

Tampereen ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuontantotekniikka
Lentokonetekniikka

Tutkintotyö

Arvin Rajabi
1:3-UAV Eurostar-pienoismallin rakennusprojektin suunnittelu- ja kehitystyö.

Työn ohjaaja Simo Marjamäki
Tampere 2010

Tampereen ammattikorkeakoulu

Kone- ja tuontantotekniikka

Lentokonetekniikka

Arvin Rajabi 1:3-UAV Eurostar-pienoismallin rakennusprojektin suunnittelu- ja kehitystyö.

Tutkintotyö 86 sivua + 9 liitesivua

Työn ohjaaja Simo Marjamäki

Tampere 2010

Hakusanat Aerodynamiset voimat, nostovoimakerroin, siipimuoto

TIIVISTELMÄ

Projektin kantavana ajatuksena oli suunnitella ja rakentaa 1:3 EV-97 Eurostar pienoismalli Tamkin ilmailukerholle.

Koneen rungon pituus on noin 2,0 m ja siiven kärkiväliksi tulee noin 2,7 m.

Painoa tämän tyyppiselle rakennelmalle muodostuu noin 15 - 20 kg. Moottorina tämäntyyppisessä lennokissa voi olla sähkömoottori, jonka teho on 9000 W.

Rakennusmateriaaleina käytetään pääosin lasikuitua ja hiilikuitua.

Projektin tavoitteena oli luoda mahdollisuus tutustua ilma-aluksen suunnittelun ja valmistuksen menetelmiin. Projekti muistuttaakin lentokoneen prototyypin tekemistä koekuormituksineen ja koelentoineen, mutta vain pienemmässä koossa.

Lisäksi tavoitteena oli laskea suoritusarvot ja aerodynaamiset voimat sekä valita sopiva sähkömoottori.

Tampereen ammattikorkeakoulu
Mechanical and Machin Engineering
Aeronautical engineering

Arvin Rajabi Eurostar-scale model of construction project planning and development.

Engineering thesis 86 pages + 9 appendices

Spring 2010

Keyword Aerodynamic forces, lift coefficient, wing profile, stall

ABSTRACT

Project's basic idea is to design and build a 1:3 EV-97 Eurostar, which will be work at TAMK aviation club.

Planes fuselage length is about 2.0 m and wing's span will be approximately 2.7m. The weight of this type of structures will be about 15 to 20 kg. The engine

of this type of plane may be an electric motor, whose power is 9000 W. Building materials are mainly fiberglass and carbon fiber.

The project aims are to explore the aircraft's design and manufacturing method. The project recalls the aircraft's prototype by making a superimposed test and a test fly, but only in smaller sizes.

Another objective is to calculate the performance characteristics and the aerodynamic forces with a suitable choice of the electric motor and other properties.

Sisällysluettelo

1 Johdanto	6
2 Lentokoneen aerodynamiikka.....	7
2.1 Painovoima W.....	8
2.2 Nostovoima L.....	9
2.3 Vastusvoima D.....	12
2.3.1 Liitoluku.....	16
2.4 Vetovoima T	17
3 Lentokoneen ohjausjärjestelmä.....	18
4 Sähkömoottori ja siihen liittyviä osia	19
4.1 Sähkömoottorin tyypit ja rakenne.....	20
4.2 Harjalliset sähkömoottorit.....	21
4.2.1 DC sähkömoottorin rakenne	21
4.3 Harjattomat sähkömoottorit	23
4.3.1 Harjattomat DC sähkömoottorit.....	23
4.3.2 Harjattomat AC sähkömoottorit.....	25
4.4 Potkuri.....	28
4.5 Alennusvaihdelaatikko.....	29
4.6 Elektroniikan nopeussäädin ”ESC”	30
4.7 Moottorin virtalähde	31
5 Radio-ohjaustekniikka	33
5.1 Tietoa radio-ohjauslaitteista.....	33
5.1.1 Tyyppihyväksytyt	33
5.1.2 Hyväksymismerkki	33
5.2 Radio-ohjauslaitteiden eri osat.....	33
5.2.1 Lähetin	33
5.2.2 Vastaanotin	34
5.2.3 Servo	34
5.2.4 Virtalähteet.....	34
5.3 Radio-ohjauslaitteen valitseminen	35
6 Lentokonemekaniikka.....	36
6.1 Lentokoneen vakavuuden ja ohjauksen tutkiminen	36
6.1.1Pituuskallistusmomentti (pitch)	36
6.1.2 Suunnanmuutosmomentti (yaw)	37

6.1.3 Poikittaiskallistusliike (roll).....	37
6.2 Suoritusarvojen määrittäminen	37
6.3 Aeroelastiikka	37
7 Eurostarin pienoismallin rakentaminen	38
7.1 Suunnittelu	38
7.1.1 Aerodynamisen keskipisteen sijanti.....	39
7.1.2 Nostovoiman laskeminen.....	40
7.1.3 Liitolumun laskeminen	44
7.2 Moottorin valitseminen.....	48
7.3 Suoritusarvojen laskeminen	52
7.3.1 Työntövoiman laskeminen.....	52
7.3.2 Maksimi lentonopeuden laskeminen.....	53
7.3.3 Sakkausnopeuden laskeminen	54
7.3.4 Liukulentto	55
7.3.5 Vaakalennon nopeus	56
7.3.6 Pystylennon nopeus	56
7.3.7 Pienin vajoamisnopeus vaakaalennossa.....	58
7.3.8 Pienin vajoamisnopeus pystylennossa	58
7.3.9 Nousulentto	59
7.3.10 Kantama ja toiminta-aika.....	60
7.3.11 Lakikorkeus.....	61
7.3.12 Kaartolento.....	62
7.3.13 V-n piirros.....	64
7.3.14 Potkurin työntövoima.....	67
7.4 Lentoonlähö ja laskeutuminen	68
7.4.1 Lentoonlähö	68
7.4.2 Laskeutumismatka	77
8 Pienoismallin rakenteen valmistaminen	81
8.1 Runko.....	81
8.2 Siipi.....	83
8.3 Sivu- ja korkeusperäsin.....	84
9 Johtopäätökset.....	85
10 Lähteet.....	87
11 Liitteet.....	89

1 Johdanto

Eurostarin pienois mallin projekti tehtiin kesällä 2008. Tässä opinnäytetyössä raportoidaan pienoismallin suunnittelu ja rakentaminen. Raportointi sisältää suoritusarvojen laskuja ja sähkömoottorin valintaperusteita. Lisäksi raportissa kerrotaan, kuinka pienoismalli valmistettiin.

Tässä työssä on kahdeksan osaa. Ensimmäisessä osassa olen kertonut, mitä tämä opinnäytetyö sisältää. Toisessa kappaleessa käsitellään aerodynaamisia voimia ja sitä, kuinka ne vaikuttavat lentokoneeseen. Kolmannessa osassa kerrotaan lyhyesti koneen ohjausjärjestelmästä. Neljännessä kappaleessa käsitellään erilaisia sähkömoottoreita ja niiden toimintoja. Tässä kappaleessa on myös käsitelty moottoreihin liittyviä osia kuten alennusvaihdelaatikkoa, potkuria, elektroniikan nopeussäädintä ja moottorin virtalähdettä. Viides kappale käsittelee radio-ohjaustekniikkaa ja siihen liittyviä osia. Kappale kuusi käsittelee lentomekaniikkaa, jossa perehdytään pituuskallistusmomenttiin, suunnanmuutosmomenttiin ja poikittaiskallistusliikkeeseen. Kappaleessa seitsemän on laskettu Eurostarin pienoismallin rakentamiseen liittyviä laskuja. Kappaleessa on käsitelty sopivan sähkömoottorin valitsemista pienoismalliin ja sen suoritusarvojen laskemista. Viimeisessä kappaleessa selitetään, kuinka pienoismalli on valmistettu.

2 Lentokoneen aerodynamiikka

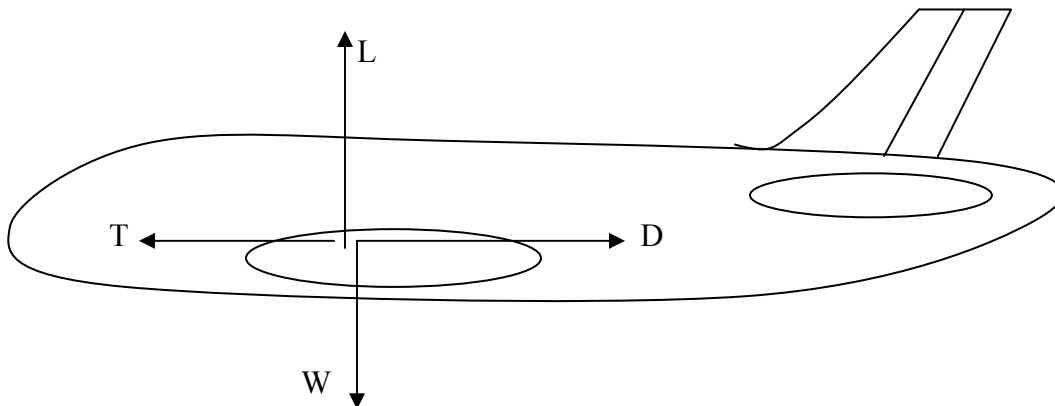
Tässä työssä käydään läpi ne aerodynaamiset voimat jotka vaikuttavat lentokoneeseen sen ollessa ilmassa.

Aerodynaamiset voimat

Jos haluamme tietää, miten kone liikkuu, meidän on tiedettävä, mitkä voimat vaikuttavat siihen.

Lentokoneeseen vaikuttaa neljä voimaa:

- Painovoima W
- Nostovoima L
- Vastusvoima D
- Vetovoima T



Lentokone pääsee ilmaan jos:

$$W = L$$

Ja

$$D = T$$

Jos L pienenee, korkeus pienenee, ja jos T kasvaa, nopeus kasvaa.

2.1 Painovoima W

Painovoima on voima, joka vaikuttaa koneeseen ja suuntautuu koneen painopisteen kautta alaspäin. Voima saadaan seuraavalla kaavalla:

$$W = mg \quad (1-1)$$

m on koneen massa ja

g on normaaliputoamiskiihtyvyys, joka saadaan seuraavalla kaavalla:

$$g = \frac{GM}{r^2} \quad (1-2)$$

jossa G on gravitaatiovakio jonka suuruus on:

$$G = 6,67 \times 10^{-11} \frac{m^3}{s^2 kg}$$

ja M on maan massa, joka on:

$$M = 5,98 \times 10^{24} kg$$

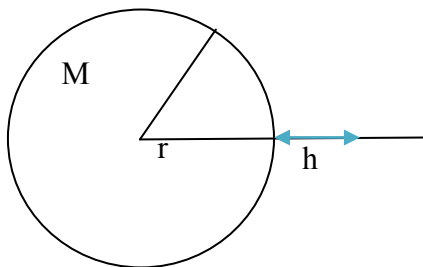
ja r on planeetan säde, eli maan säde:

$$r = 6400 \times 10^3$$

Kun nämä arvot sijoitetaan kaavaan, saadaan g:n arvo:

$$g = \frac{GM}{r^2} = \frac{(6,67 \times 10^{-11}) \frac{m^3}{s^2 kg} \times (5,98 \times 10^{24}) kg}{(6400 \times 10^3)^2} = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

Lentokoneen lentäessä korkeammalle sen paino vähenee. Korkealla lennettäessä maan vetovoima on nolla, jolloin myös painovoima W on nolla.



$$W = mg = \frac{GMm}{(r+h)^2}$$

2.2 Nostovoima L

Nostovoima on voima, joka on yhtäsuuri kuin painovoima. Tämä syntyy lentokoneen siipien avulla. Siipi tuottaa nostovoimaa vetämällä ilmaa alapuolella Newtonin 3. lain mukaisesti, joka on vastakkainen reaktivoima.

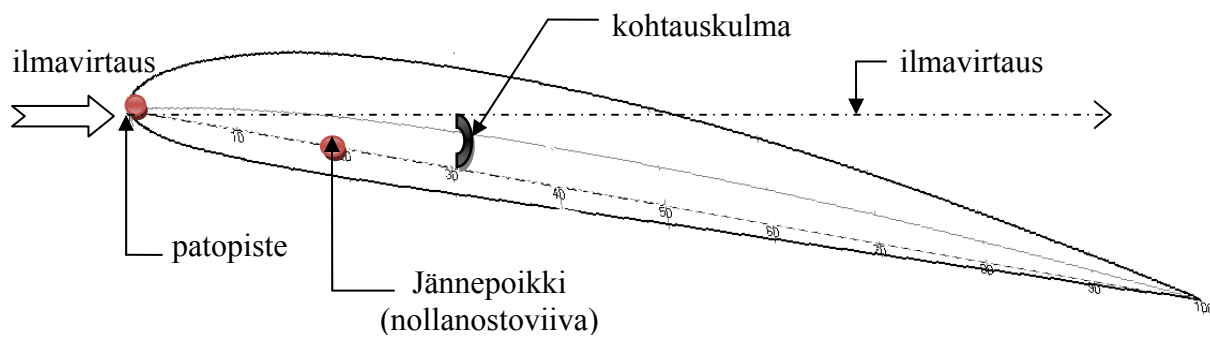
Nostovoiman suuruus riippuu sekä dynamisesta paineesta että nostovoimakertoimesta ja siiven pinta-alasta.

$$L = \left(\frac{1}{2} \rho v^2\right) \times S \times c_l \quad (2-1)$$

Dynaaminen paine = $\left(\frac{1}{2} \rho v^2\right)$, joka riippuu nopeudesta v ja korkeuden mukaan muuttuvasta ilman tiheydestä ρ .

S on siiven pinta-ala.

c_l nostovoimakerroin, joka riippuu kohtauskulmasta ja profiilin muodosta. Kohtauskulma on ilman virtauksen ja siiven jänteen välin jäävä kulma, joka on melko pieni (alle 20°).

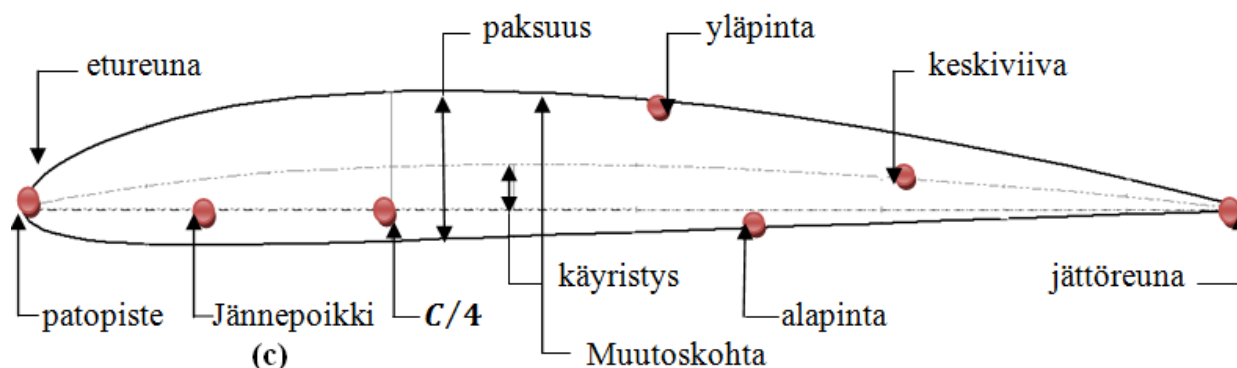


Kuva 1. Siiven kohtauskulma

Jos kohtauskulma kasvaa liian suureksi, kone sakkaa. Tällöin ilmavirtaus irtoaa siiven pinnalta, vastus kasvaa, jonka seurauksena teho pienenee ja nostovoima vähenee ja kone alkaa voimakkaasti vajota. Tässä tilanteessa lentokone on täysin tai osittain ohjaamaton. Yleensä sakkkaus tapahtuu, kun kone lentää hitaasti, kaartaa tai on alkunousussa tai laskussa.

Kohtauskulmaa eli nostovoimakeroainta voidaan lisätä solakoilla ja laskusiivekkeillä. Näiden laitteiden avulla pienennetään sakkkausnopeutta, jolloin lentoonlähtö- ja laskeutumismatkat lyhenevät.

Siiven profiilin muoto ja Reynoldsin luku määräävät siiven aerodynaamiset ominaisuudet. Jos profiili on paksu ja Reynoldsin luku on riittävän suuri, irtaantuminen alkaa jättöreunalta ja kun kasvatetaan kohtauskulmaa, irtaantumiskohta siirtyy eteenpäin ja nostovoima pienenee hitaasti. Tällöin sakkaus ei ole äkillinen. Jos profiili on ohut, irtaantuminen tapahtuu etureunan läheltä, jolloin kohtauskulmaa kasvatettaessa nostovoima pienenee äkisti ja sakkaus on nopea. Siiven paksuus voi olla kaareva tai symmetrinen.



Kuva 2. Siiven profiili ja sen eri kohdat

Siiven etureunassa ilmavirtaus jakautuu siiven ala- ja yläpinnalle. Siiven profiilin ympärillä olevan ilmavirtauksen nopeus kasvaa siiven yläpinnalla. Dynamiikan lakien perustella, kun nopeus kasvaa, paine pienenee, tällöin syntyy paine-eroa ja siitä saadaan nostovoimaa.

Virtaus on laminaarista siiven etureunan ja muutoskohdan välillä, muutoskohdan jälkeen virtaus muuttuu turbulenttiseksi. Laminaarisessa virtauksessa on vähän kitkaa.

Virtauksen nopeus ja lämpötila pienenee ja paine kasvaa kun virtaus kohtaa patopisteen. Lämpötilan kasvaessa kasvaa myös äänen nopeus.

$$c = 20,05 \sqrt{T} \frac{m}{s} \quad (2-2)$$

Äänen nopeuden arvo muuttuu ilmakehässä korkeammalle mentäessä. Merenpinnalla äänen nopeus on $c = 340,3 \text{ m/s}$ ja 11 km:n korkeudessa $c = 295,1 \text{ m/s}$.

Tulovirtauksen nopeuden ja äänen nopeuden suhdetta kutsutaan Machin luvuksi.

$$Ma = \frac{v}{c} \quad (2-3)$$

v on lentonopeus tai virtausnopeus ja c on äänen nopeus.

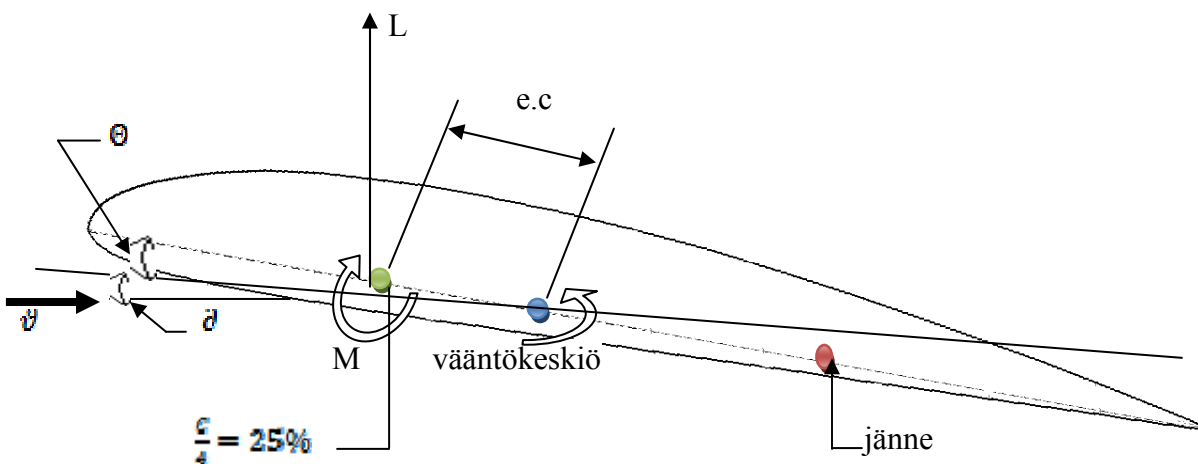
Machin luku voidaan jakaa neljään ryhmään:

- Alisooninen alue $Ma < 0,8$
- Transsooninen alue $0,8 < Ma < 1,2$
- Ylisooninen alue $1,2 < Ma < 4$
- Hypersooninen alue $Ma > 4$

Arvin Rajabi

Nostovoima paikka

Kohdassa $C/4$, jonka etäisyys etureunasta on 25 %, sijaitsee aerodynaaminen keskiö, jossa sijaitsee siiven suurin nostovoima alisoonisilla nopeuksilla. Nostovoima kiertää profiilin etureunaa ylöspäin ja sen vaikutuksesta syntyy vääntökeskiö. Vääntökeskiön pisteessä nostovoima ei väännä siipeä. Vääntökeskiön paikka riippuu siiven rakenteesta ja materiaaleista, mutta yleensä se sijaitsee 40 % etäisyydellä etureunasta.



Kuva 3 Nostovoiman sijanti

Kulma α on kohtauskulma, kun siipi ei ole kiertynyt.

Kulma θ on kohtauskulma, kun siipi on kiertynyt.

M on kohtauskulman momentti, jossa nostovoima vaikuttaa.

Vääntökeskiö, jossa on momentin vastus.

$$\text{U} \quad \text{Tasapainossa} - M = L \times e.c \quad (2-4)$$

Näiden yhteisvaikutuksesta siipi kiertyy kulman θ verran ja tällöin kiertymistä vastustaa siiven vääntöjäykkyys G . Kohtauskulman suuruus riippuu siiven jäykkyydestä.

Tällä perustella voidaan sanoa, että jos nopeus ja dynaaminen paine kasvavat riittävästi suureksi, aerodynaaminen momentti myös muuttuu niin suureksi, että syntyy lopulta tilanne, jossa siipi murtuu. Tätä nopeutta kutsutaan divergenssinopeudeksi. Ylisoonisella alueella divergenssinopeus ei ole ongelma, koska aerodynaamisen keskiön paikka siirtyy taaksepäin lähelle puolivälin jännettä.

Divergenssinopeutta voidaan kasvattaa joko siiven kärkiväliä pienentämällä tai lisäämällä siiven vääntöjäykkyyttä eli vääntöjousi. Siiven kärkivälin pienentäminen on epäedullista, koska se vähentää siiven pinta-alaa ja samalla nostovoimaa. Tästä syystä jäykempien materiaalien valinta on paras tapa kasvattaa divergenssinopeutta.

2.3 Vastusvoima D

Vastusvoima riippuu kolmesta tärkeästä tekijästä:

- Nopeus v
- Ilman tiheys ρ
- Pinta-ala S sekä profiilin muoto

Vastusvoima saadaan seuraavalla kaavalla:

$$D = \left(\frac{1}{2} \rho v^2\right) \times S \times c_D \quad (2-5)$$

Kun lämpötila tai kosteus kasvaa, tiheys pienenee. Kun ilmanpaine kasvaa, tiheyskin kasvaa.

Mitä enemmän on kokoa eli pinta-alaa, sitä enemmän dynaaminen paine vaikuttaa eli vastus kasvaa.

c_D on siiven kokonaisvastuskerroin ja se riippuu profiilivastuksesta sekä indusoidusta vastuksesta. Tätä kutsutaan siiven polaariksi

$$c_D = c_{D0} + c_{Di} \quad (2-6)$$

Indusoitu vastus c_{Di} , joka riippuu nostovoimakertoimesta eli kohtauskulmasta.

$$c_{Di} = kC_i^2 \quad (2-7)$$

Jossa kerroin k riippuu siiven muodosta ja ilman tiheydestä alisoonisella alueella.

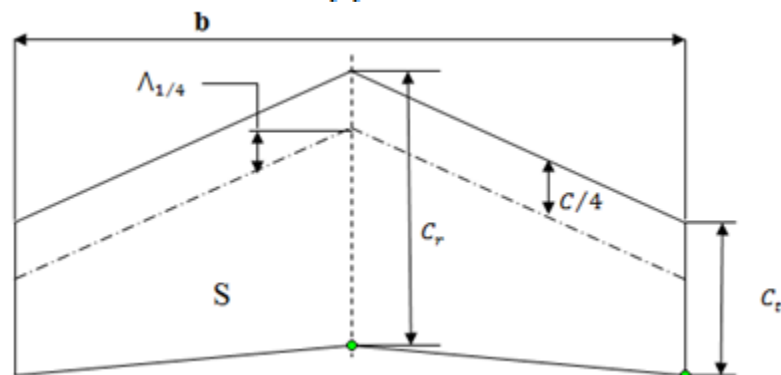
$$k = \frac{1}{\epsilon \pi b} \quad (2-8)$$

K riippuu lisäksi Machin luvusta kolmella eri alueella (alisooninen, transsooninen ja ylisooninen).

e on oswaldin kerroin. Elliptiselle siivelle $e = 1$, ja suorakaiteen muotoiselle siivelle $e = 0,7 \dots 0,85$.

