



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS
AVIACIJOS PRIETAISŲ KATEDRA

Vytautas Lapinskas

**SKLANDYTUVO ATAKOS IR SLYDIMO KAMPŲ MATAVIMO METODŲ
TYRIMAS**
**RESEARCH OF MEASUREMENTS OF GLIDER'S ATTACK AND SLIP
ANGLE**

Baigiamasis magistro darbas

Aviacinės elektronikos studijų programa, valstybinis kodas 62401T208

Elektronikos inžinerijos specializacija

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2011

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS
AVIACIJOS PRIETAISŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)
Algimantas Jakučionis
(Vardas, Pavardė)

(Data)

Vytautas Lapinskas

**SKLANDYTUVO ATAKOS IR SLYDIMO KAMPŲ MATAVIMO METODŲ
TYRIMAS**
**RESEARCH OF MEASUREMENTS OF GLIDER'S ATTACK AND SLIP
ANGLE**

Baigiamasis magistro darbas

Aviacinės elektronikos studijų programa, valstybinis kodas 62401T208

Elektronikos inžinerijos specializacija

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas doc. dr. Algimantas Jakučionis
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas doc. dr. Eduardas Lasauskas
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas doc. dr. Zofija Babickienė
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2011

Darbo uždutotis

Sąžiningumo deklaracija

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Antano Gustaičio aviacijos institutas
Aviacijos prietaisų katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. 2
Data 2011-05-10

Aviacinės elektronikos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Sklandytuvo atakos ir slydimo kampų matavimo metodų tyrimas**

Autorius **Vytautas Lapinskas**

Vadovas doc. dr. **Algimantas Jakučionis**

Kalba

☒ X

lietuvių

☐

užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe atliekamas sklandytuvo atakos ir slydimo kampo matavimo metodų tyrimas. Pirmoje darbo dalyje apžvelgiami atakos kampo matuokliai: virvutė, pritvirtinta ant stiklinio gaubto, atakos – slydimo kampo matuoklis su vėjarodžiu ir *Pitoto* vamzdelio tipo daviklis. Davikliai palyginami, aprašomi jų privalumai ir trūkumai lyginant su kitais davikliais. Antroje dalyje aprašomi *alfa* ir *beta* kampų matavimo metodai: matavimas vamzdelio tipo davikliu ir metodas, kai nenaudojami specialūs atakos, slydimo kampo davikliai. Toliau apžvelgiami veiksniai, turintys įtakos matavimo tikslumui. Pateikiamos kelių vamzdelio tipo daviklių kalibravimo kreivės. Paskutinėje dalyje programa *Matlab* kuriamas matematinis-dinaminis sklandytuvo modelis. Modeliu, pagal nustatytas sąlygas, skaičiuojami atakos ir slydimo kampai, analizuojami grafikai.

Darbo apimtis – 78 p. teksto be priedų, 55 iliustr., 11 lent., 20 bibliografinių šaltinių.

Prasminiai žodžiai: atakos kampas, slydimo kampas, AOA, AOS, alfa, beta, modelis, Pitoto vamzdelis, matuoklis

Vilnius Gediminas Technical University
Antanas Gustaitis aviation institute
Department of **avionics**

ISBN ISSN
Copies No. 2
Date 2011-05-10

Aviation electronics study programme master thesis.

Title: **Research of measurements of glider's attack and slip angle**

Author **Vytautas Lapinskas**

Academic supervisor doc. Dr. **Algimantas Jakucionis**

Thesis language

☒ X

Lithuanian

☐

Foreign (English)

Annotation

The thesis made the glider's attack and slip angle measurement methods for the investigation. The first part gives an overview of measuring devices of angle of attack and slip angle: The side string, attached to the side of the canopy, vane mounted AOA sensor, Pitot-tube type sensor. The sensors are compared, describes their advantages and disadvantages compared with other sensors. The second part describes the alpha and beta angle measurement methods: measurement with the tube-type sensor, and the method without using the specific attack, slip angle sensors. The following gives an overview of factors affecting the measurement accuracy. Several tube-type sensor calibration curves are presented. The last part of thesis presents development of mathematical – dynamic model of the glider using *Matlab* software. The model calculates the angle of attack and slip using set conditions of flight.

Thesis consist of: 78 p. text without appendixes, 55 pictures, 11 tables, 20 bibliographical entries.

Keywords: angle o attack, angle of side-slip, AOA, AOS, alpha, beta, Pitot tube, sensor

TURINYS

PAVEIKSLŲ IR LENTELŲ SĄRAŠAS	10
IVADAS.....	8
1. ATAKOS IR SLYDIMO KAMPO MATAVIMO METODŲ IR MATUOKLIŲ APŽVALGA	11
1.1 Atakos ir slydimo kampų samprata	11
1.2 Atakos ir slydimo kampų matavimas virvute	13
1.3 <i>Fliugerinis</i> atakos kampo daviklis	16
1.4 Vamzdelio tipo atakos ir slydimo kampo matuokliai.....	18
1.5 Kombinuoti α ir β kampų davikliai.....	19
1.6 Atakos ir slydimo kampo indikatoriai	20
1.7 Atakos kampo sistemos.....	21
1.7.1 Inercinių sistemų panaudojimas atakos kampo matavimui – korekcijai	21
1.7.2 Pespėjimo apie greičio praradimą sistema.....	22
1.8 Skyriaus apibendrinimas	24
2. SKLANDYTUVO ATAKOS IR SLYDIMO KAMPŲ MATAVIMO YPATUMAI	25
2.1 Kombinuoti atakos ir slydimo kampo matuokliai	25
2.2 Atakos ir slydimo kampų matavimas be specialių daviklių	30
2.3. Skyriaus apibendrinimas.....	34
3. ATAKOS IR SLYDIMO KAMPŲ MATAVIMO TIKSLUMAS	35
3.1 Matuoklių tikslumą įtakojančios veiksniai	35
3.2 Srauto krypties ir greičio vektoriaus matavimas.....	36
3.2.1 Oro klampumo, spūdumo ir pilnutinio slėgio gradiento poveikis.....	37
3.3 Dviejų matmenų davikliai.....	37
3.3.1 Kumštelinis daviklis	37
3.3.2 Conrado arba „kobra“ davikliai.....	38
3.3.3 Gembinis cilindras	41
3.3.4 Pleištas	42
3.4 Trijų matmenų davikliai.....	42
3.4.1 Kūginis daviklis.....	42
3.4.2 Gembinis cilindras.....	42
3.4.3 Penkių skylių davikliai.....	44
3.5 Skyriaus apibendrinimas	47
4. DINAMINIS – MATEMATINIS SKLANDYTUVO MODELIS	48
4.1 Programinės įrangos parinkimas	48
4.2 Modelio kūrimas	48
4.3 Matematinio sklandytuvo modelio tyrimas	57
IŠVADOS.....	70
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	71
PRIEDAI	73
PRIEDAS 1: SKLANDYTUVO ATAKOS IR SLYDIMO KAMPO MATAVIMŲ TYRIMAI.....	74

