



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS

AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Rūta Pudževelytė

SKRAIDYKLĖS SKRYDŽIO STABILUMO ANALIZĖ

HANG GLIDER STABILITY ANALYSIS

Baigiamasis magistro darbas

Orlaivių pilotavimo studijų programa, valstybinis kodas 60103T101

Transporto inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2013

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS
AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Vytautas Kazimieras
Maceika
(Vardas, pavardė)

(Data)

Rūta Pudževelytė

SKRAIDYKLĖS SKRYDŽIO STABILUMO ANALIZĖ
HANG GLIDER STABILITY ANALYSIS

Baigiamasis magistro darbas

Orlaivių pilotavimo studijų programa, valstybinis kodas 60103T101

Transporto inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

Doc.dr.Eduardas Lasauskas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas lekt. Regina Žukienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2013

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Antano Gustaičio aviacijos

Aviacijos technologijų katedra

ISBN ISSN

Egz. sk. 2

Data 2013-05-30

Orlaivių pilotavimo studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Skraidyklės skrydžio stabilumo analizė**

Autorius **Rūta Pudževelytė**

Vadovas doc. dr. **Eduardas Lasauskas**

Kalba

X

Lietuvių

Užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe aerodinaminiu požiūriu tiriamas skraidantis aparatas skraidyklė. Darbo pradžioje išnagrinėta metodinė medžiaga bei moksliniai straipsniai susiję su magistro tema. Teorinėje dalyje aprašomos bendros skraidyklės skrydžio bei stabilumo charakteristikos. Aptariama pagrindinių konstrukcijos elementų įtaka aerodinaminei kokybei, skraidyklės pavaldumui, nes į juos būtina atsižvelgti projektuojant sparną programa XFLR5.

Tiriamojame dalyje pritaikoma teorijoje išnagrinėta medžiaga, sumodeliuojamas skraidyklės sparnas, pritaikomas aerodinaminis profilis, sparno susukimas, strėliškumas, skersinio „V“ kampas ir centruotė taip, kad aerodinaminės charakteristikos atitiktų realaus pasirinktos skraidyklės sparno savybes. Po to atliekama išsami skrydžio stabilumo analizė. Išnagrinėti rezultatai pateikiami darbe.

Darbą sudaro 5 dalys: įvadas, teorinė dalis, analizė, išvados ir siūlymai, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 48 p. teksto be priedų, 32 iliustr., 3 lent., 24 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: skrydžio stabilumas, išilginis stabilumas, krypties stabilumas, skersinis stabilumas, skraidyklė, XFLR5, stabilumo režimai, strėliškumo kampas, susukimo kampas, skersinio „V“ kampas, aerodinaminis pasipriešinimas, keliamoji jėga.

Vilnius Gediminas Technical University
Antanas Gustaitis aviation institute
Aviation technology department

ISBN ISSN
Copies No. 2
Date 2013-05-30

Aircraft piloting study programme master thesis.

Title: **Hang glider stability analysis**

Author **Ruta Pudzevelyte** Academic supervisor **dr. Eduardas Lasauskas**

Thesis language

☐

Lithuanian

☐

Foreign (English)

Annotation

A hang glider is analysed in this Master thesis in order to get more accurate understanding about stability characteristics of such kind of aircraft. Firstly, reachable information sources are discussed, most of which do not introduce accurate stability explanations. Basic knowledge of a hang glider flight, construction parameters are detailed further, this information should be understood before starting wing modeling with XFLR5.

Aircraft stability is analysed separately: pitch, roll and yaw axis. Hang glider model in XFLR5 has very realistic flight characteristics, after this stability analysis are performed. All results can be found in this thesis with detailed explanations.

Structure: introduction, theoretical part, analysis, conclusions and suggestions, references.

Thesis consists of: 48 p. text without appendixes, 32 pictures, 3 tables, 24 bibliographical entries.

Appendixes included.

Keywords: flight stability, pitch stability, roll stability, yaw stability, hang glider, stability modes, XFLR5, sweep angle, dihedral, twist angle, aerodynamic drag, lift.

Turinys

Iliustracijų sąrašas.....	6
Lentelių sąrašas.....	7
1. Įvadas	8
2. Literatūros apžvalga	9
3. Teorinė dalis	14
3.1. Skraidyklės, kaip skraidančio aparato, aptarimas	14
3.1.1. Efektyvusis sparno proilgis	14
3.1.2. Keliamosios jėgos pasiskirstymas	17
3.1.3. Aerodinaminis pasipriešinimas	18
Sparno apkrova.....	19
3.1.4. Kiti skraidyklės skrydžio ir stabilumo charakteristikas įtakojantys veiksniai	19
3.2. Stabilumas	22
3.2.1. Išilginis stabilumas	22
3.2.2. Skersinis stabilumas	28
3.2.3. Krypties stabilumas	29
4. Tyrimas.....	30
4.1. Sparno projektavimas XFLR5.....	30
4.2. Sparno stabilumas.....	35
4.2.1. Išilginio svyravimo režimai	36
4.2.2. Skersinių svyravimų režimai	38
5. Išvados.....	41
6. Literatūra	42
Priedai.....	44
1. Rėmo konstrukcija (FAA)	44
2. Charakteringi skraidyklės sparno parametrai (FAA).....	44
3. Per daug lanksčios konstrukcijos sparno deformacija posūkio metu (Pagen).....	45
4. T2/T2C sparnų serijos dydžiai priklausomai nuo piloto svorio (Wing).....	45
5. Keliamosios jėgos veikimo taško padėtis (Pagen)	45
6. Švytuoklės efektas (Gratton)	46
7. Skraidyklės centruotė priekinė – sparnas stabilus skersinės ašies atžvilgiu. (Meier)	47
8. Skraidyklės centruotė galinė – sparnas nestabilus skersinės ašies atžvilgiu. (Meier).....	47
9. Publikuotas straipsnis	48

Iliustracijų sąrašas

1 pav. Laisvųjų sūkurių priklausomybė nuo sparno proilgio (Pagen)	15
2 pav. Sparno proilgio įtaka skrydžio charakteristikoms (Pagen)	16
3 pav. Keliamosios jėgos pasiskirstymas išilgai sparno (Pagen).....	17
4 pav. Profilio pasipriešinimas (Pagen)	18
5 pav. Suminis pasipriešinimas (Pagen)	19
6 pav. Žalingo pasipriešinimo įtaka skrydžio charakteristikoms (Pagen)	18
7 pav. Sparno apkrovos įtaka skrydžio charakteristikoms (Pagen)	19
8 pav. Skersės "plaukiojimas" posūkio metu (Pagen)	20
10 pav. Skersinio "V" kampas išilgai sparno (Pagen)	21
11 pav. Išėjimas iš piktiravimo (Pagen).....	25
12 pav. Skraidyklių profilio kilmė (Pagen)	26
13 pav. Skraidyklių profilių pavyzdžiai (Pagen)	26
14 pav. Stabilus ir nestabilus profiliai (Pagen).....	27
15 pav. Profilis MH 84 XFLR5 programoje.....	30
16 pav. Polinkio momento kitimas priklausomai nuo atakos kampo	31
17 pav. WW T2C 154 3D modelis XFLR5	32
18 pav. Cm momento kitimas priklausomai nuo atakos kampo	32
19 pav. Cl pasiskirstymas išilgai sparno, kai $\alpha=6^\circ$	33
20 pav. Keliamosios jėgos kitimas priklausomai nuo atakos kampo	33
21 pav. Cl/Cd prie skirtingų atakos kampų.....	34
22 pav. Cd esant skirtingiems α	34
23 pav. Išilginių natūralių svyravimų režimai	36
24 pav. Skrydžio greičio kitimas laike.....	37
25 pav. Polinkio kampo kitimas laike.....	37
26 pav. Vertikalaus greičio kitimas laike	37
27 pav. Polinkio kampo kitimas laike.....	38
28 pav. Skersiniai natūralių svyravimų režimai.....	38
29 pav. Skersinio greičio kitimas laike	39
30 pav. Pokrypio kitimas laike	39
31 pav. Posvyrio kitimas laike	40
32 pav. Kurso kampo kitimas laike	40

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Aerodinaminio pasipriešinimo šaltiniai ir jų dalis procentais bendram skraidyklės pasipriešinimui	18
2 lentelė. MH 84 profilio parametrai	30
3 lentelė. Sparno WW T2C 154 parametrai	31

1. Įvadas

WSC (angl. *weight-shift control*) orlaivis valdomas tik polinkio ir posvyrio kampais, kuriuos pilotas reguliuoja keisdamas jo svorio centro (CG) padėtį sparno atžvilgiu. Skrydžio kontrolė pagrįsta lankstaus sparno galimybe deformuotis, o ne valdymo plokštumomis (FAA, 2008). Skraidyklės yra priskiriamos šiai orlaivių kategorijai, jos neturi daugumai kitų būdingų eleronų, aukščio ir krypties vairų, neturi užsparnių. Šiuolaikinių skraidyklių prototipą dar 1948-taisiais sukūrė NASA inžinierius Francis Rogallo. Nuo to laiko skraidyklės, kaip ir visi skraidantys aparatai labai patobulėjo ir tapo plačiai paplitusia sporto šoko visame pasaulyje.

Augantis skraidyklių populiarumas skatino gamyklas investuoti kuriant ir pritaikant naujas technologijas, nes pirmieji, dažnai net savadarbiai sparnai pasižymėjo labai pavojingomis skrydžio charakteristikomis. Jų aerodinaminė kokybė buvo tokia žema, kad įveikti maršrutą, kokie dažniausiai planuojami šiuolaikinių tarptautinių varžybų metu, būtų neįmanoma.

Lietuvoje skraidyklių sportas atsirado pakankamai seniai, tačiau šiuo metu laisvo skrydžio skraidyklių pilotų skaičius labai mažas, nes nėra mokymo bazės, mokymui skirtos įrangos, metodinės medžiagos bei tik keli instruktoriai. Vienas iš šio darbo autoriaus tikslų yra parengti išsamią teorinę medžiagą, nagrinėjančią esmines skrydžio skraidykle charakteristikas, kuri galėtų būti pritaikoma mokymui. Kitas tikslas yra įrodyti arba paneigti ankstesnių skraidyklių sparnų suformuotą nuomonę, kad skraidyti jomis yra nesaugu. Stabilumas yra pagrindinė bet kokio orlaivio charakteristika. Atlikus išsamią stabilumo analizę skraidyklės sparnui galima spręsti apie aparato saugumą.

2. Literatūros apžvalga

Skraidyklių sportas gimė kartu su aviacija, nors šiuolaikinės skraidyklės šaknys siekia vėlesnius laikus. Norint išanalizuoti skraidyklės skrydžio charakteristikas pirmiausia reikia išsiaiškinti pagrindinius veiksnius lemiančius skraidančio aparato eksploatacines savybes bei projektavimo metodus, naudojamus skridimo greičiui ir sklendimo nuotoliui padidinti bei sumažinti žemėjimo spartą. Kaip bet kuris kitas orlaivis, taip ir skraidyklės labai pasikeitė nuo jų sukūrimo pritaikius naujas technologijas, pažangius tyrimo ir projektavimo būdus.

Skirtumas tarp pirmųjų *Rogallo* ir dabartinių sparnų yra akivaizdus – pagerintos skrydžio saugos ir aerodinaminės charakteristikos. Latės (nerviūros) suteikia stabilią formą sparnui, palaiko sparno profilį visų skrydžio etapų metu, apsaugo burę nuo „plasnojimo“. Pradžioje buvusius vienasluoksnius sparnus pakeitė dvisluoksniai, kilio kišenė nuėmė apkrovą nuo burės, vėliau tai buvo pritaikyta ir skersinei atramai. Polinkio stabilumui pagerinti pradėti naudoti specialūs sparno galai bei antipikiraciniai trosai. Naujos medžiagos burei siūti, *Mylar* dangos naudojimas priekinei briaunai apibendrina pagrindinius pokyčius, lėmusius skrydžio charakteristikų pasikeitimą (Pagen).

1960 metais NASA pradėjo bandymus skraidyklių pirmtakų, kurie turėjo būti naudojami įvairių kosmoso aparatų saugiam sugrąžinimui į žemę (*Rogallo* sparnas). Kadangi skraidyklių sportas yra palyginus „pigus“, tai pirmiesiems sparnams labai trūko apibrėžtų stabilumo, pavaldumo, skrydžio charakteristikų pritaikymo. Vienas išsamiausių tyrimų šia kryptimi buvo atliktas 1980 metais I. Kroo bendradarbiaujant su NASA (Kroo, 1981). I. Kroo išvedė lygtis nedideliems sparno išilginio ir skersinio – krypčių svyravimams. Darbe taip pat yra pagrindai didesnių amplitudžių svyravimų skaičiavimui. Įdomu tai, kad I. Kroo įrodė, jog nuleidžiant masės centrą žemyn tam tikru atstumu, didėja polinkio stabilumas esant dideliems atakos kampams. Tyrimas taip pat parodė, kaip dauguma sparno elementų atskirai veikia bendrą skraidyklės skrydžio dinamiką, pvz., sistemos masė, nepastovus aerodinaminis poveikis, sparno lankstumas, susukimas ir kt. (M. V. Cook, M. Spottiswoode).

Nemažai tyrimų atliko E.A.Kilkenny, savo darbuose jis išnagrinėjo tuometinių skraidyklių dinamines charakteristikas. Vykdydamas tyrimą „Full scale wind tunnel tests on hang glider pilots“ (1984) vienas pirmųjų aerodinaminiam vamydyje atliko bandymus piloto įtakos skrydžio charakteristikoms nustatymui. Atlikęs tyrimą su penkiais skirtingais pilotais ir skirtingomis pakabomis pateikė apibendrintus rezultatus, kuriuose pirmiausia ištiriamas aptakių, uždarų pilotų pakabų pranašumas prieš atviras pakabas. Įdomus faktas, kad skrydžio charakteristikoms didesnę įtaką darė ne piloto svoris ar jo fiziniai duomenys, tačiau pilotavimo ypatybės, kokia yra jo kūno padėtis įvairių manevrų ar horizontalaus skrydžio metu. Jis taip pat nustatė, kad piloto

pasipriešinimas nepriklauso nuo skrydžio greičio. Tokios išvados parodo, kad šiame darbe atliekamam tyrimui piloto modeliuoti nėra būtina, vien dėl to, kad skaičiavimai nebūtų praktiškai pritaikomi (E.A.Kilkenny).

Susipažinus su išsamiu Gary Valle tiriamuoju darbu „Preliminary Analysis of the longitudinal Dynamics of ultralight gliders“ paaiškėjo, jog skraidyklių stabilaus skrydžio užtikrinimui naudingi tie konstrukciniai parametrai, kurie kitų tipų orlaiviams nėra taikomi. Remiantis G.Valle išvadomis, išilginio stabilumo užtikrinimui naudingesni mažo proilgio, didelio mosto, kuo labiau susukti bei palyginti didelį žalingą pasipriešinimą turintys sparnai. Šių parametrų kombinavimas kartu su aerodinaminių principų įgyvendinimu apsaugo nuo persivertimo per priekį (angl. *tumble*) tikimybės skrendant blaškoje ar pasiekus kritinius skrydžio režimus.

AAIA (angl. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*) nariai yra atlikę nemažai skraidyklių aerodinaminių charakteristikų tyrimų. Keletas nagrinėtų darbų yra atlikta antros klasės skraidyklių savybėms sumodeliuoti ir išnagrinėti. Viena iš jų Xiao Huang ir kt. „Aerodynamic analysis of a class II high performance hang glider – the ATOS“ analizuojamas kietasparnis ATOS (2006 m). Šis skraidantis aparatas pasižymi geresnėmis aerodinaminėmis charakteristikomis: didesnė keliamoji jėga, tolygesnis keliamosios jėgos koeficiento pasiskirstymas išilgai sparno, mažesnis generuojamas pasipriešinimas, dėl ko jo aerodinaminė kokybė didesnė. Šiame darbe analizuojamas polinkio momento koeficientų skirtumas kietasparnio ATOS ir senesnio modelio Horten IV lanksčios geometrijos sparno. Ryškaus skirtumo nerasta, tačiau išsami stabilumo analizė tyrime nėra atlikta.

2000-taisiais Ilan Kroo tyrinėjo kitą taip pat antros klasės sparną SWIFT („Design and development of the swift: a foot –lounched sailplane“). Šio tyrimo išvados remiasi skrydžio charakteristikų pagerėjimu lyginant su įprastomis skraidyklėmis. Tai nulemia kompozitinių medžiagų naudojimas aerodinaminiams paviršiams, aerodinaminiai vairai, plonesnio aerodinaminio profilio taikymas, tačiau lyginant šiuos privalumus su žymiai išaugusia gamybos kaina, aparato svoriu, šio tipo skraidyklės nėra taip plačiai paplitusios.

2008-taisiais JAV FAA (Federal Aviation Administration) išleido išsamų skrydžių vykdymo vadovą skraidyklių pilotams „Weight-shift control aircraft flying handbook“. Jame pateikiama informacija, apimanti skraidyklių istoriją, jų konstrukcines ypatybes, aerodinaminius principus, pilotavimo bei skrydžio procedūras, orlaivio manevravimą, meteorologijos pagrindus ir kt. Šiame darbe naudojamos šio leidinio iliustracijos, bei dalis aerodinamikos temų, kurios būdingos būtent šio tipo orlaiviams.

Skraidyklių teoriją nagrinėjančių leidinių yra nedaug, dauguma jų apima pradinį skraidyklių sporto vystymąsi, jų praktinį taikymą ne tik sportiniais – pramoginiais, bet ir

moksliniais tikslais (Markowski). Dauguma literatūros yra išleista prieš dvidešimt ar trisdešimt metų, skraidyklės per tą laiką akivaizdžiai patobulėjo ir jų aerodinaminiai principai, o kartu ir stabilumo charakteristikos skiriasi. Šiuo metu kiekvienam pradedančiajam ir pažengusiam pilotui pasiekama ir lengvai suprantama informacija pateikiama keliose Dennis Pagen knygose („Performance flying“, „Hang gliding training manual Part1/Part2“, „Understanding the sky“ ir kt.). Knygų autorius, turintis apie keturiasdešimt metų skraidymo patirtį yra išleidęs apie vienuolika knygų ir parašęs apie 350 straipsnių. Šio tyrimo autoriui taip pat teko dalyvauti keliose Dennis Pagen paskaitose, vykusiose 2011 metais Slovėnijoje. Aptariant skraidyklės aerodinaminius ir stabilumo principus bus remiamasi jo knygose aprašyta teorija ir iliustracijomis. Dalis Dennis Pagen leidinių aprašo pradinį pilotų mokymą, jos yra plačiai naudojamos kaip metodinė medžiaga prieš pradedant praktinį piloto paruošimą, dalis skirta meteorologinių veiksnių svarbos skrydžių saugai ir skriejimo ypatybėms aptarti.

Magistro darbe remiamasi „Performance flying“ knygoje aprašyta skraidyklės skrydžio stabilumo teorija, apimančia detalų stabilumo charakteristikas įtakojančių veiksnių aptarimą, tokių kaip sparno profilis, sistemos skraidyklė – pilotas centruotės įtaka, sparno susukimo bei strėliškumo sąvokos, sparno proilgis, keliamoji jėga, pasipriešinimas ir kt. Šioje knygoje taip pat aprašoma sparno konstrukcija bei svarbiausi jos elementai, kurie trumpai pateikiami ir šiame darbe. Kitas skraidyklių pilotas Finbar Sheehy 1992 metais parašė knygą „The hang glider’s technical notebook“, kurioje didelį dėmesį skyrė skraidyklės skrydžio stabilumo sąvokos nagrinėjimui. Šiame darbe remiamasi ir F.Sheehy aprašyta teorija, ją patikrinus su kitais informaciniais šaltiniais.

Teorinė dalis daugelyje vietų papildoma informacija surinkta iš tyrimui naudojamų amerikiečių skraidyklių gamyklos Wills Wing sparno projektuotojų Steve Pearson bei Mike Meier straipsnių. Wills Wing – tai didžiausia JAV skraidyklių gamykla, šiuo metų užsiimanti keturių tipų skraidyklių gamyba. Nuo 1970 – tujų įmonė pardavė tūkstančius aparatų, kurie yra labai paklausūs tarp skraidyklių pilotų. Laisvo skrydžio skraidyklės išlieka populiariausios dėl savo pigumo, mažo svorio bei tvirtos konstrukcijos. Be Wills Wing, yra keletas kitų skraidyklių gamyklų, tokios kaip: Moyes, Icaro, Aeros, Airborne, Northwing. Per daugiau nei keturiasdešimt projektavimo ir gamybos metų įmonė ištobulino skraidyklių konstrukcines, aerodinamines ir stabilumo charakteristikas, kurios leidžia šiuolaikiniams pilotams pasiekti didesnius skrydžio greičius, didesnius skrydžio nuotolius, padidina skrydžių saugą bei suteikia patogesnę valdymą ore.

