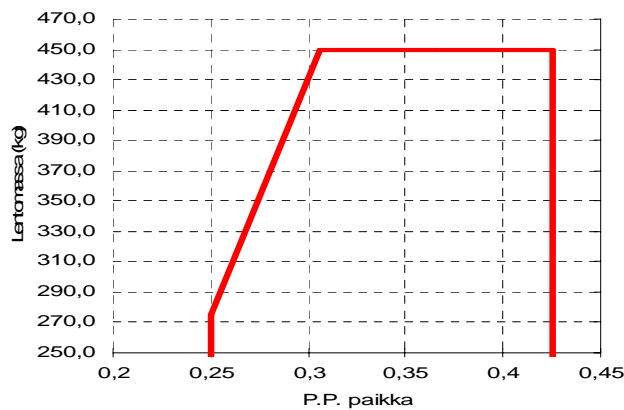
$$C.G = \frac{\text{kokonaismomentti}(kgmm)}{\text{kokonaismassalla}(kg)}$$

Yhtälö 1. painopisteen yhtälö

Eurostarin kokonaismomentti sisältää kaikkien, mikä konetta kuormatessa lisää painoa kuten ohjaaja, polttoaine, matkatavarat yms. Kokonaismassalla tarkoitetaan koneen suurinta massaa, joka koneen on suunniteltu kantavan eli 450 kg.

Yhtälön 1. tuloksena Eurostarin painopiste sijaitsee 0,320 m:n päässä siiven keskijänteen etureunasta.

Kaavio 1 esittää sallittua painopisteen vaihtelualuetta lentokoneen massan suhteen kun painopiste sijaitsee 0,320 m:n päässä siiven keskijänteen etureunasta.



Kaavio 1. Painopisteen sallittu vaihtelualue lennettäessä.

Kaaviosta voidaan myös havaita, että jos lentokoneen painopisteen paikka muuttuu liian eteen, lentokoneeseen ei voida kuormata maksimimäärää rahtia tai matkustajia.

Etupainoisesti kuormatulla lentokoneilla vaaditaan trimmiä, jolla saadaan koneen keula nousemaan ylöspäin ja pystytään ylläpitämään lentonopeutta. Trimmi vaikuttaa korkeusperäsimeen, jolloin se aiheuttaa lisänostovoiman lentokoneen perään. Samalla se lisää siipien nostovoimaa, jotta saavutettu lentokorkeus saataisiin pidettyä. Tästä seurauksena on suurempi kohtauskulma siivelle joka aiheuttaa enemmän vastusta, käännöksissä sillä on suurempi sakkausnopeus.

Takapainoisesti kuormatulla lentokoneella lennettäessä keula pyrkii ylöspäin, ja tätä korjataan trimmillä jotta saadaan keulaa alaspäin. Tällöin korkeusperäsimen

ohjauspinnat saavat aikaan enemmän nostovoimaa ja keventävät siiven kuormitusta sen verran, että saadaan pidettyä oikea lentokorkeus. Vaadittu siiven kohtauskulma on silloin pienempi, ja pienempi vastus sallii suuremman matkalentonopeuden. Periaatteessa tasapainoinen korkeusperäsimen kuormitus tuottaa kaikkein tasapainoisimman suorituskyvyn ja parhaan matkalennon, mutta tuo tullessaan epävakautta koneeseen. Modernit lentokoneet suunnitellaan vaatimaan alaspäin suuntautunutta voimaa, jotta koneen perä pysyisi vakaana ja konetta pystyttäisiin ohjaamaan.

Lentokoneen kuormituksen vaikutusten jakautumisella on huomattavaa vaikutusta suoritusarvoihin, jopa silloin kun kuormitus on painopisteiden rajoissa ja maksimi lentopainolla lennettäessä. Tärkeää näiden vaikutusten seassa ovat ohjauksen, vakauden ja siiven todellisen hyötykuorman muutokset.

Lentokone muuttuu huonosti ohjattavaksi hitailla nopeuksilla lennettäessä, kun painopiste muuttuu perään päin. Lentokone, joka puhtaasti palautuu syöksykierteestä painopisteen säilyessä paikoillaan, voi epäonnistua täydellisesti normaalista oikaisusta, kun painopiste on muuttunut 20- 50 mm taaksepäin.

Toinen asia joka vaikuttaa ohjattavuuteen, ja joka vaikuttaa kaikkein eniten suuriin matkustajakoneisiin, on pitkien momenttivarsien paikat konetta kuormatessa. Sama lentokone voi ottaa kuormaa maksimipainon verran keskipisteen rajojen puitteissa keskittämällä polttoaineen, matkustajat ja matkatavarat lähelle suunniteltua keskipistettä - kuten Eurostarissa, vaikei se ole matkustajakone- tai sijoittamalla polttoainekuormat siipitankkeihin ja matkatavarat etu- ja takatavaratilaan, jolloin tavaroiden ja polttoaineen paino jakautuu tasaisesti.

Saman painoinen kone ja samanlaisen painopisteen omaava kone vaatii liikehtiessään tai pitäessään lentokorkeutta turbulentsisessa ilmassa suuremman ohjausvoiman, kun kuormitus on hajanainen. Tämä johtuu polttoaineelle ja matkatavaroiden kuormituksen aiheuttamasta momenttivarren asennosta, sillä ohjausvoimien täytyy pystyä lannistamaan ohjauspintojen kuorma.

Lentokone tuntuu laiskaliikkeiseltä vaakakierrettä tehdessä, jos lentokoneella on ulkopuoliset polttoainetankit tai tankit sijaitsevat siipien kärjissä, kun taas lentokone, jolla on nokka ja peräosa täynnä matkatavaroita, on hidas vastaamaan korkeusperäsimen liikkeisiin.

Takimmainen painopisteen raja lentokoneella on määrätty etusijassa vakautta ajatellen.

Jos koneen nokkaa vedetään hetkellisesti ylös se saattaa vaihtoehtoisesti nousta ja laskea hyvinkin terävästi. Tällöin on lentokone liian takapainoisesti kuormattu. Tämä epävakavuus ei ole vain epämukavaa matkustajille vaan se voi tehdä lentokoneen hallitsemattomaksi tietyissä olosuhteissa.

Painopisteen takarajalle kuormattu kone käyttäytyy eri lailla käännoksissä ja sakkauksilanteissa, ja silloin koneella on erilaiset laskeutumisarvot kuin eturajalle kuormatulla koneella.