PAVEIKSLŲ IR LENTELŲ SĄRAŠAS

1 pav.	Sparno atakos kampas.....	11
2 pav.	Nesimetrinio profilio sparno keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo.....	11
3 pav.	Orlaivio šoninio slydimo kampas β	12
4 pav.	Krypties momento koeficiento priklausomybė nuo slydimo kampo: 1 – stabilus; 2 – neutralus; 3 – nestabilus.....	13
5 pav.	Kritiniai sklandytuvo atakos kampai.....	15
6 pav.	Šoninės juostelės vaizdas.....	15
7 pav.	Šoninį sklandytuvo slydimą rodanti juostelė.....	16
8 pav.	Atakos kampo matuoklis su vėjarodžiu – mentele.....	16
9 pav.	Rotorinis transformatorius.....	17
10 pav.	Vėjarodžio kampų α ir β daviklis: a – vėjarodis; b – išorinis daviklio vaizdas; c – daviklio konstrukcinė schema.....	18
11 pav.	Vamzdelio tipo daviklis ir jo vaizdas iš šono.....	19
12 pav.	Atakos – slydimo kampo matuoklis.....	20
13 pav.	Integruota atakos kampo indikacija.....	20
14 pav.	Atakos kampo indikatoriai.....	21
15 pav.	Atakos kampo/įspėjimo apie smuką sistemos blokinė diagrama.....	22
16 pav.	Skaitmeninės orinio greičio praradimo įspėjamosios sistemos sandara.....	23
17 pav.	Blokinė atakos ir slydimo kampų matavimo sistemos schema.....	26
18 pav.	Molekulių diagrama esant žemesnei temperatūrai ir didesniai slėgiui: oro srautas pastovus (g/s), tūrinis srautas sumažėjęs (cm^3/s).....	27
19 pav.	Molekulių diagrama esant aukštesnei temperatūrai ir mažesniai slėgiui: oro srautas pastovus (g/s), tūrinis srautas padidėjęs (cm^3/s).....	27
20 pav.	Sudėtinio slėgio daviklio vaizdas iš priekio	28
21 pav.	Pusrutulinio zondo šoninis vaizdas.....	28
22 pav.	Oro srautų kryptys, kai $\text{AOA} = 0^\circ$	29
23 pav.	Oro srautų kryptys, kai $\text{AOA} < 0^\circ$	29
24 pav.	Struktūrinė veikimo schema.....	31
25 pav.	Sistemos struktūrinė schema.....	33
26 pav.	Conrado dviejų vamzdelių daviklių kalibravimo kreivės.....	38
27 pav.	Kalibravimo funkcijos K_1 , K_2 ir K_3 dviejų dimensijų kobra davikliui.....	40
28 pav.	Kalibravimo funkcija K_0 kobra davikliui.....	41
29 pav.	Keturių ertmių gembinio cilindro geometrija ir nomenklatūra.....	43
30 pav.	Kalibravimo diagrama keturių ertmių gembiniam davikliui: (a) Macho skaičiaus charakteristikos, (b) pilnutinio, statinio slėgio charakteristikos, parametrai.....	44
31 pav.	Penkių ertmių daviklio geometrija ir nomenklatūra.....	46
32 pav.	Eksperimentinės kalibravimo kreivės penkių skylių davikliui.....	47
33 pav.	Orlaivį veikiančių jėgų skaičiavimui skirtas blokas.....	49

34 pav.	Koordinatų sistema ir sklaidytuvą veikiančios jėgos: T – traukas, D – pasipriešinimas, L- keliamosios jėgos vektorius ir V – greičio vektoriaus kryptis.....	50
35 pav.	Judėjimo lygčių skaičiavimo blokas.....	51
36 pav.	Orlaivio ir žemės koordinatų sistemos.....	51
37 pav.	Atakos, slydimo kampas ir oro greitį skaičiuojantis blokas.....	53
38 pav.	Horizontalaus vėjo modelis.....	54
39 pav.	Matematinis sklaidytuvo modelis.....	56
40 pav.	Horizontalaus vėjo modelio nustatymų langas.....	57
41 pav.	Vėjo greičio ir krypties nustatymo langai, kai jie yra kintantys.....	57
42 pav.	Atakos kampas, kai vėjo greitis 0 m/s ir kryptis į šiaurę.....	58
43 pav.	Sklaidytuvo slydimo kampo ir greičio kitimas keičiantis vėjo kryptčiai.....	59
44 pav.	Sklaidytuvo slydimo kampo ir greičio kitimas keičiantis kintant vėjo greičiui	60
45 pav.	Sklaidytuvo slydimo kampo ir greičio kitimas keičiantis kintant vėjo greičiui	61
46 pav.	Sklaidytuvo slydimo kampo ir greičio kitimas keičiantis kintant vėjo greičiui ir kryptčiai	62
47 pav.	Pirmoji sklaidytuvo skrydžio trajektorija.....	62
48 pav.	Antroji sklaidytuvo skrydžio trajektorija.....	63
49 pav.	Trečioji sklaidytuvo skrydžio trajektorija.....	63
50 pav.	Sklaidytuvo atakos kampo, greičio x , y , z ašimis ir nuskrusto atstumo grafikai	64
51 pav.	Nuskristų atstumų grafikas.....	65
52 pav.	Sklaidytuvo atakos kampo, greičio x , y , z ašimis ir nuskrusto atstumo grafikai	66
53 pav.	Nuskristų atstumų grafikas.....	67
54 pav.	Sklaidytuvo atakos kampo, greičio x , y , z ašimis ir nuskrusto atstumo grafikai	68
55 pav.	Nuskristų atstumų grafikas.....	69
1 lentelė	Bloko įėjimai.....	49
2 lentelė	Bloko išėjimai.....	49
3 lentelė	Bloko įėjimai.....	53
4 lentelė	Bloko išėjimai.....	53
5 lentelė	Bloko įėjimai.....	54
6 lentelė	Bloko išėjimai.....	54
7 lentelė	Bloko įėjimai.....	55
8 lentelė	Bloko išėjimai.....	55
9 lentelė	Vėjo krypties kitimas laiko atžvilgiu.....	57
10 lentelė	Vėjo greičio kitimas laiko atžvilgiu.....	59
11 lentelė	Vėjo greičio ir krypties kitimas.....	60

IVADAS

Orlaivio greitis, aukštis, padėtis horizonto atžvilgiu, vertikalus greitis – tai svarbiausi skrydžio parametrai, kuriuos turi žinoti pilotas, valdydamas orlaivį. Tačiau, be jau išvardintų, yra ir kitų parametrų, turinčių didelę reikšmę. Tai yra orlaivio atakos ir slydimo kampai, kitaip dar vadinami *alfa* ir *beta* kampais.

Sklandytuvuose, kitaip nei dideliuose lėktuvuose su turboreaktyviniais varikliais, atakos ir slydimo kampų žinojimas turi didesnę svarbą. Taip yra dėl to, kad lėktuvuose dažniausiai skrydį valdo automatizuotos sistemos, be piloto įsikišimo palaikančios tinkamus atakos ir slydimo kampus. Sklandytuose tokių sistemų nėra – visas valdymas atliekamas rankiniu būdu.