A on sivujen suhde eli:

$$A = \frac{b^2}{S} = \frac{\text{kerroin}}{\text{siivipinta-ala}} \quad (2-9)$$

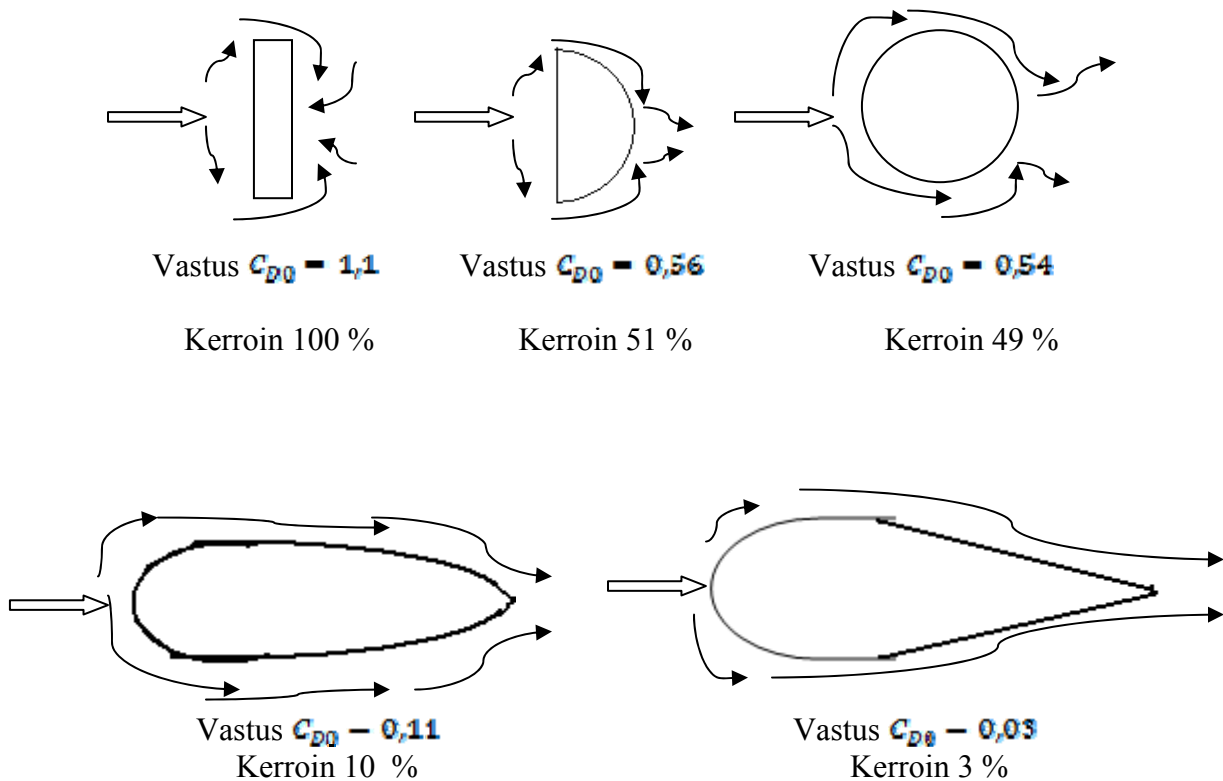


Kuva 4. Siiven profiili ylhäältä katsottuna

Kun lentokone lentää lähellä maanpintaa, maavaikutus pienentää indusoitua vastusta, joten k pienenee ja kohtauskulma muuttuu, jolloin kone pyrkii alaspäin. Jos laskusiivekkeet ovat kiinni ja kone lentää sopivasti kohtauskulma vakiona, tällöin nostovoimakertoimen kasvaa.

Profiilinvastus C_{D0} riippuu:

- Muotovastuksesta, joka johtuu profiilin etu- ja takapuolelle syntyvistä paine-eroista



- kitkavastuksesta, joka riippuu siiven profiilin laadusta.

$$f_{\mu} = \mu \times N$$

Eli:

$$C_{D0} = \text{profiilin vastus} + \text{kitkavastus}$$

$$C_{D0} = 0,03 + f_{\mu}$$

Kitka tapahtuu siiven pinnalla. Kitka riippuu Reynoldsin luvusta.

$$R_e = \frac{v \cdot l}{\nu} \quad (2-10)$$

v on virtausnopeus;

l on karakteristinen pituus eli tässä tapauksessa siiven jännepoikki (Chord) pituus;

ν on kinemaattinen viskositeetti, joka lasketaan seuraavalla kaavalla.

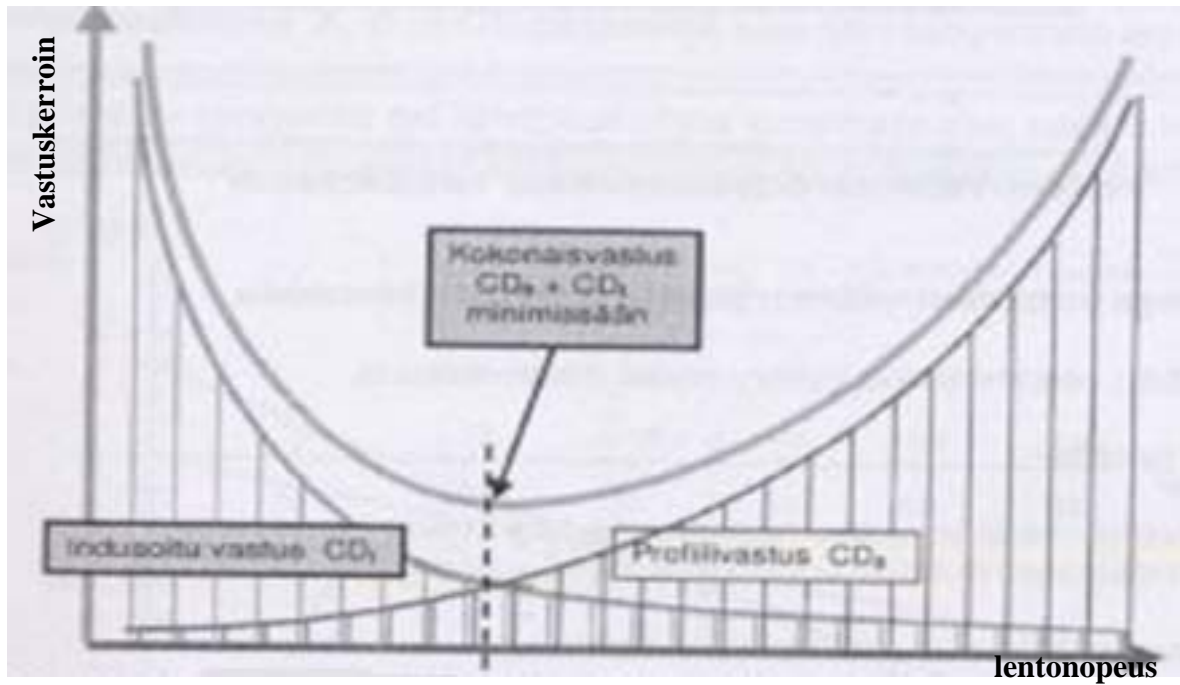
$$\nu = \frac{\text{Dynaaminen viskositeetin } \mu}{\text{tiheys } \rho} = 15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad (\text{meren pinnan tasossa})$$

Jos Reynoldsin luku on 2000- 2300 välillä, virtaus on laminaarinen, ja jos luku on suurempi kuin tämä arvo, virtaus muuttuu turbulentiksi.

Laminaarinen virtaus on kitkaton ja vastus on pieni. Laminaarinen virtaus irtoaa siiven pinnalta helpommin kuin turbulenttinen virtaus. Tämä takia laminaarista virtausta olisi hyvä olla siiven pinta-alaan nähden paljon.

Reynoldsin luvun kasvattaminen kasvattaa sakkauskohtauskulmaa. Poikkeuksena transitiokohdassa, jossa irtaantuminen tapahtuu aikaisemmin. Silloin pitää pienentää Reynoldsin lukua.

Turbulenttista virtausta tarvitaan ainakin transsoonisella nopeusalueella. Tällä alueella profiilin pinnalle syntyy tiivisaalto, joka aiheuttaa painevastusta ja virtauksen irtaantumisen. Kun divergenssin Machin luku (0,8) ylitetään transsoonisella alueella nollavastuskerroin C_{D0} kasvaa voimakkaasti ja synnyttää tärinää profiilin pinnalla. Tällöin kasvatetaan Reynoldsin lukua eli virtausta turbulentiksi, jotta voidaan pienentää profiilivastusta. Transsoonisella alueella lentonopeus ja äänen nopeus ovat lähes yhtä suuret.



Kuva 5. Indusoitu vastus ja profiilivastus sekä vastuksen summakäyrä /1/

Kuvasta nähdään, että kun lentonopeus kasvaa, indusoitu vastuskerroin pienenee ja profiilivastus kasvaa. Kun indusoidun vastuksen ja profiilivastuksen käyrät leikkaavat, on kokonaisvastus minimissään.

2.3.1 Liitoluku

Liitoluku tarkoittaa nostovoiman ja vastuksen suhdetta. Suorassa lennossa kaikilla lentokoneilla on olemassa jokin nopeus, jolla vastus on pienin.

$$E = \frac{L}{D} = \frac{C_L}{C_D} = \frac{C_L}{C_{D0} + kC_L^2} \quad (2-11)$$

Tällöin kun vastus D on minimissä, liitoluvun arvo E on maksimissa. Vastus riippuu sekä Machin luvusta että Reynoldsin luvusta. Kun vastus D on pienin, tarvitaan pienempi työntövoima ja polttoaineen kulutus on vähäinen.

$$E_{max} = \left[\frac{C_L}{C_D} \right]_{max} = \frac{1}{2\sqrt{kC_{D0}}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_{max}}{C_{D0}}} \quad (2-12)$$

2.4 Vetovoima T

Vetovoiman tehtävänä on vastusvoiman kumoaminen. Tämä voima tuodaan moottorin avulla. Suoralennossa nostovoima kumoaa painonvastuksen ja työntövoiman vastuksen D. Seuravaalla kaavaalla voidaan laskea lentoradan suuntainen kiihtyvyys.

$$F = (T - D) = ma \quad (2-13)$$

Moottori voi olla potkuri tai suihkumoottori. Suihkumoottorit ovat reaktiomoottoreita.

Potkurimoottorit voidaan jakaa kahteen pääryhmään: mäntämoottoreihin ja putkuriturbiineihin.

Mäntämoottorit jaotellaan nelitahtimoottoreihin, kaksitahtimoottoreihin ja kiertomäntämoottoreihin.

Kaksitahtimoottorit ovat yksinkertaisia, halpoja ja helppokäyttöisiä.

Nelitahtimoottoreihin verrattuna kuitenkin kiihtyvyys on huonompi ja melu on kova.

Kaksitahtimoottorit lämpenevät enemmän kuin nelitahtimoottorit, sillä palaminen kaksitahtimoottorissa tapahtuu nopeammin.

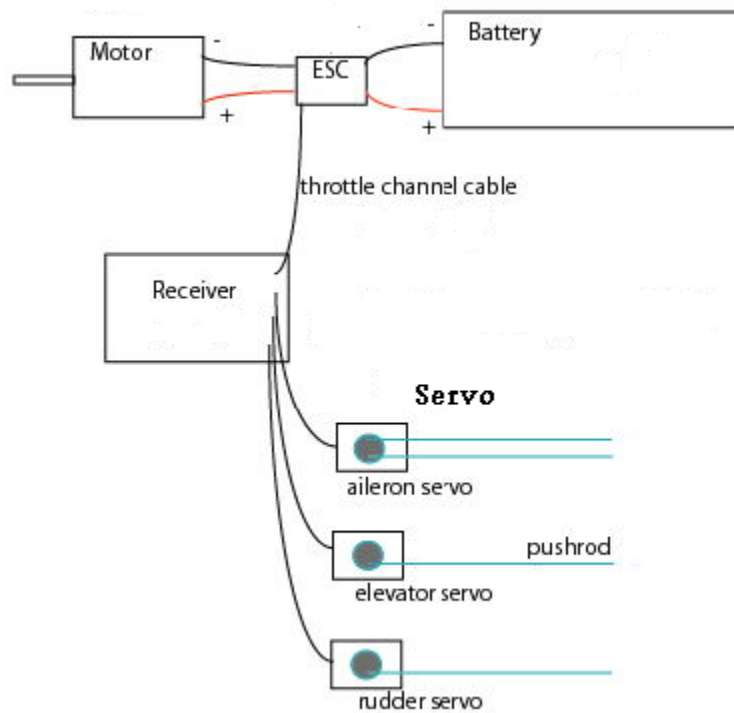
Nelitahtimoottoreiden ominaisuudet ovat hyvät, melu on vähäistä ja niillä on hyvä vääntömomentti, joten niissä voi käyttää isompia potkureita. Polttoaineenkulutus on pieni, mutta kokonaisuutena moottori on kallis.

Pienoismalleissa voidaan nykyään käyttää sähkömoottoreita.

3 Lentokoneen ohjausjärjestelmä

Ohjausjärjestelmän pääpiirin osat ovat:

- Moottori
- Elektroninen nopeussäädin
- Akku
- Radion ohjauslaite
 - Lähetin
 - Vastaanotin
 - Servo



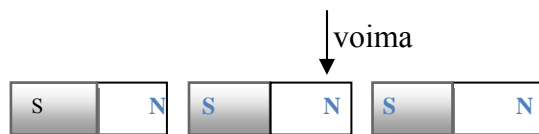
Kuva 6. Lentokoneen ohjauksen pääpiiri /2/

Seuraavassa kappaleessa käydään läpi ohjausjärjestelmän pääpiirin toiminta.

4 Sähkömoottori ja siihen liittyviä osia

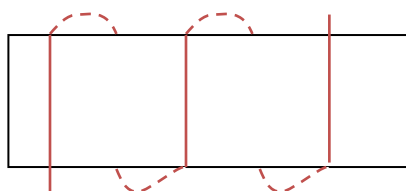
Tässä pienoismallissa on otettu käyttöön sähkömoottori. Sähkömoottori on puhdas, äänetön ja helppokäyttöinen. Moottori ottaa tehonsa akusta. Sähkömoottori on akkunsa takia painavampi kuin polttoainemoottori ja tämän takia lentokoneen kantama on pienempi.

Sähkömoottori muuttaa sähköenergian mekaaniseksi energiaksi. Kaikki sähkömoottorit toimivat magneetilla, joko kestmagneetilla tai sähkömagneetilla. Magneetissa on kaksi napaa: etelänapa (-) ja pohjoisnapa (+). Kaksi samaa napaa hylkivät toisiaan ja kaksi eri napaa vetää toisiaan puoleensa. Kun käytetään kolmea magneettia samassa linjassa ja pyöritetään keskimmäistä magneettia jollakin voimalla, pyöriminen jatkuu niin kauan kun voima vaikuttaa. Navat ovat kiinteät suhteessa toisiinsa ja suhteessa fyysiseen magneettiin. [Kuva 7]



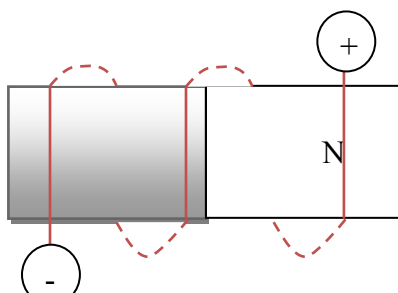
Kuva 7. Napojen suhteet

Kestomagneetilla on aina magneettikenttä. Toisenlainen magneetti on sähkömagneetti, jonka sydän koostuu raudasta ja sen ympärille on kääritty kuparia. Tätä kutsutaan kelaksi.



Kuva 8. Kuparilanka kierretty raudan päälle

Kun virta kulkee kelasta, syntyy magneettikenttä, joten sopivalla taajuudella saadaan moottori pyörimään.

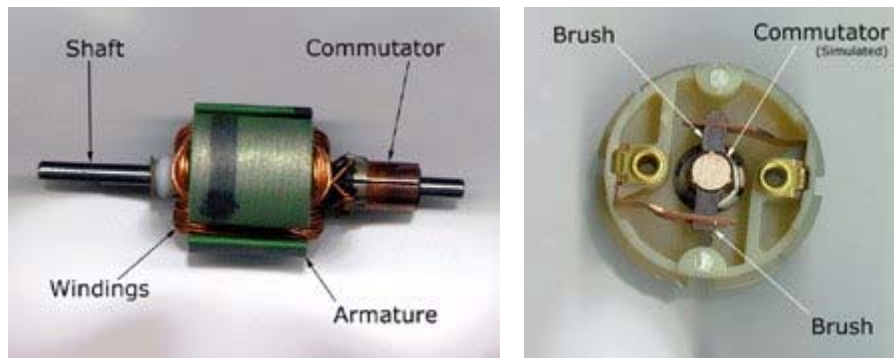


Kuva 9. magneettikenttä

Arvin Rajabi

Jos kuvan 7 mukaiseen tilanteeseen keskellä olevan magneetin tilalle asetetaan sähkömagneetti, saadaan sähkömoottori.

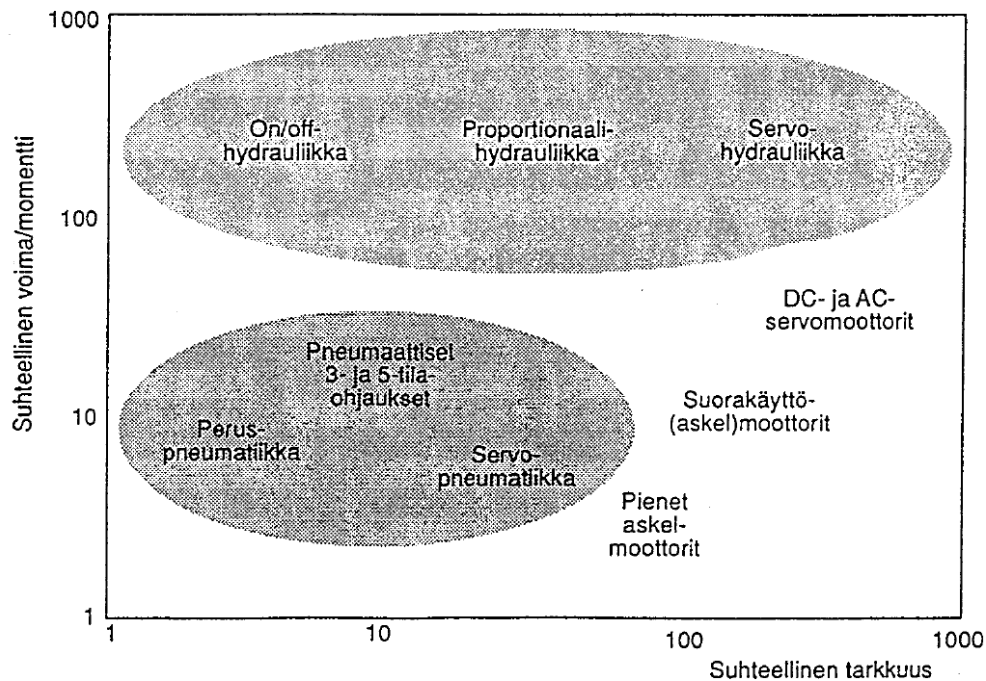
Tästä syntyy kaksi ongelmaa: jos laitteeseen kiinnitetään virtajohto, moottorin toimiessa virtajohto kiertyy laitteen ympärille. Toinen ongelma on magneetin suunnan vaihtaminen tietyin väliajoin. Molemmat näistä ongelmista on ratkaistu käyttämällä kahta laitetta: split-rengas-virrankääntäjä eli kommutaattori ja pari harjattia (pair of brushes). Tätä moottoria kutsutaan tasasähkömoottoriksi.



Kuva 10. Dc harjalliset sähkömoottorit /3/

4.1 Sähkömoottorin tyypit ja rakenne

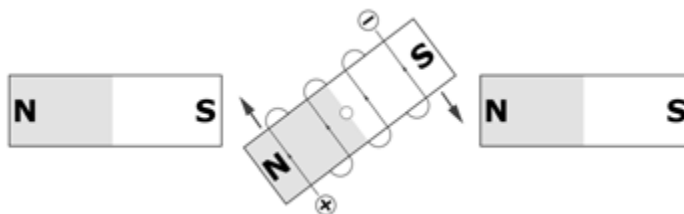
Pienkoneen mallissa voidaan käyttää kahdenlaisia moottoreita, joko harjallisia (brushed) tai harjattomia (brushless).



Kuva 11. Toimilaitteiden suhteellinen voima/momentti ja tarkkuus. /4/

4.2 Harjalliset sähkömoottorit

Harjalliset sähkömoottorit ovat DC eli tasasähkömoottoreita. Ne ovat yleisimpiä moottoreita ja niitä käytetään useimmiten kevyemmissä pienoismalleissa.



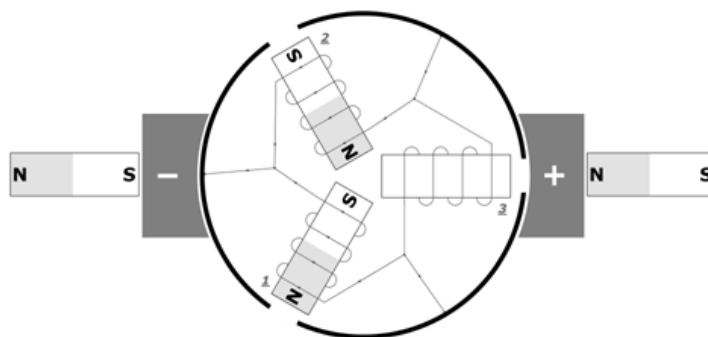
Kuva 12. Keskimäinen magneetti on sähkömagneetti. /3/

4.2.1 DC sähkömoottorin rakenne

Sähkömoottorit muodostuvat staattorista ja roottorista.

Staattori

Staattori on kiinteä ja muodostuu useammasta kestopagneettiparista.



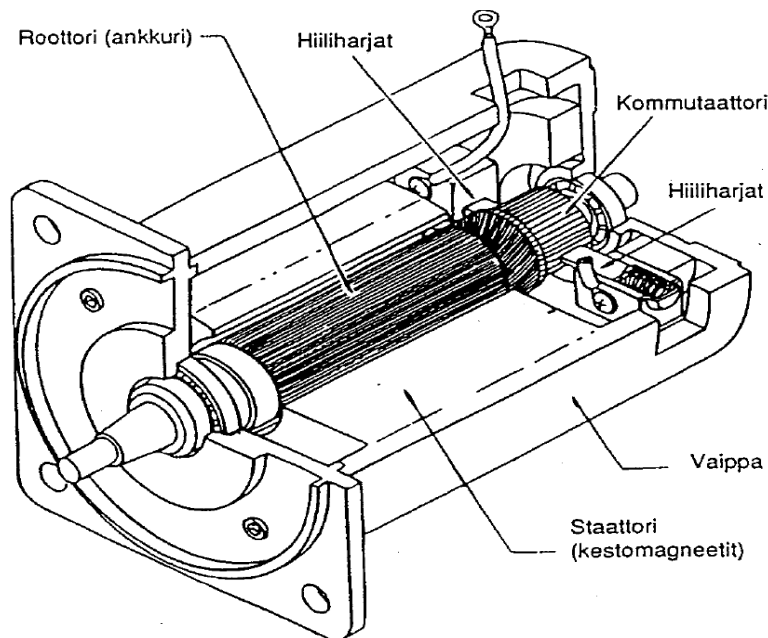
Kuva 13. Useampi magneettipari tuo moottorille enemmän tehoa. /3/

Staattorin rakenne vaihtelee magneetin materiaalin mukaan. Materiaalina voi olla ferriitti, alnico tai samariumkoboltti. Alnico magneettivuon voimakkuus on voimakkaampi kuin ferriitin. Samariumkobolttimagneetti on kallis, mutta huipputeho ja momentti ovat kaksikertaisia verrattuna ferriittiin.

Roottori

Roottori eli ankkuri on pyörivä ja siinä on ankkurikäänitys. Käämin pää on yhdistetty kommutaattoriin. Ankkurivirta johdetaan tasajännitelähteestä hiilienharjaparin välityksellä kommutaattoriin ja sieltä käämiin. Hiiliharjalla on + ja – navat.

Hiiliharjoineen virrankääntäjä eli kommutaattori rajoittaa moottorin suorituskykyä ja aiheuttaa huollontarvetta.



Kuva 14. DC-sähkömoottorin rakenne. /4/

Kommutaattori muodostuu kuparisegmentistä. Jokainen käämi on yhdistetty kahteen vierekkäiseen segmenttiin, jotka on eristetty toisistaan Mica-materiaalilla. Jokainen segmentti myös on yhteydessä kahteen vierekkäiseen segmenttiin. Tällä tavalla käämijohtimet ovat kytketty sarjaksi.

Kun virrankääntö tapahtuu, käämi joutuu hetkesi oikosulkuun. Vaikka hiiliharjat koskettavat kahta segmenttiä samaan aikaan, silti induktanssin takia virta ei katkea välittömästi. Tämä aiheuttaa kipinän suurilla arvoilla segmenttien ja hiiliharjan välissä. Tällä tavalla saadaan suuria pyörimisnopeuksia, jolla nostetaan moottorin suorituskykyä (rpm). Nopeus riippuu jännitteestä ja momentti riippuu virrasta. Virran kulutus riippuu kelan materiaalista.

Jos käämijohtimet ovat kytketty rinnakain, silloin pyörimisnopeus on pieni. Kun pyörimisnopeus Dc moottorissa kasvaa, vääntömomentti laskee. Kun tunnetaan pyörimisnopeus ja vääntömomentti, voidaan säädellä jännitettä. DC Moottorin maksimiteho saavutetaan 50 % :lla maksimipyörimisnopeudesta. Tehon hyötysuhde on 0,85.

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = 0,85 \quad (4-1)$$

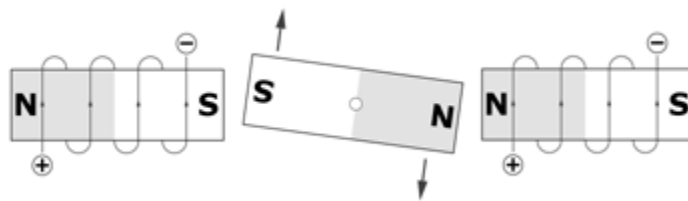
DC käytön rajoituksia voi olla:

- Moottorin lämpeneminen, jota kuitenkin voidaan pienentää jäähdyttimellä.
- Mekaaninen kestävyys ja jänniterajoitus, jotka rajoittavat pyörimisnopeuksia.
- Kommutaattoriongelmat suurella nopeudella ja viralla rajoittavat hetkellistä tehoa.

4.3 Harjattomat sähkömoottorit

Harjattomat sähkömoottorit voivat olla sekä tasasähkö- että vaihtosähkömoottoreita. Vaihtosähkö voi olla synkroni eli tahtimoottori tai asynkroni eli epätahtimoottori.