Etummainen painopisteen raja on määrätty muutamien näkökohtien mukaan. Turvallisuusnäkökulmasta trimmijärjestelmän on oltava kykenevä pitämään lentokone liu'ussa, kun moottori on sammunut. Perinteisen lentokoneen täytyy pystyä kykeneväinen täydelliseen sakkaukseen ja moottori sammuneena laskeutumiseen ensisijaisesti miniminopeudella hätälaskutilanteessa. Ohjausvaikeuksia voi tulla nokkapyörällä varustettuihin lentokoneisiin jos kone on etupainoisesti kuormattu voi lentokone kentällä rullatessa alkaa puskea./3/

- Painopisteen paikka vaikuttaa nostovoimaan ja siiven kohtauskulmaan, keston ja koneen pyrstön voiman suuntaan, ja vakaajan kulman poikkeama tarvitsee tuekseen kunnollisen pyrstövoiman tasapainotukseen. Jälkimmäinen on tärkeä johtuen sen suhteesta korkeusperäsimen voimaan.
- Lentokone sakkaa suuremmalla nopeudella, jos painopiste on eturajalla, koska sakkauksen kohtauskulma saavutetaan suuremmalla nopeudella johtuen lisääntyneestä siiven kuormituksesta.
- Suuret korkeusperäsimen voimat ilmenevät normaalisti painopisteen etupuolella koska lentokone vaatii tasapainotukseen suurempaa vakaajan kulmaa.
- Painopisteen ollessa takana lentokone lentää nopeammin, koska silloin se vähentää vastusta. Vastus vähenee, koska pienellä kohtauskulmalla ja pienellä alaspäin suuntautuneella poikkeutuksella vakaajat vaativat tukea lentokoneelta ja vähentävät pituuskallistuksen herkkyyttä.
- Lentokone tulee epävakaaaksi kun painopistettä siirretään taaksepäin. Tämä johtuu siitä, että painopisteen siirtyminen aiheuttaa kohtauskulman kasvamisen. Tästä johtuen siiven vaikutus lentokoneen vakaudelle vähenee, kun taas pyrstön vaikutus edelleen vakauttaa konetta. Kun se piste saavutetaan, jossa pyrstö ja siipi ovat

tasapainossa, neutraali vakavuus on saavutettu. Painopisteen siirtyminen perään päin aiheuttaa epävakaa lentokoneen.

- Jos painopiste sijaitsee edessä, se lisää tarvetta suuremmalle korkeusperäsimen aikaansaamalle paineelle. Korkeusperäsin ei voi enää pidätellä lisääntyvää pituuskallistelu. Kunnollista korkeusperäsinohjausta tarvitaan lennettäessä./3/

6.1 Painon ja tasapainon hallinta

Paino ja tasapaino ovat yksi kaikkein tärkeimpiä seikkoja jotka vaikuttavat lentämisen turvallisuuteen. Ylipainoinen lentokone tai sellainen, jonka painopiste on ylittänyt sallitun rajan, on huono ja vaarallinen lentää. Vastuu sopivasta painosta ja tasapainon ohjauksesta alkaa insinööreistä ja suunnittelijoista ja laajenee lentäjään, joka lentää lentokoneella, ja teknikkoon joka huoltaa lentokonetta.

Nykyaikaiset lentokoneet on suunniteltu käyttäen hyväksi uusinta teknologiaa ja materiaaleja nostamaan ilmaan mahdollisimman suuren kuorman ja kantamaan sen mahdollisimman pitkän matkan suurella nopeudella.

Lentokoneen suunnittelussa ja valmistuksessa täytyy olla huolellinen ja kokemusta.

Erilaisilla lentokoneilla on erilaiset kuormitusvaatimukset. Kuljetuslentokoneiden täytyy kantaa suuria kuormia matkustajia ja lastia pitkien matkojen päähän korkealla yläilmoissa ja suurella nopeudella. Sotilaslentokoneiden täytyy olla erittäin ketteriä ja todella kestäviä. Yksityis- ja koulutuskoneiden on oltava kevyitä, halpoja, yksinkertaisia ja turvallisia käyttää.

Kaikilla lentokoneilla on kaksi yhteistä piirrettä: kaikki ovat herkkiä painolle, ja lentokoneen massakeskipisteen täytyy pysyä tietyissä rajoissa.

Lentokoneen suunnittelijat ovat määritelleet maksimipainon, joka perustuu siipien nostovoimaan tai joka voidaan tuottaa niissä olosuhteissa, joihin lentokone on suunniteltu. Lentokoneen rakenteen lujuus asettaa myös rajoituksensa maksimipainolle, jonka lentokone voi kantaa. Ideaali paikka massakeskiölle on hyvin varovaisesti määrätty suunnittelijoiden toimesta, ja suurin hyväksytty poikkeama tälle paikalle on laskettu.

Valmistajat määräävät lentokoneen käyttäjälle lentokoneen tyhjät painon ja lentokoneen tyhjät painon massakeskiön paikan silloin kun lentokone lähtee tehtaalta.

Insinööri joka pitää kunnossa lentokonetta ja tekee kunnossapitotarkistukset, tarkkailee myös painon ja tasapainon muutoksia ja kirjaa ylös kaikki muutokset, jotka ovat syntyneet korjauksista tai lisäyksistä.

Lentokoneen lentäjä on vastuussa jokaisella lennolla lennon kokonaispainosta ja painopisteen rajoista. Tämä sallii lentäjän määrittellä ennen lentoa tehtävissä tarkistuksissa, että lentokoneen kuorma on sallituissa rajoissa.

Paino ja tasapainon määrittelystä on tullut paljon vaikeampaa, kun sen vaikutukset ja mahdollisuudet lentokoneissa ja moottoreissa ovat kasvaneet.

Paino on yksi päänäkökohta lentokoneen rakenteissa ja käytössä, ja se riippuu kaikista lentäjistä ja osittain myös kunnossapitoinsinööristä. Liika paino heikentää lentokoneen suoritusta, ja varmuusraja on saavutettavissa. Lentokone on suunniteltava niin kevyeksi kuin vain rakenteen lujuuden puolesta on mahdollista, ja siivet on suunniteltava tukemaan suurinta sallittavaa kokonaispainoa. Lentokoneen painoa lisättäessä siipien täytyy aikaansaada lisää nostovoimaa, ja rakenteen täytyy tukea staattisen kuormituksen lisäksi myös dynaamista hyötykuormaa lentoliikkeissä. Esimerkiksi, lentokoneen painaessa 450 kg, lentokoneen siipien täytyy kantaa 450 kg suoraan lennettäessä, mutta kun lentokone kääntyy pehmeästi ja terävästi kallistuen noin 60 asteen kulmaan, dynaaminen kuormitus vaatii siiven kantavan noin 900 kg.

Staattisella kuormituksella tarkoitetaan kuormitusta, joka johtuu lentokoneen painosta ja kohdistuu lentokoneen rakenteisiin.

Dynaaminen kuormitus on lentokoneen todellinen paino kerrottuna kuormituskertoimella.

Liian rajut lentoliikkeet tai turbulenssi lennettäessä voivat aiheuttaa rakenteille niin suuret kuormitukset, että dynaaminen kuormitus voi rikkoa rakenteen. Rakenteen täytyy olla tavallisille lentokoneilla sen verran luja, että se kestää kuormituskertoimen 3.8 -kertaisesti oman painonsa.

Siiven aikaansaama nostovoima määräytyy sen siivenprofiilin muodosta, kohtauskulmasta, lentonopeudesta ja ilman tiheydestä. Lentokoneen noustessa ilmaan lentokentältä, jossa on suuri ilmantiheys, sen täytyy kiihdyttää nopeammin kuin lähtiessään lentoon merenpinnalta saadakseen aikaan nostovoiman päästä ilmaan. Tarvittava matka voi olla pitempi kuin käytössä oleva kiitorata.