Magistro darbe nagrinėjami atakos ir slydimo kampų matavimo metodai, matuokliai, sistemos. Tyrimo metu siekiama nustatyti veiksnius darančius įtaką kampų matavimo tikslumui, metodus, kuriais būtų galima sumažinti paklaidas. Tyrimo gale, programiniu paketu *Matlab Simulink*, kuriamas matematinis - dinaminis sklandytuvo modelis.

Darbo pradžioje aptariami standartiniai matuokliai, *alfa* ir *beta* kampų matavimui: virvutė, matuoklis su mentele ir vamzdelio tipo daviklis. Matuokliai palyginami, apibendrinami jų privalumai bei trūkumai.

Nagrinėjamos sistemos, kurių veikimas priklauso nuo atakos kampo: įspėjimo apie smuką sistema, inercinė atakos ir slydimo kampo matavimo sistema, kuri gali būti naudojama duomenų korekcijai. Taip pat aprašomi kampų matavimo metodai naudojant kombinuotus atakos – slydimo kampo matuoklius ir kai kampai matuojami be standartinių daviklių.

Tiriami veiksniai, darantys įtaką sklandytuvų atakos ir slydimo kampų matavimų tikslumui. Nagrinėjami įvairių tipų davikliai bei jų charakteristikos: oro klampumo, spūdumo ir pilnutinio slėgio gradiento poveikis matavimo tikslumui, dviejų ir trijų matmenų davikliai.

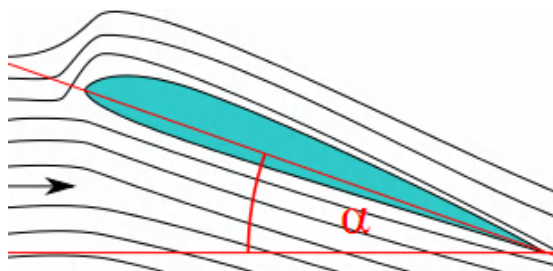
Paskutiniame etape programiniu paketu *Matlab Simulink* kuriamas matematinis dinaminis sklandytuvo modelis. Sukurtas modelis skaičiuoja sklandytuvo atakos ir slydimo kampus pagal nustatytą skrydžio trajektoriją ir šoninį vėją. Modelio veikimui parodyti simuliuojami keli skrydžio variantai su skirtingomis skrydžio trajektorijomis ir skirtingais vėjo greičiais bei kryptimis.

Magistrinio **darbo tikslas** – sukurti matematinį sklandytuvo modelį, gautus rezultatus teoriškai aptarti. Modelio užbaigimui reikia atlikti realius bandymus: ant sklandytuvo montuoti atakos ir slydimo kampo daviklius, matuoti kampus ir juos sulyginti su matematinio sklandytuvo modelio duomenimis.

1. ATAKOS IR SLYDIMO KAMPO MATAVIMO METODŲ IR MATUOKLIŲ APŽVALGA

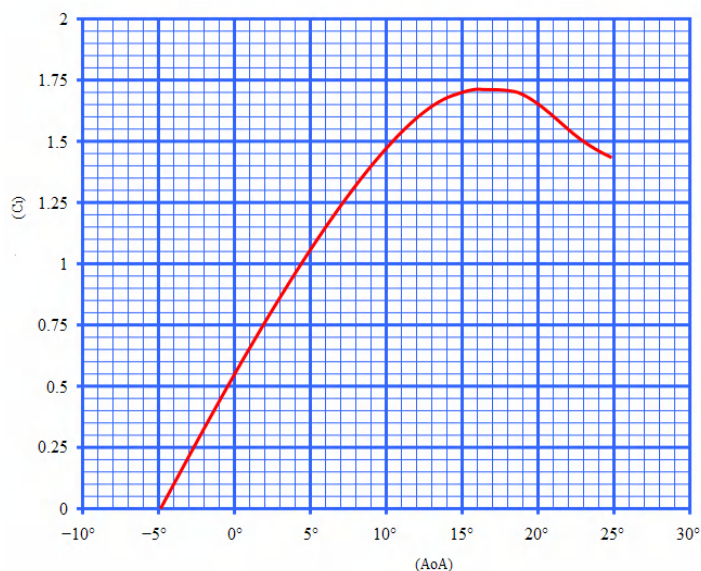
1.1 Atakos ir slydimo kampų samprata

Atakos kampas. Atakos kampas (*angl.* Angle Of Attack – AOA) dar žymimas graikiška raide α – terminas, naudojamas skysčių dinamikoje, apibūdinti kampą tarp sparno stygos ir tarp vektoriaus, apibūdinančio sparno judėjimą oro srauto atžvilgiu (1 pav.)



1 pav. Sparno atakos kampas

Viena iš pagrindinių sparno charakteristikų – kilimo koeficientas C_L priklauso nuo atakos kampo. Atakos kampo didinimas įtakoja kilimo koeficiento didėjimą iki didžiausios reikšmės, kurią viršijus keliamosios jėgos koeficientas ima mažėti. Pasiekus didžiausią sparno atakos kampą, oro srautas, aptekantis viršutinę sparno dalį, atitrūksta nuo sparno. Tai įtakoja staigų C_L mažėjimą. 2 pav. pavaizduota kreivė, apibūdinanti sparno su nesimetriniu profiliu keliamosios jėgos koeficiento priklausomybę nuo atakos kampo.



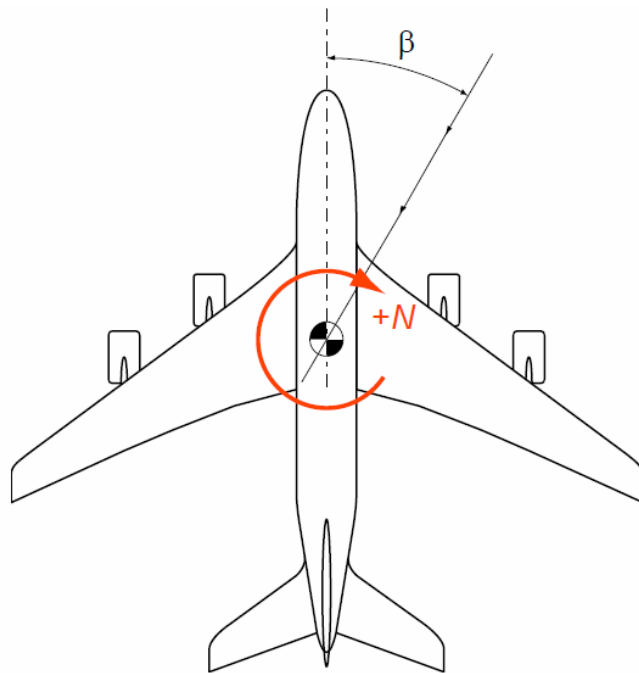
2 pav. Nesimetrinio profilio sparno keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo

Simetrinio profilio sparno keliamosios jėgos koeficientas lygus 0, kai atakos kampas yra 0° . Nesimetrinio profilio sparno $C_L > 0$, kai $\alpha = 0$.