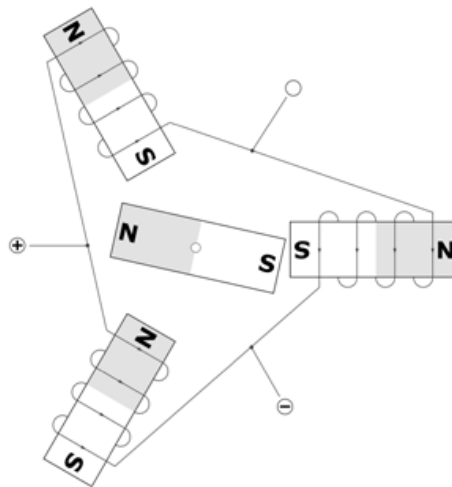
Harjattomissa moottoreissa ei tarvita kommutaattoria, koska kommutointi suoritetaan elektronisesti. Tässä moottorissa käämitys sijaitsee staattorissa, roottorissa on puolestaan kestopagneetti.



Kuva 15. Harjaton sähkömoottori. /3/

4.3.1 Harjattomat DC sähkömoottorit

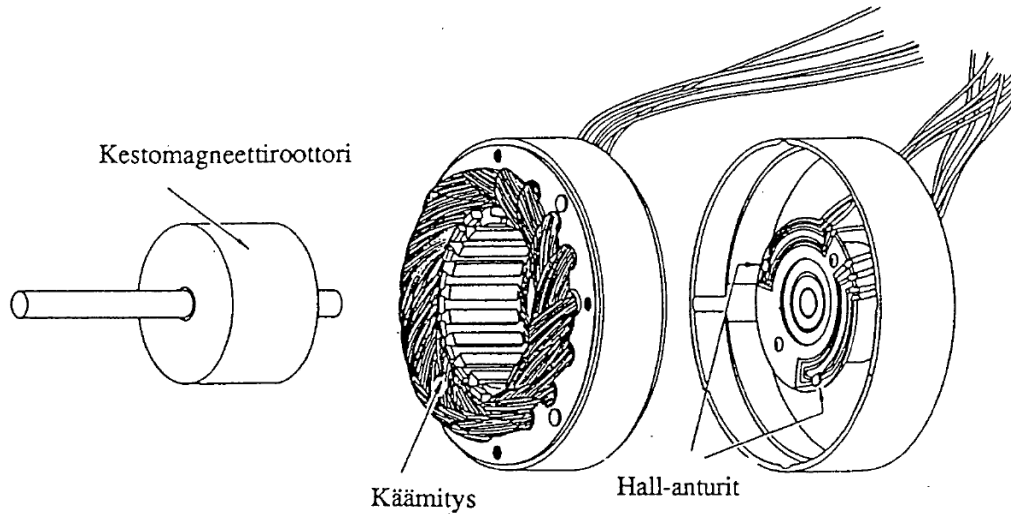
Harjattomien tasasähkömoottorien roottoriessa on useampia kestopagneetteja ja staattorissa on yleensä kolme käämistä, jotka on asetettu 120 asteen vaihekulmaan keskenään.



Kuva 16. Harjaton tasasähkömoottori /3/

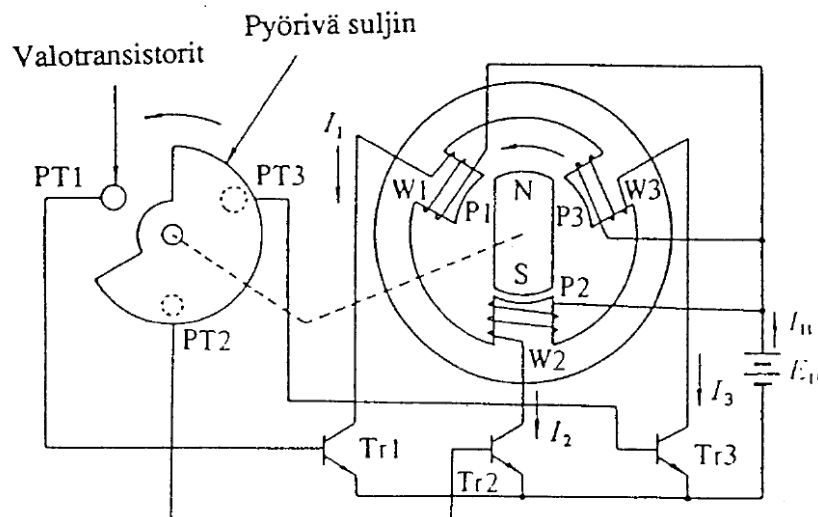
Arvin Rajabi

Roottorissa kiertymän tunnistus on tärkeä ja se tapahtuu käyttämällä anturia, esim. Hall-anturia, optisia antureita tai resolvableita.



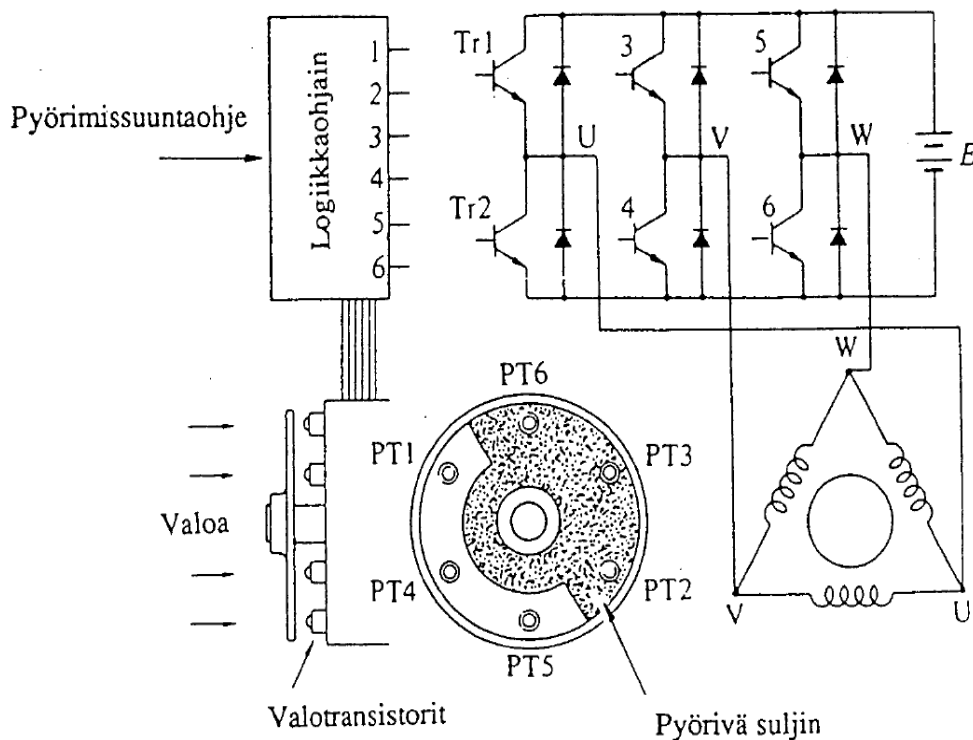
Kuva 17. Harjattoman servomoottorin perusrakenne. /4/

Harjatonta moottoria voidaan käyttää sekä yksinapaisena eli unipolaarina ja kaksinapakäyttöisenä eli bipolaarina. Unipolaarissa käämit toimivat aina samanmerkkisenä. Unipolaarissa valotransistori ohjaa kytkentätransistorin kautta käänin jännittelliseksi ja saa aikaan kestopolttimien vetovoiman.



Kuva 18. Unipolaari toimintaperiaate. /4/

Toimintaperiaatteen mukaan yksi kolmesta tarkkaan asemoidusta valotransistorista on vuorollaan peittämättömänä. Kuusi valotransistoria, jotka sijaitsevat staattorin päätylevyssä, tunnistavat roottorin aseman. Roottorin akseliin on kiinnitetty peitelevy, joka avaa ja sulkee valon pääsyn valotransistorille.



Kuva 19. Kolmivaiheisen bipolaarimoottorin rakennekaavio. /4/

Kun valotransistori aktivoituu, logiikkaohjain kääntää transistorin päälle. Esim. kun valotransistori 1 aktivoituu ja transistori 1 menee päälle, ja niin pyöräminen alkaa.

Bipolaari hyötysuhde on parempi kuin unipolaarinen.

4.3.2 Harjattomat AC sähkömoottorit

Vaihtosähkömoottorissa syötetään sinimuotoista vaihtojännitettä käämeihin, jolla moottorin pyörimisnopeutta ja momenttia voidaan säätää.

Vaihtosähkömoottoria voidaan jakaa kahteen ryhmään, tahtimoottoreihin ja epätahtimoottoreihin.

Tahtimoottori

Tämä moottori on sama kuin DC moottori mutta ohjaustapa on erilainen. Sinimuotoisen kolmivaihesähköä yhtä jännitettä syötetään käämeihin, jolloin moottori pyörii sen mukaisella taajuudella. Taajuutta muuttamalla voidaan säätää nopeutta. Akun DC jännitettä voidaan muuttaa AC jännitteisiin invertteriosalla.

Resolverianturilla voidaan ohjata virran syöttöä ja vaiheistusta.

Epätahtimoottori

Epätahtimoottori toimii oikosulkuperiaatteella. Oikosulkumoottorissa muutetaan sekä jännitettä että sen taajuutta.

Epätahtimoottorit jaetaan kolmeen pääryhmään:

- kolmivaiheiset oikosulkumoottorit
- yksivaiheiset oikosulkumoottorit
- liukurengasmootorit

Kolmivaiheiset epätahtimoottorit toimivat taajuusmuutoksella. Taajuusmuuttajia on kahdenlaisia: suoria ja välipiirillisiä.

Kun kolmivaihevirta kulkee staattorikäännyksessä, indusoi roottori suljettuun roottorikäännykseen virran, jolla saadaan toinen magneettikenttä.

Roottorikäännyksessä on sijoitettu roottorin uriin ja suljettu molemmista päistä oikosulkurenkaalla.

Magneettikenttien välillä vallitsevan voimavaikutuksen (vääntömomentti) takia roottori lähtee pyörimään, kiihtyy ja jää pyörimään hieman magneettikentän nopeutta pienemmällä nopeudella.

Jännitteen syöttötaajuuden ja roottorin pyörimistäajuuden eroa kutsutaan jättämäksi, joka määrittää virran suuruutta.

Jättämän vuoksi oikosulkumoottorilla on huonohko hyötysuhde.

Kolmivaiheisen epätahtimoottorin hyötysuhde voi olla jopa 97 %, josta vain 3 % häviää lämmöksi.

Taajuusmuuttajan tekniikaassa pulssinleveysmodulaatiota (PWM) käyttäen syöttöjännitteen siniaallon kestoa katkotaan, virtaa ja jännitettä muutetaan niin, että saadaan integroitua haluttu taajuus ja jännite.

Yleisin syöttö 3-vaiheiselle sähkömoottorille on 400-690V vaihtovirta ja normaalikäytössä lähdön säätöalue 0-50Hz, erikoissovelluksissa korotus jopa 7KHz:iin. AC moottorit on varustettu takogeneraattorilla ja anturilla. Anturi voi olla absoluuttianturi tai inkermentti anturi.

Taajuuden vaikutus pyörimisnopeuteen:

$$n = \frac{f}{p} \quad (4-2)$$

Kaavassa f on syöttötaajuus, p koneen napapariiluku ja n on pyörimisnopeus.

$$n = \frac{10}{2} = 5 \frac{1}{s}$$

Taulukko 1. Taajuudet ja niitä vastaavat kierrosluvut

Taajuus [Hz]	ns [1/s]	ns [1/min]
0	0	0
10	5	300
20	10	600
30	15	900
40	20	1200
50	25	1500
100	50	3000

4.4 Potkuri

Potkurin avulla kiihdytetään virtausta taaksepäin ja saadaan työntövoima. Potkuri koostuu useammasta (ainakin kaksi) siipimäisestä lavasta. Koneen liikkessa noin 85 % - 92 % moottorin akselitehosta muuttuu työntövoimaksi. Startissa hyötysuhde on noin 0,5-0,6. Pienoismallissa on käytetty kiintopotkuria, koska kone lentää alisoonisella aluella sekä pienellä nopeudella.

Halkaisijaltaan suuremman potkurin läpi menee enemmän virtausta, joka puolestaan kasvattaa työntövoimaa. Liian suurta potkuria ei kuitenkaan voi käyttää, sillä se osuu maahan eikä moottori kykene pyörittämään potkuria sopivalla nopeudella.

Kun potkuria valitaan, tulee myös muistaa, että jos potkurin halkaisija on kovin pieni ja se on kevyt, potkuri pyörii liian nopeasti ja aiheuttaa sakkaamisen.

Potkurin materiaali voi olla puuta, muovia tai komposiittia. Suurilla nopeuksilla lennettäessä muovinen potkuri on huono sen elastisten ominaisuuksien takia.

Jos pienoismallissa halutaan käyttää moottoria, jonka kierrosluku ylittää 22000 kierrosta minuutissa, kannattaa ottaa käyttöön electric ducted fan (EDF), sillä tämän laitteen avulla saadaan koneeseen parempi työntövoima. Laitteen avulla saataisiin koneelle myös suurempi nopeus yli 320 km/h. Tällaiselle potkurille tarvitaan moottoria, jonka kaasutin sijaitsee moottorin takana.

4.5 Alennusvaihdelaatikko

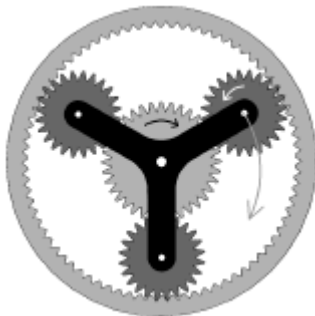
Lentokoneen potkurin nopeutta rajoitetaan alennusvaihdelaatikolla (gearbox reducer). Tämä laite pienentää kierroslukua ja kasvattaa vääntömomenttia, jonka ansiosta voidaan käyttää suurempaa potkuria. Vaihteistoja on kahdentyypisiä:

Toinen vaihteistoista koostuu kahdesta vaihteistosta, jossa toinen osa on pienempi kuin toinen. Pieni vaihteisto on kiinnitetty moottorin akseliin ja isompi vaihteisto on kiinnitetty potkuriin. Nämä vaihteistot ovat yhteydessä nokka-akselin jakohihnalla.



Kuva 20. Nokka-akselin jakohihnan vaihteisto/5/

Toinen tyyppi on aurinkokopyörä (sun gear) tai planetaarinen vaihteisto. Tämä vaihteisto on voimakkaampi kuin edellinen ja hieman monimutkaisempi. Vaihteiston keskimmäinen osa on kiinnitetty moottoriin ja sen ympärille kolme tai viisi vaihteistoa. Vaihteistot (pinion gear) on kiinnitetty tasavälein. Vaihteiston ulkokehällä on pyörimätön osa (ring gear).

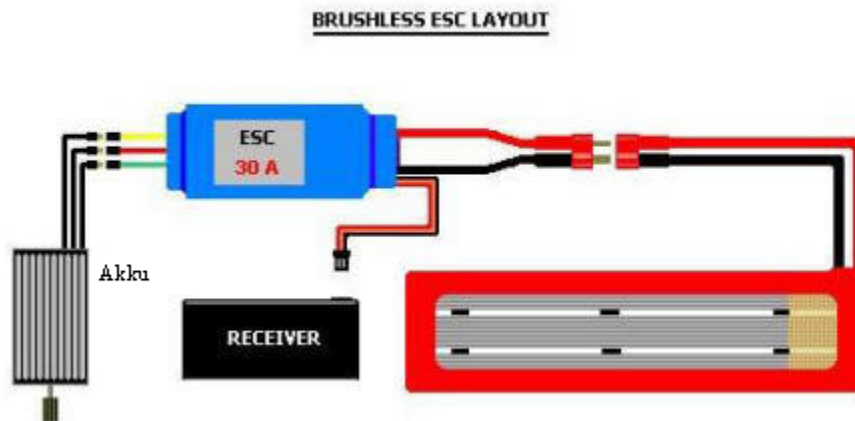


Kuva 21. Aurinkokopyöräinen vaihteisto (sun gear)/6/

4.6 Elektroniikan nopeussäädin ”ESC”

Elektroniikan nopeudensäätimellä voidaan säätää sähkömoottorin nopeutta ja suuntaa. Tämä laite valvoo akun jännitettä.

ESC kytketään suoraan vastaanottimeen servon tilalle. ESC toimii pulssinleveysmoduloiduilla transistorivahvistimilla.



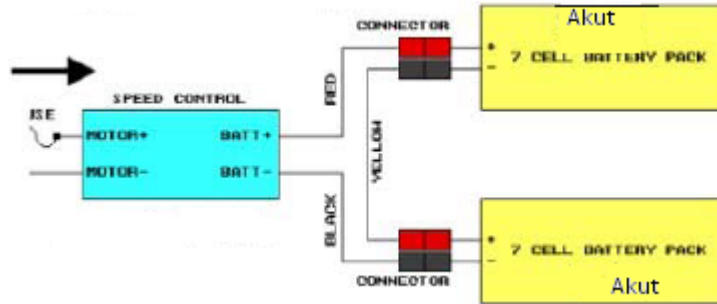
Kuva 22. Harjattomat ESC /7/

ESC:n sisällä on BEC (battery eliminator circuit). ESC mahdollistaa servon ja moottorin toimimisen samalla akulla, jolloin toista akkua ei tarvita.

Järjestelmässä, jossa käytetään BEC:tä, moottorin teho katkeaa, kun akun jännite laskee alle tietyn arvon. Vastaanottimen teho kuitenkin säilyy muutamia minutteja, jonka aikana lentokone voi laskeutua turvallisesti.

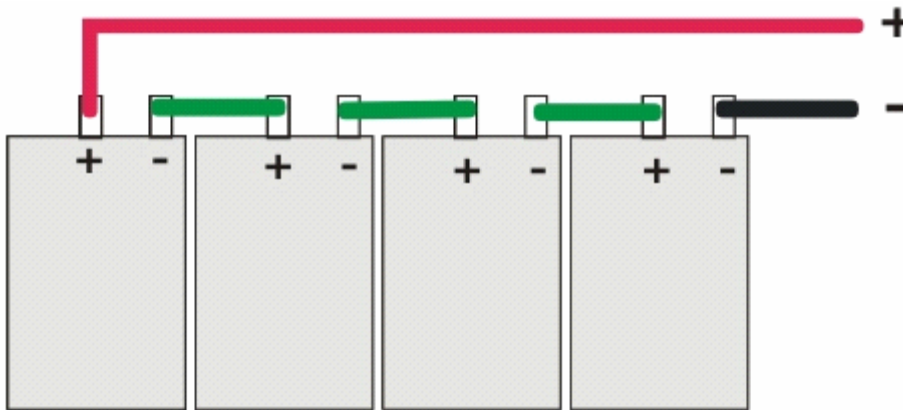
4.7 Moottorin virtalähde

Yleisesti radio-ohjauslaitteissa ”RC” käytetään NiCd- tai LiPo-akkuja. NiCd-akulla lentoaika on noin 7 minuuttia. LiPo-akun Kokonaiskapasiteetti on 4800 mAh ja paino 396 g ja sen lentoaika on noin 21 minuuttia. LiPo-akun etuja ovat pienikokoisuus ja keveys sekä edullisuus ja pitkä käyttöikä.



Kuva 23. Akku joka on liitetty ESC:hen /8/

Tässä Eurostarin pienoismallissa on 14 Lithium-ion polymer (LiPo) tyyppin akkuja, jotka on kytketty sarjaan. LiPo akut voivat toimia -20...+50 °C.



Kuva 24. LiPo-akun nimellijännite on 3,7 v. Kytkenän kokonaisjännite on $14 \times 3,7\text{v} = 51,8\text{v}$ ja vastuksen takia kokonaisjännite putoaa 49 volttiin.

Huomautus: Kun liitetään akut sarjaan,

- Kaikissa akuissa pitää olla sama kapasiteetti (mAh).
- Kaikissa akuissa pitää olla saman verran latausta.

Lithium-polymeeri akun ominaisuudet:

LiPo-akun jännite vaihtelee noin 2,7 V (tyhjä) noin 4,23 V (ladattu). LiPo-akut on suojattu yllilataukselta rajoittamalla sovellettu jännite enintään 4,235 V akkua kohti. LiPo akkuja voidaan ladata 150 kerta.

Vanhoissa akuissa (Lithium-polymeeri) täyteenlatausaika oli noin tunti, mutta nykyiset akut(Lithium-ioni polymeeri) latautuvat jopa viidessä minuutissa. Vanhoilla akuilla oli lyhyempi elinkaari uusiin akkuihin verrattuna.

Vanhanmallisilla akuilla oli suurempi räjähdysvaara kuin uusilla akuilla.

5 Radio-ohjaustekniikka

Tämä Eurostarin pienoismalli on radio-ohjattava. Radio-ohjauslaitteet ovat yleensä 2–7-kanavaisia. Jokaisella kanavalla voidaan ohjata erillistä toimintaa, esimerkiksi siivekkeiden liikkumista, nopeutta, korkeusperäsin jne.

2- ja 3-kanavaiset laitteet ovat halpoja ja perusmuodossaan paristokäyttöisiä. Akut ja laturit ovat saatavissa lisälaitteina. 2- ja 3-kanavaiset riittävät veneisiin ja autoihin. 4–7-kanavaiset ovat 5-6 kertaa kalliimpia kuin 2-kanavaiset ja ovat akkukäyttöisiä ja sopivat pienoislma-aluksiin.

5.1 Tietoa radio-ohjauslaitteista

Telehallintokeskukselle pitää hyväksyttää kaksi asiaa; tyyppi hyväksyminen ja merkki hyväksyminen.

5.1.1 Tyyppi hyväksytyt

Radiolähetintä ei saa käyttää radioviestintään, ja sen vaatimusten mukaisuus todetaan yleensä siten, että lähettimelle tehdään tyyppitarkastus ja annetaan tyyppi hyväksyntä. Tyyppi hyväksynnät eli asetetut vaatimukset määrää Telehallintokeskus.

5.1.2 Hyväksymismerkki

Merkistä nähdään, onko radio luvallinen ja kenellä on sen hallussapito-oikeus. Mikäli hyväksymismerkissä on hyväksynnän päättymisvuosi, lähetintä ei saa käyttää eikä pitää hallussa tuon vuoden jälkeen. Lähettimessä oleva Telehallituksen hyväksymismerkki osoittaa, että siitä on valvontamaksu maksettu. Tarra on yleensä laitteen lähetinosan takakannessa.

5.2 Radio-ohjauslaitteiden eri osat

Radio-ohjaus perustuu seuraaviin osiin: lähetin, vastaanotin, servo, akku ja kytkin sekä laturi.

5.2.1 Lähetin

Lähetin on radio-ohjauslaite, jolla annetaan käskyjä vastaanottimelle. Yleisimmissä lennokkiradioissa on vähintään neljä kanavaa: kaasu, sivuperäsin, korkeusperäsin ja

siivekkeet. Useampia kanavia voidaan käyttää jos koneessa on valo, kamera tai muita vastaavia laitteita. Suomessa radio-ohjattavissa pienoasilma-aluksissa käytetään yleensä 35 MHz:n radiotaajuutta. Joissakin maissa käytetään taajuutta 27 MHz.

4-7-kanavaisten lähettimien tehot ovat luokkaa 0,7–1,2 W. Käyttölämpötila voi vaihdella alueella -15... +55 °C ja käyttöaika yhdellä latauksella voi olla 5 tuntia, yleensä valmistajat ilmoittavat toiminta-ajan. Kun antenni kiinnitetään lähettimeen pallonivelellä, voidaan yhdistää suuri kenttävoimakkuus ja hyvä käyttöasento. On olemassa sellainen lähetin, jolla voidaan suunnitella lentoreitti ja lennon aika. Lähettimen avulla kone lentää ja laskeutuu automaattisesti.

5.2.2 Vastaanotin

Vastaanottimet yleensä ovat erittäin pienikokoisia ja kevyitä, 7-kanavaisen vastaanottimen paino on 63 g. Jännitealue on 4,8-6 V ± 20 %.

Pitää ottaa huomioon, että sekä vastaanottimessa että lähettimessä on oltava valittuna sama taajuus, jotta yhteys toimisi. Luonnollisesti kaksi lentäjää eivät voi toimia samalla taajuudella, koska molemmat tällöin häiritsisivät toisiaan.

Vastaanottimelle tuleva pulssisignaali ohjaa servomootoria. Jos on monta servoa ja pulssi menee väärille servoille, voidaan asia korjata lepopulssin aikana, jolloin tahdistin nollautuu.

5.2.3 Servo

Servon tehtävänä on muuttaa lähettimen antamat käskyt ohjattavan suureen liikkeeksi ja asennoksi. Servomootorin liike voi olla lineaarinen tai pyörivä. Lineaariservon liike on suoraviivaista. Niiden tarkkuus ja momentti ovat huonoja vaiheistojen lisääntyneiden osien vuoksi. Pyörimisservon vaiheiston avulla välitetään liikkeeksi ±45°. Asetusaika täydellä liikkeellä on 0,15 s ja tarkkuus on noin 0,5 %.

5.2.4 Virtalähteet

Pienemmissä järjestelmissä tarvitaan vähän voimaa ja virtalähteinä riittää paristot, isommissa tarvitaan aina akkua. Radio-ohjauslaitteissa käytettävät nikkeli-kadmiumtyyppisiä eli NiCd akkuja. NiCd- akut ovat pienikokoisia, kaasutiiviitä ja vuotamattomia. NiCd nimellisjännite on 1,25 v.

Koska jännite vastaanotinpuolella on 5 v ja lähettimissä 7,5 -10 v, akkuja kytetään sarjaan.

Sähköenergiakapasiteetti ilmoitetaan milliampeeritunteina (mAh) ja yleisimmät tyypit ovat 450 ja 500 mAh. Isojen voimakkaiden servojen akut voivat olla 1000 ja 1200 mAh. Tyypilliset NiCd akut purkautuvat 20 % neljässä viikossa, +20 °C lämpötilassa. Akkujen kapasiteetti määritellään I_{10} virralla eli 10 tunnin purkausvirralla ja hyötysuhde on noin 70 -75 %.