Viename iš straipsnių ilgametis gamyklos vadovas Steve Pearson aprašo sudėtingą projektavimo ir naujų idėjų realizavimo procesą. Straipsnyje trumpai apžvelgiamos priežastys, lėmusios „bebokščių“ skraidyklių atsiradimą ir sunkumai su kuriais susidūrė projektuotojai tuo

metu. Pagrindiniai aerodinaminiai principai skraidyklių sparnams yra tokie patys kaip ir kietą konstrukciją bei paviršiaus dangą turinčių sparnų, tačiau reikalingų parametrų užtikrinimui būtina suderinti daugiau elementų, kurie kiekvienas atskirai turi labai ribotą tikslumą. Būtent dėl to dauguma naujų technologijų, kurios vėliau pakeitė šio sporto vystymąsi, pradžioje patyrė nesėkmes. Šiuo atveju turėjo būti sukurta nauja stabilumo užtikrinimo sistema. Tam reikėjo nemažai investicijų, tad projektuotojai neskubėjo, norėdami įsitikinti, kad naujas produktas tikrai yra reikalingas, kad jo paklausa bus didelė ir atsipirks tyrimų bei naujų technologijų kaina. Bokštelio panaikinimas suteikia skraidyklės sparnui žymiai geresnes skrydžio charakteristikas prie didelių greičių, tačiau pilotai didžiąją dalį laiko praleidžia sukdami termikuose, kur greitis yra mažas, taip pat maži greičiai svarbūs tūpimui, kilimui, tad sparno pavaldumas ir stabilumas turi būti užtikrinamas platesniame greičių diapazone. Kituose straipsniuose nagrinėjamos tokios temos kaip centruotės įtaka polinkio stabilumui, vertikalių sparnų galiukų taikymo privalumai, deformacijų įtaka sparno skrydžio charakteristikoms ir kt.

Gamyklos Wills Wing internetiniame puslapyje publikuojamas 2010-taisiais Paul Dees atliktas lyginamasis tyrimas AVL programa „Hang glider design and performance“. Jame nagrinėjami šios gamyklos šiuo metu gaminamų skraidyklių sparnų serijos skirtumai. Šiame darbe naudojamo sparno modelis T2C parodė geriausias aerodinamines charakteristikas: keturių tipų sparnų aerodinaminė kokybė kito ribose nuo 9 iki 14. Skrydžio stabilumo temos Paul Dees nenagrinėja. Magistro darbe naudojamas viešai publikuojamas gamyklos Wills Wing sparno T2C 154 naudotojo vadovas.

Tiriamoji šio darbo dalis atliekama aerodinaminių paviršių modeliavimo ir jų parametrų skaičiavimo programa XFLR5. Joje integruota ir aerodinaminių profilių savybės skaičiuojanti XFOIL. Programa leidžia skaičiavimus atlikti remiantis keliomis teorijomis, viena iš jų VLM (angl. *Vortex Lattice Method*), tai sukurių tinklelio metodas, kuris įgalina įvertinti sparno strėliškumą, tinka mažo proilgio sparnų su dideliu skersinio „V“ kampų charakteristikų įvertinimui. Flavio Gohl savo darbe „Aerodynamic performance and stability simulation of different flying wing model airplane configurations“ išsamiai aprašė VLM metodą, šio tyrimo medžiaga remiamasi siekiant optimizuoti ir pritaikyti skraidyklės sparno modelį XFLR5 programai, tikslesnių skaičiavimų rezultatų gavimui. Išsamus programos taikymas aprašytas Andre Deperrois prezentacijoje „About stability analysis using XFLR5, išleistoje 2010-taisiais metais.

Skraidančių sparnų modeliai vis plačiau taikomi aviacijoje, ši plėtra skatina skraidyklių sparnų tyrimus, kurie dalinai parodo bendras šio tipo orlaiviams būdingas savybes. Tokiu tikslu atlikta „Flying wing aerodynamic analysis“ analizė (V. Prisacariu, I. Circiu, M. Boscoianu), kuriame aptariami skaičiavimai XFLR5 eksperimentiniam modeliui. Panašus tyrimas buvo

atliktas 2008-2009 metais grupės AIAA narių. Kolorado universitete buvo sukurtas stabilaus skraidančio sparno modelis („A guide to designing a stable flying wing aircraft“), jame aptariami tie patys stabilumo režimai, kuriuos tiriamojoje dalyje nagrinėja magistro darbo autorius, tačiau skaičiavimams naudotos AVL ir MATLAB programos.

Perskaičius ir išanalizavus surinktą tiek metodinę, tiek tiriamąją medžiagą paaiškėjo, kad stabilumo klausimas skraidyklių sporte yra nagrinėjamas praktiniais tyrimais, išsamių skaičiavimų atlikta nedaug ir jie turi tik sąlyginį tikslumą. Lietuviškai šia tema nerasta jokios apibendrintos ir pagrįstos informacijos, todėl šiuo rašto darbu bus apžvelgiamos skraidyklės, kaip skraidančio aparato aerodinaminės savybės, aprašomi pagrindiniai skrydžio stabilumą įtakoiantys veiksniai bei atliekama stabilumo charakteristikų analizė programa XFLR5. Tyrimu nesiekama gauti konkrečių skaičiavimų verčių, nes sparno T2C 154 modelis pasirinktas tik kaip tiriamojo objekto pagrindas, jo konstrukcinės ypatybės pritaikytos programai nors ir išlaikant didžiąją dalį geometrinių parametrų. Rezultatai gali būti lyginami su praktiniais eksperimentais, tačiau tik ribotu tikslumu vien dėl to, kad jie gauti tik tam tikram subalansuoto skrydžio režimui, neįvertinamas piloto pasipriešinimas ir kiti konstrukciniai elementai.

3. Teorinė dalis

3.1. Skraidyklės, kaip skraidančio aparato, aptarimas

Kiekvienas orlaivis yra kompromisų rezultatas derinant didelių ir mažų greičių charakteristikas, manevringumą ir stabilumą, konstrukcijos sudėtingumą, jos ilgaamžiškumą, skraidančio aparato universalumą, transportabilumą, kainą bei svorį. Svoris susijęs su visais kitais veiksniais, nes dažniausiai siekiant pagerinti konstrukciją, jos tvirtumą, naudojant papildomas atramas ir kitas priemones, didėja aparato svoris (Pagen).

Skraidyklių projektuotojai pirmiausia renka tris pagrindinius sparno parametrus:

1. Sparno formą horizontalioje plokštumoje (dydį ir sparno mostą);
2. Sparno noselės kampą;
3. Sparno profilį.

Visi skraidyklių sparnai yra strėliški, naudojamas sparno susukimas išilgai sparno mosto, beuodegiai (yra ir turinčių horizontalius stabilizatorius, tačiau šiuo metu plačiausiai naudojami beuodegiai). Visų orlaivių skrydžio charakteristikas lemia šie pagrindiniai veiksniai:

- ❖ Efektyvusis sparno proilgis;
- ❖ Keliamosios jėgos pasiskirstymas išilgai sparno;
- ❖ Pasipriešinimas;
- ❖ Sparno apkrova (Pagen).

Šių parametrų suvokimas labai svarbus tyrime naudojamo sparno projektavimui. Sparno sandara ir pagrindiniai elementai nurodyti prieduose (žr. 1, 2, priedus).

3.1.1. Efektyvusis sparno proilgis

Proilgis yra santykis tarp sparno mosto ir jo vidutinės geometrinės stygos (Pagen):

$$A = \frac{b}{c_g} \quad (3.1.1.1.)$$

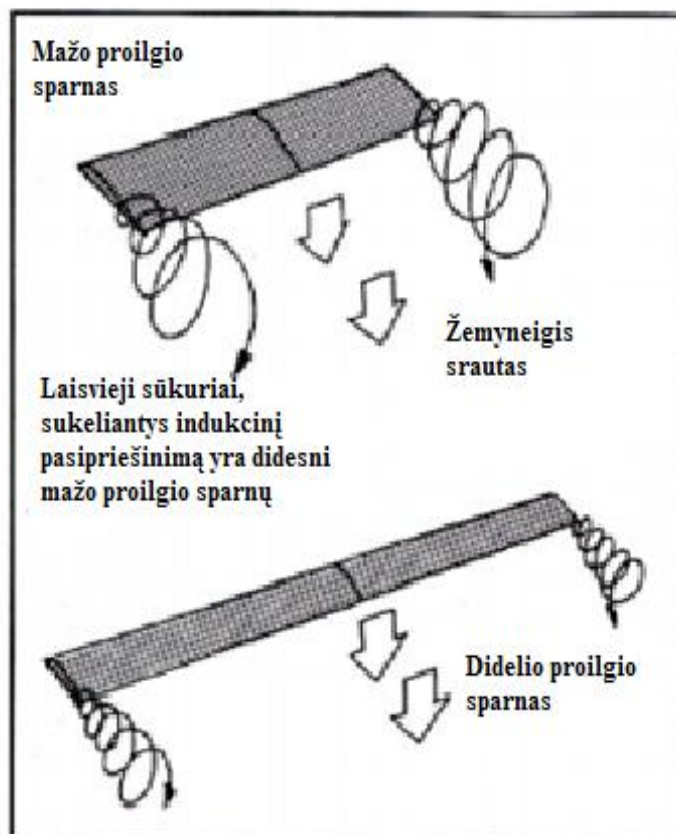
Kur: A - sparno proilgis; b – sparno mostas (m); c_g – vidutinė geometrinė sparno styga (m).

Sparno proilgį taip pat galima gauti sparno mosto kvadratą padalinus iš sparno ploto (Lasauskas, 2007):

$$A = \frac{b^2}{S} \quad (3.1.1.2.)$$

Kur: S - sparno plotas (m^2).

Didelio proilgio sparnas yra ilgas ir siauras horizontalioje plokštumoje (tipiškas sklandytuvo sparnas). Dėl slėgių skirtumo virš sparno ir jo apačioje, ties sparno galais oro srautas nukrypsta į išorę apatinėje sparno pusėje ir į vidų viršutinėje sparno dalyje. Toks oro judėjimas pereina į besitęsiančius sūkurius nuo sparno galų (Pagen).



1 pav. Laisvųjų sūkurių priklausomybė nuo sparno proilgio (Pagen)

Jie nulenkia srautą prieš sparną aukštyn, už sparno žemyn, sumažindami efektyvų atakos kampą, o kartu ir keliamąją jėgą. Pasipriešinimas sukeltas laisvųjų sūkurių vadinamas indukcinio. Indukcinio pasipriešinimo formulė:

$$C_{Di} = \frac{C_L^2}{\pi A} (1 + \delta) \quad (3.1.1.3.)$$

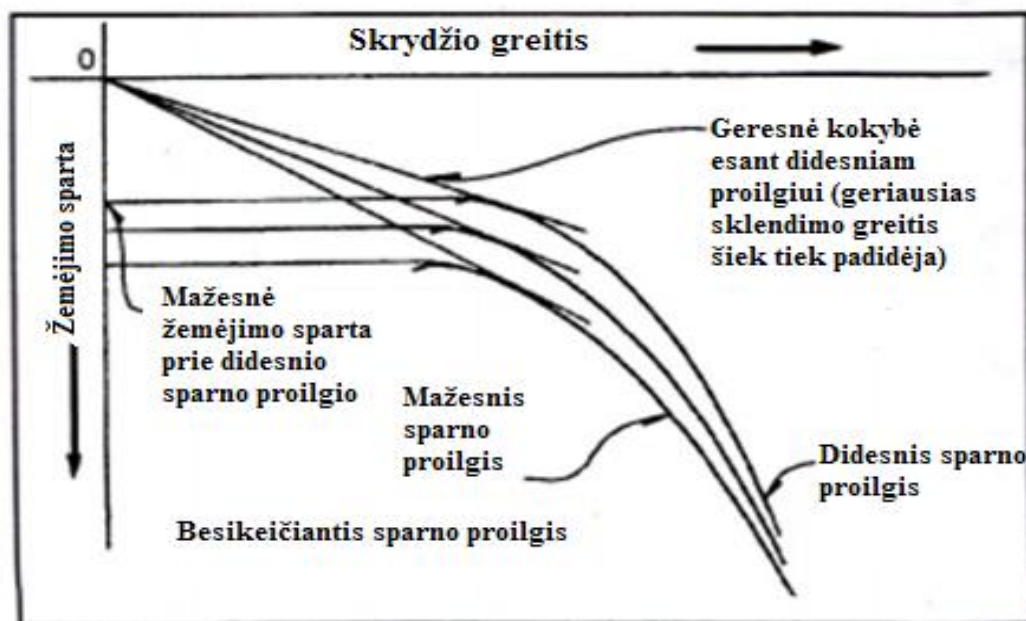
Kur: C_L – keliamosios jėgos koeficientas, δ – koeficientas, įvertinantis sparno formą indukciniam pasipriešinimui (Lasauskas).

Indukcinis pasipriešinimas atvirkščiai proporcingas proilgiui. Tai lemia didelio proilgio sparnų pranašumą prieš mažo proilgio sparnus. Ankstesni amerikiečių gamyklos *Wills Wing* skraidyklių modeliai turėjo vertikalios sparnų galiukus (angl. *winglets*). Pagal Steve Pearson jie tariamai padidina sparno proilgį, taip sumažindami indukcinį pasipriešinimą (Pearson).

Skraidyklės sparnui naudojama efektyviojo proilgio sąvoka, sparno strėliškumas ir susukimas keičia keliamosios jėgos pasiskirstymą išilgai sparno. Efektyvusis proilgis dabartinių aukštos kokybės sparnų kinta nedidelėse ribose nuo 7 iki 8,5, tad jų charakteristikos yra labai panašios. Didesnio proilgio sparnai turi būti labiau susukti, tačiau išlaikyti tokį susukimą ilgame siaurame sparne yra sudėtinga. Buvo mėginimų sukurti 11 proilgio sparną, tačiau jis neparodė tikėtojo skrydžio charakteristikų pagerėjimo, nes turėjo labai didelį susukimą (sparnas *Ellite*). Susukimas ir strėliškumas mažina efektyvųjį proilgį apytiksliai:

1. 12 % kiekvienims 15° susukimo;
2. 5 % kiekvienims 10° strėliškumo.

Standartiškai skraidyklių, kurių noselės kampas yra 130° , strėliškumas būna tarp 23° ir 25° . Naudojamas susukimas iki 15° , todėl suminis efektyvumo praradimas yra 22 % (12 % dėl susukimo ir 10 % dėl strėliškumo). Sparno proilgio įtaką skraidyklės sparnui vaizdžiai parodo kreivės.

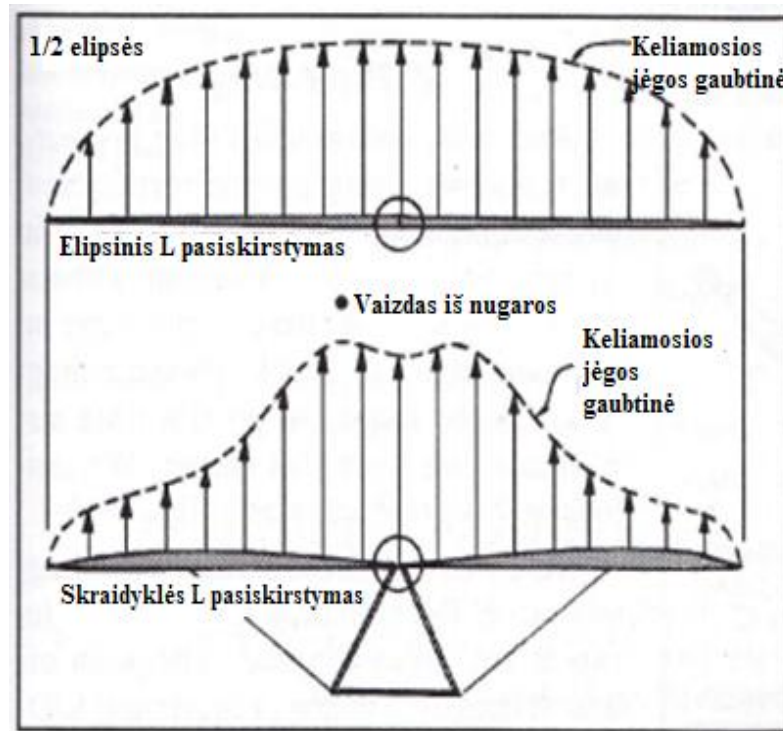


2 pav. Sparno proilgio įtaka skrydžio charakteristikoms (Pagen)

Žemėjimo sparta mažėja proilgiui didėjant kai greitis nesikeičia (kreivė kyla aukštyn), geriausios kokybės greitis šiek tiek pasislenka didesnių greičių link (Pagen).

3.1.2. Keliamosios jėgos pasiskirstymas

Sparno keliamosios jėgos pasiskirstymas išilgai sparno priklauso nuo jo horizontalios projekcijos formos. Elipsinis sparnas turi beveik pastovų keliamosios jėgos koeficientą iki pat sparno galo (Lasauskas).



3 pav. Keliamosios jėgos pasiskirstymas išilgai sparno (Pagen)

Tokia sparno forma lemia mažiausius nuostolius sparno galuose ir 100 % efektyvumą visame sparno ilgyje. Paveiksle matomas ir skraidyklės sparno keliamosios jėgos pasiskirstymas. Dėl sparno formos, susukimo ir strėliškumo keliamosios jėgos pasiskirstymas kinta, keičiantis atakos kampui, tačiau dažniausiai didžiausia keliamosios jėgos dalis yra sukurama vidinės sparno dalies.

Elipsiniai sparnai praktiškai nėra naudojami aviacijoje, nes gaunama per daug sudėtinga ir sunki sparno konstrukcija, tačiau taikomi įvairūs būdai priartinti C_l pasiskirstymą išilgai sparno prie idealaus elipsinio sparno C_l pasiskirstymo. Nauji sklandytuvai kuriami suapvalinta priekine briauna išlaikant beveik elipsinio sparno C_l pasiskirstymą. Kitas sprendimas yra siaurėjančių sparnų naudojimas, kurių sparno galiuko styga atitinka 0,4 šaknies stygos ilgio. Skraidyklių sparnai yra per siauri viduryje jų ilgio, kad atitiktų elipsinio sparno formą. Vienintelis skraidyklėms taikomas būdas – suapvalintų sparno galų naudojimas, tačiau šis efektas yra panaikinamas sparno susukimo ir strėliškumo. Tik sumažinus šiuos du techninius parametrus būtų įmanoma patobulinti C_l pasiskirstymą kartu sumažinant sparno žemėjimo spartą ir padidinti geriausios kokybės greitį (Pagen).

3.1.3. Aerodinaminis pasipriešinimas

Aerodinamikoje pasipriešinimas skirstomas taip:

1. Indukcinis pasipriešinimas – atsirandantis dėl laisvųjų sūkurių, keliamosios jėgos pasekmė;
2. Žalingas (parazitinis) pasipriešinimas – nesusijęs su keliamosios jėgos generavimu.

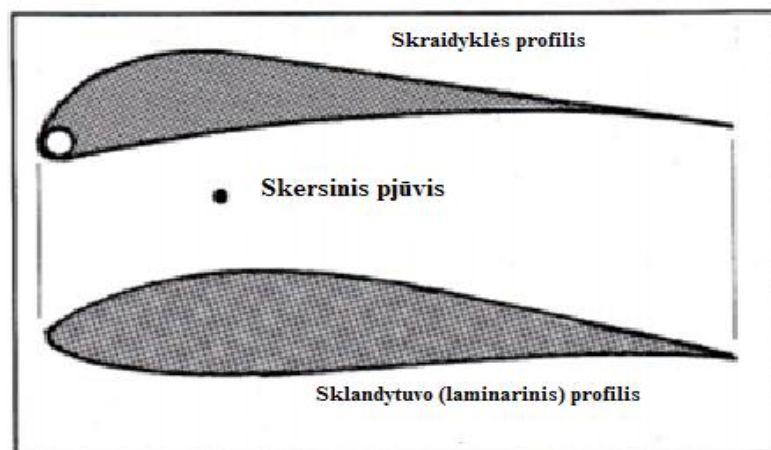
Žalingasis pasipriešinimas dar skirstomas į:

❖ Formos (slėgio) pasipriešinimas;

Jis kyla dėl slėgių skirtumo prieš kūną ir už jo. Formos pasipriešinimas atsiranda oro srautui aptekant orlaivio dalis, kurios nekuria keliamosios jėgos ir priklauso nuo kūnų formos (aptakių pasipriešinimas mažesnis, nes oro srautas apteka neatitrūkdamas nuo kūno paviršiaus) – trosai, bokštelis, skrydžio prietaisai, vairavimo trapecija yra formos pasipriešinimo šaltiniai, tačiau vienas svarbiausių yra paties piloto kūnas (Pagen).