Kritinis atakos kampas. Kritinis atakos kampas – tai kampas, ties kuriuo keliamosios jėgos koeficientas įgyja didžiausią reikšmę. Jis taip pat vadinamas smukos atakos kampu. Kai $\alpha < \alpha_{\text{kritinis}}$, didėjant *alfa* kampui, C_L didėja. Tuo pačiu metu, didėjant atakos kampui, oras pradeda ne taip tolygiai aptekėti viršutinę sparno pusę ir ima pamažu nuo jo atitrūkti. Kylant α , taškas ties kuriuo atitrūksta oro srautas, artėja prie priekinės sparno briaunos.

Kai $\alpha < \alpha_{\text{kritinis}}$, sakoma, kad orlaivis pereina į smuką. Greitis, ties kuriuo atsiranda smuka, priklauso nuo svorio, pokrypio kampo, masės centro padėties ir kitų faktorių. Dažniausiai kritinis atakos kampas būna 15° .

Slydimo kampas. Orlaivio slydimo kampas (*angl.* Angle Of Sideslip) dar žymimas graikiška raide β – tarp srauto krypties ir simetrijos plokštumos susidaręs kampas, kai lėktuvo skrydžio kryptis nesutampa su jo simetrijos plokštuma. Slydimo kampas yra teigiamas, kai oro srautas lėktuvą apteka iš dešinės (3 pav.).

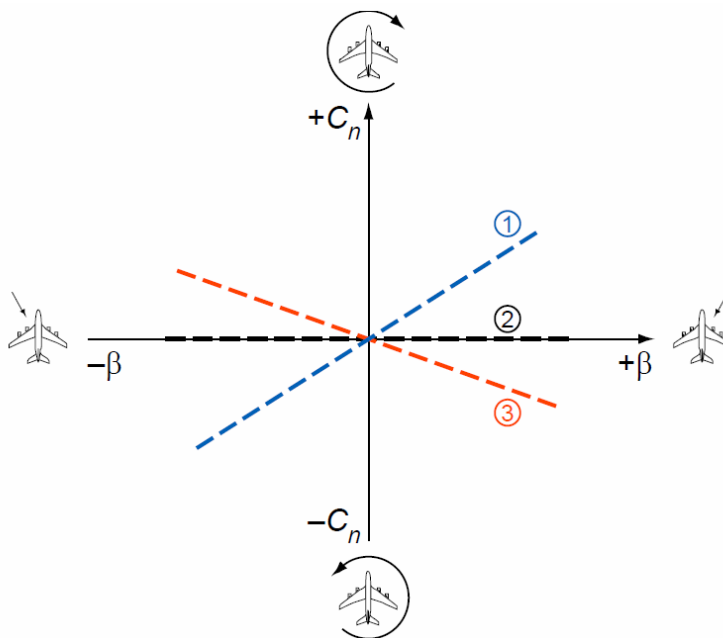


3 pav. Orlaivio šoninio slydimo kampas β [1]

Kai oro srautas lėktuvą apteka slysdamas, atsiranda krypties momentas vertikaliosios ašies atžvilgiu N (3 pav.). Šis momentas yra teigiamas, kai stengiamasi lėktuvo nosį pasukti dešinėn. Krypties momento koeficientas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$C_n = \frac{N}{q \times S \times b} ; \quad (1)$$

čia q – dinaminis slėgis; S – sparno plotas; b – sparno mostas.



4 pav. Krypties momento koeficiento priklausomybė nuo slydimo kampo: 1 – stabilus; 2 – neutralus; 3 – nestabilus [1]

4 pav. parodytas teigiamas slydimo kampas ir teigiamas krypties momentas. Jeigu veikiamas momento lėktuvas pasisuks dešinėn, slydimo kampas sumažės. Vadinasi, kad lėktuvas būtų stabilus pagal kryptį, reikia, kad, atsiradus teigiamam slydimo kampui, susidarytų teigiamas krypties momento koeficientas ir kad, atsiradus neigiamam slydimo kampui, susidarytų neigiamas krypties momento koeficientas.

Grafiko $C_n(\beta)$ aprašymas. 4 pav. parodyti trys krypties momento koeficiento priklausomybės nuo slydimo kampo variantai. Lėktuvo statinį krypties stabilumą lemia kreivės $C_n(\beta)$ polinkis. Kai polinkis teigiamas, t. y. kai, didėjant slydimo kampui, didėja ir krypties momento koeficientas, lėktuvas yra statiškai stabilus krypties atžvilgiu [1].

Pagrindinė suktuko atsiradimo priežastis – virškritinis atakos kampas. Slydimo kampas padidina tikimybę prasidėti suktukui. Kai nuo vieno sparno srauto atitrūkimas yra didesnis, to sparno keliamoji jėga sumažėja, padidėja pasipriešinimas ir jis pradeda leistis. Prasideda autorotacija [1].

1.2 Atakos ir slydimo kampų matavimas virvute

Sklandytuvo atakos kampas nesunkiai išmatuojamas paprasčiausia virvute. Ji turi būti maždaug 30 cm ilgio ir pritvirtinta kairėje gaubto pusėje, maždaug 5 cm nuo gaubto apatinės briaunos. Jei virvutė yra geriausio kilimo/pasipriešinimo (*angl.* Lift/Drag – L/D) ribose, tada ji

žymi gana tikslią informaciją apie atakos kampą kilimo, pasinaudojant termiku ir išvilkimo gerve, atvejais. Slydimo kampo matavimas taip pat gali būti atliekamas naudojantis virvute, tik ji turi būti pritvirtinta gaubto viršutinėje dalyje, pilotui matomoje vietoje

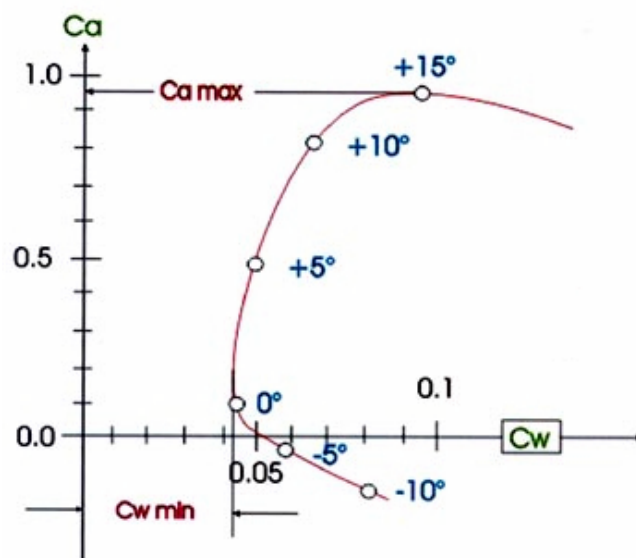
Privalumai. Virvutė visada rodo esamą atakos kampą, įvertinant tokius faktorius kaip greitį, keliamąją jėgą, pagreičius manevruojant ir gūsius. Jeigu pažymėtos visos kritinės atakos kampų ribos, ties kuriomis oro srautas atitrūksta nuo sparno, sklandytuvo pilotas turi pakankamai gerą įspėjimo apie smuką sistemą.