Yleisimmät lentokoneet on suunniteltu niin, että jos kaikki istuimet ovat varattuja ja rahtila niin täynnä matkatavaroita kuin vain lentokoneen rakenne sallii ja polttoainetankit ovat täynnä, niin lentokone on karkeasti ylikuormattu. Tämän

tyyppinen suunnittelu antaa lentäjälle liikkumavaraa tietyille lennoille. Jos maksimilentomatkaa tarvitaan, matkustajat ja matkatavarat pitää jättää pois tai jos maksimimäärä lentorahtia täytyy viedä, on jätettävä pois polttoainetta, tai jätettävä matkustajia pois./3/

6.2 Vakavuuden ja tasapainon kontrollointi

Tasapainoa ohjaa massakeskipisteen sijainti lentokoneessa. Tämä on tärkeää lentokoneen vakavuudelle joka taas vaikuttaa lentoturvallisuuteen.

Massakeskipiste on piste, johon lentokoneen kokonaispainon oletetaan keskittyvän, ja massakeskipisteen täytyy sijoittua tiettyihin rajoihin. Pitkittäinen ja poikittainen tasapaino ovat tärkeitä, mutta päämielenkiinto on pitkittäistasapainossa.

Pitkittäisvakaus pidetään trimmin avulla niin, että massakeskipiste on hiukan nostovoiman pistettä edempänä. Tämä auttaa korjaamaan nokkaa alaspäin vetävän voiman, joka ei vaikuta lentonopeuteen. Tämä tasapainotetaan vaihtelevalla nokkaa ylös nostavalla voimalla, joka saadaan aikaan korkeusperäsimestä alaspäin vaikuttavalla aerodynaamisella voimalla joka vaihtelee ilman nopeuden mukana.

Ylöspäin vaikuttava ilma aiheuttaa nokan nousemista, jolloin lentokoneen nopeus laskee ja korkeusperäsimen alaspäin vaikuttava voima vähenee. Massakeskipisteeseen keskittynyt paino vetää nokan takaisin alas. Jos nokka laskeutuu alaspäin lennon aikana, ilmannopeus alkaa nousta, ja korkeusperäsimen lisääntynyt voima nostaa nokan uudelleen ylös.

Niin kauan kuin massakeskipistettä pidetään sallituissa painorajoissa, lentokoneella saavutetaan asiallinen vakavuus ja ohjattavuus. Kun massakeskipisteen ollessa liian takana, se on silloin liian lähellä nostovoiman pistettä, jolloin lentokone on epävakaa ja vaikea oikaista koneen sakatessa.

Massakeskipisteen ollessa liian edessä alaspäin vaikuttava pyrstön kuorman täytyy kasvaa, pystyäkseen pitämään oikea lentotaso. Kasvaneella pyrstön kuormalla on sama vaikutus kuin kuljettaisi lisäpainoa – lentokone lentää korkeammalla kohtauskulmalla ja vastus kasvaa.

Paljon vakavampia ongelmia aiheutuu, jos massakeskipiste on liian kaukana edessä, jolloin korkeusperäsini ei toimi kunnolla. Hitailta lähtönopeuksilla korkeusperäsini ei

tuota tarpeeksi nostovoimaa, jotta nokka nousisi ylös. Laskeutuminen ja nouseminen pitkittyvät, jos massakeskipiste on liian edessä.

Joillakin sotilaslentokoneilla suorituskyky kasvaa, kun niille annetaan neutraali pitkittäisvakavuus. Normaalisti tämä olisi hyvin vaarallinen tilanne, mutta sotilaslentokoneita lennetään autopilotilla, joka reagoi nopeammin kuin ihminen.

Peruslentokonesuunnittelussa oletetaan, että poikittainen symmetria on olemassa. Eli painoa lisättäessä lentokoneen keskilinjan vasemmalle puolelle on myös oikealle puolelle lisättävä vastaava määrä painoa.

Kallistustasapaino voi häiriintyä esimerkiksi epäsuhtaisella polttoaineen tankkauksella. Massakeskipisteen paikkaa kallistuksessa ei normaalisti lasketa lentokoneelle mutta lentäjän täytyy olla tietoinen vaikutuksista, jotka aiheuttavat kallistukseen epätasapainoa.

Tätä korjataan käyttämällä siivekkeen säätölaippaa, kunnes polttoainetta on kulunut tarpeeksi raskaammalta puolelta lentokonetta. Taipunut säätölaippa taivuttaa siivekettä lisäämään nostovoimaa lentokoneen raskaammalta puolelta. Tämä myös tuottaa lisääntyntä vastusta, ja lentokone lentää huonosti.

Lentokoneet, joissa on nuolikulmaiset siivet, ovat paljon kriittisempiä polttoaineen epätasapainolle. Jos polttoainetta käytetään ulommista tankeista, massakeskipiste siirtyy eteenpäin, ja jos sitä käytetään sisemmistä tankeista, massakeskipiste siirtyy taaksepäin. Tästä syystä polttoaineen- käytön suunnittelu on tärkeää suihkumoottori lentokoneilla lennettäessä.

Lentokone voi toimia turvallisesti ja saavuttaa suunnitellun tehokkuutensa vain, jos sillä toimitaan ja se pidetään kunnossa niin kuin suunnittelijat ovat tarkoittaneet./3/

7. SUUNNITTELUN PIIRTEET

Lennettäessä useita erilaisia lentokoneita on huomioitava, että jokainen lentokone käyttäytyy eri lailla, koska jokainen lentokone vastustaa ohjainvoimia tai vastaa niihin omalla tyylillään. Harjoituskone on nopea vastaamaan ohjaukseen kun taas rahtikone yleensä tuntuu raskaalta ohjata, ja ohjainvoimat tuntuvat paljon raskaammalta. Nämä ominaispiirteet voidaan suunnitella erikseen jokaiselle lentokoneelle, jotta lentokone vastaisi tarkoitustaan ja olisi vakaa ja helppo ohjata. Peruseroavaisuudet vakauden, liikehtimiskyvyn ja ohjattavuuden välillä ovat:

- Vakavuus – lentokoneen luonteenpiirre korjata olosuhteet, jotka voivat häiritä sen tasapainoa ja kykyä palata tai jatkaa sen alkuperäisellä lentosuunnalla. On lentokoneelle suunniteltu ominaisuus.
- Liikehtimiskyky – Lentokoneen ominaisuus, joka sallii lentokoneen liikehtiä helposti ja kestää jännitykset jotka pakottavat koneen liikehtimään. Liikehtimiskykyyn vaikuttavat lentokoneen paino, massa, koko ja koneen ohjaimien, rakenteen lujuuden ja moottorien sijainti. Otetaan huomioon lentokonetta suunniteltaessa.
- Ohjattavuus – Lentokoneen kyky vastata lentäjän ohjaukseen, erityisesti lentosuuntaan ja korkeuteen. Se on lentokoneen ominaispiirre vastata lentäjän ohjaukseen kun kone liikehtii, riippumatta koneen vakavuus-ominaisuuksista./2/

8. OHJAUS

Lentokoneen ohjaus on jaoteltu ensisijaisiin ja toissijaisiin ohjausjärjestelmiin. Ensisijainen ohjausjärjestelmä pitää sisällään ne järjestelmät, joita tarvitaan lentokoneen turvalliseen ohjaukseen. Tähän sisältyvät sellaiset kuin siivekkeet, korkeusperäsin ja sivuperäsin. Toissijaisten ohjausjärjestelmien tarkoituksena on parantaa lentokoneen suorituskykyä tai keventää lentäjän kohtuuttomia ohjainvoimia.

Toissijaisia ohjausjärjestelmiä ovat trimmi ja laskusiivekkeet.