❖ Profilio pasipriešinimas;

Jį sukelia keliamąją jėgą generuojantys paviršiai (šiuo atveju sparnas), pasipriešinimo dydis priklauso nuo paviršių dangos (trinties jėgos), taip pat nuo aerodinaminio profilio formos – buka priekinė profilio briauna, storas profilis, netolygus profilis didina šio tipo pasipriešinimą.



4 pav. Profilio pasipriešinimas (Pagen)

Paveiksle parodyti du panašaus dydžio profiliai. Sklandytuvo sparno profilis generuoja mažesnę pasipriešinimą nei skraidyklės sparno (Pagen).

❖ Interferencinis pasipriešinimas;

Šio tipo pasipriešinimas atsiranda skirtingų orlaivio dalių sujungimo vietose. Skraidyklių sparnams jis nėra būdingas, dalinai šio tipo pasipriešinimui priskiriamas išeinančio oro iš bokštelio pritvirtinimui padarytos kiaurymės generuojamas pasipriešinimas (Pagen).

Visas pasipriešinimas yra lygus indukcinio ir žalingo pasipriešinimų sumai. Parazitinis pasipriešinimas skaičiuojamas:

$$D_p = C_{Dp} \frac{\rho_0 V_{IAS}^2}{2} S \quad (3.1.3.1.)$$

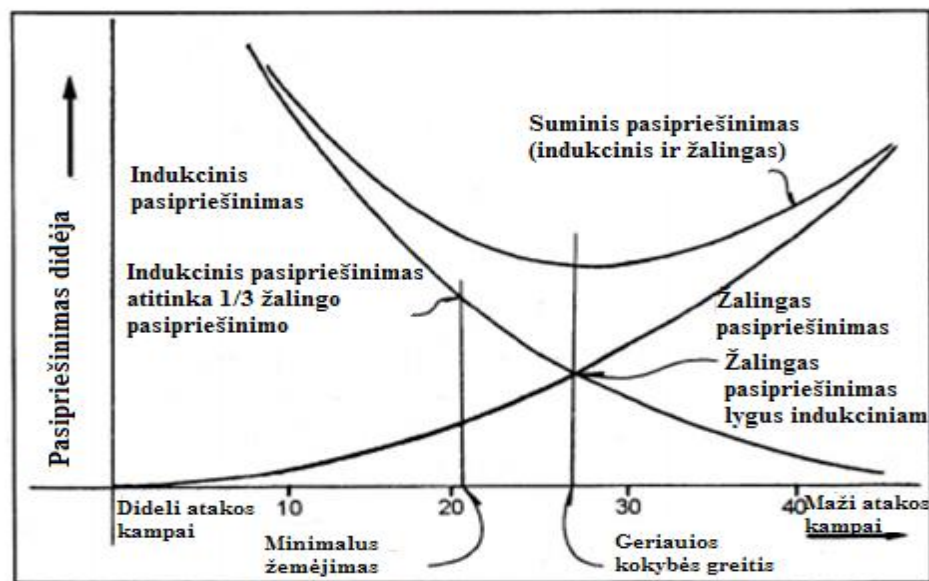
Kur: D_p – parazitinis (žalingas) pasipriešinimas, C_{Dp} – parazitinio (žalingo) pasipriešinimo koeficientas, ρ_0 – oro tankis, V_{IAS}^2 – greičio kvadratas (m/s^2), S – sparno plotas (m).

Indukcinis pasipriešinimas:

$$D_i = \left(\frac{W}{b}\right)^2 \frac{2}{\rho_0 V_{IAS}^2} (1 + \delta) \quad (3.1.3.2.)$$

Kur: D_i – indukcinis pasipriešinimas, W – orlaivio svoris (kg), b – sparno mostas (m), δ – koeficientas, įvertinantis sparno formą indukciniam pasipriešinimui (Lasauskas).

Iš šių dviejų formulių galima teigti, kad indukcinis pasipriešinimas atvirkščiai proporcingas skrydžio greičio kvadratui ir mažėja greičiui didėjant, parazitinis pasipriešinimas priešingai, yra tiesiogiai proporcingas skrydžio kvadratui ir didėja augant skrydžio greičiui. Tai vaizdžiai matoma diagramoje:



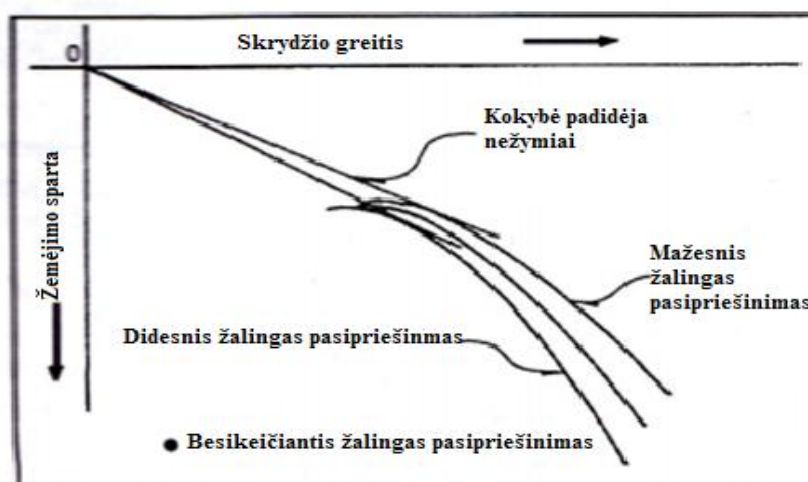
5 pav. Suminis pasipriešinimas (Pagen)

Mažiausio pasipriešinimo ir geriausios aerodinaminės kokybės taškas yra indukcinio ir žalingo pasipriešinimo kreivių susikirtime. Mažiausia žemėjimo sparta yra taške, kur žalingas pasipriešinimas atitinka 1/3 indukcinio pasipriešinimo. Lentelėje procentais išreikšta pagrindinių aerodinaminio pasipriešinimo veiksnių dalis suminiam skraidyklės pasipriešinimui (Pagen).

1 lentelė. Aerodinaminio pasipriešinimo šaltiniai ir jų dalis procentais bendram skraidyklės pasipriešinimui

Pasipriešinimo šaltinis	Sukeliamo pasipriešinimo dalis (%)
Pilotas	13
Sparnas (indukcinis)	50
Sparnas (žalingas)	17,8
Šoniniai trapecijos vamzdžiai (profiluoti)	1,0
Apatinis trapecijos vamzdis	6
Trosai	6
Antipikiraciniai trosai	1,5
Bokštelis (profiluotas)	0,3
Tvirtinimai	1,4
Interferencinis pasipriešinimas	3

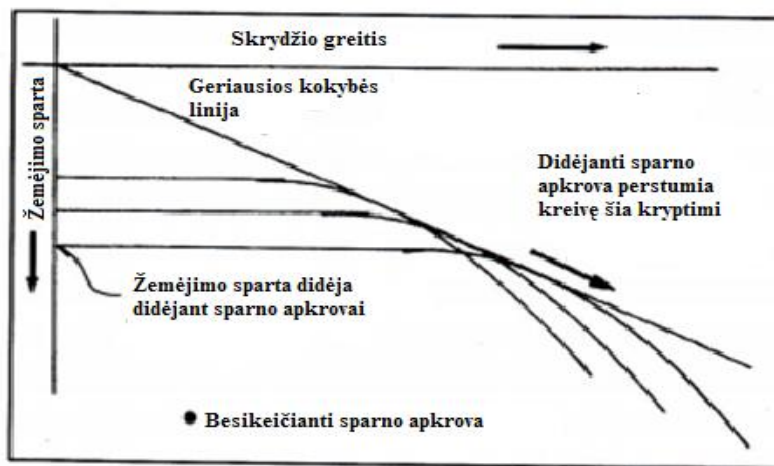
Pasipriešinimas aviacijoje mažinamas pirmiausia šalinant jo šaltinius arba kūnus darant aptakius. Taip pat ir skraidyklių sporte. Pirmiausia aukštos kokybės sparnai yra be bokštelio ir papildomų trosų jungiančių jį su karkasu, vamzdžiai yra profiluojami, pilotų pakabos ir šalmai gaminami kuo aptakesni. Sparnams naudojamų profilių efektyvumas yra labai ribojamas polinkio stabilumo reikalavimų, kurie turi būti derinami neperžengiant saugumo ribų, dėl to jų generuojamas pasipriešinimas gali būti labai sumažintas tik iki tam tikros ribos. Žemiau esančios kreivės rodo, kad mažinant žalingąjį pasipriešinimą, padidėja aerodinaminė kokybė, kas leidžia sumažinti žemėjimo spartą (Pagen).



6 pav. Žalingo pasipriešinimo įtaka skrydžio charakteristikoms (Pagen)

Sparno apkrova

Esant didesnei sparno apkrovai visi nemotorizuoti aparatai skrenda greičiau (sklandytuvai, parasparniai, skraidyklės). Pridėjus 6 kg prie sistemos skraidyklė – pilotas, greitis išauga ~1 km/h kiekvienam atakos kampui. Žemėjimo sparta taip pat išauga, tačiau aerodinaminė kokybė nekinta.



7 pav. Sparno apkrovos įtaka skrydžio charakteristikoms (Pagen)

Dėl lanksčios skraidyklės sparno geometrijos visą apkrovos įtaką įvertinti tiksliai yra sudėtinga. Skrydžio metu keičiasi sparno susukimas, skersinio „V“ kampas ir burės gaubtumas, tai neigiamai veikia skrydžio greitį, tačiau padeda suktis termikuose mažesnio skersmens spirale esant tam pačiam posvyrio kampui (Pagen).

3.1.4. Kiti skraidyklės skrydžio ir stabilumo charakteristikas įtakojantys veiksniai

3.1.4.1. Konstrukcijos lankstumas

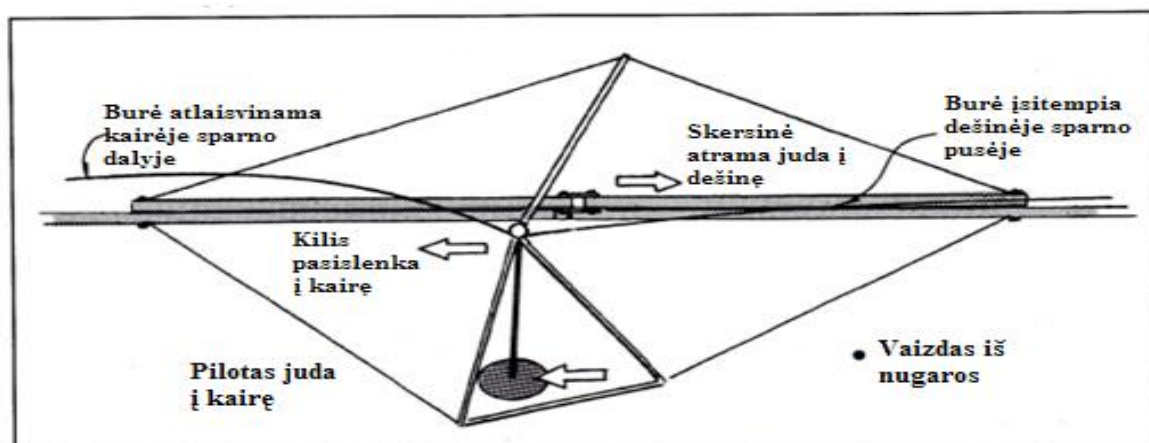
Skraidyklės sparną sudaro dvi dalys: karkasas ir burė, kurie nulemia sparno lankstumą. Ypač standžios konstrukcijos sparnas leidžia didesnę burės įtempimą, mažesnę susukimą, kas užtikrina geresnes skrydžio charakteristikas, tačiau valdyti tokį aparatą yra sudėtinga. Per daug lanksčios briaunos gali išlinkti į viršų posūkio metu (žr. 3 priedą) (Pagen).

Anksčiau buvo naudojamos atramos, kurios sukdavo papildomą pasipriešinimą. Dabartinės priekinės briaunos gaminamos standžios horizontalioje plokštumoje (jas profiliuojant arba naudojant vamzdžius, kurių vidinė dalis yra specialios struktūros) ir lanksčios vertikalioje plokštumoje. Burės audinys, lankstumas ir tamprumas turi būti atidžiai pritaikyti esamai konstrukcijai ir jos deformacijoms skrydžio metu. Kuo lengvesnis audinys naudojamas, tuo paprastesnis skraidyklės valdymas (Pagen).

Tyrime naudojama programa XFLR5 negali įvertinti konstrukcijos deformacijų, dėl ko apskaičiuoti duomenys turės paklaidą lyginant su realaus sparno duomenimis.

3.1.4.2. Skersinės atramos ir kilio slankiojimas

Paveiksle parodytas kilio ir skersinės atramos poslinkis atliekant manevrą:



8 pav. Skersės "plaukiojimas" posūkio metu (Pagen)

Pilotui paslinkus savo kūno svorį į vieną pusę, persiskirsto sparną veikiančios jėgos taip, kad kilis juda į vieną pusę, skersė į kitą, jie nėra standžiai sutvirtinti tarpusavyje, tik per diržą, kuris leidžia tam tikrą laisvumą. Ilgesnis diržas leidžia greitesnį poslinkį ir lengvesnį valdymą, jis dažniausiai tvirtinamas už bokštelio įstatymo vietos (Pagen).

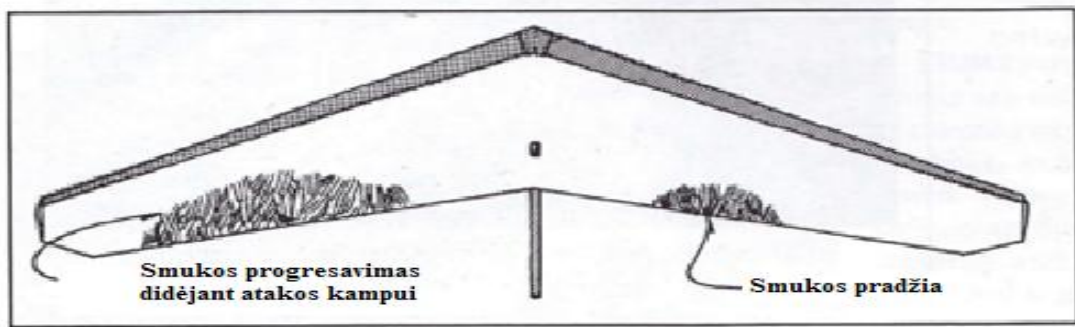
Sparno deformacijas sukeliantis kilio ir skersinės atramos tarpusavio judėjimas programa XFLR5 taip pat nebus įvertinamas.

3.1.4.3. Skraidyklės dydis

Skraidyklės sparno dydis apibūdina sparno apkrovą, kuri įtakoja tiek skrydžio charakteristikas, tiek ir pavaldumą. Manevruojant, mažesnį sparną veikia mažesnės inercijos jėgos, dėl ko jis yra lengviau valdomas, tačiau priešingą poveikį suteikia medžiagų standumo savybės, dėl kurių jis yra mažiau lankstus nei didesnis sparnas (Pagen). Tas pats skraidyklės modelis gali būti gaminamas iki šešių skirtingų dydžių. Burės projekcinis plotas kinta nuo 12 m^2 iki 15 m^2 , priklausomai nuo piloto svorio (žr. 4 priedą).

3.1.4.4. Smuka

Strėliniai sparnai pasižymi savybe – pasiekus kritinius atakos kampus srautas pradeda atitrūkti sparno galuose. Kadangi skraidyklių sparnai yra susukti taip, kad pjūvių profilių atakos kampai išilgai sparno mažėja artėjant link galų, šis efektas yra sumažinamas (Lasauskas).



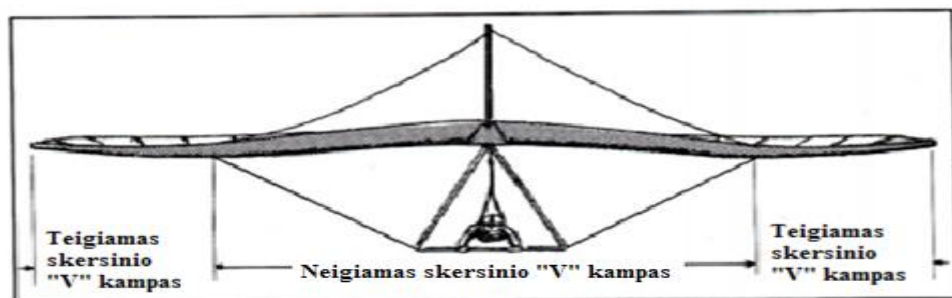
9 pav. Smukos pradžia ir progresavimas (Pagen)

Sparno susukimas nulemia mažiausią greitį, kuriuo gali būti atliekamas posūkis (svarbu sukantis termikuose, kylant, tupiant). Kuo labiau susuktas sparnas, tuo lėčiau gali judėti posūkio viduje esantis sparnas, nes jo atakos kampas padidėja dėl papildomo judėjimo žemyn. Išorinio sparno atakos kampas sumažėja dėl papildomo judėjimo aukštyn. Posūkio atlikimo efektyvumas taip pat susijęs su sparno susukimu, todėl jis negali viršyti tam tikros, sparnui būdingos ribos (Kroo).

NASA atliktas tyrimas patvirtina, kad dėl neigiamo sparno galiukų susukimo (nuo 12°) srauto atitrūkimas pirmiausia prasideda ties sparno šaknimis ir lėtai plečiasi galų link. Atlikus bandymą su 24° neigiamu sparno galų susukimu, srauto atitrūkimas prasidėjo tik esant 39° kilio polinkiui (α). Prie didelių atakos kampų sparnas deformuojasi taip, kad susukimo kampas dar padidėja, taip išlaikydamas keliamąją jėgą iki itin didelių α (Kroo).

3.1.4.5. Konstrukcijos geometrija

Strėliškumas, skersinio „V“ kampas ir skersės poslinkio diapazonas labai akivaizdžiai lemia sparno pavaldumą. Krypties stabilumą skraidyklės sparnui lemia jo strėliškumas – labiau strėlinis sparnas palengvina vairavimą. Skersinio „V“ kampas išilgai sparno mosto keičiasi iš neigiamo į teigiamą.



10 pav. Skersinio "V" kampas išilgai sparno (Pagen)

Esant neigiamam skersinio „V“ kampui, sparnas yra linkęs tęsti pradėtą posvirį, dėl to pilotui lengva jį pradėti, tačiau sudėtingesnis koordinuoto posūkio išlaikymas ir sparno išlyginimas atlikus manevrą. Konstrukcijai suteikus neigiamą skersinio „V“ kampą ir atlaisvinus burę taip, kad ji įgytų teigiamą skersinio „V“ kampą, išsprendžiama problema ir užtikrinamos geros charakteristikos nepabloginant sparno pavaldumo. Projektuotojai turi rasti pusiausvyrą tarp teigiamo ir neigiamo skersinio „V“ kampo dalių planuojamai sparno apkrovai (Pagen).

3.2. Stabilumas

Skraidyklės, kaip ir bet kurio orlaivio judėjimas apibūdinamas trijų ašių atžvilgiu: išilginės ašies, skersinės ašies ir vertikalios ašies. Išilginė ašis eina per orlaivio simetrijos ašį, skersinė ašis – jungia sparnų galus ir yra statmena išilginei, vertikali pravedama statmenai į viršų pirmųjų dviejų ašių kirtimosi taške. Atitinkamai skraidančio aparato stabilumas yra nusakomas šių ašių atžvilgiu:

- ❖ Išilginis stabilumas skersinės ašies atžvilgiu nusako skraidančio aparato reakciją į atakos kampo (polinkio) pokyčius;
- ❖ Skersinis stabilumas išilginės ašies atžvilgiu – tai posvyrio stabilumas;
- ❖ Krypties stabilumas vertikaliosios ašies atžvilgiu parodo aparato atsaką į pasikeitusį pokrypį (Sheehy).