Virvutės ypatybės:

- Apsaugo nuo orlaivio nukritimo
- Gali pagerinti skrydžio kokybę
- Gali parodyti piloto klaidas

Šoninės juostelės (*angl. Side String*) funkcija. Šoninė juostelė – tai virvutė, pritvirtinta ant gaubto šoninės dalies ir rodanti esamą oro srauto kampą. Tai – ne kas kita, o atakos kampo daviklis. Atakos kampas gali nuolatos kisti dėl vidinių priežasčių (piloto veiksmai) arba išorinių faktorių, pavyzdžiui, vertikalūs ir horizontalūs oro masių judėjimai. Orlaivio pilotavimas yra pastovi valdymo kilpa tarp vidinių ir išorinių veiksnių, išlaikant normalų orlaivio skridimą. Tai tinka visoms orlaivio skrydžio būsenoms: tiesus tolygus skrydis, manevras, paleidimas gervės pagalba, tūpimas, esant įvairioms sparno apkrovoms ir aukščiams. Taip pat tai galioja tais atvejais, kai sklandytuvas skrenda per lėtai arba per greitai.

Normalus oro srauto kampas, išmatuotas tarp sparno stygos ir oro srauto krypties, skaitomas ribose tarp $+15^{\circ}$ ir -5° (5 pav.). Orlaiviui skrendant aukštyne ratais (*angl. Inverted flight*) diapazonas padidėja iki -10° .



5 pav. Kritiniai sklandytuvo atakos kampai [2]

Šoninė juostelė tiekia informaciją apie esamą orlaivio situaciją. Jei pilotas valdys sklandytuvą taip, kad atakos kampas neviršytų kritinių reikšmių – orlaiviui nekils pavojus nukristi. Suteikiama informacija, kurią pilotas turi interpretuoti ir imtis atitinkamų veiksmų. Toks *alfa* ir *beta* kampų matavimo metodas naudojamas tik mažuose orlaiviuose: sklandytuvuose, skraidyklėse.



6 pav. Šoninės juostelės vaizdas [2]



7 pav. Šoninį sklandytuvo slydimą rodanti juostelė [2]

1.3 *Fliugerinis* atakos kampo daviklis

Atakos kampo matavimas naudojant daviklį su mentele yra dažniausiai pasitaikantis *alfa* kampo matavimo būdas. Pagrindinė tokio daviklio dalis yra vėjarodis - mentelė, turinti simetrinį aerodinaminį profilį (8 pav.). Mentelė visada lygiuojasi su ją aptekančiu oro srautu. Tokiame daviklyje generuojamas elektrinis signalas, atitinkantis mentelės padėtį, o kartu ir orlaivio atakos kampą. Dėl to, kad fliugerinis daviklis montuojamas ant orlaivio fiuzeliažo, jis matuoja vietinį atakos kampą, o ne tikrąjį. Kampai išmatuoti matuoklio, sumontuotu orlaivio priekyje, yra įtakojami oro srauto iškraipymų (*angl.* Up wash effect), kai iškiša sudaro kampą su oro srautu. Taip pat matavimo tikslumui įtakos turi mentelės gamybos netobulumas.



8 pav. Atakos kampo matuoklis su vėjarodžiu – mentele [3]

Įvairių aptartų veiksnių įtaką atakos kampo matavimo tikslumui galima sumažinti kalibruojant matavimo prietaisą vėjo tunelyje. Kalibravimas gali būti atliekamas ir skrydžio metu, tačiau tokiu atveju reikalinga antra atakos kampo matavimo sistema, pagal kurią kalibruojamas atakos kampo matuoklis. Tokiame daviklyje mentelės padėties transformacijai į elektrinį signalą naudojamas rotorinis transformatorius (9 pav.), potenciometas. Transformatorius generuoja mentelės kampui proporcingą sinusinį arba kosinusinį signalą. Tokį daviklį naudojat didesniuose orlaiviuose, skrendančiuose dideliuose aukščiuose ir dideliais greičiais, naudojamas mentelės šildymas, siekiant išvengti mentelės apledėjimo.



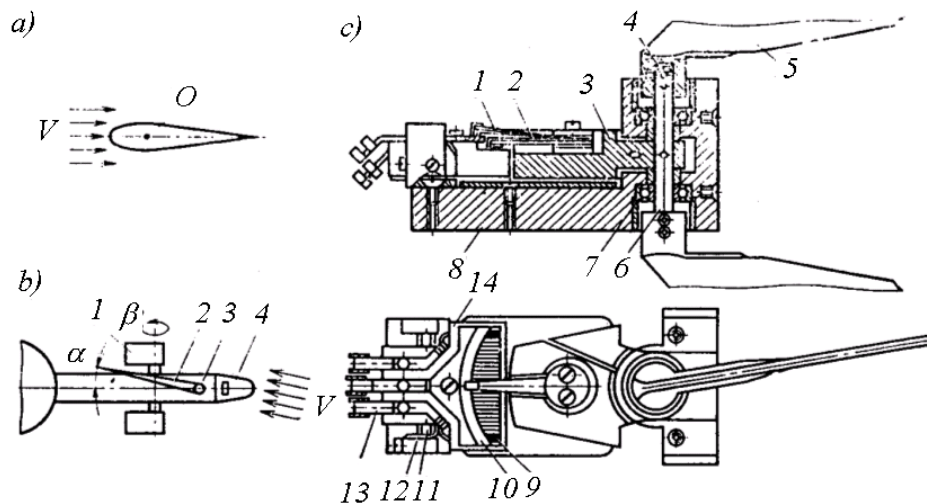
9 pav. Rotorinis transformatorius

Matuoklio veikimas. Vėjarodžiui nukrypstant nuo krypties, sutampančios su oro srautu (atsiradus kampams α ir β), kampinis vėjarodžio nuokrypis potenciometru keičiamas į elektrinį signalą. Vėjarodį nukreipiantis aerodinaminis momentas:

$$M_f = m_a S_f b \frac{\rho v^2}{2}, \quad (2)$$

Kur m_a – koeficientas, priklausantis nuo kampo α arba β ; S_f – vėjarodžio sparnų plotas; b – stygos ilgis (vėjarodžio stygos ilgis – keliamojo paviršiaus profilio styga).

Nukreipiančio aerodinaminio momento M_f dydis parenkamas iš sąlygos $M_f \gg M_{tr}$, kur M_{tr} – trinties jėgų vėjarodžio sukimosi ašyse ir potenciometro šliaužiklio su apvija suminis momentas. Kintamieji parametrai – vėjarodžio plotas S_f ir stygos ilgis b .



10 pav. Vėjarodžio kampų α ir β daviklis:
a – vėjarodis; b – išorinis daviklio vaizdas; c – daviklio konstrukcinė schema [4]

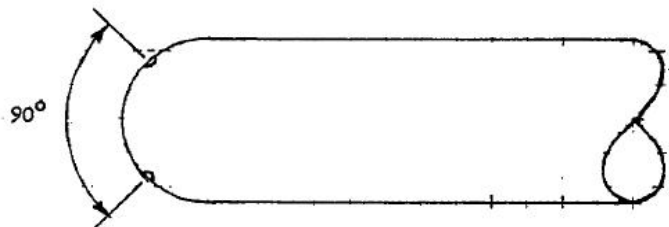
Atakos ir slydimo kampų daviklio, sutapdinto su oro slėgio imtuvu 4, schema pateikta 10 b pav. Daviklį sudaro du laisvai erdvėje besiorientuojantys poriniai vėjarodžiai – 1 ir 2, kurių sukimosi ašys pritvirtintos prie vamzdžio 3. Vėjarodžių 1 pasisukimo kampas vamzdžio 3 atžvilgiu proporcingas slydimo kampui, o vėjarodžių 2 pasisukimo kampas – atakos kampui. Vėjarodžių ašių posūkis persiduoda potenciometrų šliaužikiams, kurių padėtį, proporcingą kampams α ir β , elektrinio signalo pavidalu perduoda šliaužiklis. Potenciometrai įmontuoti vamzdžio 3 korpuso viduje.