Siis latausaika voidaan määrittää seuraavalla kaavalla:

$$1,4 \times \frac{\text{Kapasiteetti (mAh)}}{\text{Latausvirta (mA)}} = \text{tuntia} \quad (5-1)$$

5.3 Radio-ohjauslaitteen valitseminen

Tässä Eurostarin pienoismallissa tarvitaan ainakin kuuden kanavan laitetta, jotta voidaan liikuttaa korkeusperäsintä, sivuperäsintä ja laskusiivekkeitä. Futaba 7C on sopiva laite koneeseen, sillä siinä on seitsemän kanavaa.



Kuva 25. Futaba 7C /9/

Futaba 7C toimii FM-taajuudella tai Pulssikoodimodulaatiolla PCM. Laitteessa käytetään S3151 digitaalisia servoja, jotka tarjoavat nopean ja tarkan sijainnin suurilla tehoilla. Futaba 7C on luotettava ja joustava. Siinä on 72x32 LCD näyttö, joka näyttää kirjaimet isolla. Ohjelmointi on helppoa Dialin näppäimistöllä. Valitsinta voidaan kiertää ja löytää haluttava ohjelma. Ohjelman avauduttua siihen voidaan asettaa arvoja. Laite toimii NiCa-akuilla. Lähetin on 600 mAh ja vastaanotin 600 mAh ja se toimii 72 MHz taajuudella.

6 Lentokonemekaniikka

Lentokonemekaniikka voidaan jakaa kolmeen pääryhmään:

- lentokoneen vakavuuden ja ohjauksen tutkiminen
- suoritusarvojen määrittäminen
- aeroelastiikka

6.1 Lentokoneen vakavuuden ja ohjauksen tutkiminen

Lentokoneen vakavuuden tutkimisen tarkoituksena on selvittää lennon vakavuutta ja lentokoneen liikkumista tasopainossa. Tasapainotilassa kone liikkuu vakionopeudella ja momentit ovat nolla. Vakavuutta kuvaa lentokoneen pyrkimys palata alkuperäiseen asentoonsa jonkin häiriön jälkeen. Jos lentokone palaa alkuperäiseen asemaansa häiriön jälkeen, on se stabiili, jos taas puolestaan ei, on lentokone epästabiili.

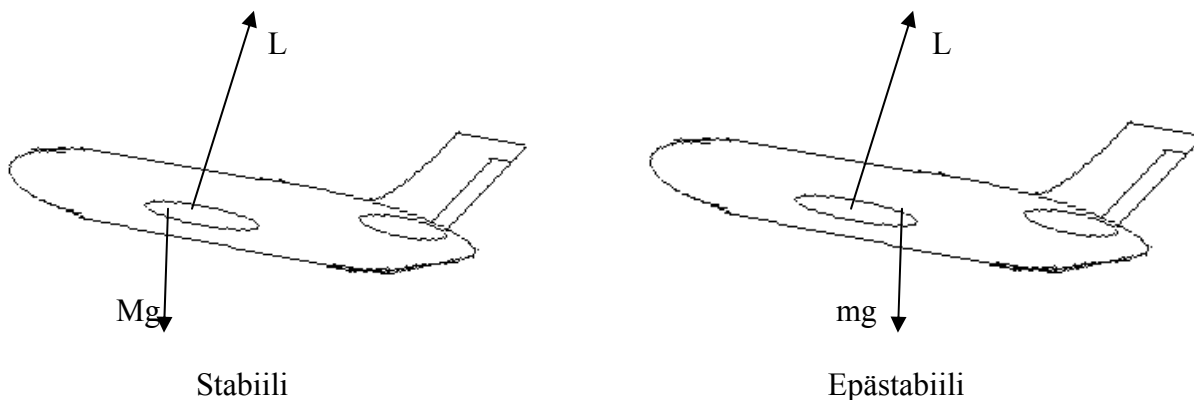
Lentokoneen kulmaliikkeistä ja kulmannopeuksista saadaan aerodynamisten momettien vaikutukset:

- Pituuskallistusmomentti (pitch).
- Suunnanmuutosmomentti (yaw).
- Poikittaiskallistusmomentti (roll)

6.1.1 Pituuskallistusmomentti (pitch)

Pituuskallistusmomentti pyrkii nostamaan tai laskemaan koneen nokkaa.

Jos painopiste sijaistaa aerodynamisen keskipisteen etupuolella, kone on stabiili ja jos painopiste taakseenpäin se on epästabiili.



Korkeusvakaimet ovat tärkeitä komponentteja pituuskallistusliikkeen aikana. Mitä suurempia ovat elevatorit, sitä stabiilimpi kone on. Kun painopisteen ja pyrstön välimatka kasvaa paranee myös koneen stabiiliteetti.

6.1.2 Suunnanmuutosmomentti (yaw)

Suunnanmuutosmomentti pyrkii kääntämään konetta ja muuttamaan sivuluisukulmaa. Lentokoneen runko ja sivuvakain ovat tärkeitä komponentteja suunnanmuutoksessa.

6.1.3 Poikittaiskallistusliike (roll)

Momentti pyrkii kallistamaan konetta. Oikealle kallistumista sanotaan positiiviseksi. Siiven sijainti lentokoneen rungossa sekä siiven kulma vaikuttavat poikittaiskallistusliikkeeseen. Jos siipi on rungon keskitason yläpuolella, lentokoneella on hyvä tasapaino ja siivet voivat olla suorat. Puolestaan, jos siivet ovat alapuolella, tarvitaan niihin v-kulma tasapainon saavuttamiseksi.

6.2 Suoritusarvojen määrittäminen

Mekaniikan keinoilla saadaan määritettyä lentokoneen suoritusarvoja kuten lentomatkaa, lentokorkeutta, hyötykuormaa, liitolukua, ym..

6.3 Aeroelastiikka

Aeroelastiikassa tutkitaan aerodynaamisten voimien vaikutusta lentokoneen rakenteisiin. Lentokoneen rakenteen pitää olla jäykkä, joka tarkoittaa sitä, että runkoon tulevat värähtelyvoimat eivät aiheuta muodonmuutosta.

7 Eurostarin pienoismallin rakentaminen

7.1 Suunnittelu

Suunnittelun aikana tarvittiin aerodynamiikan tietojen lisäksi lentomekaniikan tarkastelua. Aerodynamiikan avulla tiedettiin, miten voimat vaikuttavat lentokoneeseen ja mikä olisi hyvä hyötysuhde eli liitoluku. Lentomekaniikan avulla laskettiin lentokoneen vakavuutta, suoritusarvoja ja muodonmuutoksen palautumista. Suunnittelun tavoitteena oli saada lentokoneesta turvallinen ja taloudellinen.

Eurostarin pienoismallin tekniset tiedot

Taulukko 2. (1:3 asteikko) mallin EV-97 mittakaavan lentokoneita.

Parts	Value
Siipi	
Kärkiväli [m]	2,7
Pinta-ala [m ²]	1,1
Siiven aerodynaaminen keskijänne MAC [m]	0,42
kuormitus cg	136
Siiveke	
Pinta-ala [m ²]	0,033
Laskusiiveke	
Pinta-ala [m ²]	0,076
Runko	
Pituus [m]	1,99
Leveys [m]	0,347
Korkeus [m]	0,78
Horisontaali pyrstö yksikkö (HTU)	
Kärkiväli [m]	0,83
HTU Pinta-ala [m ²]	0,21
Korkeuseräisin pinta-ala [m ²]	0,026
Kohtisuora pyrstön yksikkö (VTU)	
Korkeus [m]	0,413
VTU Pinta-ala [m ²]	0,12
sivuperäisin pinta-ala [m ²]	0,051
Laskuteline	
renkas raide [m]	0,53
akseliväli [m]	0,45
Pää rengas halkaisija [mm]	117
Nokka rengas halkaisija [mm]	117

7.1.1 Aerodynamisen keskipisteen sijanti

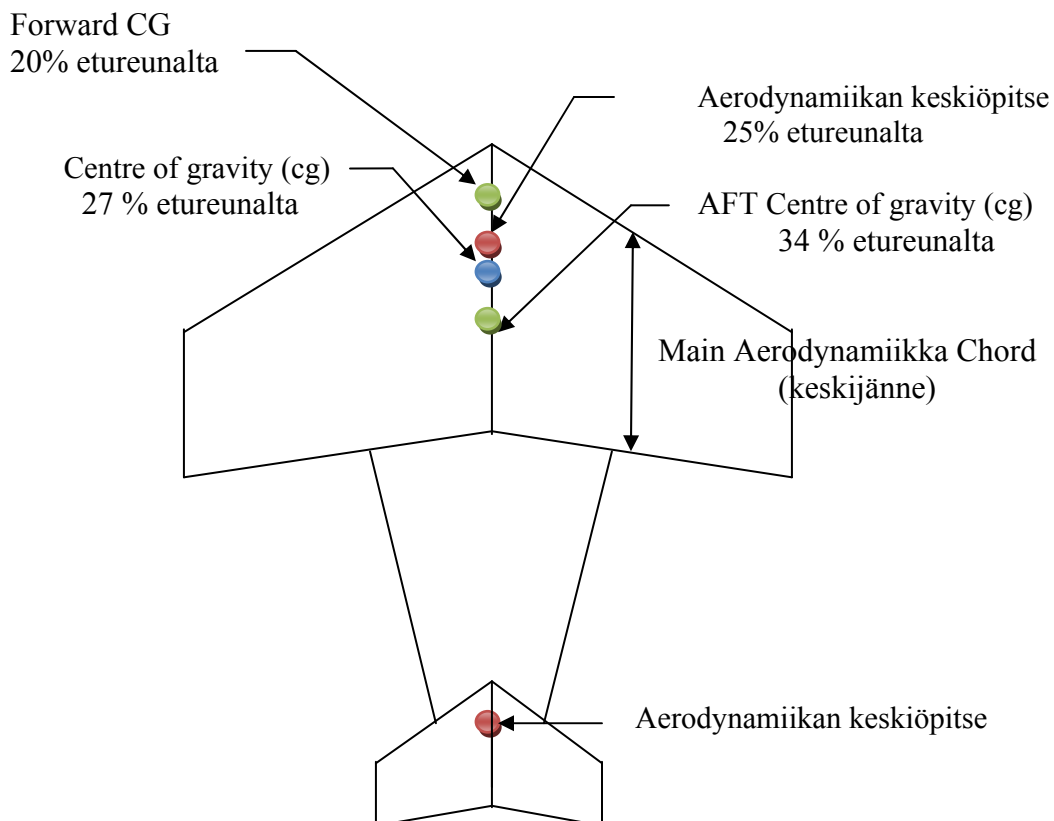
Jos vastus D ja työntövoima T sijatsevat aerodynaamisessa keskipisteessä, saadaan stabiili pituuskallistusmomentti eli pitch. Aerodynaamisessa keskipisteessä pituusmomentti ei riipu kohtauskulmasta. Tavanomainen aerodynamisen keskiön piste on 40 % keskijänteestä. Suoralla siivellä tämä piste sijaitsee 25 % keskijänteestä alisoonisella alueella. Ylisoonisella alueella aerodynaminen keskiö siirtyy keskijänteen puolivälin taakse.

Nostovoima L sijaistee aerodynamisen keskiön keskipisteessä. Nostovoiman L vastaava voima weight W sijaistee massakeskipisteessä (Centre of gravity, CG).

Massakeskipisteen (cg) avulla voidaan laskea muita aerodynaamisia arvoja.

Eurostarin pienoismallissa etumassakeskipiste sijaitsee 20 % etureunasta ja takamassakeskipiste on 34 % etureunasta. Näiden pisteiden puolivälissä sijaitsee massakeskipiste. Massakeskipisteen paikka voidaan laskea näillä tiedoilla seuraavasti:

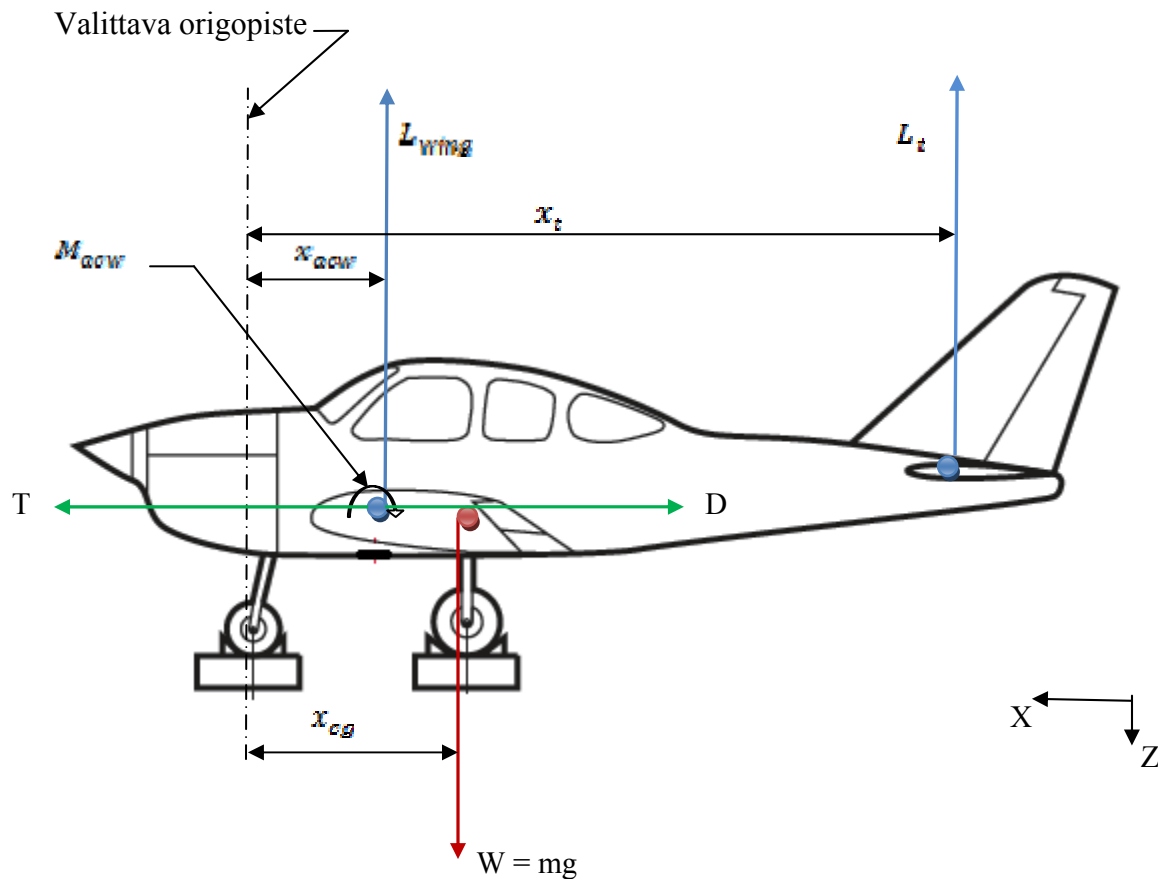
$$\frac{34 + 20}{2} \% = 27\%$$



Kuva 26. Aerodynamiikan keskipisteet sijanti

7.1.2 Nostovoiman laskeminen

Lentokoneessa on kaksi nostovoimaa: siiven nostovoima L_w ja pyrstön nostovoima L_t . Eurostarin Centre of Gravity eli painopiste sijaitsee aerodynamiikan keskiö pisteestä taaksepäin.



Kuva 27. Etu ja taka nostovoimat sekä koneen painovoiman sijanti

Nyt voidaan laskea kokonaisnostovoima:

$$\sum_{XYZ} F = 0 \quad T - D = 0 \quad (7-1)$$

$$L_w + L_t - W = 0 \quad (7-2)$$

$$\begin{aligned} \sum_{XYZ} M = 0 \quad M_{ow} + (x_{cg} - x_{ow})L_w - (x_t - x_{cg})L_t = 0 \\ L_t = \frac{i}{(x_t - x_{cg})} [M_{ow} + (x_{cg} - x_{ow})L_w] \quad (7-3) \end{aligned}$$

Koska $X_{cg} > X_{acw}$, L_t on tässä koneessa positiivinen ja se tarkoittaa että L_t vaikuttaa ylöspäin, jotta lentokone olisi tasapainossa. Jos L_t olisi negatiivinen eli voima alaspäin, koneen korkeusvakain synnyttäisi momenttia painopisteen suhteen. Tästä johtuu, että lentokoneen nokka nousee ylöspäin. Jos painopisteen ja vakaimen välimatka on suuri, momenttikin tulee suureksi.

Nyt kun sijoitetaan yhtälöön, saadaan kokonaisnostovoiman kaava:

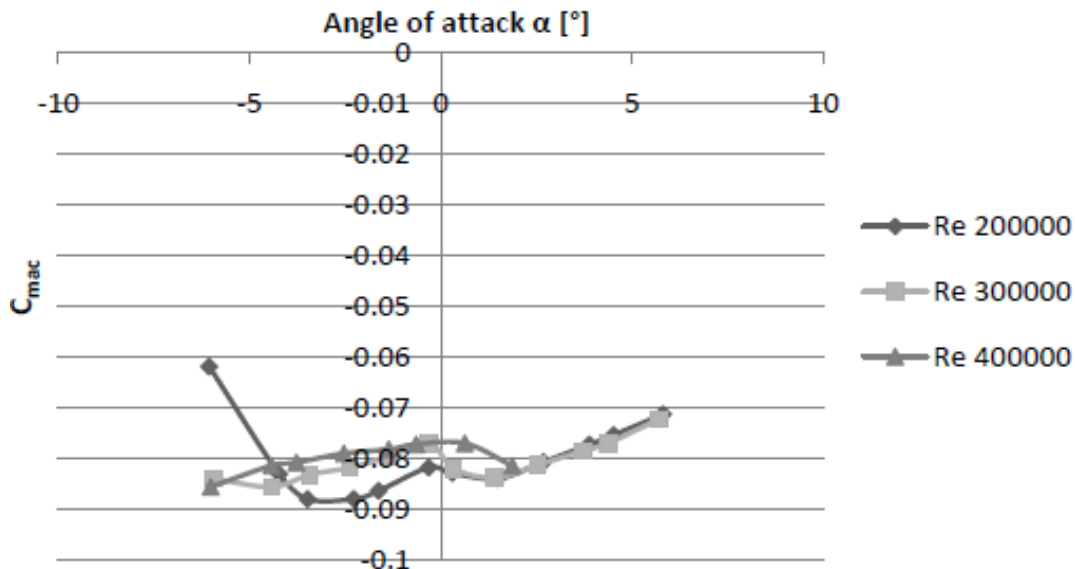
$$L = L_w + L_t \quad (7-4)$$

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_L + \frac{1}{(X_t - X_{cg})} [M_{acw} + (X_{cg} - X_{acw}) L_w] \quad (7-5)$$

M_{acw} on siiven aerodynaamisen keskipisteen momentti ja se saadaan laskettua tästä yhtälöstä:

$$M_{acw} = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_{MAC} \quad (7-6)$$

C_{MAC} on aerodynaaminen keskijänne, joka riippuu Reynoldsin luvun arvosta. Eurostarin siipi on Clark Y airfoil ja se on testattu tuulitunnelissa. Reynoldsin arvoiksi mittaamalla saatiin lukuja välillä C_{MAC} (-0,07) ja (-0,09). Niistä otettiin keskiarvo eli -0,08.



Kuva 28. Aerodynaamisen keskipisteen momentti/10/

Pyrstön nostovoima L_t laskeminen

L_t voidaan laskea etu- ja takapainopisteestä. Jos L_t on positiivista, se tarkoittaa, että pyrstön nostovoima pitää olla ylöspäin, jotta kone olisi tasapainossa.

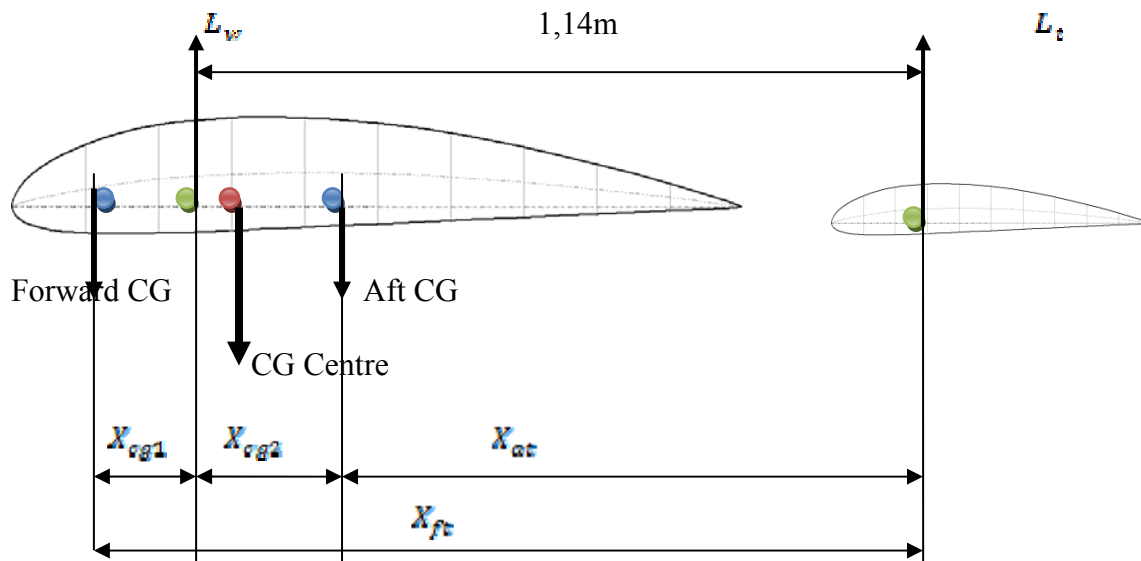
$$L_t = \frac{1}{(X_t - X_{ca})} [M_{acw} + (X_{cg} - X_{acw})L_w]$$

Ensin lasketaan siiven aerodynaaminen voima:

$$M_{acw} = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_{MAC}$$

$$M_{acw} = \frac{1}{2} \left[1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \left(12,1041 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 \times 2,169 \text{m}^2 \times -0,08 \right]$$

$$M_{acw} = -15,5711 \text{ [Nm]}$$



Kuva 29. Etu ja taka aerodynamiikan keskipisteet

$$X_{cg1}:$$

$$25\% - 20\% = 5\% \text{ jänneltä}$$
$$X_{cg1} = 0,05 \times 0,42 \text{ m} = 0,021 \text{ m}$$

$$X_{cg2}:$$

$$34\% - 25\% = 9\%$$
$$X_{cg2} = 0,09 \times 0,42 \text{ m} = 0,0378 \text{ m}$$

$$X_{fc}:$$

$$X_{fc} = 1,14\text{m} + 0,021\text{m} = 1,161\text{m}$$

$$X_{ac}:$$

$$X_{ac} = 1,14\text{m} - 0,0378\text{m} = 1,11\text{m}$$

L_z forward CG suhteen mukaan:

$$L_z = \frac{1}{X_{fc}} [M_{acw} + (X_{cg1})L_w]$$

$$L_z = \frac{1}{1,161\text{m}} [-15,5711 \text{ Nm} - (0,021\text{m} \times 196,2\text{N})]$$

$$L_z = -16,9753$$

L_z AFT, CG suhteen mukaan:

$$L_z = \frac{1}{X_{ac}} [M_{acw} + (X_{cg2})L_w]$$

$$L_z = \frac{1}{1,11\text{m}} [-15,5711 \text{ Nm} + (0,0378) \times 196,2 \text{ N}]$$

$$L_z = -7,34661$$

Pyrstön nostovoima pitää olla alaspäin, jotta kone olisi tasapainossa.

7.1.3 Liitoluvun laskeminen

Nostovoimakertoimen C_l laskeminen

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_l = W$$

$$C_l = \frac{W}{\frac{1}{2} \rho v^2 S}$$

C_D kokonaisvastuskerroin

Vastusvoima saadaan seuraavalla kaavalla:

$$D = \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right) \times S \times c_D$$

$$c_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho v^2 S}$$

$$C_D = C_{D0} + k C_l^2$$

$$k = \frac{1}{\pi A}$$

Eurostarin pienoismallin C_{D0} on välillä (0,055...0,075), joten otetaan niiden arvon keskiarvo eli 0,065.

e on oswaldin kerroin alisoonisella alueella $e = 0,7...0,85$.

e otetaan 0,75.

A on sivusuhte eli:

$$A = \frac{\text{kärkiväli}^2}{\text{stiptointi-ala}}$$

$$S = \text{Aerodynamiikan keskipinta} \times \text{kärkiväli}$$

$$S = 0,42 \times 2,7 = 1,134$$

$$A = \frac{b^2}{S} = \frac{2,7^2}{1,134} = 6,4285$$

$$k = \frac{1}{0,75 \times \pi \times 6,4285} = 0,06389 \approx 0,064$$

Arvin Rajabi

Jos pienoismalli painaa 20 kg, voidaan eri nopeuksilla, esim $\left(5 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \dots, 70 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$, laskea suoritusarvot ja liitoluku:

$$W = m \cdot g = 20 \text{ kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \implies W = 196,2 \text{ N}$$

ja

$$v = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Koska siipikuormituksen tietoa ei ole olemassa, otetaan huomioon koko lentokoneen paino ja pinta-ala.