3.2.1. Išilginis stabilumas

Stabilų sparną skersinės ašies atžvilgiu apibūdina pagrindinės taisyklės:

- ❖ Kai atakos kampas yra teisingas, momentų suma svorio centro atžvilgiu yra lygi nuliui;
- ❖ Kai atakos kampas per mažas, turi atsirasti teigiamas momentas svorio centro atžvilgiu, didinantis atakos kampą;
- ❖ Kai atakos kampas per didelis, sparnas turi sudaryti neigiamą momentą svorio centro atžvilgiu ir sumažinti polinkio kampą (Sheehy).

Pagrindiniai veiksniai nulemiantys polinkio stabilumą yra šie: švytuoklės efektas, sparno strėliškumas ir susukimas, antipikiraciniai trosai kartu su sparno galais bei profilio forma.

Orlaivių, kurie turi uodegą, keliamoji jėga veikia taške esančiame tarp svorio centro ir neutralaus taško. Tai reiškia, kad keliamosios jėgos, pridėtos tame taške, kuriamas momentas veiks kryptimi, mažinančia atakos kampą. Tam, kad lėktuvas būtų pusiausvyras skersinės ašies atžvilgiu horizontalus stabilizatorius turi kompensuoti šią jėgą, spausdamas lėktuvo uodegą

žemyn (žr. 5 priedą). Skraidyklės sparno keliamoji jėga veikia taške, esančiame prieš svorio centrą, tad jos sukuriamas momentas didina atakos kampą. Norint jį kompensuoti, sparno galai turi taip pat generuoti keliamąją jėgą nukreiptą aukštyn, priešingai nei lėktuvo horizontalus stabilizatorius (Pagen).

3.2.1.1. Švytuoklės efektas

Sistemos pilotas – skraidyklė svorio centras yra žemiau sparno, linijoje einančioje per piloto pakabinimo diržus ir tvirtinimo prie skraidyklės kilio tašką. Taip yra todėl, kad pilotas yra sunkiausia visos sistemos dalis ir jis kabo žemiausioje vietoje. Sistema turi tokias savybes:

1. Didesnis stabilumas esant dideliems atakos kampams;
2. Didesnis neigiamas sukimo momentas dėl pasipriešinimo;
3. Mažesnis stabilumas esant mažiems atakos kampams (Sheehy).

Nagrinėjant švytuoklės efektą, jis yra svarbus polinkio stabilumo užtikrinimui, tačiau beveik neturi įtakos posvyrio stabilumo kontrolei. Patekus į stiprų termiką, sparnas turi tendenciją kelti nosį, tačiau svorio centras dėl to, kad yra žemiau sparno, pasislenka į priekį reliatyviai slėgio centro, o tai ir sukuria švytuoklės efektą, slopinantį judėjimą (žr. 6 priedą). Padidėjus atakos kampui, didesnė sparno dalis yra pastatoma prieš srautą, tad generuojamas papildomas pasipriešinimas, veikiantis polinkio kampo didinimo kryptimi. Dažniausiai švytuoklės efektas kompensuoja padidėjusio pasipriešinimo momentą, iki tol, kol sparno greitis yra pakankamai didelis (polinkio momentas kinta priklausomai nuo atakos kampo kvadrato). Jam artėjant prie smukos, atakos kampas gali būti staigiai padidintas, nes pasipriešinimo jėga pridedama aukščiau svorio centro. Tai labai pavojinga ir nestabili situacija (Pagen).

Mike Meier straipsnyje „Pitch stability and center of mass location” nagrinėjama piloto padėties svarba skrydžio metu viso aparato stabilumo savybėms. Apibendrinus straipsnį padaroma išvada, kad kuo labiau pilotas pasistūmęs į priekį nuo vairavimo atramos, tuo labiau priekinė skraidyklės centruotė, tuo sparnas stabilesnis (žr. 7 Priedas). Ir priešingai, kai pilotas atsistūmęs atgal nuo vairavimo trapecijos, centruotė yra galinė ir polinkio momentas veikia priešingai nei turėtų – padidėjus atakos kampui ir toliau jį didina, sumažėjus α , verčia dar labiau jį mažinti (žr. 8 Priedas) (Meier).

3.2.1.2. Strėliškumas ir susukimas

Dėl šių dviejų veiksnių sparnų galai yra už svorio centro, o tai užtikrina statinį sparno stabilumą – jis yra linkęs išlaikyti tam tikrą subalansuotą skrydžio greitį. Pilotui pasislinkus į priekį, didesnė dalis keliamosios jėgos yra sukurama vidine sparno dalimi arti svorio centro, todėl atsiranda momentas didinantis atakos kampą ir grąžinantis sparną į pradinę padėtį. Pilotui atsistūmus nuo valdymo trapecijos atgal, sparno galai generuoja daugiau keliamosios jėgos ir dėl

to momentas yra priešingas – atakos kampo mažinimo kryptimi. Subalansuotas skrydžio greitis gali būti keičiamas nedidelėse ribose perslenkant svorio centro padėtį (Pagen).

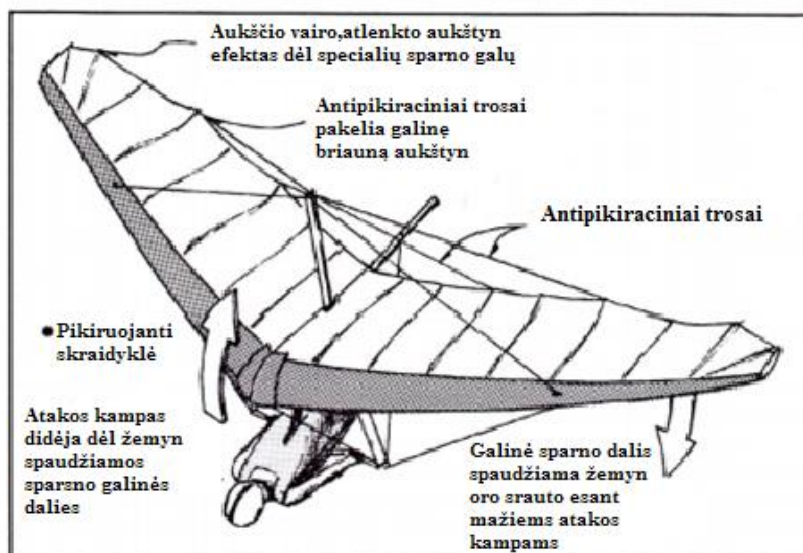
Pirminė sparno susukimo įtaka pasireiškia sparno polinkio momentui. Esant net mažiausiam sparno susukimui, polinkio momentas padidėja prie mažų atakos kampų. Sparno galų susukimas padidina išilginį stabilumą, pavėlina smuką, padidina pasipriešinimą ir sumažina $C_{L_{max}}$. Atlikus NASA bandymus aerodinaminiam tunelyje su dviem modeliais, paaiškėjo strėliškumo įtaka išilginiam ir skersiniam stabilumui. Pagrindinis skirtumas – koku būdu gaunamas didelis C_m esant nuliniam atakos kampui. Didelio strėliškumo sparnams jį suteikia susukimo generuojamas polinkio momentas, o mažo strėliškumo sparnai turi turėti didelį atvirkštinį galinės profilio dalies gaubtumą esant mažiems atakos kampams (Kroo).

Didesnio strėliškumo sparnai pasižymi geresniu krypties stabilumu, geometrinis sparno susukimas strėliškumo neigiamiems poveikiams kompensuoti kartu naudojamas smukos pavėlinimui iki didesnių atakos kampų ir geresniam keliamosios jėgos pasiskirstymui išilgai sparno. Eksperimentų rezultatai parodė didesnes C_{l_β} ir C_{n_β} reikšmes labiau strėliškiems sparnams. Jų aerodinaminė kokybė L/D taip pat buvo geresnė (dėl didesnio pasipriešinimo, kurį generuoja nestrėliški didelio atvirkštinio gaubtumo profilių sparnai) (Kroo).

3.2.1.3. Antipikiraciniai trosai ir sparno galai

Dinaminis stabilumas pasireiškia greitai keičiant atakos kampą skrydžio metu. Staigiai pakitus pusiausvyros padėties atakos kampui, skraidyklės sparno reakcija į šį pokytį apibūdinama dinaminio stabilumu. Dalinis dinaminis stabilumas yra gaunamas kuriant statinį stabilumą (dėl sparno susukimo, strėliškumo, stabilaus aerodinaminio profilio), tačiau antipikiraciniai trosai (angl. *reflex bridles, luff lines*) ir specialūs sparno galai padaro sparną dinamiškai stabiliu (Pagen).

Trosai jungia bokštelį su viena ar keliomis poromis lačių (nerviūrų) ties galine sparno briauna. Įprasto skrydžio metu galinė briauna yra aukščiau sparno plokštumos, tad trosai būna laisvi. Atakos kampui labai sumažėjus, galinės briaunos plokštuma juda žemyn, trosai įtempiami ir saugo nuo tolimesnio poslinkio žemyn. Kadangi latės paprastai turi tam tikrą lankstumą, keičiasi profilis, įgyja aiškiai atvirkštinį gaubtumą galinėje sparno dalyje, o tai sukuria stiprų stabilizuojantį momentą atakos kampo didinimo kryptimi. Taigi jų pagrindinė paskirtis išvesti sparną iš pikiravimo ir apsaugoti nuo persivertimo per priekį galimybės. Trosų ilgis nustato atakos kampą, kuriam esant pasireišk šis efektas. Standartiškai antipikiraciniai trosai turėtų generuoti polinkio momentą nuo +0,1 iki +0,2 (Kroo).



11 pav. Išėjimas iš pikiravimo (Pagen)

Tai pasyvi sistema, turinti suveikti susidarius neįprastoms skrydžio sąlygoms. Pilotai gali skraidyti daugybę valandų, skirtingomis oro sąlygomis ir niekada nepatirti, kaip veikia antipikiraciniai trosai, tačiau jei sistema yra išsiderinusi ir reguliariai netikrinta, polinkio stabilumo lygis tam tikruose atakos kampo ir skrydžio greičio kombinacijose gali būti daug žemesnis nei sparno projektavime numatyta. 1997-taisias *Wills Wing* gamykla atliko bandymą su sparnu *HPAT 158*, kurio suminė skrida buvo beveik 400 valandų. Antipikiraciniai trosai niekada nebuvo koreguoti. Po tyrimo paaiškėjo, kad esant atlaisvintai skersinei atramai, sparnas turėjo teigiamą polinkio momentą nors polinkio momento kreivė ne visur atitiko HGMA reikalavimus, tačiau įtempus skersinę atramą, skraidyklės sparnas turėjo neigiamą polinkio momentą, ties atakos kampais prie kurių keliamoji jėga lygi nuliui (Meier).

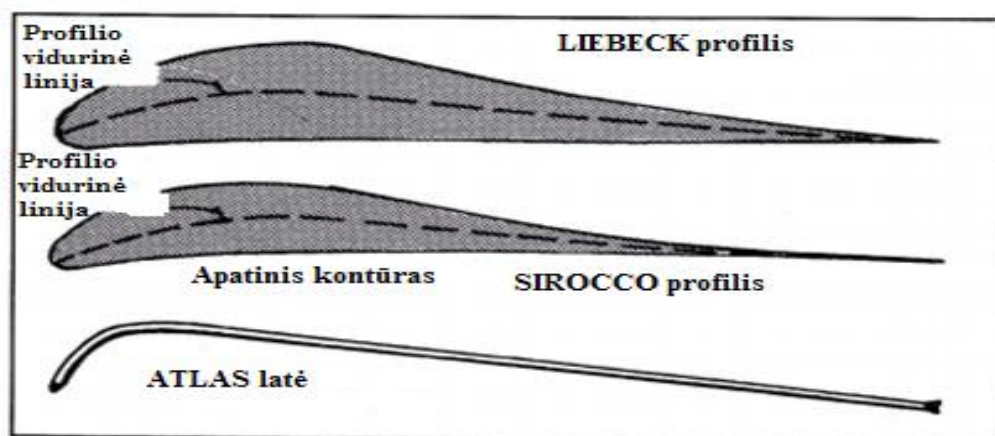
Mano nagrinėjamas sparnas priskiriamas sportinių sparnų kategorijai ir jo konstrukcijoje antipikiraciniai trosai panaikinti. Straipsnyje „The story of the design and development of the Fusion“ Steve Pearson aptaria, pagrindines problemas su kuriomis susidūrė projektuotojai norėdami panaikinti papildomą pasipriešinimo šaltinį – buvo reikalinga sukurti naują stabilumo sistemą (Pearson).

3.2.1.4. Aerodinaminio profilio forma

Profilis arba lačių forma yra vienas svarbiausių veiksnių išilginiam stabilumui užtikrinti. Skraidyklių projektavime naudojami itin stabilūs profiliai (storiausia profilio vieta visada arti priekinės briaunos, profilio uodegėlė tiesi arba išlenkta į viršų).

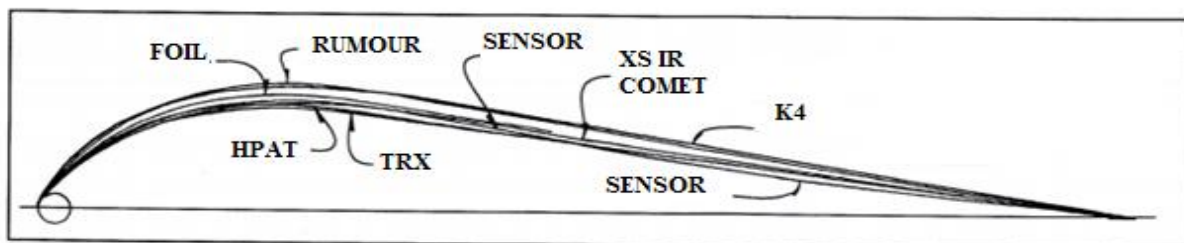
Pirmieji profiliuoti skraidyklių sparnai atsirado apie 1975-uosius (*Sirocco*, *Seedwing Sensor 210*). Profilis buvo patobulinta Liebeck (profilis sukurtas gauti didelę keliamąją jėgą esant mažiems skrydžio greičiams ir išlaikant reikiamą stabilumą) versija, vėliau jis buvo parduotas gamykloms (*Wills Wing*, *Ultralite Products*) ir tapo standartu iki 1980-ųjų pabaigos.

1979-aisiais Jean-Michel Bernasconi sukūrė profilį, kuris buvo naudotas Atlas ir Moyes Mega sparnų gamybai (Pagen).



12 pav. Skraidyklių profilio kilmė (Pagen)

Paveiksle matomas staigus profilio kreivumas pradžioje ir tiesi likusi dalis. Tokia forma sumažino žemėjimo spartą, tačiau buvo neefektyvi esant dideliems greičiams. Tobulinant šiuolaikinius sparnus, kompiuterinėmis programomis yra sukurta daug profilių, tipiniai aukštos kokybės sparnai turi tokį pjūvį, kaip parodyta paveiksle (Pagen).



13 pav. Skraidyklių profilių pavyzdžiai (Pagen)

Skraidyklių, kaip ir visų skraidančių aparatų, profilis yra kuriamas atsižvelgiant į pagrindinius reikalavimus: atakos kampų ir skrydžio greičių diapazonus, stabilumo reikalavimus ir norimą keliamosios jėgos generavimą.

Pagrindiniai skraidyklės profilio parametrai, kuriuos keičiant gaunamos norimos skrydžio charakteristikos yra:

1. Gaubtumas;

Didesnis profilio gaubtumas praplečia atakos kampų diapazoną, kuriame sparnas gali efektyviai skristi, tačiau padidina pasipriešinimą. Smailesni profiliai turi mažesnį pasipriešinimą, tačiau atakos kampai gali kisti mažose ribose.

2. Noslės kreivumas;

Skraidyklių priekinės briaunos spindulys yra apie 3 % stygos ilgio.

3. Maksimalus storis;

Skraidyklių sparnų profilio storis yra 11 % – 13 % stygos ilgio. Perstumiant storiausią profilio vietą tolyn nuo noselės, pasipriešinimas yra sumažinamas, tačiau kartu sumažėja ir profilio stabilumas. Dėl to, naudojami profiliai, kurių storiausia vieta yra santykinai arti noselės – apie 20 % (palyginimui sklandytuvų apie 35 %).

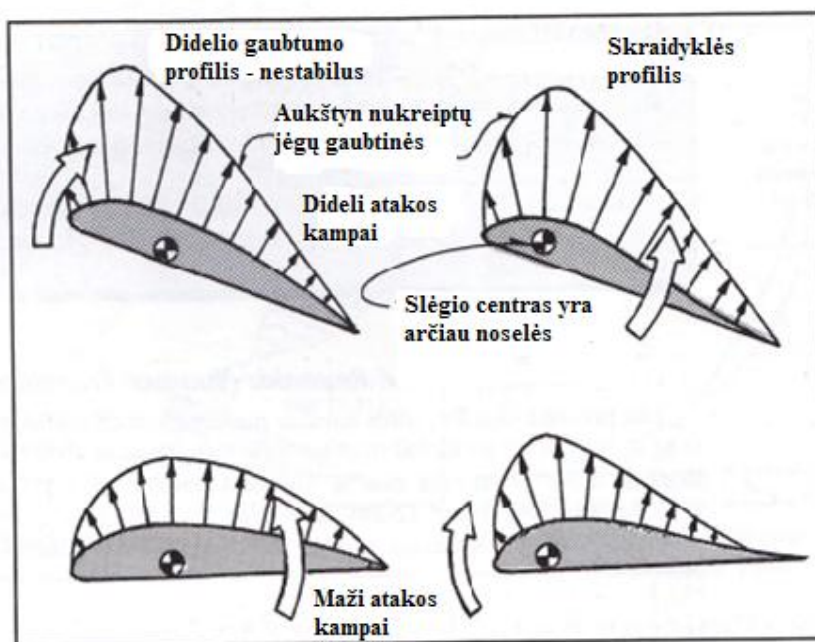
4. Dvisluoksnė profilio dalis (procentais);

Kuo didesnė profilio dalis yra dvisluoksnė, tuo mažesnis pasipriešinimas skrydžio metu, tačiau kartu sumažinamas profilio gaubtumas ir maksimali keliamoji jėga.

5. Oro srauto sulėtėjimo zona.

Oro srauto sulėtėjimo zona yra dalis nuo storiausios profilio vietos iki uodegėlės. Joje pagreitintas oras turi sulėtėti iki laisvo srauto greičio. Paprastai ši dalis turi mažą kreivumą siekiant išvengti srauto atitrūkimo (Pagen).

Paveiksle pavaizduotos stabilaus ir nestabilaus profilių reakcijos į atakos kampo pasikeitimą.



14 pav. Stabilus ir nestabilus profiliai (Pagen)

Kairėje pusėje esantis didelio gaubtumo profilis yra nestabilus, nes atakos kampui padidėjus, aerodinaminių jėgų atstojamoji yra pridėta taške prieš svorio centrą, ir veiks kryptimi toliau didinančia atakos kampa. Priešingu atveju, keliamoji jėga toliau mažins atakos kampa, nes bus pridėta taške už svorio centro. Dešinėje paveikslo pusėje pavaizduotas stabilus profilis, kuris reaguos priešingai į atakos kampo pokyčius: jam padidėjus, aerodinaminių jėgų atstojamoji bus pridėta už svorio centro ir kurs momentą atakos kampo mažinimo kryptimi, sumažėjus atakos kampui – atvirkščiai (Pagen).

3.2.2. Skersinis stabilumas

Posvyris apibūdina judėjimą išilginės ašies atžvilgiu, valdant skraidyklės sparną šis judėjimas vykdomas piloto svorio poslinkiu į kairę ir į dešinę, panašiai kaip orlaiviuose, turinčiuose aerodinaminius vairus, naudojami eleronai. Į kurią pusę pilotas pastumia svorio centrą, tos dalies sparno apkrova padidėja, kartu padidėja sparno susukimas dėl lanksčios geometrijos. Jei svyrama į dešinę, šioje pusėje padidėjęs neigiamas sparno susukimas sumažina keliamąją jėgą, o priešingoje pusėje sumažėjęs sparno susukimas lemia keliamosios jėgos prieaugį. Šių deformacijų įtakoje, kaip ir veikiant eleronams (svyrant į dešinę, šio sparno eleronas atlenkiamas aukštyn, taip sumažinant keliamąją jėgą) dešinysis sparnas leidžiasi žemyn, kairysis kyla aukštyn, skraidyklė pasvyra, atliekamas manevras (FAA).

Orlaivis, kurio sparnai skrydžio metu yra išvedami iš horizontalios padėties (vienas pakyla aukščiau, kitas nusileidžia žemiau), ir turi tendenciją grįžti į pradinę padėtį, yra stabilus išilginės ašies atžvilgiu (posvyrio stabilumas). Sparnas neturi būti per daug stabilus, nes tai apsunkins piloto kontroliuojamą manevravimą. Pagrindinės sparnų konstrukcinės ypatybės didinančios skersinį stabilumą yra sparno strėliškumas ir teigiamas skersinio „V“ kampas. Susukimo įtaka skersiniam stabilumui nėra tiksliai aiški, tačiau bandymai parodė, kad dėl jo sumažėja efektyvusis skersinio „V“ kampas (Sheehy).