Lentokoneen ohjausjärjestelmät on suunniteltu antamaan pilotille luonnollisen tunteisen ja samalla asiallisen herkän ohjauslaitteen. Hitaalla lentonopeudella ohjaus yleensä tuntuu laiskalta ja pehmeältä, suurilla nopeuksilla ohjaus tuntuu paljon nopeammalta ja jämerältä. Minkä tahansa kolmen ensisijaisen ohjauspinnan asennon muuttuminen muuttaa ilmavirtaa ja paineen esiintymisaluetta. Nämä muutokset vaikuttavat ohjauspintojen aikaan saamaan nostovoiman ja vastuksen yhdistelmään, ja tämä sallii koneen ohjaajan liikutella konetta kaikkien kolmen akselin ympäri.

Lentokoneen suunnittelun yksityiskohdat rajoittavat ohjauspintojen taipumaa. Esimerkiksi ohjauksen rajoitinmekanismi voi olla liitetty ohjaimiin, tai ohjaussauvan

liikkumista on rajoitettu. Tämän tarkoituksena on estää ohjaajaa vahingossa yliohjaamasta tai yllirasittamasta konetta tehdessään normaaleita lentoliikkeitä.

Ohjauksen tehtävä on pitää lentokone tasapainossa kaikissa lentotiloissa. Ohjauksen avulla on myös saatava aikaan tarpeeksi suuria momenteja, jotta koneella liikehtiminen olisi mahdollista. Tästä on seurauksena se, että ohjauksen tulisi olla tarpeeksi tehokas, jotta koneen liikehtiminen olisi mahdollista. Ohjausta suunniteltaessa tulisi välttää liian suuria vakautinpintoja, koska ne samalla toimivat lisäpainona ja lisäävät vastusta, joka taas tarkoittaa lisääntynyttä polttoaineen kulutusta. Ohjainpintoja Eurostarissa ovat korkeusperäsin, sivuperäsin ja kallistussiivekkeet. Joskus korkeusperäsimenä käytetään myös kiinteätä kokonaan liikkuvaa vakautinta. Kallistusohjaukseen käytetään spoilereita, jotka aiheuttavat lentokoneelle konetta kääntävän suuntamomentin. Normaaleilla kallistussiivekkeillä kallistusmomentti syntyy yleensä luonnottomasti päinvastaisiin suuntiin. Kallistussiivekkeet aiheuttavat vain liikettä aiheuttavan momentin. Korkeus- ja sivuperäsimintä käytetään erilaisten tasapainotilojen aikaansaamiseksi. Ultrakevyissä lentokoneissa on yleensä suora mekaaninen yhteys ohjaussauvasta työntötankojen välityksellä ohjainpintoihin./5/

8.1 Ohjaussiivekkeet

Siivekkeillä ohjataan lentokonetta korkeussuunnassa. Siivekkeet on liitetty siiven johtoreunan ulkoreunaan ja ne liikkuvat päinvastaisiin suuntiin. Siivekkeet on yleensä liitetty vajjereilla, kulmavivuilla tai työntötangoilla toisiinsa ja ohjaussauvaan. Ohjaussauvan liikuttaminen oikealle aiheuttaa sen, että oikea siiveke taipuu ylöspäin ja vasen siiveke taipuu alaspäin. Ylöspäin taipunut siiveke vähentää kallistuskulmaa, mikä vähentää oikean siiven nostovoimaa, ja vastaavasti alaspäin taipunut vasen siiveke lisää kallistuskulmaa, jolloin se vastaavasti lisää nostovoimaa. Tästä seurauksena lisääntynyt nostovoima vasemmassa siivessä ja vähentynyt nostovoima oikeassa siivessä aiheuttavat lentokoneen kallistumisen oikealle.

Alaspäin taipunut siiveke aiheuttaa lisääntyntä nostovoimaa. Se aiheuttaa myös lisääntyntä ilmanvastusta. Lisääntynyt ilmanvastus yrittää muuttaa lentokoneen nokan suuntaa ylös nousseen siiven suuntaan; tätä kutsutaan haitalliseksi suunnan muutokseksi. Peräsintä käytetään vastustamaan tätä suunnan muutosta, ja koska peräsinohjaus vaatii hitaan ilmannopeuden, suuren kohtauskulman ja suuren siivekkeen taipuman.

Kaikki käännökset tapahtuvat siivekkeiden, peräsimen ja korkeusperäsimen yhteistyönä. Siivekkeen oikea paine on tarpeellinen, jotta saadaan lentokone oikeaan kallistuskulmaan, kun samaan aikaan peräsimeen kohdistunut paine vasta vaikuttaa suunnan muutoksen tuloksena. Käännöksen aikana kohtauskulmaa täytyy nostaa johtuen korkeusperäsimen hakemisesta paineessa, koska nostovoimaa tarvitaan lisää enemmän kuin suoraan lennettäessä. Mitä jyrkempi käännös sitä, enemmän tarvitaan peräsimen aikaansaamaa painetta. Kun haluttu kallistuskulma on saavutettu, siivekkeiden ja peräsimen paineen pitäisi rauhoittua, ja tämä lopettaa kallistumiskulman kasvamisen, koska siivekkeiden ja peräsimen ohjauspinnat ovat neutraalit virtaviivaisessa asennossaan. Peräsimen paineen tulee pysyä vakiona pitääkseen korkeuden oikeana./2/

8.2 Peräsin

Peräsin ohjaa lentokoneessa pystyakselia, tätä liikettä kutsutaan suunnan muutokseksi. Kuten muutkin ensisijaiset ohjausjärjestelmät, peräsin on liikuteltava pinta joka on saranoituna kiinteään pintaan, tässä tapauksessa sivuvakaimeen tai evään. Peräsintä ohjataan liikuttamalla vasenta tai oikeaa poljinta. Kun peräsin vaikuttaa ilmavirtaan, vaakasuora voima pakottaa vastakkaiseen suuntaan. Poljinta painamalla peräsin liikkuu vasemmalle. Tämä muuttaa ilmavirtaa peräsimen tai vakaimen ympärillä ja samalla syntyy sivuttainen nostovoima joka liikuttaa pyrstöä oikealle, ja koneen nokka kääntyy vasemmalle. Peräsimen käyttö lisää nopeutta, joten suuret poikkeamat hitailla nopeuksilla ja pienet poikkeamat suurilla nopeuksilla voivat auttaa aikaansaamaan toivotun reaktion. Potkurikoneilla potkurin ilmavirta korostaa peräsimen toimintaa./2/

8.3 Korkeusperäsin

Korkeusperäsimellä ohjataan pituusakselia. Korkeusperäsintä ohjataan mekaanisesti ohjaussauvalla, lentokoneen perän liikkeitä ohjataan korkeusperäsimen ohjainpinnoilla. Ohjaussauvasta vedettäessä taakse korkeusperäsimen ohjaussiivekkeiden kulma pienenee ja aiheuttaa alaspäin suuntautuvan aerodynaamisen voiman, joka on suurempi kuin normaalisti alaspäin peräsimestä alaspäin suuntautuva voima joka on olemassa normaali lentoa lennettäessä. Tämän voiman vaikutuksena koneen perä liikkuu alaspäin ja keula ylöspäin. Pituusmomentti esiintyy suurin piirtein koneen painopisteen kohdalla. Pituusmomentin voima on määrätty olemaan tietyn välimatkan päässä painopisteen ja korkeusvakaimen ohjauspinnan välillä.