Vieno iš galimų atakos (slydimo) kampų daviklio variantų konstrukcinė schema pateikta 10 c pav. Vėjarodžiai 5 tvirtinami vienoje plokštumoje ant ašies 6 kaiščiais 4 ir subalansuojami atsvaru 3, standžiai pritvirtintu ant ašies 6. Ašis 6 sukasi guoliuose 7, įpresuotuose pagrinde 8. Atsvaro 3 įpjovoje įtvirtintas šliaužiklį 1 ir keturių laikiklių 2 mazgas. Potenciometras 9 ir kontaktinė plokštelė 10 pritvirtinti ant kaladėlės 14. Daviklis (potenciometrų padėtis šliaužiklių atžvilgiu) reguliuojamas varžtu 11, kuris užfiksuojamas spyruokle 12. Potenciometro maitinimas prijungiamas kontaktais 13. Prie atakos (slydimo) kampo daviklio pagrindo pritvirtintas apšildymo elementas.

Atakos ir slydimo kampų davikliams būdingos vadinamosios prietaiso paklaidos, kurias pagrindinai lemia trinties jėgos kontaktinėse porose, elektrinių matavimo grandinių ir vėjarodžių gamybiniai netikslumai [4].

1.4 Vamzdelio tipo atakos ir slydimo kampo matuokliai

Atakos ir slydimo kampų matavimams galima naudoti vamzdelio tipo daviklius, kitaip dar vadinamus *Pitoto* vamzdeliu (11 pav.). Tokio tipo matuoklis – vamzdelis, su priekinėje dalyje padarytomis kiaurymėmis. Atakos kampo matavimui daromos dvi kiaurymės vertikaloje ašyje, slydimo kampo – dvi kiaurymės horizontalioje plokštumoje.



11 pav. Vamzdelio tipo daviklis ir jo vaizdas iš šono [5]

Tokio tipo prietaiso kampams matuoti veikimas pagrįstas skirtuminio slėgio matavimu. Orlaiviui skrendant tiesiai, kai α ir β kampų reikšmės lygios 0, slėgis visose keturiose kiaurymėse yra vienodas. Kai atakos kampas įgyja tam tikrą reikšmę, nelygią nuliui, vertikaliai išdėstytose kiaurymėse atsiranda slėgių skirtumas. Kuo atakos kampas didesnis, tuo didesnis slėgių skirtumas. Pagal slėgių skirtumą apskaičiuojamas atakos kampas. Analogiškas procesas vyksta esant slydimo kampui, tik slėgių skirtumas susidaro horizontaliai išdėstytose kiaurymėse. Oro slėgis verčiamas į elektrinį signalą, kur jis yra toliau apdorojamas. Slėgio vertimui į elektrinį signalą naudojami slėgio jutikliai. Jie gali būti montuojami pačiame *Pitoto* vamzdyje, arba gali būti už vamzdelio ribų. Pastaruoju atveju slėgis į daviklius perduodamas vamzdeliais arba žarnelėmis.

Atakos – slydimo kampo matuoklis gali būti sumontuotas tiek ant fiuzeliažo, tiek ant sparno, apatinėje jo dalyje. Tokiu atveju matuojamas tikrasis sparno atakos kampas, kadangi prie fiuzeliažo, kaip minėta 1.3 skyriuje, oro srautas yra iškraipomas ir skiriasi nuo srauto, patekančio į sparną. Esant būtinybei naudojamas daviklio šildymas. Tokį daviklį galima laikyti universaliu, nes jį patobulinus galima matuoti ne tik atakos ir slydimo kampus, bet ir greitį, aukštį.

1.5 Kombinuoti α ir β kampų davikliai

Kartais α ir β kampų matavimams apjungiami davikliai, aptarti 2.2 ir 2.3 skyriuose. Kombinuoto daviklio, kai naudojamos du vėjarodžiai – mentelės, pavyzdys pateiktas 12 pav. Tokio tipo davikliuose gali būti naudojami du fliugeriniai davikliai: vienas orientuotas horizontaliai, kitas vertikaliai. Taip galima matuoti ir atakos ir slydimo kampus vienu metu.



12 pav. Atakos – slydimo kampo matuoklis

1.6 Atakos ir slydimo kampo indikatoriai

Kolkas nėra įteisinta jog atakos ir slydimo kampų indikatoriai yra privalomi. *Alfa* ir *beta* kampų duomenys gali būti naudojami kitų sistemų, pvz. perspėjimo apie smuką sistemos, o kampų reikšmės į kabinos prietaisus nesiunčiamos. Kalbant apie didelius orlaivius, kur didžiąją skrydžio dalį piloto vaidmenį atlieka elektroninės skrydžio sistemos, informacija apie α ir β kampus pilotui nelabai reikalinga. Visai kita situacija su mažais orlaiviais, pavyzdžiui, sklandytuvais. Sklandytuvas neturi variklio (kai kuriais atvejais montuojami varikliai), todėl norint kuo ilgiau išlaikyti sklandytuvą ore, būtina žinoti ir palaikyti tinkamą atakos kampą.

Atakos kampo indikacija gali būti integruota į kitus kabinos prietaisus (13 pav.)

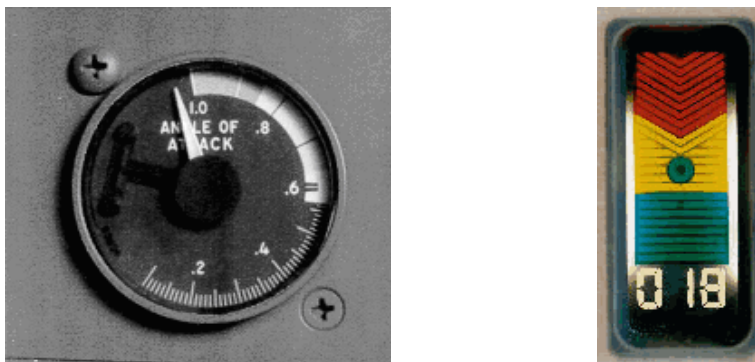


13 pav. Integruota atakos kampo indikacija

Atakos kampo indikatorius padalintas į tris skirtingų spalvų zonas:

- *Žalia* zona – „saugi“ zona, atakos kampas neviršija leistinų ribų.
- *Geltona* zona – išpėjimo zona. Artėjama prie kritinio atakos kampo
- *Raudona* zona – smukos zona. Atakos kampas viršija didžiausią leistiną reikšmę

Taip pat, gali būti naudojami atskiri atakos ir slydimo kampo indikatoriai (14 pav.).