Esant teigiamam skersinio „V“ kampui, kai vienas sparnas yra žemiau už kitą, prasideda slydimas į žemesniojo sparno pusę. Oras apteka sparnus ne vienodai, kampu iš tos pusės, į kurią slystama. Dėl to žemyn einantis sparnas turi didesnę atakos kampą ir generuoja didesnę keliamąją jėgą, kai aukštyn einantis priešingai – dėl sumažėjusio atakos kampo praranda keliamąją jėgą. Dėl atsiradusio momento išilginės ašies atžvilgiu, sparnai grįžta į horizontalią padėtį. Neigiamas skersinio „V“ kampas veikia priešingai, mažina skersinį stabilumą (Sheehy).

Teigiamas strėliškumas veikia panašiai kaip ir teigiamas skersinio „V“ kampas. Dėl atsiradusio posvyrio susidaro slydimas į žemyn einančio sparno pusę. Dėl strėliškumo žemesnįjį sparną oro srautas apteka beveik stačiu kampu, kai aukštesnysis sparnas aptekamas įstrižai, tad jo reliatyvus greitis oro atžvilgiu yra mažesnis. Kadangi keliamoji jėga tiesiogiai proporcinga greičio kvadratui, didesnę greitį turintis sparnas (esantis žemiau) generuoja didesnę keliamąją jėgą, dėl kurios susidaręs momentas išlygina sparnus.

Neigiamo strėliškumo sparnas turėtų destabilizuojančias savybes. Skraidyklių sparnai turi teigiamą strėliškumo kampą, dėl ko jiems būdingas skersinis stabilumas. Norint padaryti juos ne per daug stabilus, piloto fizinių jėgų, reikalingų atlikti manevrą sumažinimui, naudojama kombinacija tarp neigiamo ir teigiamo skersinio „V“ kampo išilgai sparno (Sheehy).

3.2.3. Krypties stabilumas

WSC sparnai yra projektuojami skrydžiui lygiagrečiai laisvajam srautui, nes neturi krypties vairų, kuriais būtų galima kontroliuoti sparno judėjimą apie vertikalią ašį (FAA). Sparnas yra stabilus vertikalios ašies atžvilgiu, jei yra linkęs sukti orlaivio nosį kryptimi kuria jis skrenda. Vertikaliosios plokštumos ir sparno strėliškumas padeda užtikrinti krypties stabilumą. Lėktuvai dažniausiai turi vertikalų stabilizatorių – kilį, kuris esant pokrypiui generuoja keliamąją jėgą nukreiptą į tą pačią pusę į kurią slystama, dėl santykinai didelio atstumo nuo svorio centro sukuriamas momentas pasukantis lėktuvo nosį tiesiai į oro srautą. Skraidyklių sparnai retai turi vertikalius stabilizatorius (dažniausiai motorizuotos), nedidelį krypties stabilumą prideda kilio (skraidyklių sporte taip vadinama ne vertikali plokštuma, o horizontalus vamzdis, einantis per sparno simetrijos ašį) laikikliai esantys po sparnu, tačiau jie yra labai arti svorio centro ir nesukuria efektyvaus sukimo momento. Dalinę vertikalaus stabilizatoriaus paskirtį gali atlikti vertikalūs sparnų galiukai, kurie yra pakankamai toli už svorio centro (Sheehy).

Didžioji dalis stabilumo vertikalios ašies atžvilgiu yra sukurama sparno teigiamo strėliškumo pagalba. Sparnui slystant, į srautą nukreipto sparno mostas reliatyviai yra didesnis nei kito. Šis sparnas generuoja daugiau pasipriešinimo, dėl kurio ir atsiranda sukimo momentas vertikalios ašies atžvilgiu. Sparnai turintys neigiamą strėliškumą, yra nestabilūs krypties atžvilgiu, jei kiti veiksniai (pvz.: vertikalus stabilizatorius) neatlieka šios funkcijos (Sheehy).

4. Tyrimas

Skraidančių sparnų atveju nėra vertikalios ir horizontalios stabilizatorių, kurie užtikrina sparno stabilumą visų trijų ašių atžvilgiu. Pagrindinis sparnas turi būti pakankamai stabilus, tai užtikrinama naudojant itin stabilus profilius bei pritaikant neigiamą sparno galų susukimą. Tyrimas atliekamas su programa XFRL5, jame negali būti įvertinamos sparno deformacijos skrydžio metu, profilio pasikeitimai, todėl gauti rezultatai parodo bendrąsias stabilumo savybes, būdingas šiuolaikinių skraidyklių sparnams, tačiau jie gali būti pritaikomi tik tam tikro vieno skrydžio režimo metu.

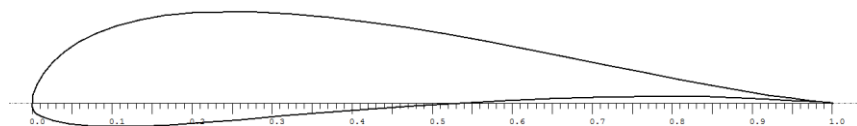
4.1. Sparno projektavimas XFLR5

Savaime stabilūs profiliai suteikia tinkamas stabilumo charakteristikas visam sparnui be stabilizatoriaus pagalbos. Vienas iš reikalavimų stabiliam profilui yra neutralaus taško (angl. *neutral point*) vieta ties 25 % sparno stygos. CG turi būti išdėstytas prieš NP (Deperrois).

Tiriamajam sparnui T2C 154 pritaikytas MH 84 profilis, specialiai sukurtas beuodegių skraidančių sparnų (taip pat skraidyklių) modeliams. Jį pasirenkant atsižvelgta į pagrindinius svarbius profilio parametrus (2 lentelė), kurie atitinka originalius sparno lačių brėžinius (Group).

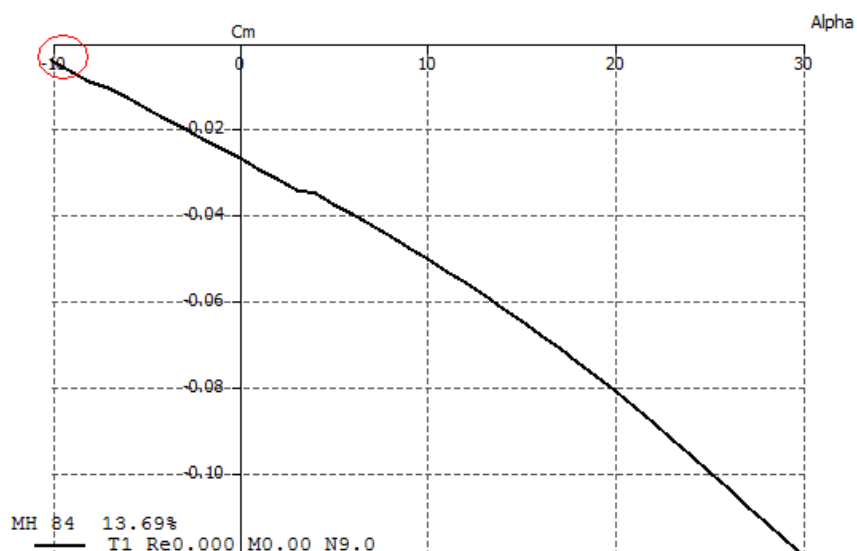
2 lentelė. MH 84 profilio parametrai

Profilio parametras	Dydis išreikštas procentais stygos ilgio
Profilio storis, T	13,72 %
Santykinė maksimalaus storio vieta, x_t	20,10 %
Maksimalus gaubtumas, F	4,75 %
Santykinė maksimalaus gaubtumo vieta, x_f	32,50 %



15 pav. Profilis MH 84 XFLR5 programoje

Išnagrinėjus stačiakampį sparną su MH 84 profilu be susukimo, paaiškėjo, kad jis generuoja neigiamą keliamąją jėgą prie nulinio polinkio momento koeficiento, t.y. pusiausvyros padėtyje. Toks sparnas negali skristi.



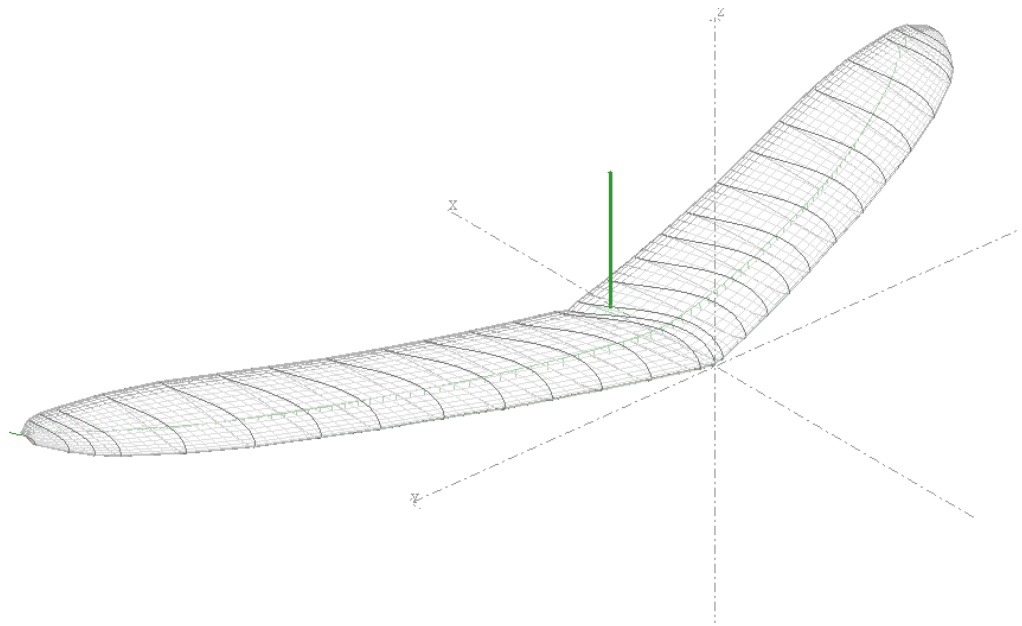
16 pav. Polinkio momento kitimas priklausomai nuo atakos kampo

Kitas būdas spręsti stabilumo problemą – pritaikyti neigiamą sparno galų susukimą, o tai yra būdinga skraidyklių sparnams. Projektuojamam modeliui pritaikytas -14° sparno galų susukimas, prie kurio pusiausvyros padėtyje C_l tampa nežymiai teigiamas. Suprojektuoto modelio parametrai pateikti lentelėje.

3 lentelė. Sparno WW T2C 154 parametrai

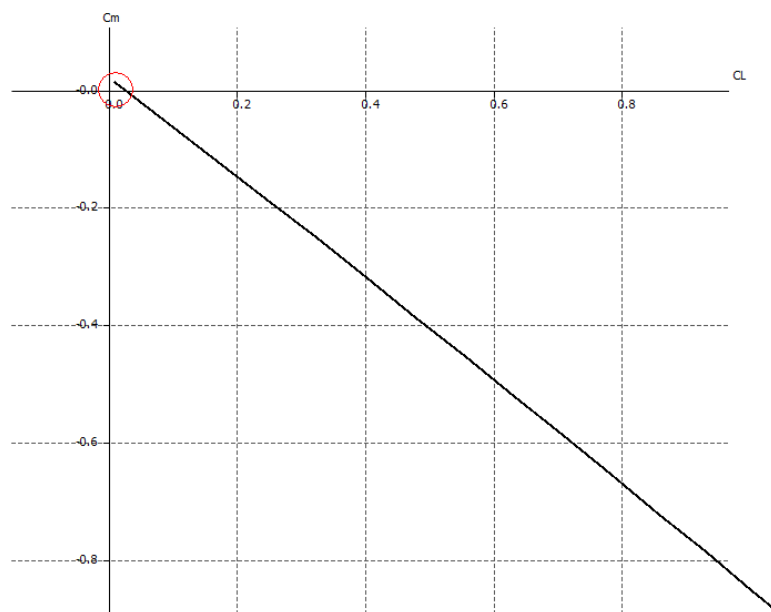
Eil. Nr.	Sparno parametras	Dydis
1.	Sparno plotas, m^2	14,3
2.	Sparno mostas, m	10,2
3.	Proilgis	7,3
4.	Sparno masė, kg	33
5.	Piloto prisikabinimo masė, kg	107
6.	Strėliškumo kampas, $^\circ$	25
7.	Skrydžio greitis, m/s	14
8.	Skersinio „V“ kampas, $^\circ$	6
9.	Susukimas, $^\circ$	-14

Trimatis skraidyklės sparno modelis XFLR5 pateiktas paveiksle.



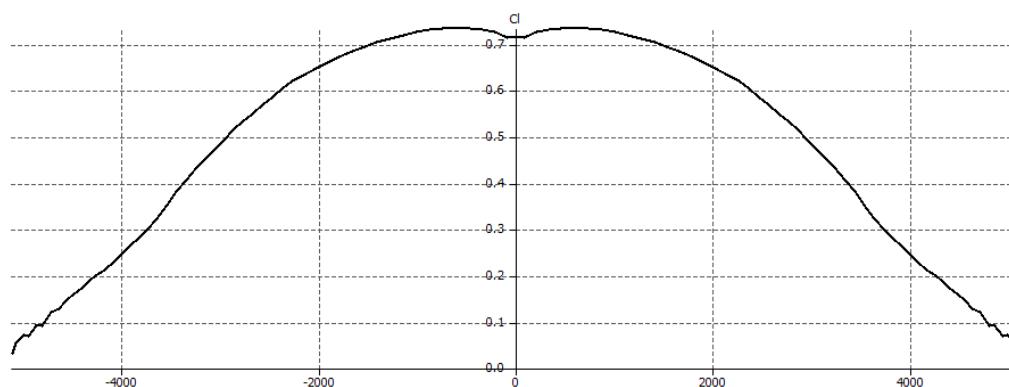
17 pav. WW T2C 154 3D modelis XFLR5

Pritaikius susukimą sparnui, keliamoji jėga tampa nežymiai teigiama sparnui esant pusiausvyros padėtyje. Toks sparnas gali skristi.



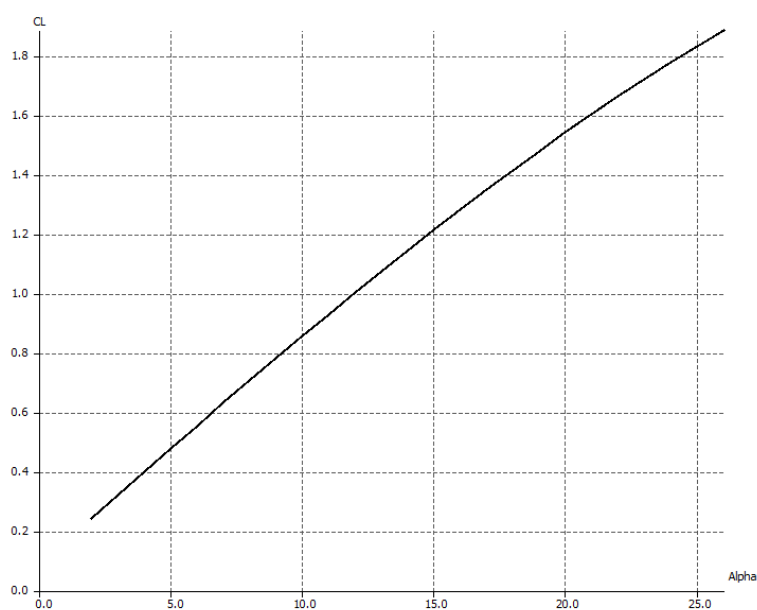
18 pav. C_m momento kitimas priklausomai nuo atakos kampo

Dėl sparno susukimo pagerėja ir C_l pasiskirstymas išilgai sparno.



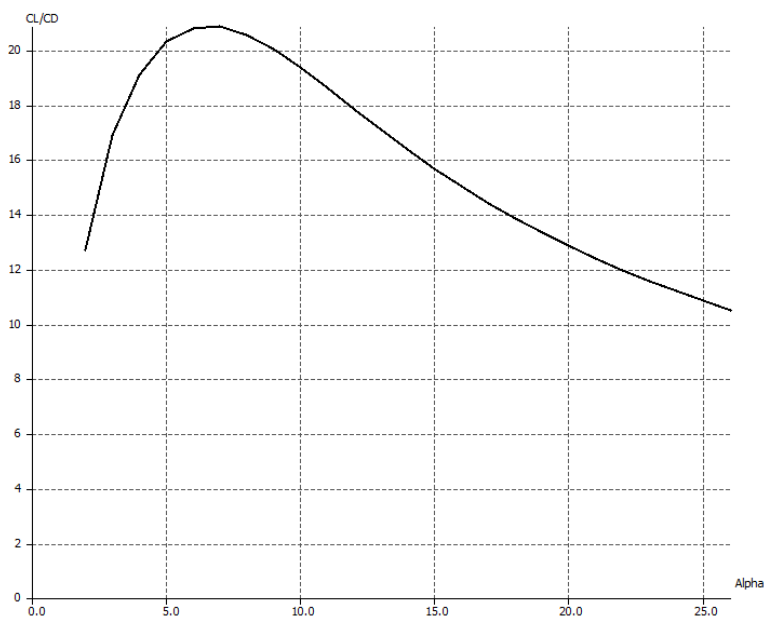
19 pav. C_l pasiskirstymas išilgai sparno, kai $\alpha=6^\circ$

Didžioji keliamosios jėgos dalis generuojama centrinės sparno dalies, kaip aprašyta ankstesniuose skyriuose, susukimas apsaugo strėlinių sparnų galus nuo smukos iki didesnių atakos kampų, dėl kurios visas sparnas taptų nevaldomas. Bendrosios suprojektuoto T2C 154 modelio charakteristikos matomos sekančiose kreivėse.



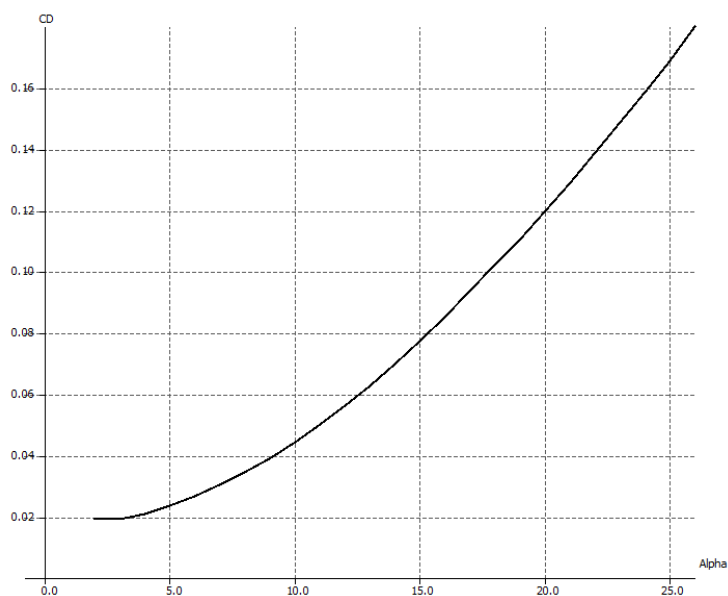
20 pav. Keliamosios jėgos kitimas priklausomai nuo atakos kampo

Tiriamoji sparno keliamoji jėga didėja proporcingai atakos kampui, šių dviejų parametų priklausomybė nagrinėtame atakos kampų diapazone kinta tiesiškai.



21 pav. C_l/C_d prie skirtingų atakos kampų

Aerodinaminę kokybę rodanti kreivė $C_l/C_d(\alpha)$ kyla iki 6° - 7° atakos kampo, tuomet pradeda leistis žemyn. Pagal gautus skaičiavimų duomenis, kai $\alpha=6^\circ$, sparno keliamosios jėgos ir pasipriešinimo santykis pasiekia maksimalią reikšmę 21. Reali aparato aerodinaminė kokybė yra 15-17, tad gauti rezultatai yra pakankamai tikslūs, nes neįvertinamas piloto bei kitų konstrukcinių sparno dalių pasipriešinimas.



22 pav. C_d esant skirtingiems α

Pasipriešinimo koeficiento kreivė rodo, kad iki maksimalios kokybės atakos kampo ($\alpha=6^\circ$) pasipriešinimas auga nežymiai, kreivės statumas ypač padidėja viršijus $\alpha=15^\circ$.