Ohjaussauvan eteenpäin liikuttamisella on päinvastainen vaikutus. Tässä tapauksessa korkeusperäsimen kulma kasvaa ja aikaansaa enemmän nostovoimaa korkeusperäsimessä. Tällöin lentokoneen perä liikkuu ylös, ja nokka painuu alaspäin. Momentti vaikuttaa koneen painopisteessä./2/

9. OHJAUSJÄRJESTELMÄT

Keveissä ja hitaasti lentävissä koneissa, kuten Eurostar, käytetään tavallisesti suoraa mekaanista yhteyttä ohjaussauvasta. Ohjainvoimat määräytyvät ohjainpintoihin kohdistuvista saranamomenteista ja mekaanisista välityssuhteista.

Lentokoneen koon ja muodon kasvaessa ohjainvoimat myös kasvavat. Tällöin ei mekaaninen ohjausjärjestelmä enää riitä, vaan on otettava käyttöön tehostettu ohjausjärjestelmä. Yleensä hydraulisylinteri toimii ohjaajan apuna.

Kolmannessa ohjainjärjestelmässä ohjaaja ohjaa ohjainpintoja liikuttelevia servolaitteita. Nämä voivat olla joko hydraulisia, pneumaattisia tai sähköisiä. Näissä ohjaimissa saranamomentit eivät välity ohjaimiin, vaan ohjaintuntuma on saatava aikaan keinotekoisesti.

Ylisoonisissa lentokoneissa apuvoimalaiteet ovat pitkittäisohjauksessa välttämättömiä. Kun siirrytään alisoonisesta ylisooniseen lentoon, koneen neutraalipiste siirtyy myös

taaksepäin. Ohjainvoimat riippuvat painopisteen ja neutraalipisteen välisestä etäisyydestä, ilman apulaitteita kone olisi liian raskas lentää.

Oli sitten ohjausjärjestelmä millainen hyvänsä, on jokaisen ohjaimen liikuttava helposti, tasaisesti ja luotettavasti. Aerodynaamisten pintojen ohjausjärjestelmä on myös varustettava rajoittimilla, jotka rajoittavat liikkumisaluetta ja näiden rajoittimien tulee kestää kuormat, joille järjestelmä on suunniteltu. Ohjausjärjestelmä on suunniteltu niin, ettei järjestelmässä tapahdu takertelua kuormien, matkustajien, vieraiden esineiden tai kosteuden jääytymisen osalta. Eurostarissa ohjainvaijerit ja työntötangot kulkevat sen verran kaukana toisistaan, etteivät ne pääse hankaamaan tai hakkaamaan lentokoneen muita osia, läpiviennit on suojattu suojakumeilla. Virheellinen asentaminen voidaan estää merkitsemällä työntötangon päät eri väreillä. Vieraiden esineiden pääsy ohjaamosta ohjausjärjestelmään on myös estettävä tarpeellisin keinoin./5/

9.1 Ohjainjärjestelmien kuormat

Ultrakevyiden lentokoneiden tarkastuskäsikirjan mukaan ohjausjärjestelmän on kestettävä ohjaajan aikaansaamat kuormat mekaanisiin rajoittimiin saakka, kuormat ovat:

- Käsiohjainliike eteenpäin/taaksepäin 350N – korkeusperäsin, laskusiiveke
- Käsiohjainliike sivuille 200N – ohjaussiivekkeet
- Polkimet erikseen 900N – sivuperäsin

Ohjainpintojen ja rajoittimien välisten ohjainjärjestelmien osien on kestettävä kuormitusta joka on 125 % liikkuvien ohjainpintojen lasketuista saranamomenteista. Saranamomenttiin vaikuttavat kohtauskulma, peräsinkulma, kineettinen paine kuten kaikissa lentokoneisiin liittyvissä laskuissa. Myös peräsimen pinta-ala ja muoto vaikuttavat asiaan kuten myös saranamomentti. Saranamomentti on usein keveissä ja hitaasti lentävissä koneissa suoraan verrannollinen ohjausvoimiin.

Laskettaessa arvoja käytetään luotettavia aerodynaamisia tietoja. Turvallisuuden takia kuormat ei saa missään tapauksessa alittaa 60 % ohjaajan aikaansaamista kuormista.

Silloin sauvavoima tulee liian pieneksi, ja koneen ohjaaja voi vahingossa ylittää sallitun kuormituskertoimen 4 g. Ohjainjärjestelmän rakenne ei salli suurta joustavuutta, koska se voi vaikuttaa haitallisesti lento-ominaisuuksiin suurimmilla sallituilla kuormilla. Eurostarissa on takarajoitin, joka estää lentokoneen ohjaajaa vetämästä ohjaussauvaa liian taakse ja joka ottaa vastaan ohjaajan aikaansaaman voiman. Takarajoitin on kiinnitetty ohjaussauvan rungon takana olevaan palkkiin. Rajoitin kiinnitetty yhdessä istuintuen kanssa palkkiin 8 niitillä. Liiallisia käsiohjainvoimia sivulle vedettäessä Eurostarin ohjausjärjestelmässä on estämässä ohjaussauvassa sijaitseva lukitusruuvi./6/

9.2 Ohjainvoimat

Ohjainvoimien tulee olla oikean suuruisia ja suuntaisia. Kun ohjaussauvasta väännetään vasemmalle, koneen pitää kääntyä haluttuun suuntaan. Ohjainvoimat koostuvat koneen koosta, painosta, painopisteen paikasta, ohjainpintojen geometriasta ja välityksestä ohjaimiin sekä lentotilanteesta. Ohjaaja ei pysty lentämään jatkuvalla sauvavoimalla, joten se on nollattava tasapainoa vastaavalla peräsinkulmalla. Tavallisimmin saranamomentti nollataan trimmin avulla. Toinen keino on käyttää sauvassa säädettävää joustaa.

Koneen liikehtimiseen tarvittavia sauvavoimia kuvataan suurella g. Määritelmän mukaan g, on ylösvetokaaren alimmassa pisteessä vaadittu sauvavoima jaettuna kiihtyvyyssmomenttikerralla. Koneen ohjaimet säädetään niin, että, lennettäessä vaakalentoa ohjainvoimat olisi nolla. Sauvavoima g:n ollessa liian pieni voi koneen ohjaaja tarkoituksettomasti ylittää sallitun kuormituskertoimen, mutta jos g on liiansuuri, on kone raskas lentää. Lentokoneeseen kohdistuvat voimat ovat suurimmillaan, kun konetta oikaistaan syöksystä./5/

10. EUROSTAR TYÖNTÖTANKO OHJAUKSEN ASENNUS

Työ aloitettiin liittämällä ohjaussauvat ohjaussauvojen runkoon kiinni ruuveilla ja muttereilla, (kuva 8) mutterit lukittiin paikoilleen vielä varmistussokilla. Tällä

pyritään varmistamaan, etteivät ruuvit pääse aukeamaan missään vaiheessa. Ennen sokkien paikoilleen laittoa muttereita kiristettiin sen verran, ettei ohjaussauva päässyt vapaasti liikkumaan. Muttereita ei kiristetty momenttiin, mikä herättää hieman ihmetystä, koska silloin ohjaussauvan liike tulisi kaikissa Eurostarin koneissa yhtä jäykäksi, ja mutterit ja ruuvit samaan tiukkuuteen. Ohjaussauvan rungon sisälle asennettiin tanko, johon liitetään lentokoneen siivistä tulevat työntötangot, joilla ohjataan lentokoneen siivissä olevia ohjainpintoja.