Taulukko 3. Eurostarin pienoismallin eri osien pinta-alat

Parts	Value
Siipi	
Pinta-ala [m ²]	1,1
Siivekke	
Pinta-ala [m ²]	0,033
Laskusiivikke	
Pinta-ala [m ²]	0,076
Runko	
Pituus [m]	1,99
Leveys [m]	0,347
HTU	
HTU Pinta-ala [m ²]	0,21
Korkeus peräisin Pinta-ala [m ²]	0,026

$$S = 1,134 + 0,033 + ,076 + 0,21 + 0,026 + (1,99 \times 0,347) \text{m}^2 = 2,169 \text{m}^2$$

Nostovoimakertoimen C_l laskeminen:

$$L = L_{wing} + L_{tail} = W$$

$$C_l = \frac{W}{\frac{1}{2} \rho v^2 S}$$

$$C_l = \frac{196,2 \text{ kg } \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\frac{1}{2} \times 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \left(5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)^2 \times 2,169 \text{ m}^2}$$

$$C_l = 5,90736$$

Kokonaisvastuskertoimen C_D Laskeminen:

$$C_D = C_{D0} + k C_l^2$$

$$C_D = 0,065 + (0,064 \times 5,90736^2)$$

$$C_D = 2,29840$$

Siiven vastuksen laskeminen:

$$D = \left(\frac{1}{2} \rho v^2\right) \times S \times c_D$$

$$D = \frac{1}{2} \left[1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \left(5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)^2 \times 2,169 \text{ m}^2 \times 2,29840 \right]$$

$$D = 76,3363$$

Liitoluku E:

$$E = \frac{C_L}{C_D}$$

$$E = \frac{5,90736}{2,29840} = 2,57021$$

Olen laskenut liitolukua eri nopeuksilla liitteen 1 mukaan.

Liitoluvun maksimi:

Nyt voidaan laskea aerodynaamisen tehokkuuden maksimi eli E_{Max} .
Liitoluku on maksimissa, jos vastus on minimissä.

$$E = \frac{L}{D}$$

$$E_{Max} = D_{Min}$$

$$E_{max} = \left[\frac{C_L}{C_D} \right]_{max} = \frac{1}{2\sqrt{kC_{D0}}}$$

$$E_{max} = \frac{1}{2\sqrt{0,065 \times 0,064}}$$

$$E_{max} = 7,752170912$$

E_{max} kasvaa sivusuhteen kasvaessa:

$$A = \frac{b^2}{S}$$

Eli kärkivälin kasvattaminen kasvattaa sivusuhdetta ja tällöin kasvaa myös liitoluvun maksimi. Alisoonisella alueella liitoluvun maksimiarvo on vakio. Transsoonisella alueella E_{max} pienenee Machin luvun kasvaessa, koska nollavastuskerroin C_{D0} alkaa kasvaa tällä alueella. Ylisoonisella alueella C_{D0} pienenee, mutta k kasvaa Machin luvun kasvaessa, joten E_{max} pienenee.

7.2 Moottorin valitseminen

Harjattomat sähkömoottorit ovat luotettavampia ja tarvitsevat vähemmän huoltoa harjallisiin sähkömoottoreihin verrattuna. Niillä on hyvät dynaamiset ominaisuudet, toisinsanoen pieni kitkakerroin ja suuri vääntömomentti. Huonona puolena harjattomilla sähkömoottoreilla on niiden kallis hinta. Moottori lämpenee vähän, jolloin sen hyötysuhde pysyy hyvänä ja sillä on pitkä käyttöikä

3-vaiheinen epätahtikone on parempi vaihtoehto

- Vähentää käynnistyksissä syntyviä rasituksia
- Tarkentaa prosessin toimintaa
- Säästää energiaa
- Virtapiikit poistuvat käynnistyksestä
- Hyötysuhde jopa 97 %, vain 3 % lämmöksi

Pienoismalliin valitaan korkean käynnistysmomentin ja suuritehoisuuden takia 3-vaiheinen epätahtinen Ac-moottori.

Moto Calc 8.0.7 -ohjelmalla voidaan löytää koneelle sopiva sähkömoottori kun maksimilentoaika on 30 minuuttia. Ohjelmaan syötetään siiven pinta-ala ja kärkiväli, moottorin käyttömäärä, siiven profiili, lentokorkeus, lentoaika sekä lentokoneen paino.

Sopivia sähkömoottoreita tälle pienoismallille löytyi kaksi. Scale 45 lbs (20 kg) A150-8 ja A150-10. Molempien maksimiteho on 9000 W 15 sekunnin aikana ja valmistaja on Hacker. Molemmat ovat samanhintaisia ja molemmat painavat 2100g. A150-10: lla on enemmän vastushäviöitä ja vähemmän virtahäviöitä kuin 150-8:lla, mutta se ei tarvitse vaihdetta.

<i>Motor</i>	<i>A100</i>		<i>A150</i>		<i>A200</i>	
Ersetzt VerbrennerGröße	80-100ccm		100-120ccm		150-200ccm	
Leistungsbereich	max. 7000W (15 sec.)		max. 9000W (15 sec.)		max. 15000W (15 sec.)	
Sport- und Scale	10..15kg / 22..33 pounds		15..20kg / 33..44 pounds		20..27kg / 44..60 pounds	
Kunstflug und 3D	8..12kg / 17,5..24 pounds		10..15kg / 17,5..33 pounds		15..20kg / 33..44 pounds	
<i>Windungszahl</i>	<i>8</i>	<i>10</i>	<i>8</i>	<i>10</i>	<i>6</i>	<i>8</i>

Kuva 30. Erilaiset hacker sähkömoottorit /11/

Hacker A150-8 Motor on suunniteltu ja hyvin suosittu 80 150cc Gas luokan malli. Etuna tässä on hiljainen ja puhdas sähkömoottori. Moottori on suunniteltu pienoismalleille joiden paino on 22–60 paunaa (10,0- 27,0 kg). Kyseinen moottori sopii Eurostarin pienoismalliin, sillä se painaa 44 paunaa (20 kg). Hacker A150-8 Motor on 20-napainen Outrunner-tyyppinen, joka antaa suuren vääntömomentin alemmilla nopeuksilla kuin Inrunnerit, joilla voidaan käyttää isoa potkuria ilman vaihteistoa.



A150-8
Bestnr.: 37200006

Für Kunstflugmodelle bis 15kg oder Scale-Modelle bis 20kg mit 12-14S
For Pattern up to 20 lbs or Scale-Airplanes up to 31 lbs and 12 to 14S

Prop	27x12 TH Mejzlik	27x12 TH Mejzlik
LiPo	12 S	14 S
Volt	42 V	49 V
Amp.	155 A	188 A
RPM	5940	6892
Power	6510 W	9212 W
Contr.	MasterSpin 170	MasterSpin 220



A150-10
Bestnr.: 37200007

Für Kunstflugmodelle bis 15kg oder Scale-Modelle bis 20 mit 12 bis 14S
For Pattern up to 20 lbs or Scale-Airplanes up to 31 lbs and 12 to 14 S

Prop	27x12TH Mejzlik	30x12 Engel
LiPo	12 S	14 S
Volt	42 V	49 V
Amp.	125 A	140 A
RPM	4800	5733
Power	5260 W	6860 W
Contr.	MasterSpin 170	MasterSpin 220

Kuva 31. Moottorien ominaksuusia /12/

Arvin Rajabi

Potkuri

Hacker A150-8 Moottorissa voidaan käyttää 27x12 potkuria.

Akku

Hacker A150-8 Moottorissa voidaan käyttää 12..14 sarjassa LiPo akkua.

LiPo tarkoittaa Lithium-ion polymer battery.

<i>Motor</i>	<i>A150</i>		<i>Motor</i>
Ersetzt Verbrennergröße	100-120ccm		Equivalent to gas engine size
Leistungsbereich	max. 9000W (15 sec.)		Powerrange
Sport- und Scale	15..20kg / 33..44 pounds		Sport and Scale
Kunstflug und 3D	10..15kg / 17,5..33 pounds		Pattern and 3D
<i>Windungszahl</i>	<i>8</i>	<i>10</i>	<i>Turns</i>
Leerlaufstrom (Io) @8,4Volt [A]	3,6A	2,2A	Idle Current (Io) @ 8,4Volt [A]
Innenwiderstand (Ri) [Ohm]	0,015	0,023	Resistance (Ri) [Ohm]
RPM/Volt (Kv)	166	133	RPM/Volt (Kv)
Prop-Adapter	✓		Prop-Adaptor
Gewicht	2100g / 4,6 pounds		Weight
Aussendurchm. D1	109 mm / 4,3"		Diameter D1
Länge von Propadapter bis Rückplatte	114mm / 4,49"		Length from Propadaptor to Mountingflange
Drehzahl max.	8.000		RPM max.
Typ	20-Poliger Aussenläufer		Type
Drehzahlsteller	MasterSpin 220 OPTO		Speed Control
empf. Timing	22°		recomm. Timing
Schaltfrequenz	8 kHz		Switching Frequency

Kuva 32. Moottorin virta- ja jännitehäviöiden tiedot /11/

Moottorin yhteenveto

Hacker 150A-8, jossa on käytetty 14 LiPo akkua. Moottori toimi hyvin -40 ... +55°C lämpötilassa. Voidaan käyttää potkuria, jonka halkaisija on 27x12.

Sea-level Pressure: inHg
Air Temperature: -40 ... +55°C

Drive System Type: Direct Drive Only
Propeller Size: 27x12
Motor Type: Brushless Only
Manufacturer: Hacker
Battery Type: LiPo
Maximum Number of Cells: 14s LiPo
Speed Control: MasterSpin 220
RPM max: 6892
Weight: 2100g
Max Power 9000W



7.3 Suoritusarvojen laskeminen

Moottorin valitsemisen jälkeen voidaan laskea kaikki muut arvot, jotka riippuvat moottorista. Näitä ominaisuuksia ovat työntövoima, vastus, lento-ohjain, laskeutuminen, toiminta-aikaja kantama.

7.3.1 Työntövoiman laskeminen

Työntövoima syntyy potkurin avulla. Potkurin tärkeä tekijä on sen halkaisija, jonka avulla voi laskea potkurin pint-alan. Työntövoima voidaan laskea seuraavalla kavaalla:

$$T = \dot{m}\Delta\vartheta \quad (7-7)$$

$$\left[N = \frac{kg}{s} \times \frac{m}{s} \right]$$

\dot{m} on ilmapvirtauksen massa ja riippuu ilman tiheydestä ja nopeudesta sekä potkurin pinta-alasta.

$$\dot{m} = \rho\vartheta S \quad (7-8)$$

$\Delta\vartheta$ avulla voidaan laskea tarvittava työntövoima T_R ja käytettävissä oleva työntövoima T_A .

T_R riippuu koneen painosta ja liitoluvusta:

$$\frac{D}{L} = \frac{T}{mg} = \frac{mg}{E} \quad (7-9)$$

Seuraavalla kaavalla saadaan laskettua tarvittava työntövoima.

$$T = mg \frac{D}{L} = \frac{mg}{E}$$

Tarvittava työntövoima:

$$E_{max} = 7,7521;$$

$$mg = 196,2 \text{ N}$$

$$T = \frac{196,2N}{7,7521} = 25,3093N$$

Käytettävissä työntövoima:

Käytettävissäoleva työntövoima riippuupotkurin hyötysuhteesta, jokasaadaan seuraavalla kaavalla.

$$T = \frac{\eta P}{\dot{m}} \quad (7-10)$$

Jossa, η on potkurin hyötysuhde nopeassa lennossa, jolloin paras hyötysuhde on $\eta \approx 0,85 - 0,92$. Koska käytössä on kolmivaiheinen säkömoottori, hyötysuhde on 91 %. P on moottorin teho, joka on 9212W ja v on lentonopeus.

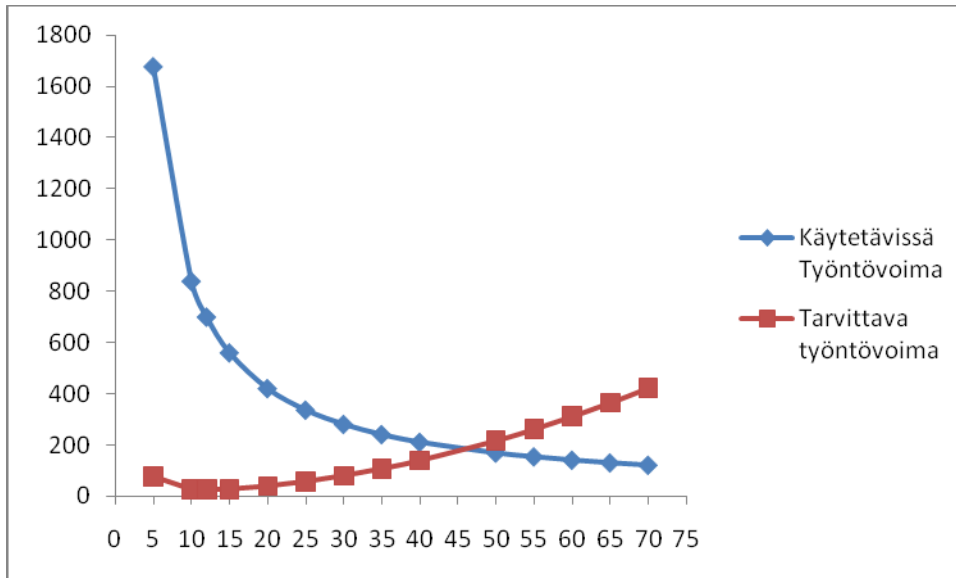
$$T = \frac{0,91 \times 9212 \frac{\text{N}}{\text{s}}}{12,1041 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 698,63 \text{ N}$$

7.3.2 Maksimi lentonopeuden laskeminen

Kun lentonopeus on nolla, potkurin lavat ovat paikallaan. Kun nopeus kasvaa, työntövoima pienenee.

Taulukko 4. Tarvittava työntövoima ja käytettävissä oleva työntövoima erilaisilla nopeuksilla.

Nopeus	η_{Prop}	Pmax	Nopeus	Ta	Tr
5	0,91	9212	5	1677	76,33636
10	0,91	9212	10	838,3	27,17971
12	0,91	9212	12	698,6	25,31292
15	0,91	9212	15	558,9	27,67144
20	0,91	9212	20	419,1	39,17742
25	0,91	9212	25	335,3	56,93792
30	0,91	9212	30	279,4	79,77847
35	0,91	9212	35	239,5	107,2966
40	0,91	9212	40	209,6	139,3243
50	0,91	9212	50	167,7	216,6251
55	0,91	9212	55	152,4	261,8318
60	0,91	9212	60	139,7	311,387
65	0,91	9212	65	129	365,2817
70	0,91	9212	70	119,8	423,5097



Kuva 33. Tästä kuvasta nähdään työntövoiman suuruus eri lentonopeuksilla.

T_R on tarvittava työntövoima, joka riippuu nostovoimasta ja se kasvaa lentokoneen nopeuden kasvaessa.

T_A on käytävissä oleva työntövoima ja se riippuu nollanostovastuksesta. Arvo pienenee lentonopeuden kasvaessa. Tietyllä lentonopeudella kokonaisvastus on pienimmillään. Tämä nopeus on maksiminopeus, joka tässä koneessa on $46 \frac{m}{s}$.

$$v_{max} = 46 \frac{m}{s} \times 3,6 = 165 \left[\frac{km}{h} \right]$$

7.3.3 Sakkausnopeuden laskeminen

Pienin nopeus, joka vastaa sakkausnopeutta voidaan helposti löytää käyttämällä kaavaa:

$$v_s = \sqrt{\frac{2mg}{C_{lmax} \rho S}} \quad (7-11)$$

Sakkausnopeudella nostovoimakerroin on maksimissaan $C_l = C_{lmax}$. C_l maksimi on 1,02558.

$$v_s = \sqrt{\frac{2 \times 196,2 kg \frac{m}{s^2}}{1,02558 \times 1,225 \frac{kg}{m^3} \times 2,169 m^2}}$$

$$v_s = 11,8557 \frac{m}{s} = 42,680 \frac{km}{h}$$

7.3.4 Liukulento

Kun lentokoneen moottori sammuu, tällöin työntövoima on nolla. Potkuri pyörii vielä vaikka koneen moottori on sammunut. Potkurin pyörimisnopeus ja lentokoneen nopeus riippuvat vastuksesta ja nostovoimasta eli liitoluvusta.

7.3.5 Vaakalennon nopeus

Kun vastus on minimissään, voi kone lentää vaakalennossa parhaalla liitoluvun nopeudella. Tämä nopeus voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$v_{ref} = \sqrt{\frac{k}{C_{D0}}} \times \sqrt{\frac{2mg}{\rho S}} \quad (7-12)$$

$$v_{ref} = \sqrt{\frac{0,064}{0,065}} \times \sqrt{\frac{2 \times 196,2 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 2,1695 \text{ m}^2}}$$

$$v_{ref} = 12,1041 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 43,575 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

v_{ref} on referenssinopeus, myös käytetään v_{md} symbolia eli minimum drag. Referenssinopeus riippuu siipikuormituksesta $[mg/S]$ ja ilman tiheydestä ρ . Ilman tiheys pienenee korkeuden kasvaessa, joten referenssinopeus kasvaa.

7.3.6 Pystylennon nopeus

Pystynopeus riippuu ratalentonopeudesta ja liukukulmasta.

$$C = v \sin \gamma \quad (7-13)$$

C on pystynopeus ja v on lentoratanopeus ja γ on liukukulma, joten arvo on radiaaneina. Jos liukukulma on tosi pieni, ei siniä oteta huomioon.

$$C \approx v \gamma \quad (7-14)$$

Liukukulma on minimissään parhaalla liitoluvulla ja se lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$\gamma_{min} = -\frac{1}{E_{max}} \quad (7-15)$$

$$\gamma_{min} = -\frac{1}{7,752170912}$$

$$\gamma_{min} = -0,128996139 \text{ rad} = -7,391^\circ$$

Eli kone menee alaspäin $7,4^\circ$ kulmalla.

Koska liukukulma on tosi pieni, lasketaan seuraavalla kaavalla pystynopeutta:

$$C \approx \theta \gamma$$

$$C = 12,1041 \frac{m}{s} \times -0,128996 = -1,56138 \frac{m}{s}$$

Voidaan myös laskea kuljettu matka korkeuden muutoksen tiedon mukaan:

$$X = -\frac{100m}{-0,128996} = 7752,5389 m = 7,752 km$$

Eli 7,7 kilometrin jälkeen kone alentaa 100 metriä korkeudesta.

Taulukko 5. Pystynopeus eri nopuksilla

nopeus V m/s	y	Pystynopeus (C)	X [m]	korkeus [m]
5	-0,38907	-1,9453709	-257,02039	100
10	-0,13853	-1,3853064	-721,86195	100
12,1041	-0,12902	-1,5616213	-775,09828	100
15	-0,14104	-2,1155537	-709,03424	100
20	-0,19968	-3,9936208	-500,79867	100
25	-0,29020	-7,2550868	-344,58582	100
30	-0,40662	-12,198543	-245,93102	100
35	-0,54687	-19,140582	-182,85755	100
40	-0,71011	-28,404551	-140,82250	100
50	-1,10410	-55,205162	-90,57124	100
55	-1,33451	-73,398315	-74,93360	100
60	-1,58709	-95,225397	-63,00840	100
65	-1,86178	-121,01584	-53,71198	100
70	-2,15856	-151,09928	-46,32716	100

Tässä nähdään, että kun nopeus kasvaa, liukukulma myös kasvaa.

7.3.7 Pienin vajoamisnopeus vaakaalennossa

$$\vartheta_{C_{min}} = \frac{\vartheta_{ref}}{\sqrt{5}} \approx 0,76\vartheta_{ref} \quad (7-16)$$

$$\vartheta_{C_{min}} = 0,76 \times 12,1041 \frac{m}{s}$$

$$\vartheta_{C_{min}} = 9,19912 \frac{m}{s}$$

7.3.8 Pienin vajoamisnopeus pystylennossa

$$C_{min} = -\frac{2\sqrt{3}\vartheta_{ref}}{3 E_{max}} \approx -0,877 \frac{\vartheta_{ref}}{E_{max}} \quad (7-17)$$

$$C_{min} = -0,877 \times \frac{12,1041 \frac{m}{s}}{7,7521709}$$

$$C_{min} = -1,36933 \frac{m}{s}$$

Jos virtausnopeus on suurempi kuin vajoamisnopeus, kone lentää ylöspäin. Jos kärkiväliä kasvatetaan 10 %, liukukulma pienenee 9,1 % ja pienin vajoamisnopeus 13,3 %. Jos nollanostovastuskerroin pienenee 10 %, liukukulmaa pienenee 5,1 % ja pienin vajoamisnopeus 2,6 %.

7.3.9 Nousulento

Vakionopeudella lentävä lentokone nousee ilmaan, jos työntövoima on suurempi kuin vastus.

$$L = mg \cos \gamma \quad (7-18)$$

$$T - D = mg \sin \gamma \quad (7-19)$$

$\sin \gamma$ on nousukulma eli ratakulma ja se ilmoitetaan radiaaneina.

$$\sin \gamma = \frac{T - D}{mg}$$

Jos ratakulma on pieni, ei sinia oteta huomioon.

Kohoamisnopeus C voidaan määrittellä seuraavalla kaavalla

$$C = V \sin \gamma = \frac{TV - DV}{mg} \quad (7-20)$$

jossa V on ratanopeus.

Nyt voidaan sijoittaa kaavalle vastus D ja nostovoima L. Tämä kaava on potkurikoneen kohoamisnopeudelle.

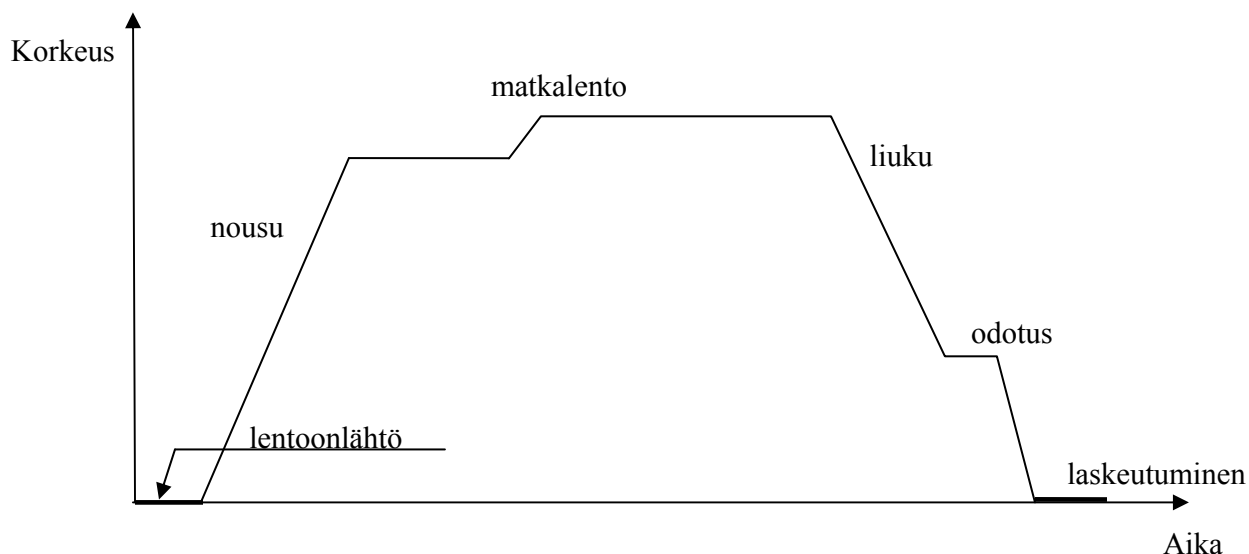
$$C = \frac{V^2}{mg} - \frac{\rho \sigma^2 S}{2mg} \left[C_{D0} + K \left[\frac{2mg}{\rho \sigma^2 S} \right]^2 \right] \quad (7-21)$$

Kohoamisnopeuksia on laskettu eri nopeuksilla liitteessä 2.

7.3.10 Kantama ja toiminta-aika

Kantamalla tarkoitetaan matkaa, jonka kone voi lentää käytettävissä olevalla polttoainemäärällään. Käytettävä polttoainemäärä riippuu tankkien tilavuudesta, hyötykuormasta ja koneen suurimmasta sallitusta lentoonlähtöpainosta.

Lento voidaan jakaa viiteen vaiheeseen: lentoonlähtöön, nousuun matkalentokorkeuteen, matkalentoon, liukuun laskua varten ja laskeutumiseen. Kaikki nämä lennon vaiheet otetaan huomioon kantamaa ja toiminta-aikaa laskettaessa.



Kuva 34. Lennon eri vaiheet.

Tarkkoja matkalentolaskemia varten voidaan antaa tiedot koneen ominaisuuksista ominaiskantaman avulla. Ominaiskantama ei ole vakio, vaan se muuttuu koko ajan lennon aikana ja se riippuu koneen massa, lentonopeudesta, painekorkeudesta ja ilman lämpötilasta. Ominaiskantamassa ei yleensä oteta huomioon tuulen vaikutuksia.

Ominaiskantama kuvaa sitä matkaa ΔX , joka koneella voidaan lentää yhdellä polttoaineyksiköllä Δm_{poltto} (esim. 1 km 1 kg:lla polttoainetta).

Potkurikoneen ominaiskantama voidaan määrittää seuraavalla kaavalla.

$$\frac{\Delta X}{\Delta m_{\text{poltto}}} = \frac{\eta E}{b' mg} \quad (7-22)$$

b' on polttoaineen ominaiskulutus ja sen yksikkö on $\left[\frac{\text{kg}}{\text{Wh}} \right]$:

$$b' = \frac{\beta}{P} \quad (7-23)$$

Tyypillinen polttoaineen ominaiskulutuksen arvo 100 kW:n mäntämoottorilla on

$$b' \approx 8,5 \times 10^{-8} \frac{\text{kg}}{\text{Wh}}$$

β on polttoaineen ominaiskulutus ja P on moottorin teho.

Potkurikoneen kantama vaakalennossa voidaan laskea ominaiskantaman seuraavalla kaavalla

$$X = \frac{\eta E}{b' g} \ln \left[\frac{m_i}{m_f} \right] \quad (7-24)$$

joissa η on potkurin hyötysuhde, E on liitoluku, b' on polttoaineen ominaiskulutus, g on maan vetovoima, m_i on lentokoneen massa tarkasteltavan vaakalento-osuuden alussa ja m_f sen lopussa. Suuri liitoluku pienentää polttoaineenkulutusta.

Pienoismallissa on käytetty sähkömoottoria. Moottori ei tarvitse toimiakseen polttoainetta vaan akun.