4.2. Sparno stabilumas

Orlaivio pusiausvyros padėtis apibūdinama pastoviu skrydžio greičiu, atakos kampu, posvyrio kampu, padėtimi ir kt. Tai labiau teorinis skrydžio režimas, nes pilotui valdant skraidantį aparatą ar net ir nedidelių oro gūsių įtakoje panaikinama ši pusiausvyra. Stabilumo ir pavaldumo savybių tyrimo tikslas yra įvertinti dinaminį aparato stabilumą laiko atskaitoje. Kiekvienas orlaivis, išvestas iš pusiausvyros padėties, reaguoja jam būdingais skrydžio režimais. Matematiškai jie apibūdinami kaip natūralūs skrydžio režimai. Natūralūs orlaivio skrydžio režimai po jų paveikusių trukdžių apibūdinami:

1. Tikriniu vektoriumi (angl. *eigenvector*), kuris nurodo režimo tipą – skrydžio kintamųjų amplitudę ir fazę. XFLR5 tikriniai vektoriai analizuojami vizualiai pagal 3D modelį;
2. Tikrine verte (angl. *eigenvalue*), kuri apima svyravimų dažnį ir jų slopinimo ypatybes. XFLR5 pateikia šią informaciją dviem būdais – laiko atskaitoje ir vizualiniais taškais, žyminčiais režimo dažnį ir slopinimą.

Natūralūs režimai būna:

- ❖ Mechaniniai – kaip pavyzdys pateikiamas slopstantis šakutės vibravimas, tai dinamiškai stabilus režimas;
- ❖ Aerodinaminiai – pvz., Fugoidinis ilgo periodo slopstantis svyravimas, po kurio lėktuvas grįžta į pradinę skrydžio padėtį.

Aprašyti režimai skirstomi į svyruojamuosius (Fugoidinis, trumpo periodo, Olandiško žingsnio), kurie apibūdinami tikriniu vektoriumi (angl. *eigenvector*), natūraliu svyravimų dažniu ir slopinimo veiksniumi. Nesvyruojamieji režimai (posvyrio slopinimas, spiralinis) apibūnami tik tikriniu vektoriumi ir slopinimo veiksniumi. Tikrinis vektorius suteikia informaciją apie skrydžio kintamųjų amplitudę ir fazę. Programa XFLR5 tikrinis vektorius analizuojamas vizualiai nagrinėjant orlaivį trimatėje erdvėje. Skrydžio metu bet koks nukrypimas dėl piloto įtakos ar vėjo gūsių sužadina visus skrydžio režimus skirtingomis proporcijomis:

- ❖ Atsakas į trumpo periodo ir posvyrio slopinimo režimus, kurie yra gerai slopinami, greitai išnyksta;
- ❖ Atsakas į Fugoidinį ir Olandiško žingsnio režimą yra akivaizdžiai matomas;

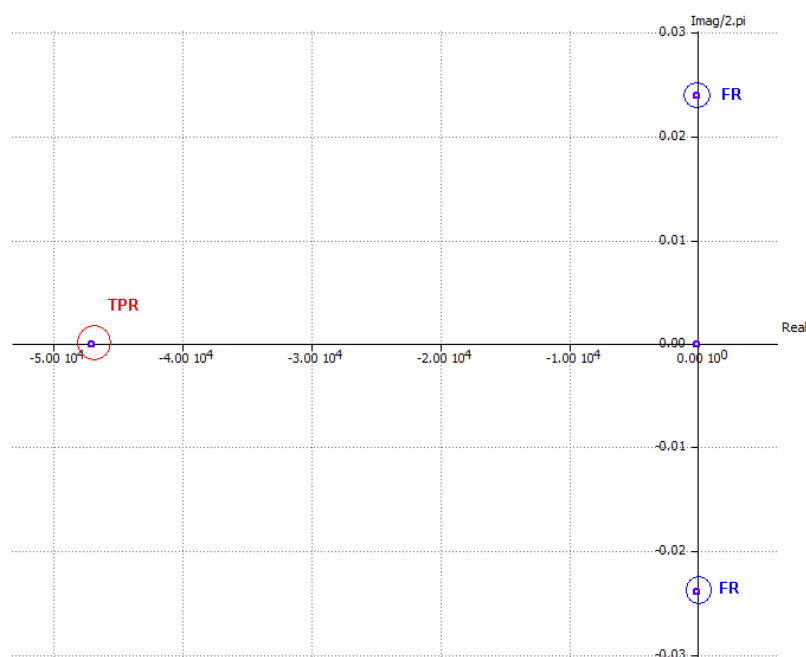
❖ Atsakas į spiralinį režimą yra lėtas ir nedidelis savo dydžiu lyginant su kitais skrydžio veiksniais, dėl to dažniausiai nepastebimas ir nesąmoningai pakoreguojamas paties piloto.

Programa XFLR5 nagrinėjami aštuoni aerodinaminiai režimai. Gerai suprojektuotas sparnas turi keturis išilginius ir keturis skersinius natūralius svyravimų režimus.

4.2.1. Išilginio svyravimo režimai

Išilginiai svyravimų režimai:

1. Du simetriniai Fugoidiniai režimai;
2. Du simetriniai trumpo periodo režimai.



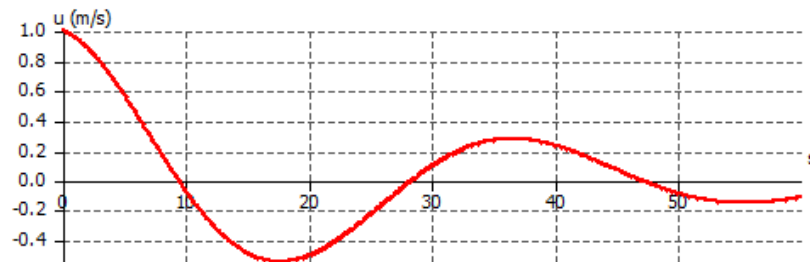
23 pav. Išilginių natūralių svyravimų režimai

Fugoidinis svyravimas – tai makroskopinis režimas, kai vyksta mainai tarp kinetinės ir potencinės energijų. Tai paprastai lėti svyravimai, silpnai slopinami, gali būti stabilūs ir nestabilūs. Tiriamojo sparno Fugoidiniai režimai (FR) nedidelio dažnio – kuo režimas labiau nutolęs nuo horizontalios ašies, tuo didesnis jo svyravimų dažnis. Svyravimas yra neutralaus stabilumo – tai rodo režimo atidėjimas ant vertikalios ašies.

Trumpo periodo svyravimas – vertikalus judėjimas vyksta tokia pačia faze kaip ir polinkio svyravimai, aukšto dažnio gerai slopinami virpesiai. Pirminis veiksnys, nulemiantis režimo slopinimą, yra neigiamas kreivės $C_m(\alpha)$ polinkis. Skraidyklės sparno trumpo periodo svyravimai (TPR) atidėti ant horizontaliosios ašies, tai rodo stiprų slopinimą – kuo toliau į neigiamą pusę

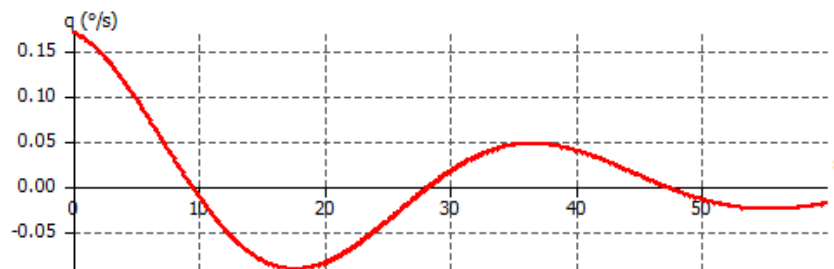
atidėtas režimas, tuo didesnis jo slopinimas. Trumpo periodo svyravimai nuslopunami labai staigiai, todėl, jų dažnis beveik nulinis.

Laiko atskaitoje vaizduojamas sparno virpesių slopinimas įvairių ašių atžvilgiu.



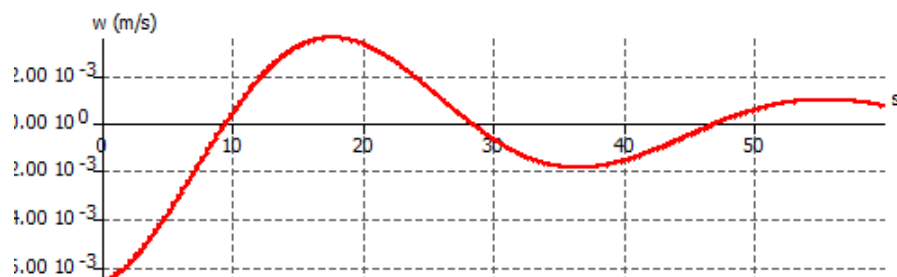
24 pav. Skrydžio greičio kitimas laike

Funkcija $u(t)$ rodo skrydžio greičio išilgai skrydžio ašies x svyravimus, šiuo atveju jie yra tolygiai slopstantys.



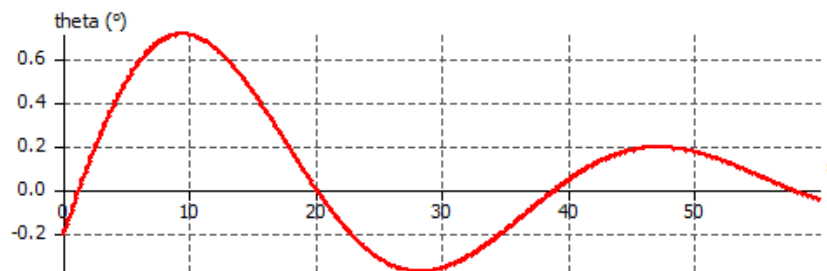
25 pav. Polinkio kampo kitimas laike

Funkcija $q(t)$ yra polinkio kitimo sparta, šie mažos amplitudės svyravimai greitai nuslopunami.



26 pav. Vertikalaus greičio kitimas laike

Greičio kitimo išilgai vertikalios ašies z funkcija $w(t)$ taip pat vaizduoja efektyvų virpesių slopinimą.



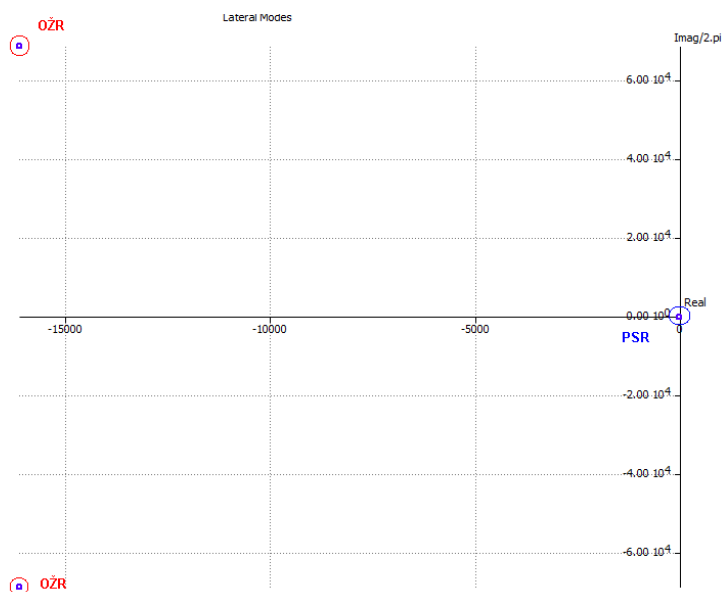
27 pav. Polinkio kampo kitimas laike

$\theta(t)$ – tai polinkio kampas tarp stabilumo ašies x ir horizontalios skrydžio linijos. Svyravimai slopstantys.

4.2.2. Skersinių svyravimų režimai

Skersiniai svyravimų režimai:

1. Vienas spiralinis režimas;
2. Vienas posvyrio slopinimo režimas;
3. Du Olandiško žingsnio režimai.



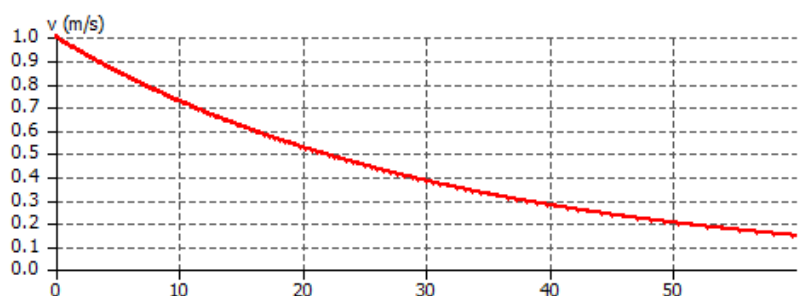
28 pav. Skersiniai natūralių svyravimų režimai

Spiralinis režimas – tai kurso nuokrypa, nesvyruojantis, lėtas, dažniausiai nestabilus režimas, reikalingas piloto įsikišimas norint išvengti nukrypimo didėjimo. Skraidyklėms nebūdingas, nes susijęs su vertikaliąja plokštuma – orlaivio kiliu. Kai pradinė kurso ar posvyrio nuokrypa suteikia kiliui teigiamą atakos kampą, atsiradusi keliamoji jėga ir sukimo momentas didina nuokrypą nuo kurso.

Posvyrio slopinimas – susijęs su orlaivio posvyriu, tai stabilus režimas. Prasidėjus posvyriui, žemyn einantis sparnas įgyja reliatyviai didesnę atakos kampą, padidėja jo generuojama keliamoji jėga, atsiranda atstatomasis momentas išilginės ašies atžvilgiu. Sparno T2C 154 modelio posvyrio slopinimo režimas (PSR) yra neutralus ir nesvyruojamasis, tai reiškia, kad pilotai turi patys taisyti atsiradusį posvyrį.

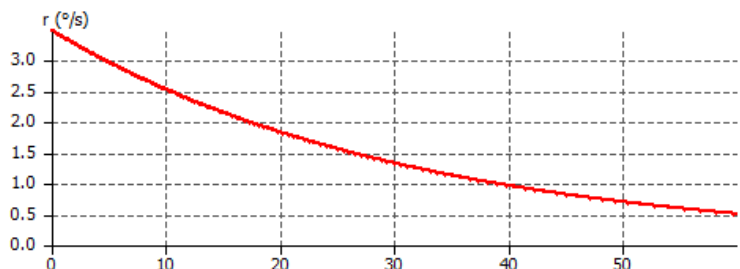
Olandiškas žingsnis – tai jungtinis svyravimas apie vertikalią ir išilginę ašis, kai šių judėjimų fazės skiriasi apie 90 laipsnių, dažniausiai jis yra švelniai slopinamas. Tyrimas rodo, kad suprojektuoto modelio atveju Olandiško žingsnio režimas (OŽR) yra gerai slopinamas. Kadangi svyravimų dažnis yra gana didelis, tai ši savybė labai palengvina pilotavimą. Koreguoti aukšto dažnio skraidyklės sparno svyravimus, dėl to kad jis yra valdomas piloto svorio padėties keitimu, būtų labai sudėtinga.

Laiko atskaitoje gauti šių parametrų kitimai: $v(t)$, $r(t)$, $p(t)$, $\psi(t)$. Visiems šiems parametrų būdingas kritinis slopinimas, lygus vienetui. Tai reiškia, kad svyravimai nevyksta, tačiau palaipsniui grįžtama į pradinę padėtį.



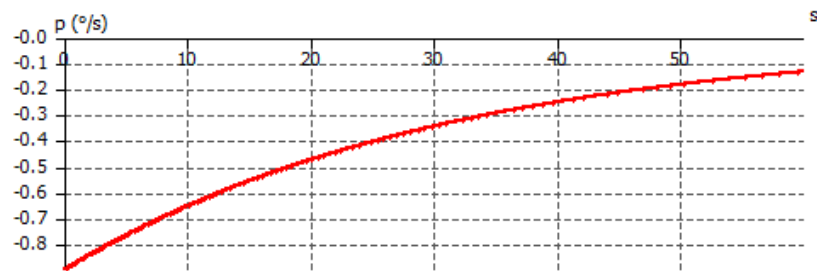
29 pav. Skersinio greičio kitimas laike

Funkcija $v(t)$ yra skersinio greičio kitimas išilgai y (skersinės) ašies.

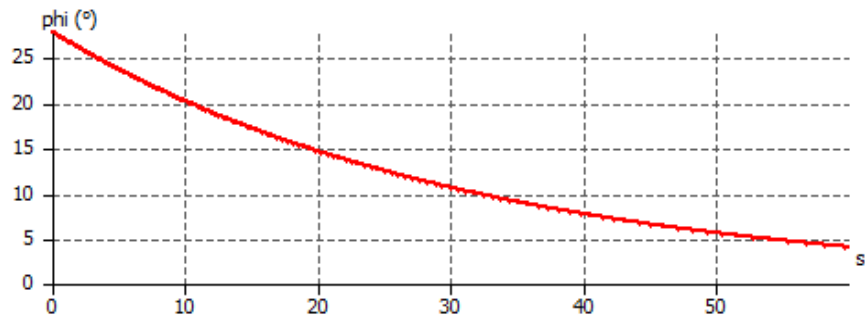


30 pav. Pokrypio kitimas laike

Sparno pokrypio kitimo sparta $r(t)$ taip pat tolygiai grįžta į pradinę padėtį nesvyruojamuoju judesiu.



31 pav. Posvyrio kitimas laike



32 pav. Kurso kampo kitimas laike

Aprašyti režimai skirstomi į svyruojamuosius (Fugoidinis, trumpo periodo, Olandiško žingsnio), kurie apibūdinami tikriniu vektoriumi (angl. *eigenvector*), natūraliu svyravimų dažniu ir slopinimo veiksniu. Nesvyruojamieji režimai (posvyrio slopinimas, spiralinis) apibūnami tik tikriniu vektoriumi ir slopinimo veiksniu. Tikrinis vektorius suteikia informaciją apie skrydžio kintamųjų amplitudę ir fazę. Programa XFLR5 tikrinis vektorius analizuojamas vizualiai nagrinėjant orlaivį trimatėje erdvėje.

5. Išvados

Projektuojant Wills Wing gamyklos gaminamos skraidyklės T2C 154 modelį programa XFLR5 įsitikinta, kad didžiausia aerodinaminė kokybė (20,8) išlaikant tinkamas stabilumo charakteristikas pasiekama naudojant didelį neigiamą sparno galų susukimą (-14°). Modelis suprojektuotas naudojant 6° teigiamą skersinio „V“ kampą bei 25° strėliškumo kampą. Atlikus stabilumo analizę išsiaiškinti išilginio ir skersinio stabilumo natūralūs svyravimų režimai.

Išilginio stabilumo natūralūs svyravimų režimai:

- ❖ Du simetriniai Fugoidiniai svyravimai – neutralaus stabilumo, nedidelio dažnio;
- ❖ Du simetriniai trumpo periodo svyravimai – pasižymi stipriu slopinimu, dėl to svyravimų praktiškai nebūna.

Skersinio stabilumo natūralūs svyravimų režimai:

- ❖ Spiralinis režimas – skraidyklėms nebūdingas;
- ❖ Posvyrio slopinimas – neutralaus stabilumo, nesvyruojamasis;
- ❖ Du simetriniai Olandiško žingsnio svyravimai – aukšto dažnio, gerai slopinami.

Laiko ataskaitoje gautos įvairių parametrų priklausomybės parodė dinaminį stabilumą. Įvertinus visus gautus rezultatus galima daryti išvadą, kad šiuolaikinių skraidyklių konstrukcinės ypatybės nulemia aparato stabilumą įprastinių skrydžio greičių diapazone. Tai reiškia, kad šio aviacinio sporto sauga priklauso nuo paties piloto, jo gebėjimų bei techninės skraidyklės būklės, kuri turi būti prižiūrima ir reguliariai patikrinama. Kaip ir bet kuris kitas orlaivis jos turėtų turėti tinkamumo skraidyti pažymėjimus, tuomet būtų galima išvengti daugumos incidentų.

6. Literatūra

Dees Paul Hang glider design and performance [Konferencija] // 10th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Conference . - Seattle, WA : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010.

Deperrois Andre About stability analysis using XFLR5 [interaktyvus] // XFLR5. - 2010 m.. - 2012 m. lapkričio 20 d.. - www.xflr5.com/xflr.htm.

Deperrois Andre Modal analysis and experimental validation [interaktyvus] // XFLR5. - 2011 m. February. - 2012 m. lapkričio 20 d.. - www.xflr5.com/xflr5.htm.

E.A.Kilkenny Full scale wind tunnel tests on hang glider pilots [Konferencija] // College of Aeronautics report 8416. - 1984.