Kuva 8. Ohjaussauvan runko, johon kiinnitetty ohjaussauvat ja siivekkeitä ohjaavat työntötangot.

Siivistä tulevat kolme työntösauvaa ja ohjaussauvan rungon sisällä oleva sauva yhdistetään ohjaussauvaan ruuvilla, mutteri kiinnitetään kevyesti ja lukitaan paikoilleen varmistussokalla. Ohjaussauvan sisällä olevan tangon päässä on laakerisilmukka, joka toimii samalla nivelenä, samanlainen laakeri on myös siivestä tulevassa työntötangossa. Ohjaussauvan runkoa kiinnitettäessä koneeseen tuli ilmi, että laakeripintana toimiva alumiini oli huonosti työstetty, alumiinin reunassa tuntui selvästi purseita eikä alumiininen tuki istunut kunnolla ohjaussauvan runkoa vasten (kuva 9).



Kuva 9. Alumiinisten laakeripintojen sovitusta ohjaussauvan runkoon.

Purseita hiottiin pois hiekkapaperilla, jolloin huomattiin alumiini tuessa olevan pieni reunaetäisyys kiinnitysreiän ja laakeripintana toimivan alumiinin välillä. Tämä aiheutti sen, ettei alumiinia enää uskaltanut hio tasaisemmiksi. Kiinnitysreiät oli ilmeisesti porattu summittaisesti alumiinista lävitse. Alumiinisten laakeripintojen leveyttä lisäämällä olisi saatu aikaan suurempi reunaetäisyys.

Muutenkin alumiinipalojen koneistusjäljet olivat hyvin surullista katseltavaa.

Kun ohjaus asennettiin paikoilleen, ei ohjaus liikkunut kunnolla, vaan nykäyksittäin ja tuntui hyvin jäykältä. Ongelman korjasimme laittamalla ohuet metallipalat (0,2 mm) alumiinisten tukien väliin, jolloin ohjaus muuttui nöyremmäksi. Tämän ongelma olisi voinut estää jo alun perin jos valmistusvaiheessa alumiinipalat olisi sorvattu noin 0,2 mm alkuperäistä halkaisijaa suuremmaksi.

Tässä vaiheessa huomattiin myös olevan työpiirustusten ja työohjeiden välillä olevan eroa. Ohjausta rakennettaessa työohje ei kertonut mitään prikoista, joita kuului asentaa muttereiden alle. Piirustuksiin oli selkeästi piirretty myös prikat tai ohjaussauvan puslat, joiden paikka löytyi vasta työpiirustuksista. Työohjeet olivat jatkuvasti hiukan epätarkat, joten työryhmä joutui keskustelemaan ja improvisoimaan saadakseen aikaan tyydyttävän ratkaisun./4/

10.1 Työntötankojen ja vipuvarsien asennus

Työ aloitettiin asentamalla kaksi vipuvartta koneen runkoon kiinni. Näihin vipuvarsiin asennettiin ohjaussauvalta tulevat korkeusperäsimen ohjaukseen tarvittavat työntösauvat. Ensiksi asennettiin sauva, joka kiinnitettiin toisesta päästä ohjaussauvan runkoon kiinni ja toinen pää vipuvarteen. Korkeusperäsimen ohjaukseen tarvittiin 3 työntötankoa ja 2 vipuvartta. Tangot ovat aika paksuja (30 mm). Siten pyritään ehkäisemään tangon nurjahtaminen ohjainvoimien vaikutuksesta, suurin rasitus kohdistuu kuitenkin tankojen liitosniveliin. Ohjainjärjestelmä on varustettu työntötangoilla ja työntötankojen nivelien lujuuslaskuissa JAR 23.693:n mukaan käytetään varmuuskerrointa 3,33 pehmeimmän käytetyn laakeriaineen mukaan. Eurostarin siivessä on kaksi työntötankoa, joilla ohjataan siivessä olevia siivekkeitä. Ensimmäinen työntötanko, joka on kiinnitetty nivellä ohjaussauvaan on halkaisijaltaan 25 mm ja se on 2314 mm pitkä. Tähän tankoon yhdistetään siivekkeitä ohjaava tanko, joka on halkaisijaltaan 16 mm ja pituudeltaan 712 mm. Siivessä näitä kahta tankoa liitetään toisiinsa vivulla, joka on niitattu siipi salkoon kiinni, tangot kiinnitettiin ruuvilla ja mutterilla vipuun kiinni ja varmistettiin sokilla.(kuva 10)



Kuva 10. Siivessä sijaitseva vipu, johon kiinnitetty työntötanko.

Siivekkeeseen niittaamalla kiinnitettyyn korvakkeeseen kiinnitettiin lyhyempi työntötanko kiinni ruuveilla ja muttereilla, ja varmistettiin ruuvien kiinni pysyminen

sokalla. Siiven ja rungon välisten työntötankojen kiinnitys hoidettiin samalla tavalla. Siipien työntötankojen nurjahdusvoima on laskettu Eulerin II kaavan mukaan. Ennen siipien nurjahdusvoiman laskemista laskettiin siipien työntötankojen neliömomentti I_y , jota tarvittiin laskujen myöhemmässä vaiheessa.

$$I_y = \frac{\pi d^4}{64}$$

(Yhtälö 1. ympyrän neliömomentti)

Nurjahdusvoima F_n laskettiin $\phi 16$ mm työntötangolle käyttämällä Eulerin II kaavaa.

$$F_n = \frac{\pi^2 EI}{I^2}$$

(Yhtälö 2. Euler II)

Taulukkoon 1. on koottu rungon työntötankojen nurjahdusvoimat ja neliömomentit

Taulukko 1. Rungossa sijaitsevien nurjahdusvoimat, neliömomentit.

Halkaisija mm	Pinta-ala mm ²	Pituus mm	Neliömomentti mm ⁴	Nurjahdusvoima N/m ²
$\phi 18$	254	723	5152,9	$681 \cdot 10^6$
$\phi 30$	706	1486	39760,7	$1243 \cdot 10^6$
$\phi 30$	706	1486	39760,7	$1243 \cdot 10^6$

Siivissä olevien työntötankojen nurjahdusvoimat ja neliömomentit koottu taulukkoon 2.

Taulukko 2. Siivissä sijaitsevien tankojen nurjahdusvoimat ja neliömomentit

Halkaisija mm	Pinta-ala mm ²	Pituus mm	Neliömomentti mm ⁴	Nurjahdusvoima N/m ²
$\phi 16$	201	291	3216,9	$262 \cdot 10^6$
$\phi 16$	201	712	3216,9	$438 \cdot 10^6$
$\phi 25$	491	2314	19174,7	$2473 \cdot 10^6$

10.2 Työntötankojen varmuusluku

Varmuusluvulla pyritään ottamaan huomioon epävarmuustekijät, joiden tarkka huomioon ottaminen on mahdotonta. Tällaisia ovat mm. kuormituksiin kohdistuvat epävarmuudet kuten rakenteen painon, koon tai hinnan erityinen tärkeys. Lentokoneiden suunnittelussa käytetyt varmuusluvut ovat yleensä pieniä. Lentokoneiden rakenteissa käytetään kuitenkin tarkkoja laskentamenetelmiä jolloin epävarmuustekijät pyritään minimoimaan tarkalla materiaalien ja valmistuksen valvonnalla sekä rakenteiden määräaikaistarkastuksilla. Ilmailumääräykset myös määrittelevät joillekin lentokonerakenteille varmuusluvut, yleisin varmuusluku lentokonerakenteille JAR 23.303 mukaan on 1.5 jos toisin ei määrätä.