Sähkömoottorissa Hacker A150-8 on käytetty Lithium-ion polymer -akkaa, jonka syöttövoltti on 49 v ja häviövoltti on 8,4 voltia sekä ampeerikapasitetti on 188A ja häviöampeeri on 3,6 A. Näiden tietojen perusteella voidaan laskea akun virran tyhjennysaika T:

$$T = \frac{\text{syöttö virran}}{\text{virran Häätö}}$$

$$T = \frac{188 \text{ Ah}}{3,6 \text{ A}} = 52,22 \text{ h}$$

Eli akun tyhjennysaika on 52 tuntia ja 13 minuuttia.
Akun tyhjennyksen aikana syöttövoltti alenee 40,6:

$$49 \text{ v} - 8,4 \text{ v} = 40,6 \text{ v}$$

Eli minimiteho tässä moottorissa on:

$$40,6 \text{ v} \times 188 \text{ A} = 7632,8 \text{ W}$$

7.3.11 Lakikorkeus

Lakikorkeus on se korkeus, jossa kohomisnopeus on nolla eli absoluuttinen lakikorkeus. Kun korkeus kasvaa, kohomisnopeus pienenee. Lakikorkeudella tarkoitetaan suurinta korkeutta. Lakikorkeus riippuu liitoluvusta. Korkeuden mukaan paino ja työntövoima pienenevät. Potkurikoneelle absoluuttinen lakikorkeus voidaan määrittää seuraavalla kaavalla:

$$P_{Max} = \frac{2}{3} \sqrt{g} \frac{\rho_{ref} m g}{\eta E_{max}} \approx 0,877 \frac{\rho_{ref} m g}{\eta E_{max}} \quad (7-25)$$

Eli maksimiteho ja referenssinopeus riippuvat lentokorkeudesta, jossa:

$$(DV)_{min} = (\eta P)_{min}$$

Arvin Rajabi

Toisaalta käytännöllinen lakikorkeus määräytyy ilman tiheyden mukaan, joka puolestaan vaikuttaa maksimitheoon.

$$P_{max}(\rho) = P_{max0} \left[1,132 \frac{\rho}{\rho_0} - 0,132 \right] \quad (7-26)$$

P_{max0} on moottorin maksimiteho, joka tälle koneelle on 9212W. Sijoitetaan yhtälöön tarvittavat arvot:

$$\begin{aligned} P_{max}(\rho) &= P_{Max} \\ P_{max0} \left[1,132 \frac{\rho}{\rho_0} - 0,132 \right] &= 0,877 \frac{v_{ref} m g}{\eta P_{max0}} \\ 9212 \left[1,132 \frac{\rho}{1,225} - 0,132 \right] &= 0,877 \times \frac{12,1041 \frac{m}{s} \times 196,2N}{0,91 \times 7,75} \\ \rho &= 0,177536 \frac{kg}{m^3} \end{aligned}$$

Ilman tiheyttä vastaava lentokorkeus on **15,55 km**.

Tässä korkeudessa lämpötila on $-56,5^\circ C$ ja ilmanpaine on 11043.978864 pa tai 110,43 mbar ja äänen nopeus on 295.06956 m/s.

7.3.12 Kaartolento

Kaartolennolla tarkoitetaan lentokoneen kykyä muuttaa liikesuuntaansa.

Vaakakaarrossa kone kiertää ylhäältä katsottuna ympärämuotoista rataa kaarron keskipisteen ympäri.

$$\omega = \frac{v}{R} \quad (7-27)$$

Jossa $v \left[\frac{m}{s} \right]$ on rataa nopeus ja $R [m]$ on kaartosäde ja $\omega \left[\frac{rad}{s} \right]$ on kulmanopeus.

Lentosuunnan muuttamiseen tarvitaan voima, jonka suunta on kohti kaarron keskipistettä.

$$F = \frac{mv^2}{R} \quad (7-28)$$

Koneen nostovoiman vaakakomponentin on oltava yhtä suuri kuin voima F ja sen vastaava komponentti on lentokoneen paino:

$$L \cos \varphi = mg \quad (7-29)$$

Näiden perusteella saadaan kallistuskulmalle φ kaava:

$$\tan \varphi = \frac{v^2}{gR} \quad (7-30)$$

Kaarrossa nostovoiman on aina oltava suurempi kuin lentokoneen painon. Nostovoimaa ja painesuhdetta kutsutaan kuormitusmoninkerraksi (load factor), ja sen symboli on n . Puhekielessä käytetään merkintää G .

$$n = \frac{L}{mg} = 1 \quad (7-31)$$

Jos kone lentää vaakalentoa selällään, nostovoiman arvo on negatiivinen, jolloin kuormitusmoninkerta on -1 .

Kaartoliikkeessä kuormitusmoninkerta riippuu kallistuskulmasta yksinkertaisella tavalla:

$$n = \frac{1}{\cos \varphi} \quad (7-32)$$

Jos annetaan arvot n :lle esimerkiksi $n=2$. Silloin:

$$\cos \varphi = \frac{1}{n} \quad (7-33)$$

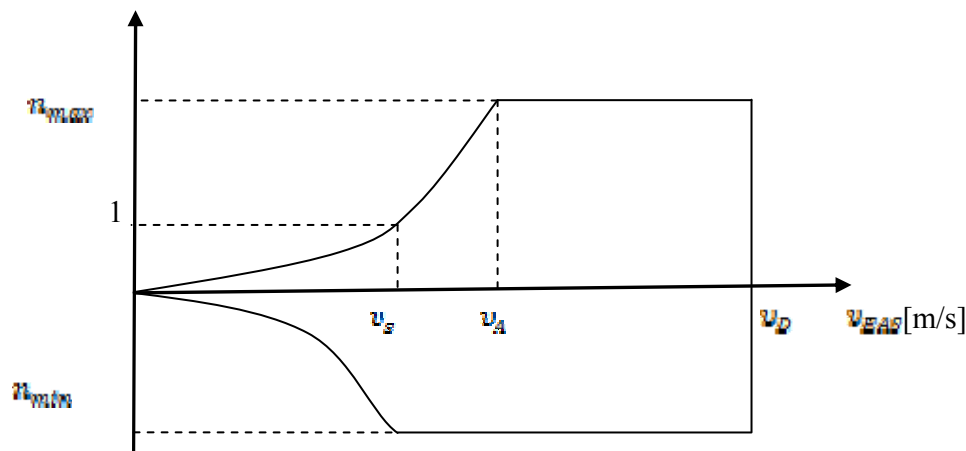
$$\cos \varphi = \frac{1}{2}$$

$$\cos^{-1} 0,5 = 60^\circ$$

Kuormitusmoninkertoja eri arvoilla on laskettu liitteessä 3.

7.3.13 V-n piirros

V-n piirroksen avulla voidaan löytää maksimi kuormitusmoninkerta. Piirroksen piirretään suurin ja pienin kuormitusmoninkerta lentonopeuden (V_{EAS}).



Kuva 35. v-n-piirros

Käyrä on paraabelinmuotoinen siksi, että nostovoima on verrannollinen lentonopeuden neliöön.

Nopeus, jolla reunakäyrä leikkaa arvon $n=1$, on sakkausnopeus vaakalennossa v_s , jonka koneen nostovoima ja paino ovat yhtä suuret.

Jos $n > 1$, puhutaan G-sakkauksesta.

Koneen rakenteen lujuus rajoittaa suurimman mahdollisen kuormitusmoninkerran arvon ylitämistä. Nopeutta, jolla positiivinen rakenteellinen raja leikkaa nostovoimاران, kutsutaan liikehtimisnopeudeksi v_A .

V_D on syöksynopeus, joka on kuormitusmoninkerrasta riippumaton rajanopeus.

Syöksynopeuden määrää rakenteelliset syyt (moottorin toiminta, ohjausominaisuudet, aeroelastiikka).

Liikehtimisnopeus kasvaa lentokorkeuden kasvaessa, koska lentokorkeuden kasvaessa ilman tiheys pienenee:

$$\frac{1}{2} \rho_0 v_A^2 = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (7-34)$$

jossa 0 alapuolella tarkoittaa merenpinnan tasolla.

Tästä saadaan tosi-ilmanopeus:

$$v = \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho} v_A^2} \quad (7-35)$$

Jos $v_A < v$, tällöin kuormitusmoninkerta on:

$$n = \frac{\rho v^2 C_{Lmax}}{2mg} \quad (7-36)$$

Sakkausnopeudella nostovoimakerroin on maksimissaan $c_t = c_{tmax} = 1,02558$

Taulukko 6. Kuormitusmoninkerrat eri nopeuksilla.

nopeus $V[\frac{m}{s}]$	n
5	0,173610582
10	0,694442329
12	0,999996954
15	1,562495241
20	2,777769317
25	4,340264557
30	6,249980962
35	8,506918532
40	11,11107727
50	17,36105823

Kun $v_A = v$, tulevat molemmat rajoitukset voimaan, jolloin v :n, c_{tmax} :n ja n_{max} :in välinen yhteys on:

$$v = \sqrt{\frac{2n_{max}mg}{\rho S c_{tmax}}} \quad [\text{m/s}] \quad (7-37)$$

$$n_{max} = \frac{\rho v^2 S c_{tmax}}{2mg}$$

$$n_{max} = \frac{1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 12,1041^2 \times 2,169 \text{m}^2 \times 1,02558}{2 \times 196,2 \text{N}}$$

$$n_{max} = 1,01742$$

Hetkellisen sakkauksen rajoittama vaakakaarron kaartokulmanopeus:

$$\omega = \frac{v}{2m} \sqrt{(\rho v c_{tmax})^2 - \left(\frac{2mg}{Sv}\right)^2} \quad [\text{rad/s}] \quad (7-38)$$

$$\omega = \frac{2,169}{2 \times 20} \times \sqrt{\left(1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 12,1041 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 1,02558\right)^2 - \left(\frac{2 \times 196,2}{2,169 \times 12,1041 \frac{\text{m}}{\text{s}}}\right)^2}$$

$$\omega = 0,151945 \text{ rad/s} \approx 8,706^\circ/\text{s}$$

Vastaavasti hetkellinen sakkauksen rajoittama kaartosäde:

$$R = \frac{v}{\omega} \text{ [m]}$$

jossa ω on kulmanopeus ja v on ratanopeus.

$$R = \frac{12,1041 \text{ m/s}}{0,151944 \text{ rad/s}}$$

$$R = 79,6612 \text{ m}$$

Kuormituksen moninkerran rajoittamat kaartokulmanopeus ja kaartosäde ovat:

$$\omega = \frac{g}{g} \sqrt{n_{\max}^2 - 1} \quad (7-39)$$

$$R = \frac{v}{\omega} = \frac{v^2}{g \sqrt{n_{\max}^2 - 1}} \quad (7-40)$$

$$\omega = \frac{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{12,1041 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \times \sqrt{1,01742^2 - 1}$$

$$\omega = 0,151935 \text{ rad/s} \approx 8,705^\circ/\text{s}$$

$$R = \frac{v^2}{g \sqrt{n_{\max}^2 - 1}}$$

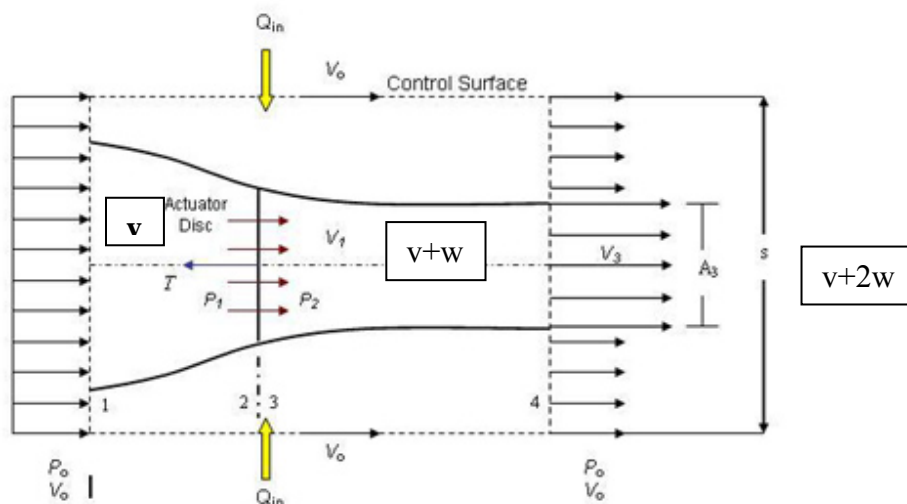
$$R = \frac{\left(12,1041 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \sqrt{1,01742^2 - 1}}$$

$$R = 79,66661 \text{ m}$$

Hetkellinen sakkauksen kaartokulmanopeus ja kaartosäde ovat melko yhtäsuuria kuin kuormituksen moninkerran kaartokulmanopeus ja kaartosäde.

7.3.14 Potkurin työntövoima

Potkurin avulla kiihdytetään ilman virtausnopeutta, jolloin syntyy työntövoimaa. Virtausnopeus V alussa, eli potkurin edessä, on pieni ja ylipaineessa, potkurin avulla virtausnopeus kasvaa ($V+W$) ja potkurin takana virtauksen kokonaisnopeus kasvaa edelleen alipaineessa ($V+2W$).



Kuva 36. Potkurin analyysi. Lentonopeus on v , ja potkurin synnyttämä lisänopeus on w . /13/
 w on kulman nopeus, joka lasketaan seuraavalla kavaalla:

$$w = \sqrt{\frac{\vartheta^2}{4} + \frac{T}{2\rho A v}} - \frac{\vartheta}{2} \quad (7-41)$$

työntövoima riippuu potkurin hyötysuhteesta ja moottorin tehosta:

$$T = \frac{\eta P}{v} \quad (7-42)$$

kun sijoitetaan kavaan:

$$\omega = \sqrt{\frac{\vartheta^2}{4} + \frac{\eta P}{2\rho A v}} - \frac{\vartheta}{2}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{\left(12,1041 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{4} + \frac{0,91 \times 9212 \text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{2 \times 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 6,428 \times 12,1041 \frac{\text{m}}{\text{s}}}} - \frac{12,1041}{2}$$

$$\omega = 2,5259$$

Potkurin työntövoimaa ja sen lisänopeuksia on laskettu eri nopeuksilla liitteessä 4.

7.4 Lentoalähtö ja laskeutuminen

Maanvaikutus ja kiitotien ominaisuudet vaikuttavat lentoalähtöön ja laskeutumiseen.

7.4.1 Lentoalähtö

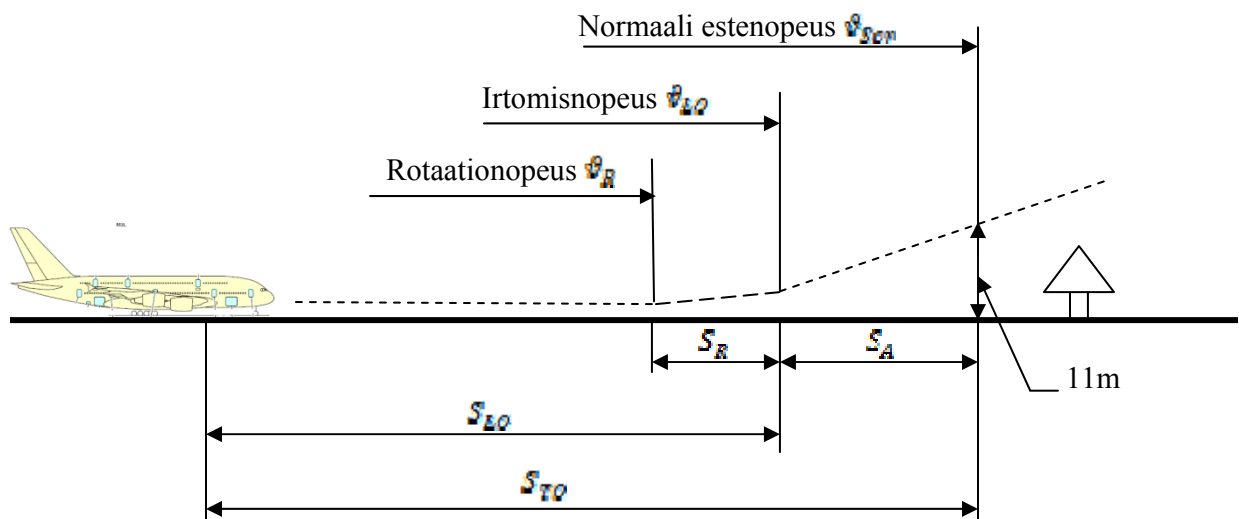
Lentoalähtömatka on maan pinnalla kuljettu etäisyys lentoalähdön alussa ja matka ylityskorkeuden saavuttamiseen.

7.4.1.1 Lentoalähdön vaiheet

Lentoalähtömatka S_{TO} koostuu kiihdyksestä irtoamisnopeuteen S_{LO} ja irtoamispisteestä estekorkeuden kohoamiseen yli S_A .

$$S_{TO} = S_{LO} + S_A \quad (7-43)$$

Eurostrin pienoismallin koneelle estekorkeus saa olla $35\text{ft} \approx 11\text{m}$.



Kuva 37. Normaalin lentoalähtömatkan S_{TO} vaiheet.

Lentoalähtömatka S_{TO} riippuu koneiden suuresta siipikuormituksesta ja työntövoiman ja painon suhteen pienyydestä. Esimerkiksi suurilla suihkumatkustajalentokoneilla lentoalähtömatka on noin 2500 m. Pienillä koneilla lentoalähtömatkat ovat yleensä alle 500 m.

Irtomisnopeus v_{LO} on hieman sakkausnopeutta suurempi:

$$v_{LO} \approx 1,15 \times v_s \quad (7-44)$$

$$v_{LO} \approx 1,15 \times 11,8557 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{10} \approx 13,6341 \frac{m}{s} \approx 49,082 \frac{km}{h}$$

Maavaikutuksessa sakkausnopeus on jonkin verran (15 %) suurempi kuin maavaikutuksen ulkopuolella.

Maakiitomatkan pituus riippuu sakkausnopeudesta ja kiihtyvyydestä. Kiihtyvyys riippuu työntövoiman ja vastuksen erotuksen suhteesta koneen massaan.

$$a = \frac{T - D_G}{m} \quad (7-45)$$

D_G on vastus, joka sisältää sekä ilmanvastuksen että maan ja pyörien välisen kitkan

$$D_G = D + \mu(mg - C_{L_G} q S) \quad (7-46)$$

$$= C_{D_0} q S + K C_{L_G}^2 q S + \mu(mg - C_{L_G} q S)$$

jossa q on kineettinen paine, C_{L_G} nostovoimakerroin maakiidossa ja μ pyörien ja kiitoradan välinen vierintäkitkakerroin, joka riippuu radan materiaalista (betoni/asfaltti, kova nurmi, lyhyt ruoho, pitkä ruoho,..).

Taulukko 7. pyörien ja kiitoradan välinen vierintäkitkakerroin lentoonlähdessä.

kuiva betoni/asfaltti	0,02- 0,03
kova nurmi, sora	0,04
lyhyt ruoho	0,05
pitkä ruoho	0,1
pehmeä maa	0,1-0,3
kova lumi tai jää	0,1-0,12

Pienoismallille siipien vastusta ja maavaikutusta voidaan määrittää seuraavalla kaavalla:

$$C_{D_I} = - \frac{G^2 \sigma}{\pi e d} \quad (7-47)$$

Ja σ voidaan laskea Ostowarin kaavalla:

$$\sigma = \frac{2e}{\pi^2} \ln \left[1 + \left(\frac{\pi B}{8h} \right)^2 \right] \quad (7-48)$$

jossa e on lentokoneen tehokkuuden tekijä, B on siipien kärkiväli, ja h on siipien ja maan etäisyys. Aikaisemmin todettiin, että $e = 0,65$; siiven kärkiväli $B = 2,7$ m ja $h = 0,5$.

$$\sigma = \frac{2 \times 0,65}{\pi^2} \ln \left[1 + \left(\frac{\pi \times 2,7m}{8 \times 0,5m} \right)^2 \right]$$

$$\sigma = 0,22$$

Arvin Rajabi

Siis C_{DI} :

$$C_{DI} = -\frac{1,02558^2 \times 0,22}{\pi \times 0,65 \times 6,4285} = 0,176$$

Ja kokonaisvastuskerroin on:

$$C_{DC} = KC_L^2 + C_{DI} = KC_L^2(1 - \sigma) \quad (7-49)$$

$$C_{DC} = 0,064 \times 1,02558^2 \times (1 - 0,22)$$

$$C_{DC} = 0,052507$$

Kiitomatkan lyhyiden takia voidaan käyttää laskusiivekkeitä, jotka lisäävät nostovoimakerrointa. Toisaalta laskusiivekkeiden avaaminen tuo lisäävastusta, pienentää kiihtyvyyttä ja nousukykyä. Tässä tapauksessa kokonaisnostovoima voidaan määrittää:

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 [S C_L(\alpha) + S_F \Delta C_L(\delta_F)] \quad (7-50)$$

jossa $\Delta C_L(\delta_F)$ vähitellen nostaa siivekkeen pinta-alaa S_F kun kulma tulee käyttöön (δ_F). Nostovoimakeroin voidaan laskea seuraavalla kavaalla.

$$\Delta C_L = \alpha \tau(c_f, c) \eta(\delta_F) \delta_F \quad (7-51)$$

α nostovoiman kulmakerroin (C_L - kerronin(α)).

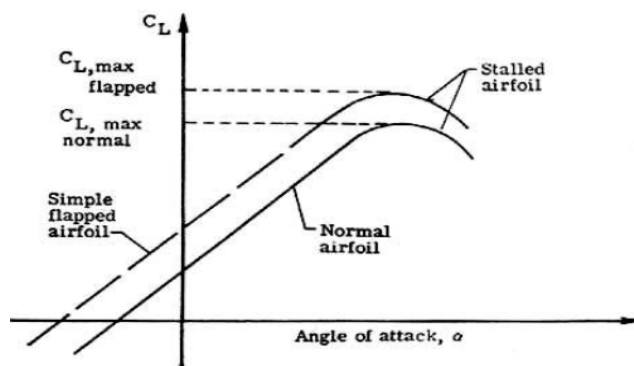
τ on siivekkeen tehokuuden tekijä.

c_f on siivekkeen jänne.

η on viskositeetin korjauskerroin.

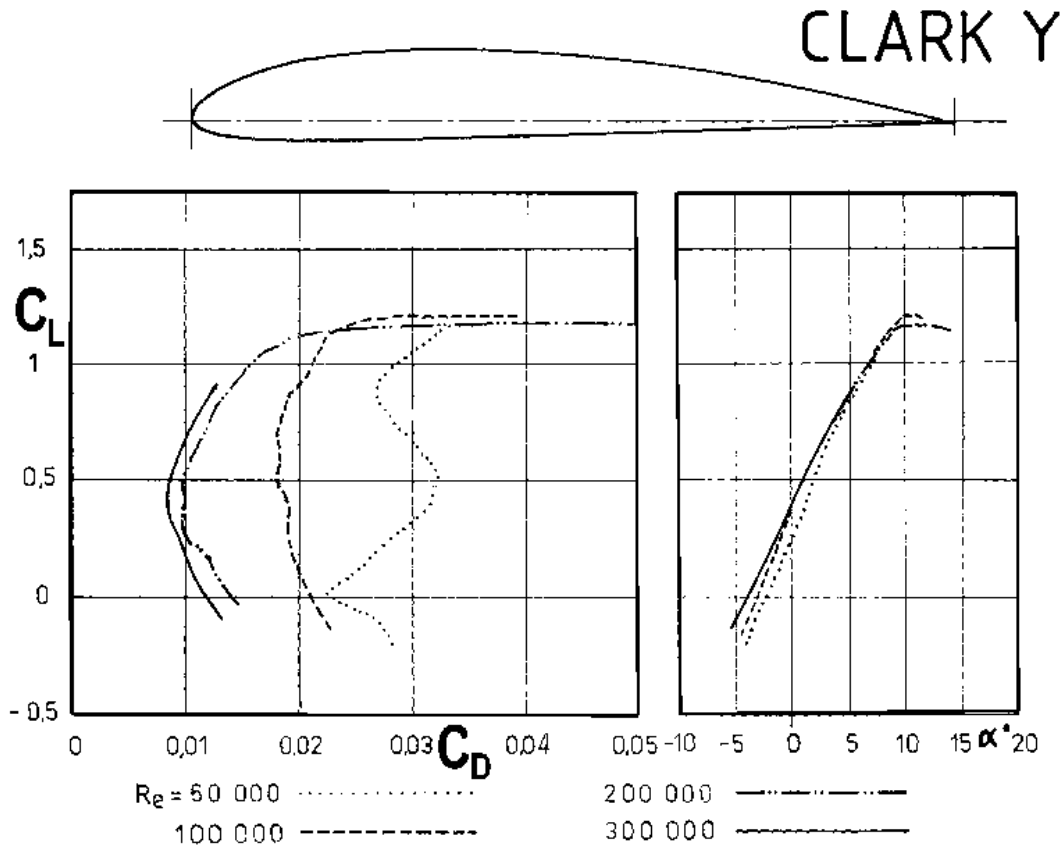
Kulmakerroin α lasketaan koko siiven maksiminostovoimakertoimen C_{Lmax} perusteella: nostovoimakeroin C_L riippuu Machin luvusta ja Reynoldsin luvusta, kun kohtauskulma on lähellä sakkausta. Nostovoiman ja kohtauskulman välinen yhteys riippuu siiprofilista, joten tärkeä parametri tässä on sivusude.

Kohtauskulman kasvaessa kasvaa nostovoimakeroin. Lähellä sakkauskulmaa saavutetaan maksiminostovoimakeroin C_{Lmax} , siivekkeiden avaaminen lisää kohtauskulmaa.