FAA Weight-shift control aircraft flying handbook [Knyga]. - Oklahoma City, OK : US Department of Transportation, FAA, Airman Testing Standards Branch, 2008.

Gratton Guy Brian Atheoretical and experimental appraisal of airworthiness evaluation rechniques for small light aeroplanes [Ataskaita]. - 2005.

Group UIUC Applied Aerodynamics UIUC Airfoil Coordinates Database [interaktyvus] // UIUC Airfoil Data Site. - 1995-2013 m.. - 2012 m. kovo 12 d.. - http://www.ae.illinois.edu/m-selig/ads/coord_database.html.

Guidelines for XFLR5 v6.03 [interaktyvus] // XFLR5. - 2011 m. vasaris. - 2012 m. lapkričio 20 d.. - www.xflr5.com/xflr5.htm.

Kroo Ilan M. Aerodynamics, aeroelasticity, and stability of hang gliders - experimental results [Konferencija] // NASA Technical Memorandum 81269. - California : [s.n.], 1981.

Lasauskas Eduardas Skrydžio principai [Knyga]. - Vilnius : [s.n.], 2007.

M. V. Cook, M. Spottiswoode Modelling the flight dynamics of the hang glider [Žurnalas] // The Aeronautical Journal. - 2006 m..

Markowski Michael A. The hang glider's bible [Knyga]. - USA : Tab Books, 1977.

Meier Mike Aerobatics in hang gliders: understanding operating limitations [interaktyvus] // Wills Wing. - 2012 m. kovo 10 d.. - www.willswing.com/Articles/Article.asp?reqArticleName=aerobatics.

Meier Mike Pitch stability and center of mass location [Straipsnis] // Hang Gliding magazine. - 1997 m. gruodis.

Meier Mike Polar data for Wills Wing hang gliders [interaktyvus] // Wills Wing. - 2012 m. kovo 12 d.. - www.willswing.com/Articles/Article.asp?reqArticleName=PolarData#.

Meier Mike Reflex bridle adjustment and maintaining pitch stability [Straipsnis] // Hang Gliding magazine. - 1997 m. gruodis.

Pagen Dennis Performance flying [Knyga]. - Spring Mills, PA : Sport Aviation Publications, 1993.

Pearson Steve The story of the design and development of the Fusion [Žurnalas] // Hang Gliding magazine. - 1997 m..

Pearson Steve Wills Wing winglets Q&A [interaktyvus] // Wills Wing. - 2002 m. lapkričio 12 d.. - 2012 m. kovo 15 d.. - www.willswing.com/articles/Article.asp?reqArticleName=winglets.

Sheehy Finbar The Hang glider's technical notebook [Knyga]. - Pasadena, CA : Faoilean Press, 1992.

V. Prisacariu, I. Circiu, M. Boscoianu Flying wing aerodynamic analysis [Konferencija] // Technical Sciences and Applied Mathematics. - Brasov : [s.n.].

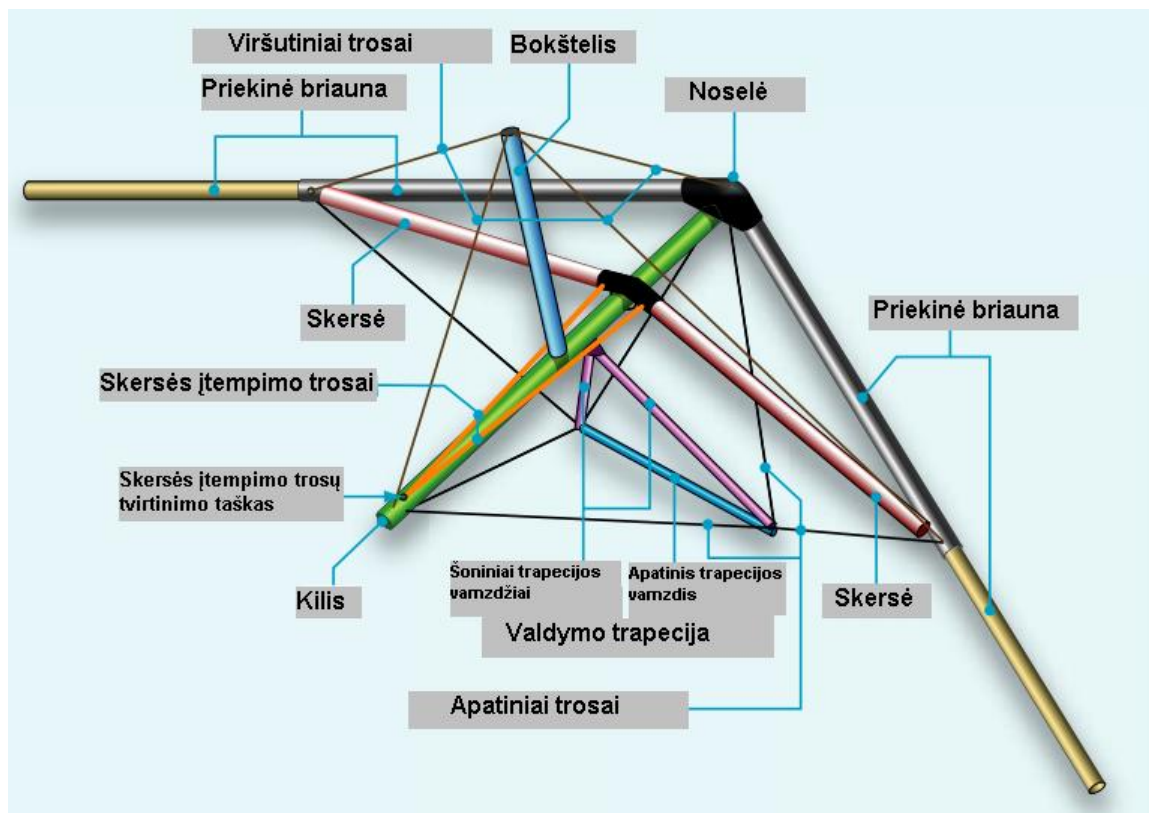
Willner Martin A tutorial for XFLR5 - version 1 [interaktyvus] // Scribd.. - 2013 m. vasario 15 d.. - www.scribd.com/doc/40661331/XFLR5-Tut-v1.

Wing Wills T2 144, 154 and T2C 136, 144, 154 Owner/ Service Manual [interaktyvus] // Wills wing. - 2012 m. rugsėjis. - 2012 m. lapkričio 15 d.. - www.willswing.com/pdf/manuals/om_T2_5th_ed_Sep2012_wAssyDiag_revMarch2013.pdf.

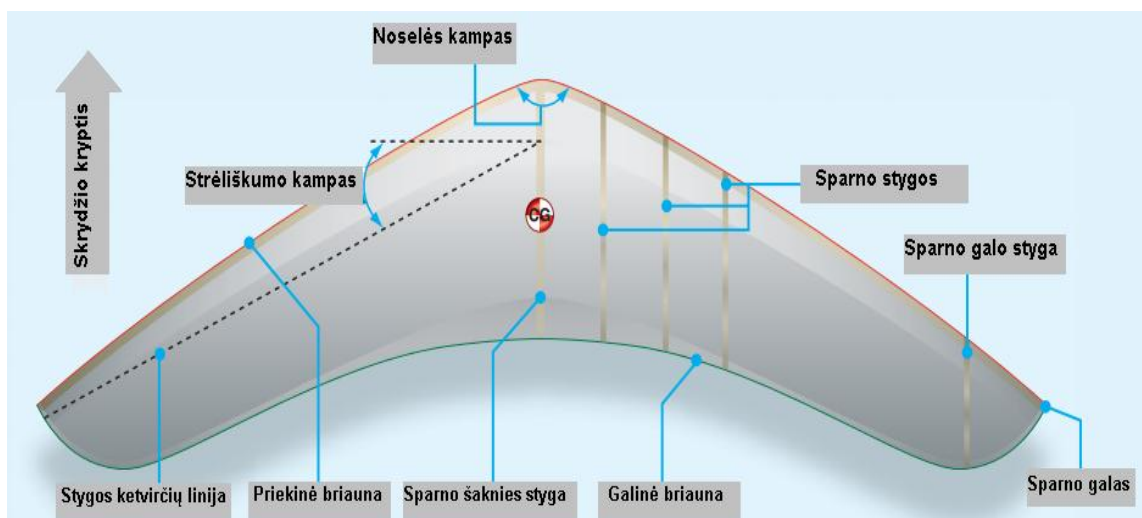
Xiao Huang, Kiran K. Pippalapalli, Bernd Chudoba Aerodynamic analysis of Class II high-performance hang gliders - ATOS [Konferencija] // 44th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit . - Reno, NV : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.

Priedai

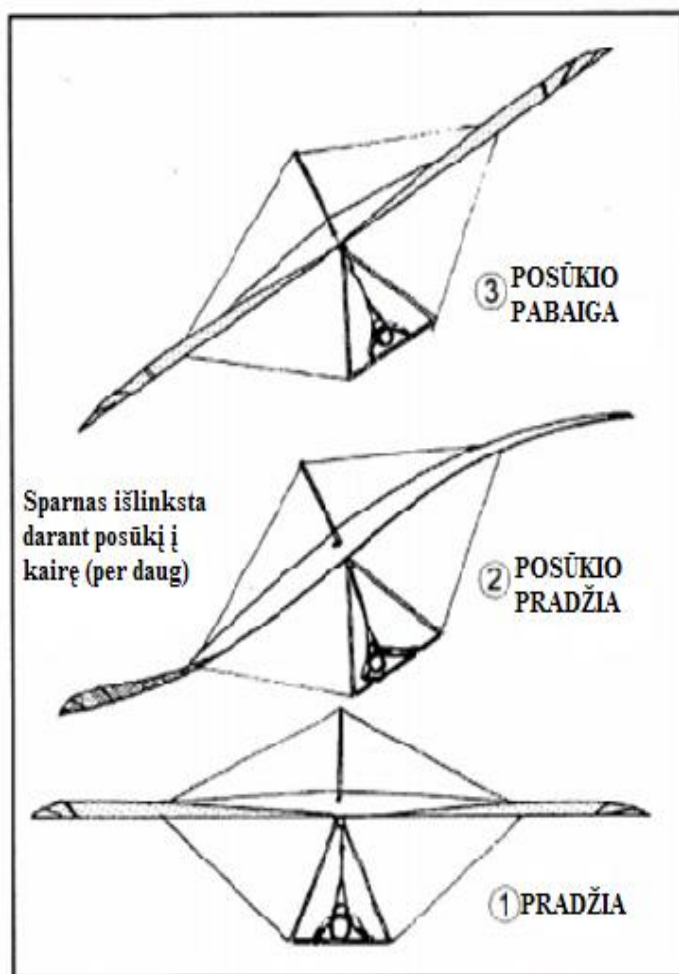
1. Rėmo konstrukcija (FAA)



2. Charakteringi skraidyklės sparno parametrai (FAA)



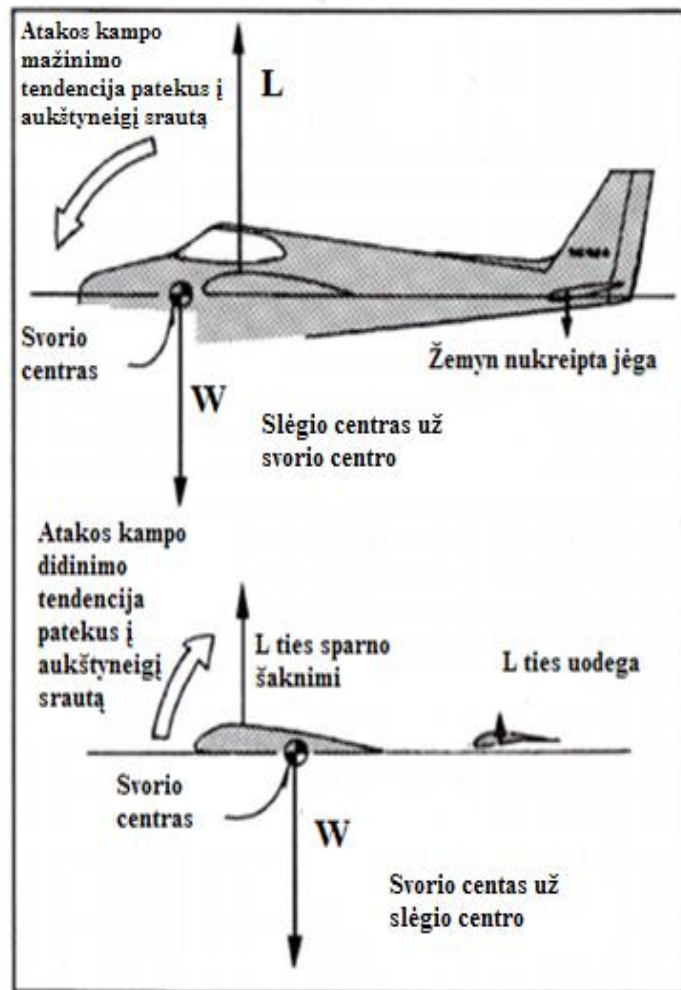
3. Per daug lanksčios konstrukcijos sparno deformacija posūkio metu (Pagen)



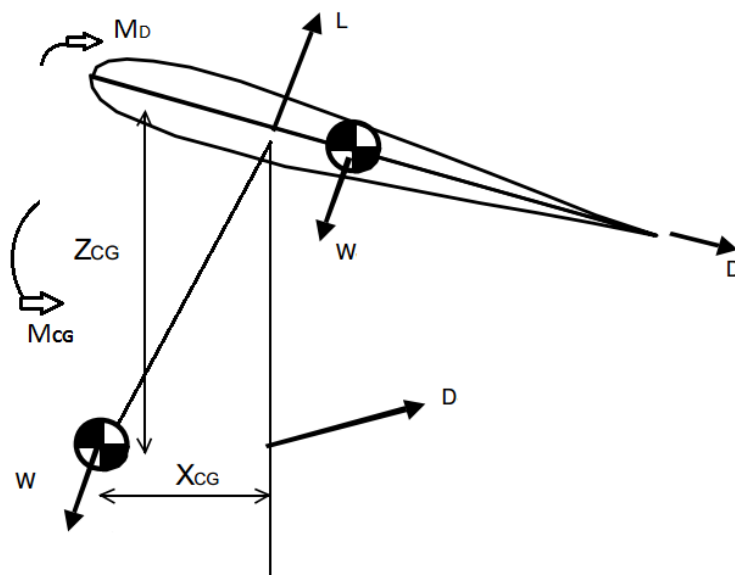
4. T2/T2C sparnų serijos dydžiai priklausomai nuo piloto svorio (Wing)

Sparno charakteristika	T2C 136	T2/T2C 144	T2/T2C 154
Plotas, m^2	12,6	13,4	14,3
Mostas, m	9,6	9,8	10,2
Proilgis	7,3	7,3	7,4
Svoris, kg	31	32	33
Prisikabinimo svoris, kg	68-95	72-107	84-129
Optimalus piloto svoris, kg	58-68	68-82	82-91
Noselės kampas, $^{\circ}$	127-132		
Dvisluoksni danga, %	92		
v_{NE} , km/h	85		
v_A , km/h	74		
v_{ms} , km/h	34		
v_d , km/h	120		

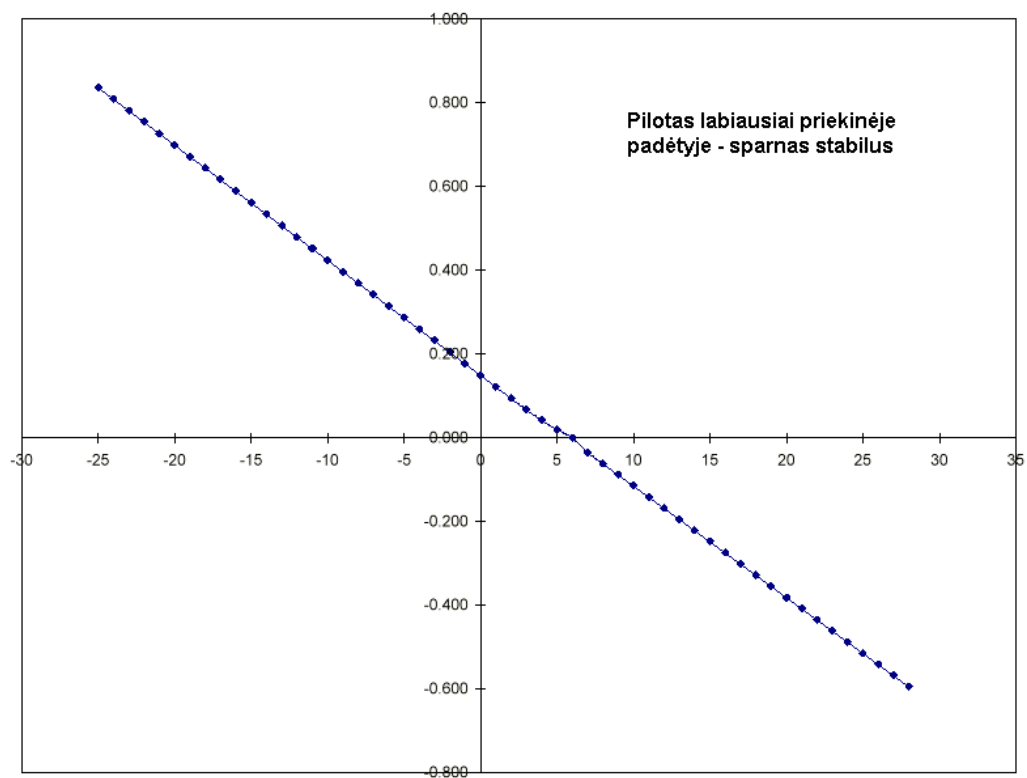
5. Keliamosios jėgos veikimo taško padėtis (Pagen)



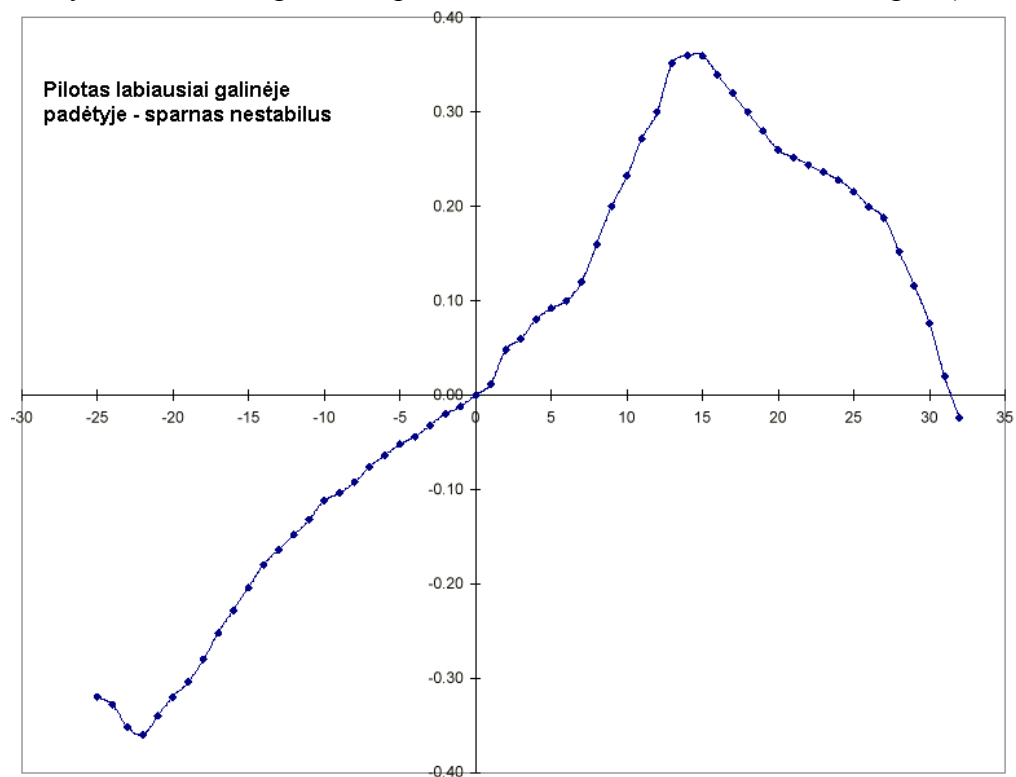
6. Švytuoklės efektas (Gratton)



7. Skraidyklės centruotė priekinė – sparnas stabilus skersinės ašies atžvilgiu. (Meier)



8. Skraidyklės centruotė galinė – sparnas nestabilus skersinės ašies atžvilgiu. (Meier)



9. Publikuotas straipsnis



16-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminė konferencija, 2013 m. balandžio 12 d. Vilnius

Proceedings of the 16th Conference for Junior Researchers „Science – Future of Lithuania“, 12 April, Vilnius, Lithuania

Aviacijos technologijos
Aviation Technologies

Orlaivių pilotavimas
Aircraft Piloting

SKRAIDYKLĖS SPARNO POLINKIO MOMENTO TYRIMAS

Rūta Pudževelytė

VGTU AGAI Aviacijos technologijų katedra

El. p. ruta.pudzevelyte@gmail.com

Santrauka. Straipsnyje nagrinėjama strėliškumo kampo ir sparno susukimo įtaka programa XFLR5 sukurtam T2C 154 skraidyklės sparno modeliui. Aprašomos sparno profilio ypatybės bei svorio centro padėties įtaka polinkio momento koeficiento reikšmėms. Taip pat aptariamos gautos polinkio momento koeficiento kreivės prie skirtingų atakos kampų, pritaikius įvairius sparno strėliškumo ir susukimo parametrus.