Työntötankoja tarkasteltaessa on otettava huomioon rajakuormat, joita työntötankojen on kestävä ilman pysyvää muodon muutosta. Ilmailumääräys JAR 23.301:n mukaan rakenteiden on kestävä suurimmat odotettavat kuormat eli ns. rajakuormat.

Rajakuorma on suurin mahdollinen kuorma joka voi ilmetä lentokoneen käytön aikana; tässä tapauksessa 350 N tai 200 N riippuen siitä, mihin suuntaan koneen lentäjä ohjaussauvaa työntää.

Murtokuorma on rajakuorma kerrottuna varmuusluvulla; työntötankojen mitoituksessa käytetyt varmuusluvut voidaan selvittää jakamalla murtokuorma rajakuormalla.

Mitoituksessa käytetty varmuusluku n määritetään kriittisen jännityksen σ_{kr} suhteena suurimpaan laskettuun rakenteessa esiintyvään jännitykseen σ_{sall} (yhtälö 4).

$$n = \frac{\sigma_{kr}}{\sigma_{sall}}$$

yhtälö 4. Varmuusluku n määrittäminen

Taulukkoon 3. ja 4. on koottu varmuuslukua laskettaessa käytettyjä tietoja ja varmuusluku n . Varmuuslukua laskettaessa määritettiin ensin taivutusvastus W jokaiselle työntötangolle yhtälöllä 5.

$$W = \frac{\pi d^3}{32}$$

Yhtälö 5. Taivutusvastus

Varmuuslukua laskettaessa oletetaan, että työntötangossa tapahtuu nurjahdusta, jolloin tangon keskikohdalle syntyy momenttia kun tanko taipuu. Momentti laskettiin käyttämällä ohjaajan aikaansaamaa maksimivoimaa jonka ohjausjärjestelmä sallii rajoittimeen asti, ja kertomalla sen taivutusvastuksella. Suurin sallittu taivutusjännitys $\sigma_{t \max}$ laskettiin yhtälöllä 6.

$$\sigma_{t \max} = \frac{M_t}{W}$$

Yhtälö 6. Taivutusjännitys

Varmuuskulku n laskettiin yhtälöllä 4. jossa kriittisenä jännityksenä σ_{kr} käytettiin yhtälöstä 6. saatua arvoa. Sallittuna jännityksenä σ_{sall} käytettiin suurinta sallittua jännitystä, jonka lentokoneen ohjaaja voi aiheuttaa ohjausjärjestelmään eli rungossa sijaitseviin työntötankoihin σ_{sall} on 350N ja siipien työntötangoissa σ_{sall} on 200N.

Taulukkoon 3. ja 4. on koottu laskuissa saadut tulokset ja työntötankojen varmuusluvut.

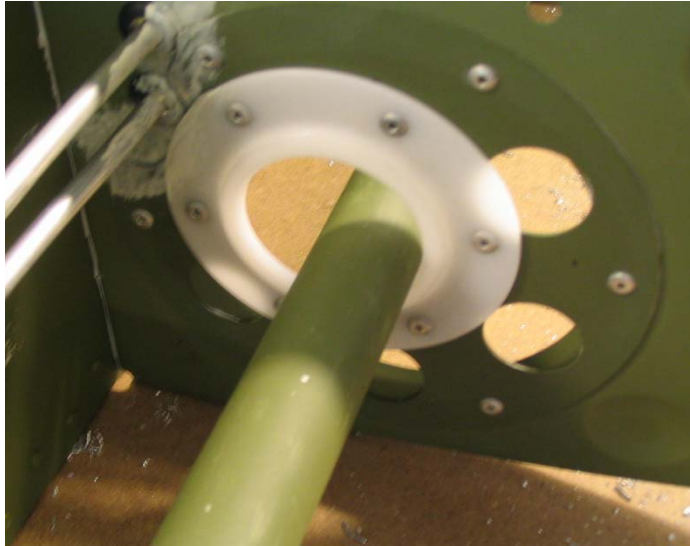
Taulukko 3. Siiven työntötankojen varmuusluku

Halkaisija mm	Pinta-ala mm ²	Pituus mm	Momentti M _t	Taivutusvastus mm	Taivutusjännitys N	Varmuusluku n
φ16	201	291	29,1	402,1	73	0,36
φ16	201	291	29,1	402,1	73	0,36
φ25	491	2314	231,4	1533,9	150	0,75

Taulukko 4. Rungon työntötankojen varmuusluku

Halkaisija mm	Pinta-ala mm ²	Pituus mm	Momentti Nm	Taivutusvastus mm	Taivutusjännitys N	Varmuusluku n
φ18	254	723	126,5	572,5	220	0,62
φ30	706	1486	260	2650,7	98	0,28
φ30	706	1486	260	2650,7	98	0,28

Eurostarin siipien siipikaariin on niittaamalla asennettu muovinen rajoitin, jonka tehtävänä on estää työntötankojen liiallinen nurjahtaminen ja toimia samalla ohjaimena (kuva 11).



Kuva 11. Siiven kaaressa oleva rajoitin, joka estää liiallista nurjahtamista

Eurostarin kääntyessä siivekkeet liikkuvat ylös tai alaspäin, jolloin niihin kohdistuva nostovoima rasittaa siivessä olevaa 712 mm työntötankoa eniten aiheuttamalla tankoon vääntöä ja vetoa, joten sauva joutuu olemaan todella kovalle rasitukselle.

Työntötanko ohjaus kestää hyvin voimia joita siihen kohdistuu ohjainpintojen ja lentäjän kautta. Työntötanko-ohjaus on rakenteeltaan hyvin yksinkertainen ja hyvin luotettava rakenteeltaan josta ei juuri heikkoa lenkkiä löydy.

11.3 Työntötanko-ohjauksen säätö

Työntötankojen pituutta voidaan säätää löysäämällä työntötankojen päässä olevaa säätöruuvia, jolloin työntötangon päätä pyörittämällä voidaan työntötankoa pidentää tai lyhentää.

Lentokoneen ohjauksen säätäminen aloitettiin avaamalla molemmat säätöruuvit, jotka toimivat siivekkeiden ja korkeusperäsimen rajoittimina ohjauksen ohjaussauvan rungosta. Korkeusperäsin ja molemmat siivekkeet asennetaan neutraaliin asentoon ja tarkistetaan, että ohjaussauvat ovat pystysuorassa. Ohjaussauvat voidaan suoristaa avaamalla ohjaussauvan rungon sisällä olevan työntötangon säätöruuvit, mitkä jälkeen löysätään alumiiniset tuet ja käännetään ohjaussauvat oikeaan asentoon. Myös vastamutterin kiinnitys pitää muistaa tarkastaa, ettei se ole päässyt aukeamaan.