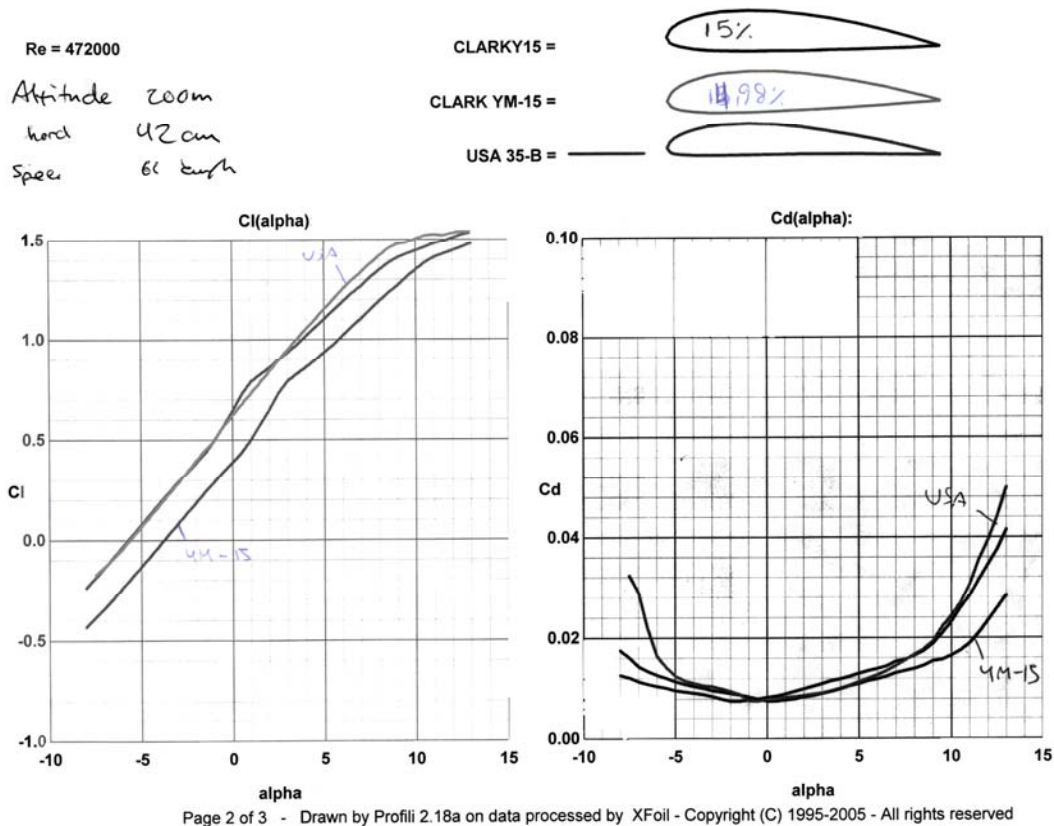
Kuva 38. Nostovoimakertoimen ja kohtauskulman välinen yhteys /14/

Eurostarin lentokoneessa on käytetty Clark Y -siipiprofilia (airfoil).



Kuva 39. Clark Y airfoil: neljä erilaista arvoa Reynoldsin luvulle (Re) /14/

Eurostar-piennoismallin nostovoimakerroin ja kohtauskulma voidaan esittää seuraavalla kuvaajalla, jossa Re on 472000. Kun Reynoldsin luku on pieni, profiili on laminaarinen ja tämä siipi sopii pienoismalliin.



Kuva 40. Kuvasta nähdään, että nostovoimakerroin kasvaa 0,106/aste. Tässä siipiprofilissa maksiminostovoimakerroin on noin 1,55, kun kohtauskulma α on noin 12,5°. /10/

Siivekkeen tehokkuuden tekijä voidaan määritellä:

$$\tau(c_f, c) = 1 + \frac{\sin \theta_f}{\pi} - \frac{\theta_f}{180} \quad (7-52)$$

Ja

$$\theta_f = \cos^{-1} \left(\frac{2c_f}{c} - 1 \right) [deg] \quad (7-53)$$

20 % siivikeiden janteen pituudesta on 0,42.

$$c_f = 0,42 * ,20 = 0,084 \text{ (20\% of MAC):}$$

$$\theta_f = \cos^{-1} \left(\frac{2 * 0,084}{0,42} - 1 \right) = 126,87^\circ$$

Siivekkeen tehokuuden tekijä siis on:

$$\tau(c_f, c) = 1 + \frac{\sin(126,87)}{\pi} - \frac{126,87}{180}$$

$$\tau(c_f, c) = 0,55$$

Siivekkeiden viskositeetin korjauskerroin saadaan kaavalla:

$$\eta_{spilitz} = \frac{-89,8018}{\delta_f^2} + \frac{13,8031}{\delta_f} + 0,1191 \quad (7-54)$$

Nyt voidaan määrittää arvot $\eta(\delta_f)$ ja $\Delta C_L(\delta_f)$ eri siivekkeiden kulmaan.

$$\Delta C_L = \alpha \tau(c_f, c) \eta(\delta_f) \delta_f \quad (7-55)$$

$$\alpha = 0,106$$

$$\tau(c_f, c) = 0,55$$

Taulukko 8. Siivekkeiden viskositeetin korjauskerroin

δ_f	$\eta_{spilitz}(\delta_f)$	ΔC_L
10	0,800595	0,466747
20	0,684601	0,798245
30	0,546046	0,955035
40	0,458039	1,068147
50	0,399241	1,163789
60	0,357546	1,250695
70	0,32654	1,332609

Kokonaisnostovoimakerroin saadaan:

$$C_{LF} = C_L + \Delta C_L(\delta_f) \quad (7-56)$$

Kun lentokone on sakkauksessa, siivekkeisiin lisätään korjauskerroin $\Delta C_L(\delta_f)$, tämä korjauskerroin on:

$$f_{spilitz} = 16,667 \left(\frac{c_f}{c}\right)^4 - 6,667 \left(\frac{c_f}{c}\right)^3 - 2,667 \left(\frac{c_f}{c}\right)^2 - 0,183 \left(\frac{c_f}{c}\right) + 1 \quad (7-57)$$

jossa c_f on siivekkeiden jännepoikki (flap Chord) ja c on siiven jänne (wing chord).

$$\frac{0,42}{0,21} = 0,2$$

Arvin Rajabi

Siis f_{opt} on 0,833, ja tällöin saadaan nostovoiman maksimi:

$$(C_{L,F})_{max} = C_L + 0,833\Delta C_L(\delta_f) \quad (7-58)$$

Taulukko 9. Saadaan nostovoiman maksimikerroin siivekkeiden eri kulmilla δ , kun $C_L = 1,02558$.

$\Delta C_L(\delta_f)$	$(C_{L,F})_{max}$	f
0,466747	1,41298	10
0,798245	1,688123	20
0,955035	1,818259	30
1,068147	1,912142	40
1,163789	1,991525	50
1,250695	2,063657	60
1,332609	2,131646	70

Esimerkiksi jos siiveke on avattu 60° , tällöin nostovoima nousun aikana eli irtoamisnopeudella on:

$$L = \frac{1}{2}\rho v^2 [S C_L(\theta) + S_F \Delta C_L(\theta_F)] \quad (7-59)$$

irtoamisnopeus: $v_{i0} \approx 13,6341 \frac{m}{s}$

$$L = \frac{1}{2} \times 1,225 \frac{kg}{m^3} \times \left(13,6341 \frac{m}{s}\right)^2 \times [(2,169 m^2 \times 2,06365) + (0,075 m^2 \times 1,2506)]$$

$$L = 520,301 N$$

Arvin Rajabi

7.4.1.2 Maakiidon pituus S_{LO} :

$$E_{\text{neto}} = (T - D_G) S_{LO} \quad [\text{J}] \quad (7-60)$$

jossa S_{LO} on kiitomatkan pituus. T ja D ovat keskimääräiset työntövoiman ja vastuksen arvot lähtökiidon aikana. Sopiva nopeus on $0,7 \times v_{LO}$.

Voimien tekemä työ muuttuu liike-energiaksi.

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v_{LO}^2 \quad [\text{J}] \quad (7-61)$$

Koska nämä voimat ovat yhtä suuret:

$$\frac{1}{2} m v_{LO}^2 = (T - D_G) S_{LO} \quad (7-62)$$

Siis kiitomatkan pituus on:

$$S_{LO} = \frac{\frac{1}{2} m v_{LO}^2}{(T - D_G)} \quad [\text{m}] \quad (7-63)$$

Jos lentomassa tai irtoamisnopeus kasvaa, kiidon matka myös kasvaa. Irtoamisnopeus riippuu ilman tiheydestä ja nostovoiman maksimiarvosta:

$$S_{LO} = \frac{k^2 m}{\rho C_{L,max} S [(T - D_G)]} \quad (7-64)$$

jossa k on likimain 1,15.

$$k = \frac{v_{LO}}{v_s} = 1,15$$

jossa v_{LO} on irtoamisnopeus ja v_s on sakkausnopeus.

7.4.1.3 Rotaatio

Kun nokkapyörä irtoaa maasta, kohtauskulma ja nostovoima kasvavat ja kone irtoaa kentästä. Tätä vaihetta kutsutaan rotaatioksi.

$$S_R \approx L_R v_{LO} \quad (7-65)$$

Jossa L_R on rotaatiovaiheeseen kulunut aika noin 2-3 s. S_R kulunut matka tänä aikana.

$$S_R = 2,5 \times 13,6341 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 34,085 \text{ m}$$

Arvin Rajabi

7.4.1.4 Normaali estenopeus

Kun kone on irronnut kentästä, kone alkaa nousta kaarella ja sen jälkeen suoraviivaisesti nousulento.

$$v_{Scr} \approx 1,2v_s + 5 \frac{m}{s} \quad (7-66)$$

$$v_{Scr} \approx 1,2 \times 11,8557 \frac{m}{s} + 5 \frac{m}{s}$$

$$v_{Scr} \approx 19,2268 \frac{m}{s} \approx 69,2166 \frac{km}{h}$$

Matka irtoamiskohdasta estekorkeuteen voidaan toisaalta laskea energiaperiaatteella:

$$E_{työ} = (T_2 - D_2) s_A \quad (7-67)$$

s_A on matka irtoamiskohdasta estekorkeuteen. T_2 ja D_2 ovat työntövoiman ja vastuksen keskimääräisiä arvoja.

Kokonaisenergian on potentiaalienergian ja liike-energian summa

$$\Delta E = mgh + \frac{1}{2}mv_{Scr}^2 - \frac{1}{2}mv_{IO}^2 \quad (7-68)$$

jossa h on estekorkeus, joka on pienille koneille 11 m.

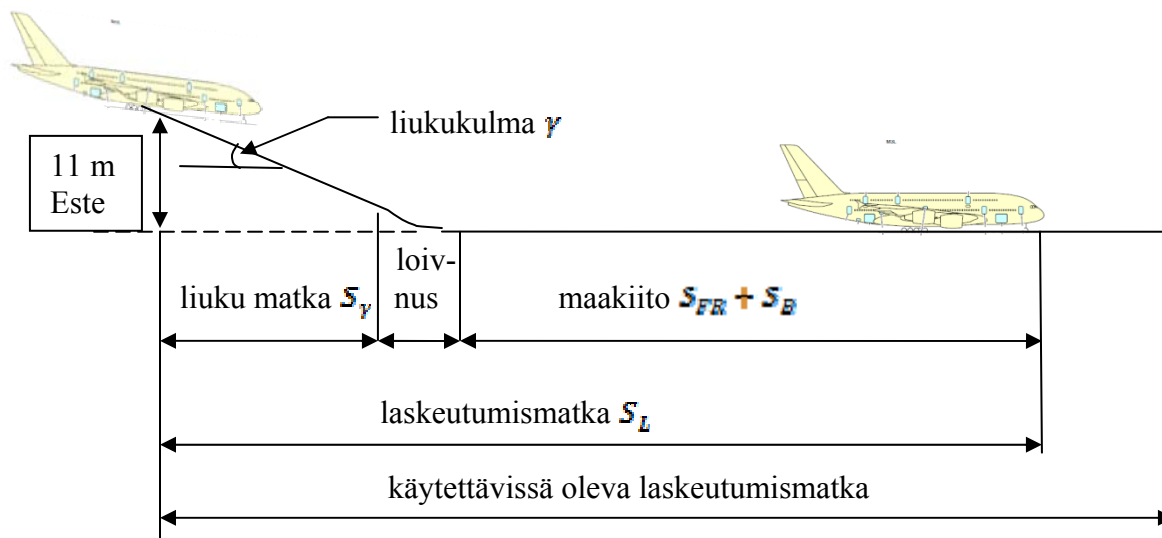
Näin saadaan s_A matkalle:

$$s_A = \frac{mgh}{T_2 - D_2} + \frac{\frac{1}{2}m(v_{Scr}^2 - v_{IO}^2)}{T_2 - D_2} \quad (7-69)$$

7.4.2 Laskeutumismatka

Laskeutumismatkalla on eri vaiheita:

- Kone liikuu estekorkeudelta (11 m) tietyllä liukukulmalla ja nopeudella, $v = 1,3 \times v_s$, jossa v_s on sakkausnopeus.
- Liu'un loivennusmatka
- Maakosketus, joka sisältää maakiidon $S_{FR} + S_B$



Kuva 41. Laskeutumismatkan eri osat.

7.4.2.1 Liuku

Liukukulman matka voidaan määrittää seuraavalla kavaalla

$$S_\gamma = \frac{h-h_f}{\tan \gamma} \approx \frac{h-h_f}{\gamma} \quad (7-70)$$

jossa h on estekorkeus ja h_f on korkeus liukuvaiheen lopussa.

Yleisesti liukukulma γ on noin $2-3^\circ \approx 0,035 - 0,05 \text{ rad}$, kun kone lähestyy kiitorataa ja $h_f = 0$

$$S_\gamma = \frac{11\text{m} - 0\text{m}}{0,05} = 220\text{m}$$

$$S_\gamma = \frac{11\text{m} - 0\text{m}}{0,035} = 314,286\text{m}$$

eli liukumatkan pituus on 220-314,3 m.

Arvin Rajabi

7.4.2.2 Loivennus

Loivenuksen aikana koneen nopeus hidastetaan arvoon:

$$v_{TD} = 1,1 - 1,15 \times v_s \quad (7-71)$$

Loivenuksessa lentorata on kaarena ja siitä seuraa, että kuormitusmoninkerta on suurempi kuin 1. Kun valitaan kuormitusmoninkerroille arvo, voidaan laskea loivenukseen kuljettu matka.

Loivenuksen ja liu'un yhteismatka S_a voidaan määrittää seuraavalla kaavalla.

$$S_a = \frac{h}{r} + 3,78 \times \frac{v_{TD}^2}{g} \quad (7-72)$$

Kerroin 3,78 pätee siviili-ilmailussa. Sotilasilmailulle tämä kerroin on 3,31. Kaavassa on valittu kuormitusmoninkerralle arvo 1,2.

Jos liukukulmaksi valitaan 3°:

$$S_a = \frac{11m}{0,05 \frac{1}{s}} + 3,78 \times \frac{\left(12,1041 \frac{m}{s}\right)^2 \times 0,05 \frac{1}{s}}{1,2}$$

$$S_a = 221,90m$$

Jos liukukulmaksi valitaan 2°:

$$S_a = \frac{11m}{0,035 \frac{1}{s}} + 3,78 \times \frac{\left(12,1041 \frac{m}{s}\right)^2 \times 0,035 \frac{1}{s}}{1,2}$$

$$S_a = 315,62m$$

Eli loivenuksen ja liu'un yhteismatka S_a on 222-316 m.

Tuulen aiheuttaman häiriön takia, tämä matka voi vaihdella suuresti. Se voi olla noin 67 % suurempi kuin suoritusravokaaviolla.

$$221,90m + (0,67 \times 221,90m) = 370,584m$$

$$315,62m + (0,67 \times 315,62m) = 527,086m$$

7.4.2.3 Maakiito

Kun pyörät koskevat kiitorataan, 0-3 sekunnin jälkeen nopeus on

$$S_{FR} = t_{FR} v_{TD} \quad (7-73)$$

jossa t_{FR} on jarrituksen aloitukseen kuluva aika ja v_{TD} on lentokoneen nopeus loivennuksen aikana.

$$S_{FR} = 3s \times (1,15 \times 12,1041) = 41,759$$

Laskeutumisen aikana maavaikutus ja vastusvoima ovat samoja kuin nousun aikana. Tämän lisäksi myös reverssi työntövoima on sama. Työntövoiman käännoystä kutsutaan reverssiksi ja se tapahtuu, kun potkurinkoneissa käännetään potkurin lavat ja se pyörii niin, että syntyy vastustava voima. Potkurikoneissa reverssit ovat voimakaita.

$$D = C_{D0} q S + K C_{Lg}^2 q S + \mu (mg - C_{Lg} q S) + T_R \quad (7-74)$$

jossa C_{D0} on vastuskerroin, joka sisältää lentojarrujen osuuden, C_{Lg} on nostovoimakeroin, μ on maan ja pyörien välinen ja T_R on moottorin työntövoima käännoyksessä. Kitkakerroin saadaan seuraavasta taulukosta.

Taulukko 10. kitkakertoimen arvoja jarrituksen eri tilanteissa

kuiva betoni/asvaltti	0,3-0,7
kuiva betoni/asvaltti, lukkojarrutus	0,4
jäinen betoni/asvaltti	0,05
märkä betoni/asvaltti, sileä	0,1-0,15
märkä betoni/asvaltti, epätasainen	0,35-0,5
pehmeä nurmi, märkä ruoho	0,2
kova lumi	0,1-0,15

Hidastuvuus saadaan seuraavalla kavaalla:

$$a_L = \frac{D_G}{m} \quad (7-75)$$

jossa a_L on hidastuvuus, D_G on jarruttava voima ja m on koneen massa.

Arvin Rajabi

Maakiidon pituus saadaan seuraavalla kavaalla, joka riippuu hidastuvuudesta ja maakosketusnopeudesta:

$$S_B = \frac{v_{TD}^2}{2\bar{a}_L} = \frac{m v_{TD}^2}{2\bar{D}_G} \quad (7-76)$$

\bar{a}_L on keskimääräinen hidastuvuus ja \bar{D}_G on keskimääräinen vastus. Tästä kaavasta nähdään, että kun nopeus kasvaa 10 %, matka pitenee noin 20 %.

Tämä kaava voidaan esittää nostovoimakertoimen maksimiarvon C_{Lmax} avulla:

$$S_B = \frac{k^2 m^2 g}{\rho S C_{Lmax} \bar{D}_G} \approx \frac{k m^2}{\rho S C_{Lmax} k} \quad (7-77)$$

Tässä kaavassa kerroin k on noin 1,1- 1,15.

Siis kokonaislaskeutumismatka s_L on:

$$s_L = s_a + s_{TK} + s_B \quad (7-78)$$

ja kiitoratavaatimus $1,67s_L$.

8 Pienoismallin rakenteen valmistaminen

8.1 Runko

Lentokoneen rungossa on tilat miehistölle ja rahdille. Runkoon kiinnitetään siivet, vakaimet, peräsin ja laskutelineet. Rungossa pitää olla sopiva seinävahvuus. Yleensä päämateriaaliksi valitaan hiilikuitu ja lasikuitu. Hiilikuitu on painavampaa lasikuituun verrattuna, mutta toisaalta se on vahvempaa ja lujempaa. Runkovoidaan valmistaa alipaineessa. Komposiitti muodostuu kahdesta kerroksesta lasikuitua (48 g/m^2), kerroksesta kangasta, yhdestä kerroksesta hiilikuitua (193 g/m^2) ja kerroksesta kangasta. Näiden kerroksien välissä on epoksihartsia (SP 115) ja koviketta (SP 117).

Rungon muodon valmistaminen

Rungon muoto tehdään foamista. Foami leikataan rungon muotoon kuumaleikkurilla. Leikuri muodostuu muuntajasta ja kahdesta kuparilangasta. Toinen kuparilanka on kiinnitetty muuntajan miinusnapaan ja toinen plusnapaan.



Kuva 42 Tässä laitteessa on kaksi 12 voltin osaa, jotka on kytketty sarjaan. Näin saadaan käyttöön 24 voltia.

Kun virta kulkee johdossa, kuparilangoista tulee lämpimiä ja niillä voi leikata foamia. Foamien pinnasta saadaan sileä hiomalla. Tämän jälkeen voidaan muodon pinnalle latioa lasikuitukerroksia ja tämä säkitetään alipaineeseen. Vuorokauden päästä laminaatti on valmis ja se voidaan irroittaa foamista. Tämän jälkeen on rungon muotti valmis.



Kuva 43. Rungon muoto foamista ja rungon muotti laminoinnin jälkeen

Muotin valmistamisen jälkeen sen sisäpuoli hiotaan ja puhdistetaan.

Arvin Rajabi

Rungon valmistaminen

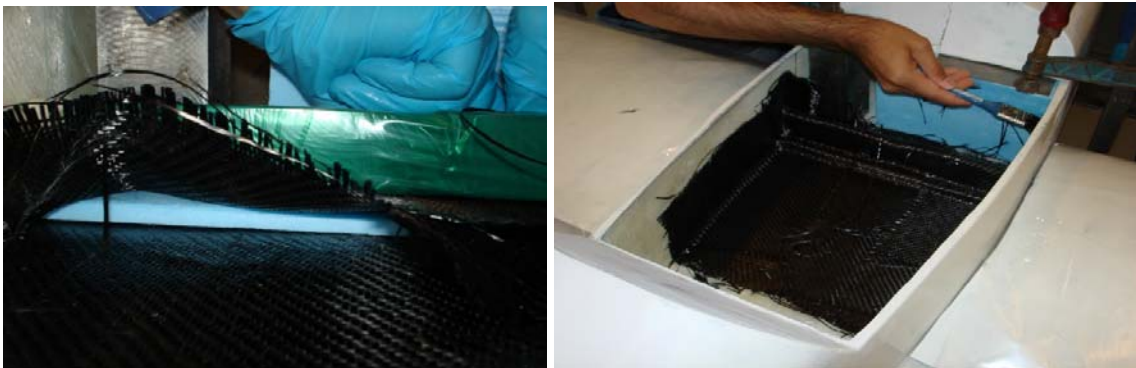
Rungon muotin sisäpuolelle asetetaan kaksi kerrosta lasikuitua ja yksi kerros hiilikuitua ja niiden jokaiseen väliin tulee epoksihartsia. Tämän jälkeen rakennelma laitetaan alipaineeseen. Alipaineen takia pitää viimeisen kerroksen päälle laittaa huopaa ja muovia, jolloin kaikki ilma saadaan kappaleen ympäriltä pois, jolloin syntyy alipaine. Vuorokauden jälkeen kappale on kovettunut ja se voidaan irroittaa muotista. Irroituksen jälkeen runko hoitetaan ja puhdistetaan. Tämän jälkeen oikea ja vasen rungon puolikas liitetään yhteen lasikuidulla.



Kuva 44. Rungon vasen ja oikea puoli liimattu yhteen.

Rungon valmistuksen jälkeen voidaan leikata siipi, korkeusvaa'an sijanti ja tehdään salon paikka hiilikuidusta.

Salon paikkaa varten leikataan sopiva foami ja sen ympärille laitetaan movia ja muovin päälle tulee hiilikuitua monta kerrosta ja sen jälkeen alipainetaan.



Kuva 45. Muovi helpottaa hiilikuidun irrottamista foamista.

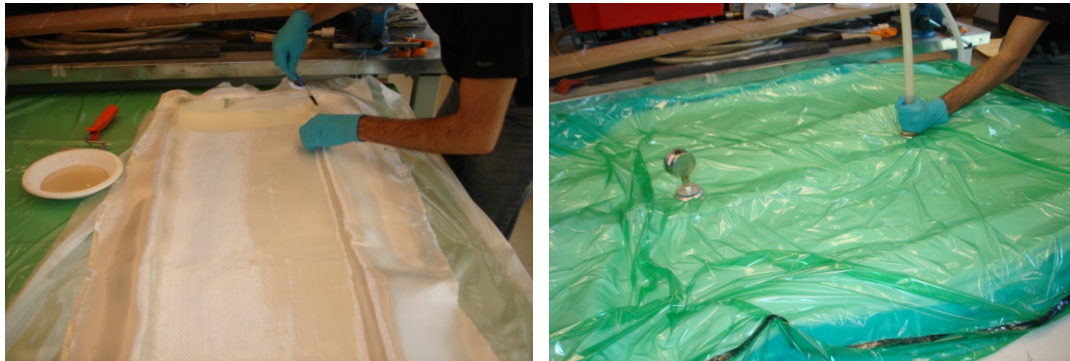


Kuva 46. Salon paikka alipaineessa.

Arvin Rajabi

8.2 Siipi

Siiven muoto tehdään ensin foamista, jonka päälle ladotaan lasikuitua kuten runkoonkin. Saadun muotin sisäpuoli hiotaan ja puhdistetaan hyvän pinnan saavuttamiseksi. Tämän jälkeen voidaan valmistaa siivet. Muottiin ladotaan hiili- ja lasikuitua ja se säkitetään. Vuorokauden jälkeen voidaan alipainesäkitys purkaa ja siiven osat hiotaan ja puhdistetaan.



Kuva 47. Siiven laminointi ja alipainesäkitys.

Siiven ylä- ja alaosan valmistuksen jälkeen voidaan osat liittää toisiinsa lasikuidun avulla. Osien väliin tulee kaaret.



Kuva 48. Siiven kaaret ja yhteenliitetty siipi.

8.3 Sivu- ja korkeusperäsin

Sivuperäsimen ja korkeusperäsimen muotteja ei tarvitse tehdä. Peräsimien muodot valmistetaan foamista, joiden päälle ladotaan kaksi kerrosta lasikuitua. Alipainesäkityksen jälkeen hiotaan osien pinnat.



Kuva 49. Sivuperäsin ja korkeusperäsimet



Kuva 50. Korkeusperäsimet alipaineessa

Sivuperäsin kiinnitetään runkoon salolla. Salko on myös tehty foamista ja hiilikuidusta.



Kuva 51. Sivuperäsin ja salon paikka

9 Johtopäätökset

Tämä työ koostuu kolmesta pääosasta: teoria, suoritusarvojen laskeminen ja koneen rakentaminen.