Reikšminiai žodžiai: polinkio momento koeficientas, skraidyklė, strėliškumo kampas, profilis, susukimo kampas, stabilumas, išilginis stabilumas, svorio centras.

1. Įvadas

Laisvo skrydžio skraidyklė – tai bemotoris skraidantis aparatas, turintis trikampio formos sparną, kuris skrydžio metu keičia geometriją. Skraidyklė neturi važiuoklės – kylama ir tupiama ant kojų. Šis orlaivis neturi kabinos, pilotas skrenda gulėdamas ant pilvo specialioje, aptakioje pakaboje pritvirtintoje po sparnu.

Aviacijos pradžia siejama būtent su pirmųjų skraidyklių atsiradimu, dar 1874-taisiais vokiečių inžinierius Otto Lilienthal, pradėjo jų projektavimą. Plačiai pritaikytas 1951-aisiais užpatentuotas amerikiečio Francis M. Rogallo trikampis sparnas (FAA). Pirmosios skraidyklės, kurias dažnai pilotai mėgėjai konstravo patys, pasižymėjo pavojingai nestabiliomis skrydžio charakteristikomis, dėl ko šis sportas buvo laikomas nesaugiu. Vienas išsamiausių tyrimų šia kryptimi buvo atliktas 1980-tais metais I. Kroo bendradarbiaujant su NASA (Kroo). I. Kroo išvedė lygtis nedideliems sparno išilginio ir skersinio krypties svyravimams panaudodamas praktinių tyrimų gautą aerodinaminiam vamzdyje rezultatus. M.V.Cook ir M. Spottiswood 2006-taisiais publikavo

straipsnį, kuriame labai išsamiai išnagrinėtos skraidyklės dinaminės charakteristikos skaičiavimų lygmenyje (M. V. Cook, M. Spottiswoode).

Šiuo darbu siekiama gauti ne labai tikslius rezultatus, kas yra neįmanoma dėl ribotų programos XFLR5 galimybių bei dėl paties sparno geometrijos nepastovumo, tačiau nustatyti sparno polinkio momento svyravimus keičiant šiuos sparno parametrus: sparno strėliškumą ir susukimą.

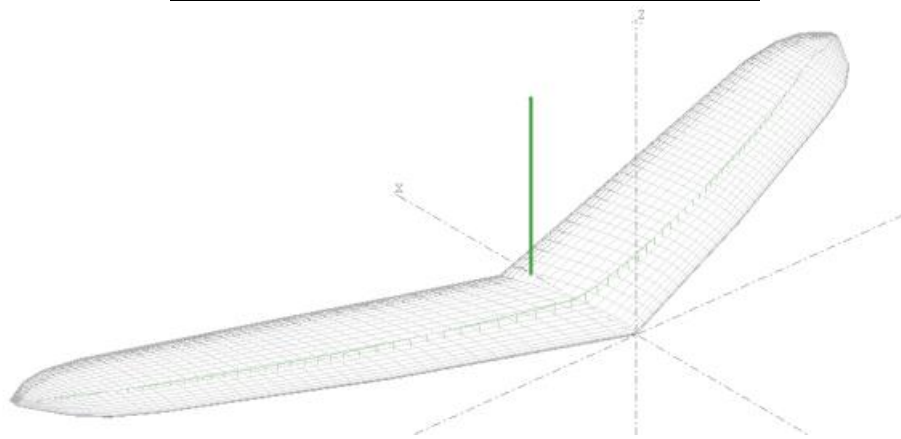
2. Tyrimo metodika

1. Skraidyklės sparno duomenys

Šiame tyrime naudotas amerikiečių gamyklos Wills Wing sparno modelis T2C 154 (Wing). Sparno duomenys pateikti lentelėje.

Lentelė 4 Sparno T2C 154 duomenys
Table 1 T2C 154 wing data

Eil. Nr.	Sparno parametras	Dydis
1.	Sparno plotas, m ²	14,3
2.	Sparno mostas, m	10,2
3.	Proilgis	7,4
4.	Sparno masė, kg	33
5.	Piloto prisikabinimo masė, kg	107
6.	Strėliškumo kampas, °	25
7.	Skrydžio greitis, m/s	14



Pav. 33 Trimatis T2C 154 modelis XFLR5
Fig. 1 3D T2C 154 model XFLR5

Visų orlaivių stabilumas yra skaičiuojamas trijų ašių atžvilgiu:

1. Išilginis stabilumas (polinkio), skersinės ašies atžvilgiu;
2. Skersinis stabilumas (posvyrio), išilginės ašies atžvilgiu;
3. Krypties stabilumas (pokrypio), vertikalios ašies atžvilgiu. (Sheehy)

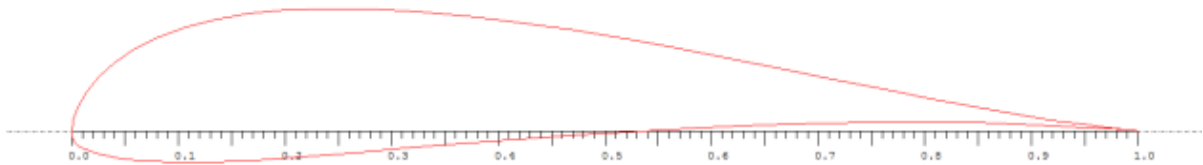
Stabilų sparną skersinės ašies atžvilgiu apibūdina pagrindinės taisyklės:

- ❖ Kai atakos kampas yra teisingas, momentų suma svorio centro atžvilgiu yra lygi nuliui;

- ❖ Kai atakos kampas per mažas, turi atsirasti teigiamas momentas svorio centro atžvilgiu, didinantis atakos kampą;
- ❖ Kai atakos kampas per didelis, sparnas turi sudaryti neigiamą momentą svorio centro atžvilgiu ir sumažinti polinkio kampą. (Sheehy)

2. Aerodinaminio profilio forma

Skraidyklių projektavime naudojami itin stabilūs profiliai: storiausia profilio vieta visada arti priekinės briaunos, profilio uodegėlė tiesi arba išlenkta į viršų (vidurinė linija „S“ formos). Skraidyklių, kaip ir visų skraidančių aparatų, profilis yra kuriamas atsižvelgiant į pagrindinius reikalavimus: atakos kampų ir skrydžio greičių diapazonus, stabilumo reikalavimus ir norimą keliamosios jėgos generavimą.



Pav. 34 Profilis MH 84 XFLR 5
Fig. 2 Airfoil MH 84 XFLR5

Pagrindiniai skraidyklės profilio parametrai, kuriuos keičiant gaunamos norimos skrydžio charakteristikos yra:

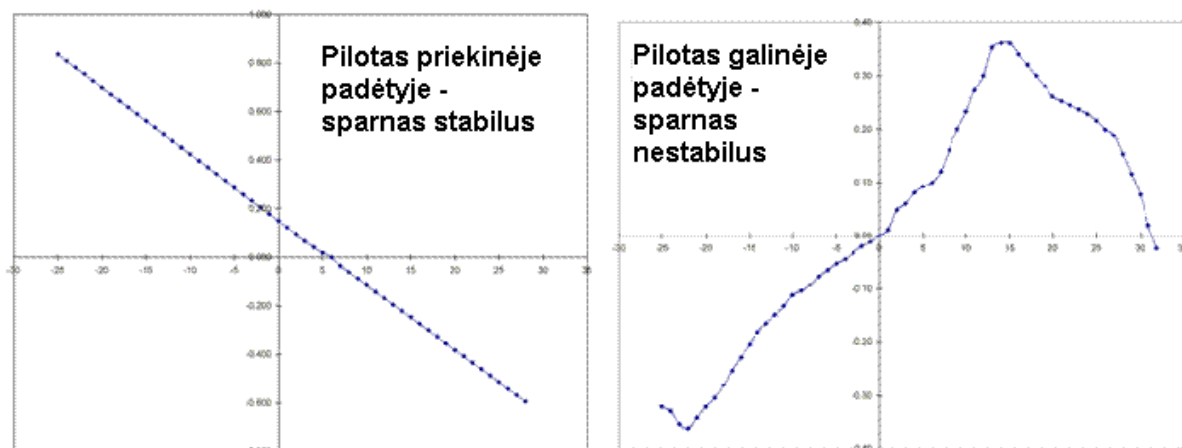
1. Gaubtumas – paprastai randamas kompromisas tarp didėjančio pasipriešinimo ir didėjančios keliamosios jėgos;
2. Noselės kreivumas – priekinės briaunos spindulys apie 3% stygos ilgio;
3. Maksimalus storis – skraidyklių profilių 11% – 13% stygos ilgio;
4. Maksimalaus storio vieta – apie 20% nutolusi nuo priekinės briaunos;
5. Dvisluoksnė profilio dalis – 92% (kuo didesnė sparno dalis dvisluoksnė, tuo mažesnis pasipriešinimas, tačiau kartu mažesnis ir profilio gaubtumas);
6. Oro srauto sulėtėjimo zona – nuo storiausios profilio vietos iki uodegėlės. (Pagen)

Parinktas profilis MH 84 (13,69% storis) pasižymi dideliu stabilumu. Sparno galai veikia kaip stabilizatoriaus plokštuma įprastinės konfigūracijos orlaiviuose, tačiau priešingai nei horizontalus stabilizatorius, jie generuoja keliamąją jėgą nukreiptą aukštyn, kaip ir pagrindinė sparno dalis. Taip yra todėl, kad profilio slėgio centras yra prieš svorio centrą ir sparno galai turi kompensuoti teigiamą centrinės sparno dalies momentą. (Pagen)

3. Svorio centro padėties svarba

Sistemos pilotas – skraidyklė svorio centras yra žemiau sparno, linijoje einančioje per piloto pakabos tvirtinimo prie skraidyklės kilio tašką. Pilotas yra sunkiausia sistemos dalis, nulemianti jos svorio centro padėtį. (Sheehy)

M. Meier straipsnyje „Pitch stability and center of mass location“ išdėstoma piloto padėties skrydžio metu svarba. Apibendrinus straipsnį padaroma išvada, kad kuo pilotas labiau pasistūmęs į priekį nuo vairavimo atramos, tuo labiau priekinė skraidyklės centruotė, tuo sparnas stabilesnis.



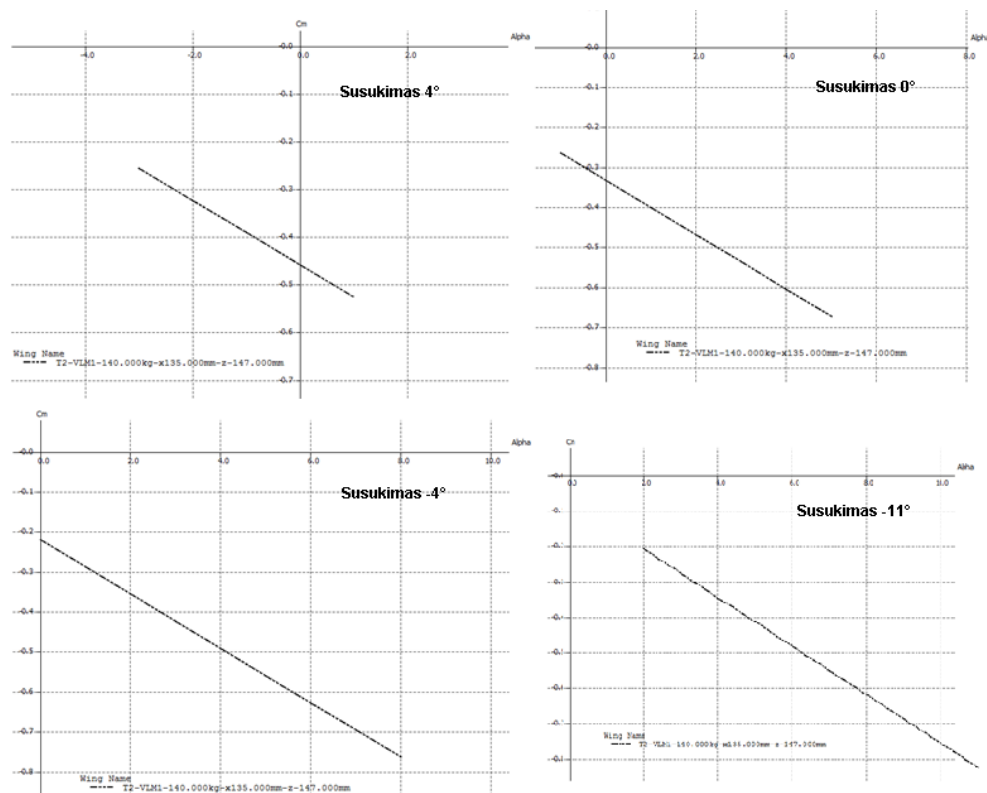
Pav. 35 $C_m(\alpha)$ kai CG skirtingose vietose
Fig. 3 $C_m(\alpha)$ with different CG positions

Pilotui pasislinkus į priekį, didesnė dalis keliamosios jėgos yra sukurama vidine sparno dalimi arti svorio centro, todėl atsiranda momentas didinantis atakos kampą ir grąžinantis sparną į pradinę padėtį. Pilotui atsistūmus nuo valdymo trapecijos atgal, sparno galai generuoja daugiau keliamosios jėgos ir dėl to momentas yra priešingas – atakos kampo mažinimo kryptimi. Subalansuotas skrydžio greitis gali būti keičiamas nedidelėse ribose perslenkant svorio centro padėtį, tai daroma keičiant piloto pakabos tvirtinimo vietą prie kilio. (Pagen)

3. Gauti rezultatai

Sparno strėliškumas ir susukimas nulemia tai, kad sparnų galai yra už svorio centro.

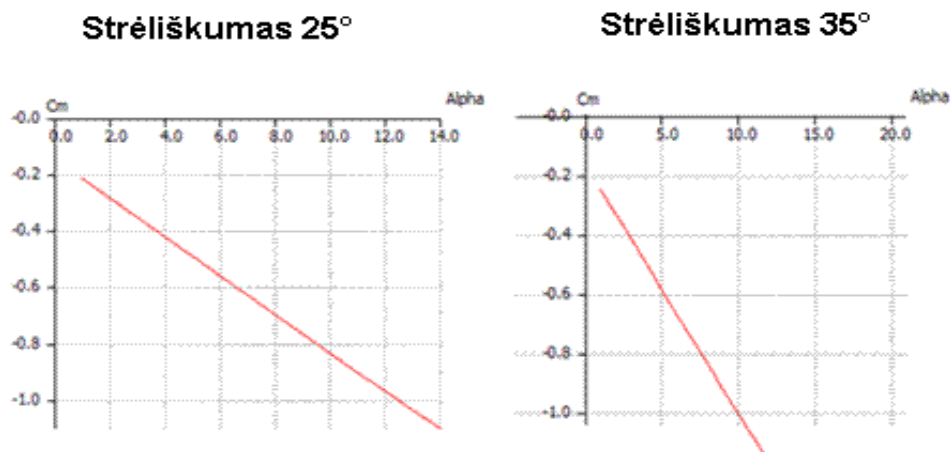
Paprastai skraidyklių sparnų susukimas kinta nuo 5° iki 15° . Pirminė sparno susukimo įtaka pasireiškia sparno polinkio momentui.



Pav. 36 $C_m(\alpha)$ esant skirtingam sparno susukimui
Fig. 4 $C_m(\alpha)$ with different twist angle

Esant net mažiausiam sparno susukimui, polinkio momentas padidėja prie mažų atakos kampų. Sparno galų susukimas padidina išilginį stabilumą, pavėlina smuką, padidina pasipriešinimą ir sumažina $C_{L_{max}}$. (Sheehy). $C_m(\alpha)$ rodo, kad esant teigiamam arba nuliniam susukimui išilgai sparno, jis būtų pusiausvyros padėtyje prie didelių neigiamų atakos kampų. Susukimui didėjant, kreivė slenkasi aukštyne prie mažų neigiamų atakos kampų (kai susukimas -4°) ir priartėja prie nulio ties -11° susukimu. Didinant susukimą toliau, $C_m = 0$ esant teigiamoms atakos kampo (α) reikšmėms, tačiau dėl didelio susukimo labai sumažėja $C_{L_{max}}$ todėl šiam sparnui efektyviausias susukimas atitinka -11° .

Sparno strėliškumas neigiamai veikia polinkio momento reikšmes, jei nėra taikomas sparno susukimas kartu su juo. Strėliškų sparnų smuka prasideda ties sparno galais, tuomet slėgio centras juda į priekį, taip sukurdamas papildomą teigiamą polinkio momentą ir toliau didindamas atakos kampą. Sparno susukimas neatsiejamas nuo strėlinių sparnų, nes juo pakoreguojamas C_L pasiskirstymas išilgai sparno taip, kad smuka prasidėtų ties sparno šaknimis.



Pav. 37 $C_m(\alpha)$ esant skirtingam strėliškumo kampui
Fig. 5 $C_m(\alpha)$ with different sweep angle

Atliktas tyrimas parodė, kad $C_m(\alpha)$ nuolydis darosi statesnis didinant strėliškumo kampą sparnui su pritaikytu susukimu. Tai reiškia, kad esant tam pačiam atakos kampo pokyčiui, grąžinamas momentas į pusiausvyros padėtį bus didesnis. NAGRINĖJAMAM sparnui T2C 154 pritaikytas 25° strėliškumo kampas. Viena iš priežasčių – per didelis stabilumas apsunkina sparno valdymą, reikalingos didelės jėgos manevro atlikimui.

4. Išvados

Skraidyklės sparnams reikalingas didelis neigiamas susukimas išilgai sparno mosto, tai užtikrina geresnes smukos charakteristikas ir padidina sparno polinkio stabilumą. Polinkio stabilumas didėja didinant sparno strėliškumą (pritaikytas ir sparno susukimas), tačiau labai didelis strėliškumo kampas yra nenaudingas, nes apsunkina manevravimą. Svorio centro padėties vieta ir aerodinaminio profilio forma turi didelę įtaką visos sistemos skraidyklė – pilotas stabilumo charakteristikoms.

5. Literatūra

- FAA. (2008). *Weight-shift control aircraft flying handbook*. Oklahoma City, OK: US Department of Transportation, FAA, Airman Testing Standards Branch.
- Kroo, I. M. (1981). Aerodynamics, aeroelasticity, and stability of hang gliders - experimental results. *NASA Technical Memorandum 81269*. California.
- M. V. Cook, M. Spottiswoode. (2006). Modelling the flight dynamics of the hang glider. *The Aeronautical Journal* .
- Meier, M. (1997 m. gruodis). Pitch stability and center of mass location. *Hang Gliding magazine* .
- Meier, M. (1997 m. gruodis). Reflex bridle adjustment and maintaining pitch stability. *Hang Gliding magazine* .
- Pagen, D. (1993). *Performance flying*. Spring Mills, PA: Sport Aviation Publications.
- Sheehy, F. (1992). *The Hang glider's technical notebook*. Pasadena, CA: Faoilean Press.
- Wing, W. (2012 m. rugsėjis). *T2 144, 154 and T2C 136, 144, 154 Owner/ Service Manual*. Paimta 2012 m. lapkričio 15 d. iš Wills wing: www.willswing.com/pdf/manuals/om_T2_5th_ed_Sep2012_wAssyDiag_revMarch2013.pdf

Hang glider pitch stability analysis

R. Pudzevelyte, E. Lasauskas

Summary

It is presented a hang glider T2C 154 model designed with program XFLR5 pitching moment analysis. The importance of the CG position is described roughly with explanation about an airfoil shape for hang hiders. Graphs of pitching moment coefficient with different wing sweep angle and twist angle are presented.

Keywords: pitching moment coefficient, hang glider, sweep angle, airfoil, twist, stability, longitudinal stability, CG.