14 pav. Atakos kampo indikatoriai

1.7 Atakos kampo sistemos

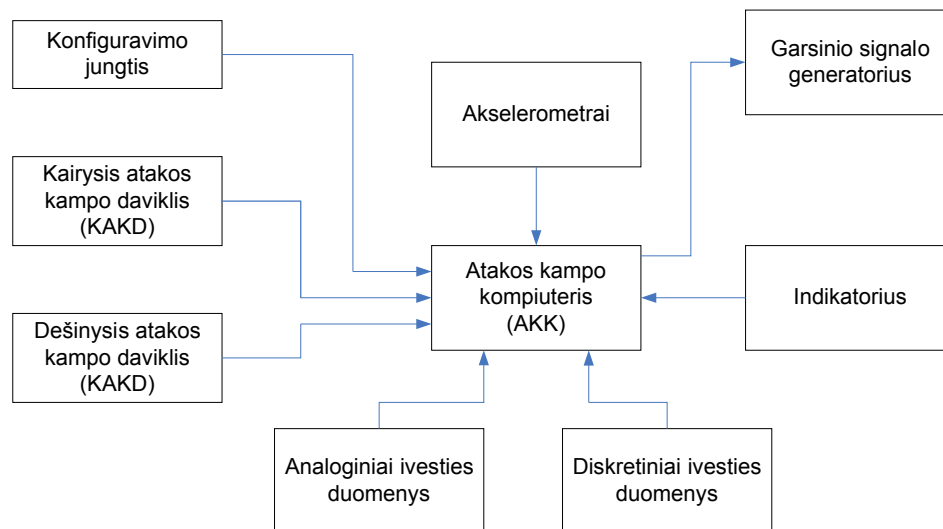
1.7.1 Inercinių sistemų panaudojimas atakos kampo matavimui – korekcijai

Orlaivio atakos kampas gali būti išmatuotas naudojant ne tik tiesiogiai tam skirtus daviklius, bet ir panaudojant inercinę sistemą. Naudojant akselerometrus galima išmatuoti atakos bei slydimo kampus, kurie naudojami kampų reikšmėms, gautoms iš standartinių daviklių, korekcijai. Taip pat tokia sistema gali dirbti kaip rezervinė tuo atveju, kai sugenda atakos kampo daviklis.

Sistemos veikimo principas. Šis metodas parodo inercinės sistemos navigacinės sistemos daviklių panaudojimą apytikriam atakos kampo (α) ir šoninio slydimo kampo (β) apskaičiavimui. Inerciniai davikliai sudaryti iš vieno ar daugiau akselerometrų, kurie generuoja signalus kampų α ir β apskaičiavimui. Pastarieji signalai gali būti apjungti su įprastiniais davikliais, kad pagerintų pastarųjų daviklių signalų dažnines charakteristikas, naudojant filtrus. Signalai gali būti pagerinti generuojant korekcijos signalus, pavyzdžiui, tikslinant atakos kampo signalus, panaikinant šoninio slydimo kampo efektus.

15 pav. pavaizduota atakos kampo/perspėjimo apie smuką sistemos blokinė diagrama. Sistema naudoja du atakos kampo daviklius, sumontuotus kairėje ir dešinėje orlaivio pusėse (KAKD ir DAKD), kurių signalai siunčiami į atakos kampo skaičiavimo kompiuterį. Akselerometrai siunčia į procesorių signalus apie šoninį (N_y) ir normalinį (N_z) pagreičius. Šoninio pagreičio signalas (N_y) naudojamas šoninio slydimo kampo apskaičiavimui, o normalinio pagreičio (N_z) – atakos kampo skaičiavimui. Vieno akselerometro gedimo atveju, atakos kampo kompiuteris gali ir toliau atlikti skaičiavimus, priimdamas (N_z) signalą iš dviejų ašių akselerometro. Taigi, iš pagreičių signalų, atakos kampo kompiuteris (AKK) gali apskaičiuoti šoninio slydimo kampą ir tokiu būdu patikslintą orlaivio atakos kampą.

Kaip matyti iš schemos, AKK naudoja ne tik pagreičių daviklius, bet ir kitus analoginius bei diskretinius signalus. Tai gali būti, pavyzdžiui, antrinių valdymo plokštumų (užsparnių) padėtis. AKK nepertraukiamai siunčia duomenis į kabinos prietaisus apie esamą atakos kampą. Papildomai, AKK generuoja perspėjimo apie smuką signalus ir siunčia juos į garsinio signalo generatorių, o šis savo ruožtu garsinį toną į vidaus ryšio sistemą.



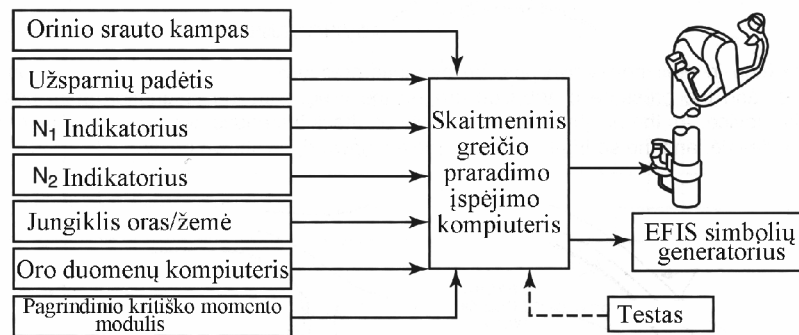
15 pav. Atakos kampo/įspėjimo apie smuką sistemos blokinė diagrama

Daugiausia naudojami dviejų tipų atakos kampo davikliai: flugeriniai matuokliai su mentele, ir vamzdelio tipo davikliai, kampą nustatantys pagal skirtuminį slėgį.

1.7.2 Perspėjimo apie greičio praradimą sistema

Kaip jau buvo minėta, atakos kampo davikliais gali naudotis kai kurios orlaivio sistemos. Viena iš tokių yra greičio praradimo įspėjimo sistema, kuri aktyvuojama atakos kampo arba *Alfa* davikliais. Daviklis tvirtinamas vienoje arba kitoje orlaivio sklandmens pusėje, netoli orlaivio nosies ir reaguoja keisdamas padėtį, priklausomai nuo orlaivio atakos kampo kitimo, kintant oriniam greičiui. Daviklis turi tam tikrą aerodinaminio sparnelio paviršiaus pavidalo formą, keičiančio savo padėtį priklausomai nuo aptekančio orinio srauto krypties. Kada daviklio fiksuojančios jungties padėtis orinio srauto atžvilgiu pasiekia kampinę 12–14° ribą, generuojamas elektrinis signalas ir aktyvuojamas greičio praradimo įspėjimas. Daviklis, be to, pašildomas, kad liktų veikiantis visais atžvilgiais skrydžio metu.

Daviklio fiksuojanti jungtis per sukimosi centrą susieta su skaitmenine orinio greičio praradimo įspėjamąja sistema, kurios sandara pavaizduota 16 pav.