Teoriaosassa esitellään, kuinka kone lentää ja mitä tarvitaan sen käsittelyyn. Tärkeitä osia ovat aerodynaamiset voimat, moottorin tiedot ja radio-ohjaustekniikka. Pienoismalliin valittiin kolmivaiheinen harjaton epätahtisähkömoottori. Sähkömoottori on HACKER A150-8, jonka teho on 9212 W 15 sekunnin aikana ja se saa virtansa 14 LiPo akusta. Akun virran tyhjennysaika on 52 tuntia ja 13 minuuttia. Etuna sähkömoottorin käytössä on sen hiljainen käyntiäänäni eikä siitä tule pakokaasupäästöjä. Moottori toimii hyvin -40- 55 °C lämpötilassa. Moottori hinta on noin 800 €. Tälle moottorille voidaan käyttää 26×15 potkuria. Radio-ohjaukseen valittiin FUTABA 7C, jossa on 7 kanavaa ja joka toimii NiCa-akuilla. Lähetin on 600 mAh ja vastaanotin 600 mAh ja se toimii 72 MHz:n taajuudella.

Koneen rakentamiseen tarvittiin ensin Eurostarin piirustukset ja niiden perustella valmistettiin koneen runko ja siivet. Materiaalina käytettiin lasikuitua ja hiilikuitua. Pienoismalli olisi kolme kilogrammaa kevyempi, jos se rakennettaisiin lasikuidusta. Vaikeinta oli salon kohdan valmistelemine, missä salko kulkee lentokoneen rungon läpi. Salko piti olla mukana, kun teimme salon paikkaa ja sen irrottaminen oli tosi hankalaa. Pinnan rakenteen piti olla tasainen, sillä tarkoitus oli välttää turhaa pakkelin käyttöä, jotta pienoismallista ei tulisi liian painava.

Suoritusarvoista laskettiin ensin sipipinta-ala, sivusuhte ja liitoluvunmaksimi:

Sipipinta-ala	S	1,136 m ²
Sivusuhte	A	6,4285
Aerodynaamisen tehokkuuden maksimi eli E_{max}		7,75217

Eurostarin pienoismallille **rotaatiomatka** on noin 34 metriä ja **irtoamisnopeuden** pitää olla 13.6341 m/s tai 49 km/h. Tämän nopeuden jälkeen on **normaali estenopeus**, jonka pitää olla 19,2268 m/s eli 69,2166 km/h.

Laskeutumismatka, joka lasketaan estekorkeudelta (11 m) maakiitokosketukseen ja yleisesti liukukulmalla ($2-3^\circ \approx 0,035 - 0,05 \text{ rad}$), on 220–314 metriä, ja se riippuu sitä, millä kulmalla kone laskeutuu. **Loivenuksen ja liu'un yhteismatka** on 222–316 m. Tuulen aiheuttaman häiriön takia tämä matka voi vaihdella suuresti. Se voi olla noin 67 % suurempi kuin suoritusarvokaaviolla, eli silloin tämä matka voi olla 370–527 metriä.

Moottorin tehon (9212) ja koneen painon perustella (20 kg eli 196,2 N) laskettiin lentonopeudet lennon eri vaiheille:

	m/s	km/h
Maksiminopeus VMAX	46	165
Sakausnopeus VS	11,8557	42,68
Vaakalennon nopeus Vref	12,1041	43,575

Arvin Rajabi

Jos moottori sammuu lennon aikana mistä tahansa syystä, kone voi lentää vielä ilman moottoria, mutta ei kauaa ja lentoaika riippuu korkeudesta.

Lopuksi muutama kommentti:

Koneen pinnan pitää aina olla puhdas kitkan vähentämisen takia.

Koneen käyttämisen jälkeen akut pitää ottaa pois. Akut eivät tyhjene käytön aikana.

Koneen pitää olla sopivassa paikassa, jossa sen päälle ei putoa mitään. Paras olisi olla sisätiloissa. Jos konetta pidetään ulkona, sen päällä pitäisi olla jonkinlainen suojus.

Kone ei saa olla lähellä lämmönlähteitä eikä kosteassa ilmassa.

Kun haluat lentää konetta, muista, että auringonvalo ei saa olla edessäsi ja jos mahdollista, käytä aurinkolaseja.

10 Lähteet**Kuvaluettelo**

- /1/ ultrakevytlennonmoottoripurjelennon oppikirja /osa5 S.17
- /2/ Kuva 6 <http://www.rc-airplane-advisor.com/electric-rc-airplanes.html>
- /3/ <http://www.stefanv.com/rcstuff/qf200212.html>
- /4/ kuvaa on otettu servotekniikka.pdf tamkin material
- /5/ Kuva 19. on otettu http://www.modelflight.com.au/pics/belt_drive.gif
- /6/ Kuva 20. on otettu. <http://www.stefanv.com/rcstuff/qf200003.html>
- /7/ kuva 22. http://www.walkersite.com/what_is_esc.html
- /8/ <http://yazilarim.blogfa.com/>
- /9/ <http://www.flyingsites.co.uk/features/txcomp/txcompared.htm>
- /10/ VII THE EVEKTOR EV-97 MODEL AIRCRAFT
- /11/ Kuva 26 otettu <http://www.hacker-motor.com/images/Catalog09/Hacker-2009-WEB%2022+23.pdf>
- /12/ kuva 27 otettu <http://www.hacker-motor.com/images/Catalog10/Hacker-2010-Katalog-20-21.pdf>
- /13/<http://ocw.mit.edu/ans7870/16/16.unified/propulsionS04/UnifiedPropulsion7/UnifiedPropulsion7.htm>
- /14/ kuva on otettu http://marlongofast.tripod.com/zipped_aeronotes/clarky.htm

Kaavatluettelo

- | | |
|-------------------------|--|
| Kaavat (1-1) ja (1-2) | wikipediasta |
| Kaavat (2-1) ... (2-13) | lentokoneen areodynamiikka ja lentomekaniikan kirjasta. |
| Kaava (3-1) | Tamkin verkosta kaarin oma opintomateriaalista |
| kaava (3-2) | www.tp.spt.fi/~salabra/yk/sk2/oikosulk.doc |
| kaava (5-1) | radio ohjaustekniikan käsikirja |
| Kaavat (7-1)...(7-6) | VII THE EVEKTOR EV-97 MODEL AIRCRAFT |
| Kaavat (7-7)...(7-44) | ”Lentokoneen aerodynamikkaa ja lentomekaniikka” kirjasta |
| Kaavat (7-47)...(7-59) | VII THE EVEKTOR EV-97 MODEL AIRCRAFT |
| Kaavat (7-60)...(7-78) | ”Lentokoneen aerodynamikkaa ja lentomekaniikka” kirjasta |

Tietolähteet

Osa 2. Lentokoneen aerodynamiikka

kirjoitettu ”Lentokoneen aerodynamikkaa ja lentomekaniikka” kirjasta

Osa 4. Sähkömoottori tyypit ja rakenne

TAMK:n verkkosivusta Kari Järvinen kansiossa pdf- muodossa olevaa materiaalitietoa:
” servotekniikka.pdf”

Ja netisivusta <http://www.stefanv.com/rcstuff/qf200212.html>

Osa 4.4 Potkuri

kirjoitettu ”Lentokoneen aerodynamikkaa ja lentomekaniikka” -kirjasta

Osa 5. Radio Ohjaustekniikka

”Radio-Ohjaustekniikan käsikirja 2” -kirjasta

Osa 5.2.4 Virtalähteet

http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_polymer_battery sekä ”Radio-Ohjaustekniikan käsikirja 2” -kirjasta

Osa 5.3 radio ohjaus valitseminen

<http://www.futaba-rc.com/radios/futj69.html>

Osa 6. lentomekaniikka

”Lentokoneen aerodynamikkaa ja lentomekaniikka” -kirjasta

Osa 7. Eurostarin pienoismallin rakentaminen

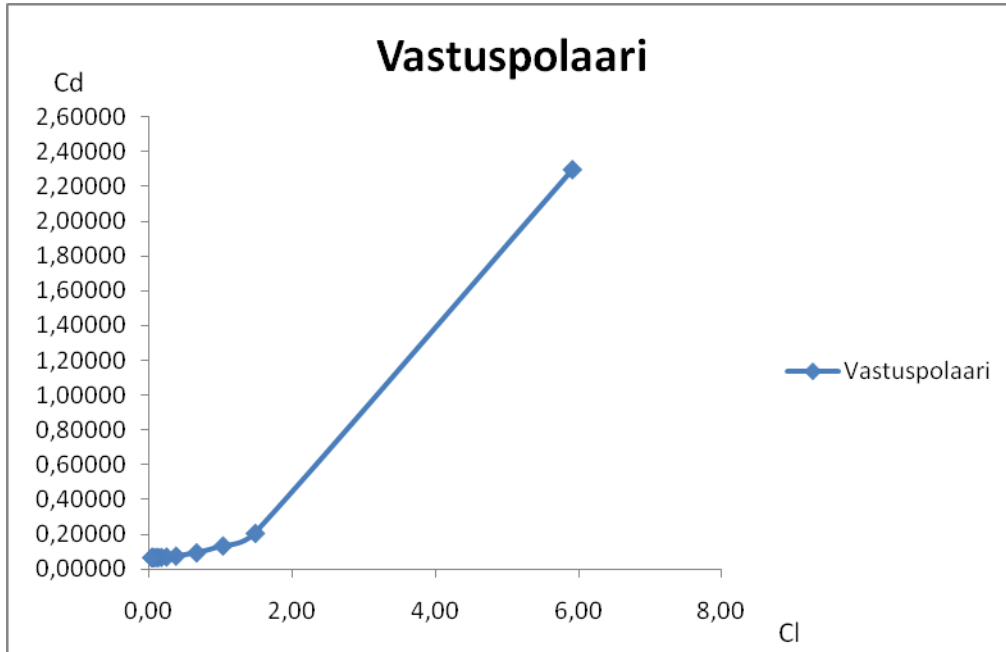
Omaa tekstiä sekä ”Lentokoneen aerodynamikkaa ja lentomekaniikka” -kirjasta että VII THE EVEKTOR EV-97 MODEL AIRCRAFT.

11 Liitteet

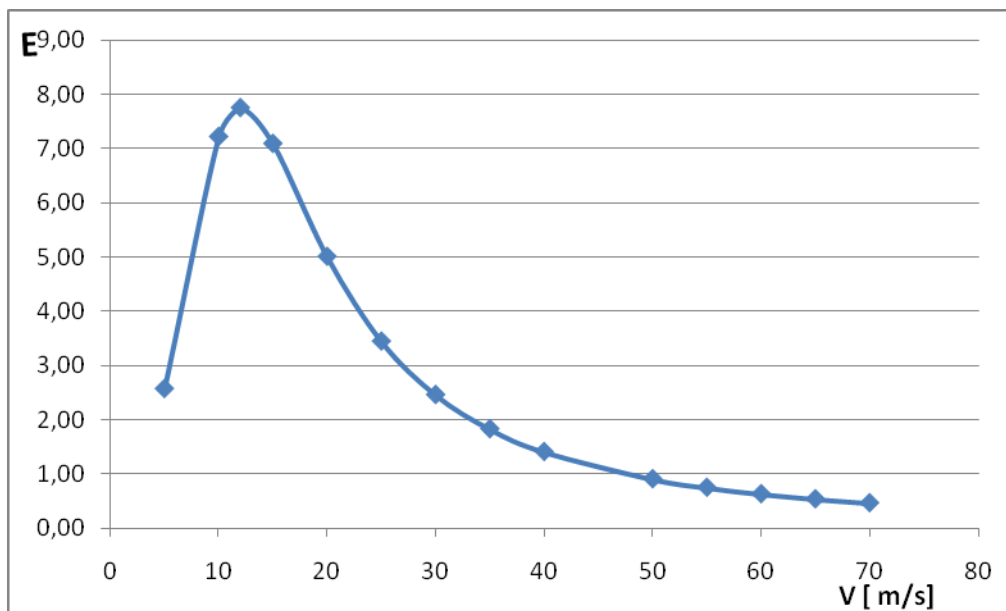
Liitte 1. Liitoluku eri nopeuksilla alueella.

Paino W[N]	nopeus V[m/s ²]	C_L	C_{D0}	C_D	E	ρ [kg/m ³]	Pinta-ala S [m ²]	k	D
196,2	5	5,90736	0,065	2,29840	2,57020	1,225	2,169	0,064	76,33636
196,2	10	1,47684	0,065	0,20459	7,21862	1,225	2,169	0,064	27,17971
196,2	12	1,02558	0,065	0,13232	7,75098	1,225	2,169	0,064	25,31292
196,2	15	0,65637	0,065	0,09257	7,09034	1,225	2,169	0,064	27,67144
196,2	20	0,36921	0,065	0,07372	5,00799	1,225	2,169	0,064	39,17742
196,2	25	0,23629	0,065	0,06857	3,44586	1,225	2,169	0,064	56,93792
196,2	30	0,16409	0,065	0,06672	2,45931	1,225	2,169	0,064	79,77847
196,2	35	0,12056	0,065	0,06593	1,82858	1,225	2,169	0,064	107,2966
196,2	40	0,09230	0,065	0,06555	1,40823	1,225	2,169	0,064	139,3243
196,2	50	0,05907	0,065	0,06522	0,90571	1,225	2,169	0,064	216,6251
196,2	55	0,04882	0,065	0,06515	0,74934	1,225	2,169	0,064	261,8318
196,2	60	0,04102	0,065	0,06511	0,63008	1,225	2,169	0,064	311,387
196,2	65	0,03495	0,065	0,06508	0,53712	1,225	2,169	0,064	365,2817
196,2	70	0,03014	0,065	0,06506	0,46327	1,225	2,169	0,064	423,5097

Vastuspolaari



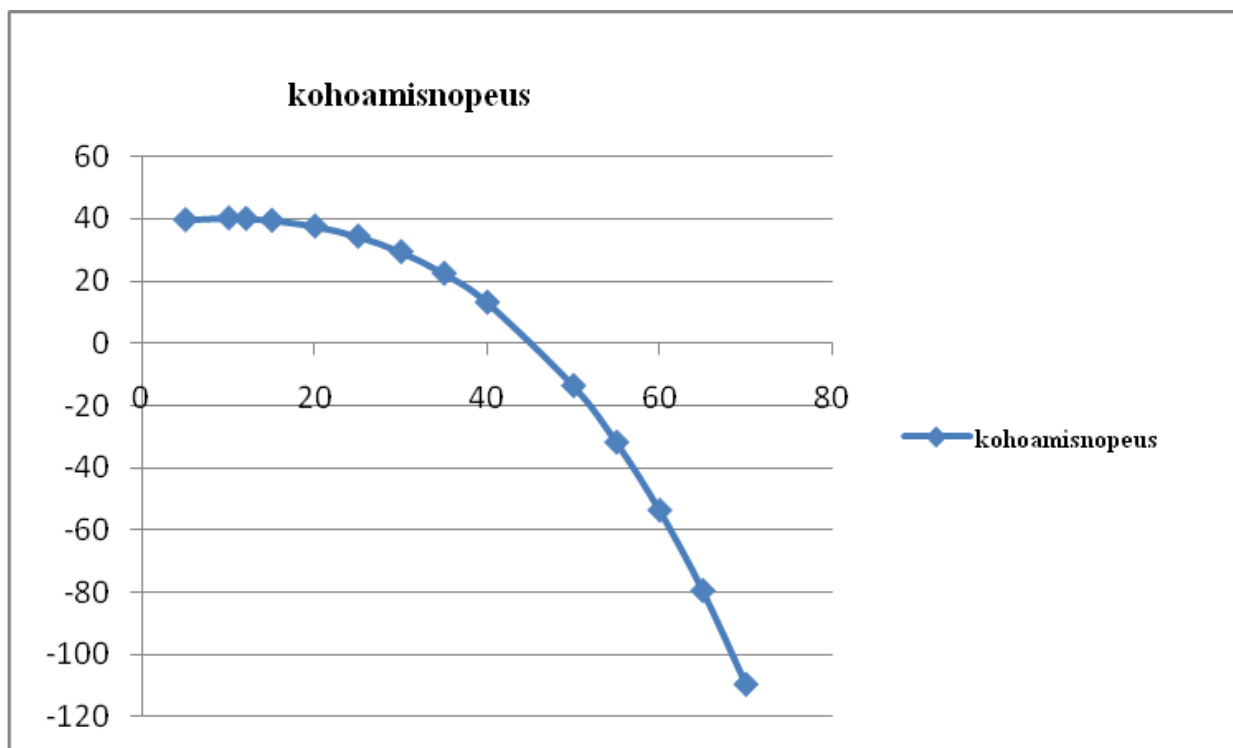
Eurostarin pienoismallin vastuspolaari. Polaari kertoimet ovat $C_{D0} = 0,065$ ja $K = 0,064$



Eurostarin pienoismallin vastuspolaari eri nopeudella.

Liitte 2. Kohoamisnopeus

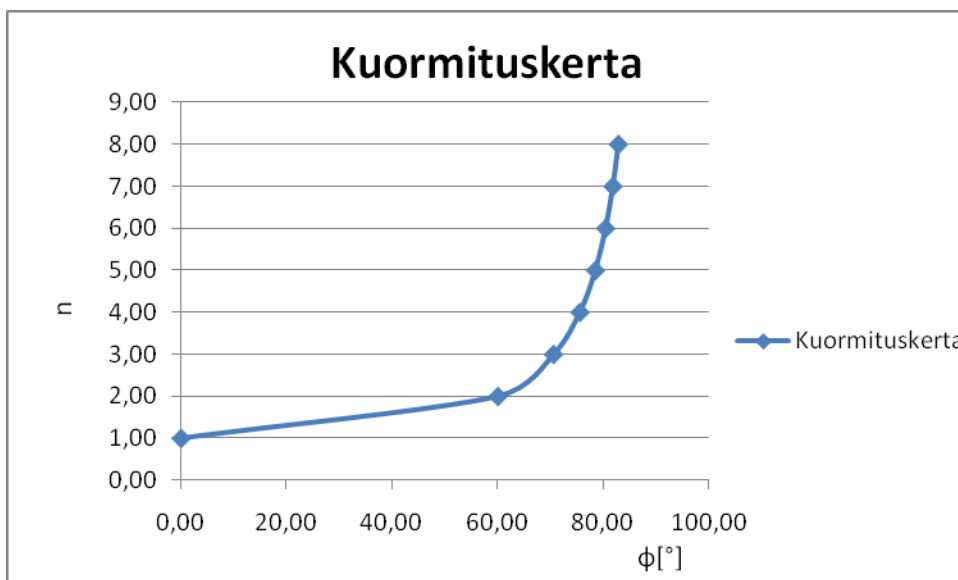
η	P [W]	Paino [N]	nopeus V m/s^2	ρ $[kg/m^3]$	C_{D0}	k	Pinta-ala S $[m^2]$	Kohoamisnopeus C [m/s]
0,91	9212	196,2	5	1,225	0,065	0,064	2,169	40,78103
0,91	9212	196,2	10	1,225	0,065	0,064	2,169	41,3411
0,91	9212	196,2	12	1,225	0,065	0,064	2,169	41,17821
0,91	9212	196,2	15	1,225	0,065	0,064	2,169	40,61085
0,91	9212	196,2	20	1,225	0,065	0,064	2,169	38,73278
0,91	9212	196,2	25	1,225	0,065	0,064	2,169	35,47131
0,91	9212	196,2	30	1,225	0,065	0,064	2,169	30,52786
0,91	9212	196,2	35	1,225	0,065	0,064	2,169	23,58582
0,91	9212	196,2	40	1,225	0,065	0,064	2,169	14,32185
0,91	9212	196,2	50	1,225	0,065	0,064	2,169	-12,4788
0,91	9212	196,2	55	1,225	0,065	0,064	2,169	-30,6719
0,91	9212	196,2	60	1,225	0,065	0,064	2,169	-52,499
0,91	9212	196,2	65	1,225	0,065	0,064	2,169	-78,2894
0,91	9212	196,2	70	1,225	0,065	0,064	2,169	-108,373



Tässä nähdään että maksiminopeuden jälkeen 46 m/s, kohoamisnopeus alenee.

Liitte 3. Lentokoneen kuormitusmonikerta ja kallistumiskulma kaarrossa.

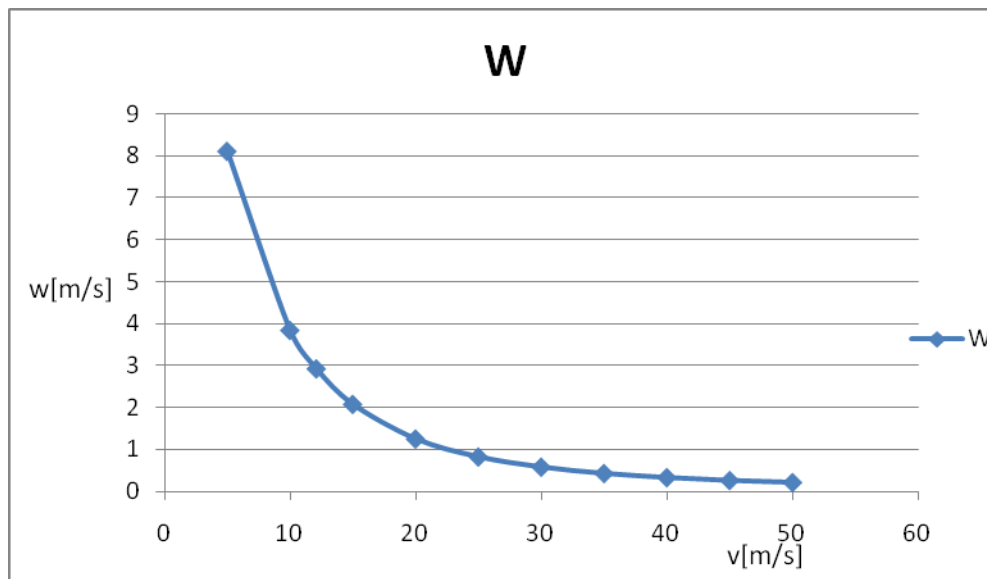
n	$\cos \varphi$	$\cos^{-1} \varphi [^\circ]$
1,00	1,0000	0,00
2,00	0,5000	60,00
3,00	0,3333	70,54
4,00	0,2500	75,52
5,00	0,2000	78,46
6,00	0,1667	80,40
7,00	0,1429	81,78
8,00	0,1250	82,82



Lentokoneen kuormitusmonikerta n vaakatasossa tapahtuvassa kaarrossa kallistuskulman φ funktiona.

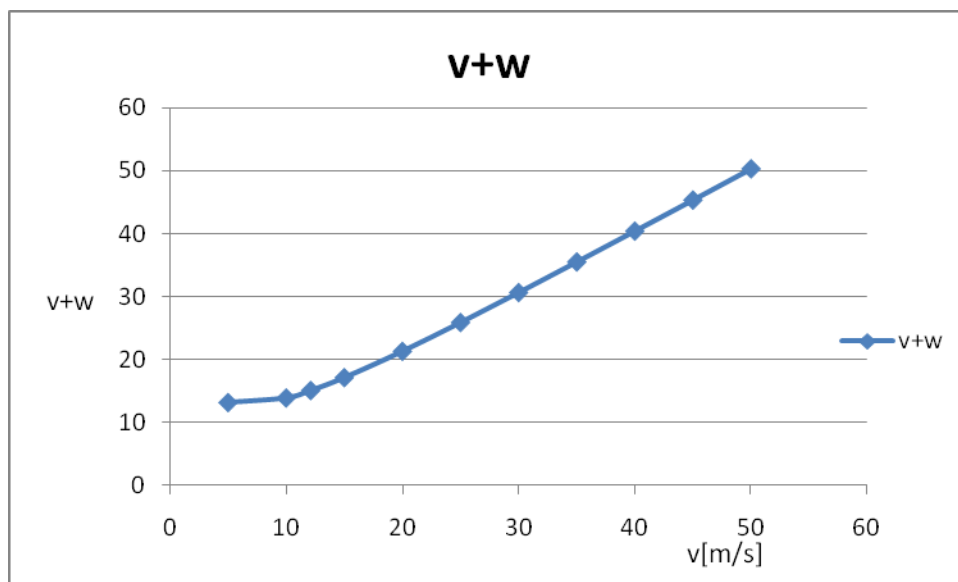
Liitte 4. Työntövoima

ρ	A	η	P	V	W
1,225	6,428	0,91	9212	5	8,116461
1,225	6,428	0,91	9212	10	3,844751
1,225	6,428	0,91	9212	12,1041	2,925914
1,225	6,428	0,91	9212	15	2,077913
1,225	6,428	0,91	9212	20	1,252325
1,225	6,428	0,91	9212	25	0,824483
1,225	6,428	0,91	9212	30	0,580218
1,225	6,428	0,91	9212	35	0,429263
1,225	6,428	0,91	9212	40	0,329963
1,225	6,428	0,91	9212	45	0,261345
1,225	6,428	0,91	9212	50	0,212019



Potkuri synnyttämä lisänopeus W

V	W	v+w
5	8,116461	13,11646
10	3,844751	13,84475
12,1041	2,925914	15,03001
15	2,077913	17,07791
20	1,252325	21,25232
25	0,824483	25,82448
30	0,580218	30,58022
35	0,429263	35,42926
40	0,329963	40,32996
45	0,261345	45,26134
50	0,212019	50,21202



Kun virta kulkee potkurin kehä läpi.

V	W	v+w	V+2w
5	8,116461	13,11646	21,23292
10	3,844751	13,84475	17,6895
12,1041	2,925914	15,03001	17,95593
15	2,077913	17,07791	19,15583
20	1,252325	21,25232	22,50465
25	0,824483	25,82448	26,64897
30	0,580218	30,58022	31,16044
35	0,429263	35,42926	35,85853
40	0,329963	40,32996	40,65993
45	0,261345	45,26134	45,52269
50	0,212019	50,21202	50,42404