Toisessa vaiheessa korkeusperäsin säädetään 20 astetta alaspäin, kun tämä vaihe on tehty, asetetaan ohjaussauvan runko koskettamaan välisiipeä, jolloin korkeusperäsin on 25 astetta ylöspäin taipuneena

Käännetään siivekkeet vasemmalle 20 astetta, muutetaan niiden asentoa, säädetään rajoitin koskettamaan ohjaussauvaa ja kiristetään vasta mutteri. Siivekkeet käännetään seuraavaksi oikealle 20 astetta ja tehdään samat toimenpide uudestaan.

Korkeusperäsimen ja siivekkeiden kulmat voidaan säätää tarkasti asentamalla korkeusperäsimeen kiinni astelevy joka näyttää nolla astetta kun peräsin on neutraalissa asennossa (kuva 12).



Kuva 12. Korkeusperäsimen asteiden säädössä tarvittava astemitta

Korkeusperäsimen asteet on $25^{\circ} \pm 1^{\circ}$ ylöspäin ja $20^{\circ} \pm 1^{\circ}$ alaspäin. Siivekkeiden asteet on $20^{\circ} \pm 1^{\circ}$ ylöspäin ja $15^{\circ} \pm 1^{\circ}$ alaspäin.

Säätöjä tehdessä ohjaussauvan täytyy olla 50 mm:n etäisyydellä kojetaulusta ja korkeusperäsimen kulman oltava 20° alaspäin. Siivekkeitä säädettäessä ohjaussauvan ja siivekkeiden on oltava neutraalissa asennossa./4/

12. VIRHETARKASTELU

Virhetarkastelu työntötangon nurjahdusvoimalle F_n , Nurjahdusvoimaa laskettaessa π ja kimmokerroin E eivät aiheuta virhettä, joten ainoat suureet, jotka voivat aiheuttaa virhettä ovat neliömomentti ja työntötangon pituus, jolle työpiirustukset antoivat mittatoleranssia $\pm 5\text{mm}$.

$$\frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta l}{l} = \Delta F_n$$

Yhtälö 6. Virhetarkastelun kaava

Taulukko 5. Rungon työntötangon virhetarkastelu

Halkaisija mm	Pituus mm	Nurjahdusvoima N/m^2	Neliömomentti mm^4	Virhe \pm
$\phi 18$	723	$681 \cdot 10^6$	5152,9	0,07
$\phi 30$	1486	$1243 \cdot 10^6$	39760,7	0,003
$\phi 30$	1486	$1243 \cdot 10^6$	39760,7	0,009

Taulukko 6. siiven työntötangon virhetarkastelu

Halkaisija mm	Pituus mm	Nurjahdusvoima N/m^2	Neliömomentti mm^4	Virhe \pm
$\phi 16$	291	$262 \cdot 10^6$	3216,9	0,07
$\phi 16$	712	$438 \cdot 10^6$	3216,9	0,008
$\phi 25$	2314	$2473 \cdot 10^6$	19174,7	0,018

Virhetarkastelun perusteella voidaan todeta, ettei nurjahdusvoimien laskennassa ole juuri tapahtunut virhettä.

Näiden tulosten valossa voimme havaita, että ohjauksessa käytettävät työntösauvat kestävät hyvin lentokoneen ohjaajan aiheuttamat voimat.

Ilmailumääräys JAR 23.395:n ja suomalaisten ultrakevyiden tarkastuskäsikirjan mukaan ohjainpintojen ja rajoittimen välisten osien on kestettävä kuormia jotka ovat 125 % liikkuvien ohjainpintojen saranamomenteista. Eurostar on kuitenkin tyyppihyväksymätön ultrakevyt lentokone jolloin kaikki turvallisuusnäkökulmat on otettu huomioon jo konetta suunniteltaessa.

13. OMAT POHDINNAT TYÖSTÄ

Eurostarin työohje antaa yksityiskohtaiset ohjeet eri työvaiheille. Joissakin kohdissa on kuitenkin havaittavissa pientä epäloogisuutta ja huolimattomuutta, kuten ohje jossa neuvotaan poraamaan reikä ensin 4,2 mm:n poralla, jonka jälkeen reikä porataan oikeaan kokoon 3,2 mm:n poralla.

Konetta rakennettaessa työohjeiden mukaan kannatti yleensä lukea huolellisesti läpi koko työohje. Esimerkiksi, työvaiheessa 3 pyydetään kiinnittämään osa, mutta ohje ei kerro, että kyseinen osa pitää kiinnittää toisen osan kanssa yhtä aikaa. Tämä saatetaan kertoa ohjeissa vasta myöhemmässä vaiheessa, että osa pitäisi kiinnittää toiseen osaan. Helpompaa olisi tietysti kiinnittää osat toisiinsa jo ensimmäisen työvaiheen aikana ja kiinnittää osakokonaisuus yhtenä pakettina paikoilleen.

Eurostarin rakentaminen oli alusta alkaen hyvin kunnianhimoinen projekti jonka suunnittelussa ja projektia aloitettaessa ei ehkä ollut tarpeeksi tietämystä siitä minkälaiseksi projekti ajansaatossa muodostuu ja minkälainen projekti tulee todellisuudessa olemaan, ainoastaan vain hyviä arvauksia.

Oma osuuteni tässä projektissa oli toimia ryhmänjohtajana ryhmässä, joka rakensi Eurostarin työntötangoilla toimivan ohjauksen ja lisäksi tein samalla lopputyötä joka tutkii lentokoneen vakauden, painon ja ohjauksen yhteyttä.

Itse ohjauksen rakentaminen oli yksinkertainen mutta mielenkiintoinen projekti. Lopputyöni osoittautui myös mielenkiintoiseksi, samalla tuli pohdittua paino ja tasapainon välistä yhteyttä, ja sen vaikutusta lentokoneen ohjaukseen. Kuinka lentokonetta kuormatessa painopiste muuttuu ja sen vaikutus ohjaukseen ja painopisteen siirtymisen vaikutusta lentokoneen vakauteen.

Loppujen lopuksi Eurostarin rakentaminen oli hyvin mielenkiintoinen projekti, joka antoi hyvin käytännön harjoittelua lentokoneen rakenteista ja eri järjestelmien toiminnasta. Projekti tuki myös hyvin lentokoneiden rakenteista saatua teoriaopetusta. Toivottavasti lentokone saa paljon lentotuntia vuosien varrella

14. LÄHDELUETTELO

PAINETUT LÄHTEET

- 1 Ilmailumääräys JAR 23.179
- 2 Pilot's Handbook Aeronautical Knowledge.
(FAA-H-8083-25) Federal Aviation Administration, 2003
- 3 Aircraft Weight And Balance Handbook.
(FAA-H-8083-1) Federal Aviation Administration, 1999
- 4 Eurostar EV-97 Assembly manual
Evektor – Aerotechnic, 2001
- 5 Laine Seppo, Renko Kari. Lentokonetekniikan Perusteet
Luentomoniste. 1990, Lentotekniikankurssi
- 6 Suomalaisten ultrakevyiden lentokoneiden tarkastuskäsikirja. L9/2003
Lentoturvallisuushallinto, 2003

SÄHKÖISET LÄHTEET

- 1 Kevytilmailu ry. [www.kevytilmailu.net].[viitattu 8.4.2005] Saatavissa:
www.kevytilmailu.net

KUVAT

- 1 <http://serc.carleton.edu/images/introgeo/models/Stability.jpg>
- 2 www.evektor.cz