16 pav. Skaitmeninės orinio greičio praradimo įspėjamosios sistemos sandara [6]

Dažniausiai sistemoje yra du nepriklausomi skaitmeniniai kompiuteriai, kurie apskaičiuoja greičio praradimą, atitinkantį atakos kampų reikšmėms, užsparnių padėčiai ir traukai. Kompiuteriai priima signalus iš atakos kampo daviklio (*Alfa daviklio*) užsparnių padėties daviklio, indikatorių N_1 ir N_2 , jungiklio oras/žemė, oro duomenų kompiuterio ir pagrindinės kritiškos padėties modulis.

Įspėjamoji greičio praradimo sistema turi savikontrolės galimybes, leidžiančias imituoti kritiškas atakos kampo reikšmes, sukeliančias orinio greičio praradimo situacijas ir patikrinti su tuo susietas sistemos įspėjamąsias reakcijas.

Atakos kampo sistema sudaryta iš sekančių komponentų:

- a) *Daviklių*. Vienas ar daugiau daviklių, sumontuoti taip, kad juos veiktų aptekantis oro srautas. Yra du bendri daviklių tipai:
 - 1) *Mentelės* (angl. Vane) veikia kaip vėjarodis, susilygiuodama su ją aptekančiu oro srautu.
 - 2) *Zondo – vamzdelio tipo* (angl. Probe) matuoja skirtuminį oro srauto slėgį.
- b) *Keitiklio*. Abiejų tipų davikliai, reaguodami į oro srautą bei jo pokyčius, generuoja signalą, kuris į kabinos prietaisą siunčiamas arba tiesiogiai arba per oro duomenų sistemą. Keitiklis gali būti įmontuotas pačiame daviklyje arba atskirai.
- c) *Kabinos indikatorius*. Naudojami skirtingi atakos kampo atvaizdavimo įrenginiai. Informacija gali būti pateikiama kampais, sutartiniais vienetais arba simboliais.
- d) *Įspėjimo apie smuką aparatūros* (angl. Stall-Warning devices). Sistema apjungia papildomus elektrinius įrenginius, tokius kaip vairalazdės vibratorius ir/ar garsinius perspėjamuosius signalus, kurie yra aktyvuojami jei pilotas nesiimta veiksmų, kad išvestų orlaivį iš smukos [6].

1.8 Skyriaus apibendrinimas

Skyriuje apžvelgti pagrindiniai orlaivių atakos ir slydimo kampų matavimo metodai. Buvo išsiaiškinta, kad naudojami du pagrindiniai būdai *alfa* ir *beta* kampams matuoti. Naudojamas arba slėginis vamzdelis su kiaurymėmis jo galuose, arba daviklis su vėjarodžio tipo mentele, kuri pasisuka taip, kad būtų lygiagreti su mentele aptekančiu oro srautu. Taip pat yra nemažai patentuotų, tačiau praktikoje naudojamų atakos ir slydimo kampo daviklių, kampų matavimo metodų. Yra įvairiausių konstrukcijų kombinuotų daviklių, kurie be atakos kampo matuoja šoninio slydimo kampą, oro temperatūrą, orinį greitį. Dažniausiai tai būna vamzdelio tipo orinio greičio davikliai, su ant jo sumontuotais kitais davikliais.

Daviklių palyginimas:

- Vienos mentelės fliugeriniu davikliu galima matuoti tik atakos arba tik slydimo kampą. Abiejų kampų matavimui tokiu davikliu, turi būti antra mentelė, besisukiojanti vertikalioje plokštumoje.
- Atakos – slydimo kampo matuoklyje su mentele yra judančių dalių. Dėl to mažėja jo patikimumas.
- Vienu vamzdelio tipo davikliu galima matuoti atakos ir slydimo kampus.
- Vamzdelio tipo daviklio konstrukcija paprastesnė – nėra judančių dalių.
- Atakos ir slydimo kampų matuokliai – virvutės yra patys paprasčiausi kampų matavimo įrenginiai. Nereikalauja papildomos priežiūros. Jų trūkumas – netikslūs matavimai.

Aptartos sistemos, kuriose gali būti panaudota arba yra naudojama informacija apie atakos kampą. Tokios sistemos yra išpėjimo apie greičio praradimą, išpėjimo apie smuką sistemos. Taip pat atakos kampo sistema gali būti apjungta su inercine navigacine sistema. Tokiu būdu sistemos papildo viena kitą. Naudodamasis inercinės sistemos duomenimis, atakos kampą skaičiuojantis kompiuteris, gali koreguoti iš kampo daviklių gautus duomenis, juos tikslinti.

Aprašyti atakos kampo indikatoriai. Indikatoriai gali būti su apvaliu ciferblatu, kuris yra sugraduotas konkrečiomis atakos kampo reikšmėmis, arba juostelinis, kurio skalė padalinta į tris skirtingų spalvų (žalia, geltona, raudona) padalas. Kai pastarojo indikatoriaus šliaužiklis yra ties žalia padala – atakos kampas yra leistinose ribose, geltona – atakos kampas artėja prie kritinio, raudona – atakos kampas kritinis, orlaivis pereina į smuką.

2. SKLANDYTUVO ATAKOS IR SLYDIMO KAMPŲ MATAVIMO YPATUMAI

2.1 Kombinuoti atakos ir slydimo kampo matuokliai

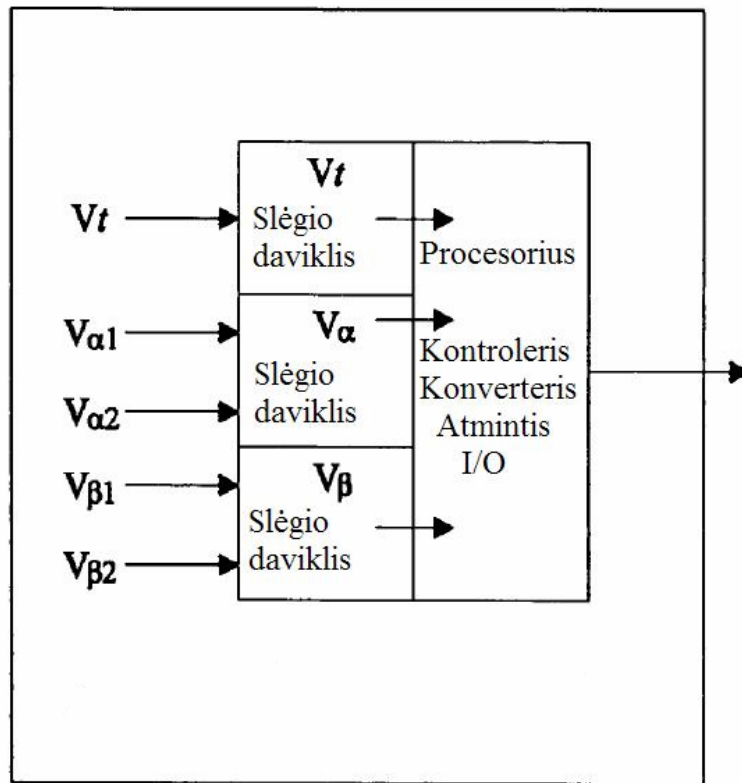
Išradėjo Steven H. Thomas pasiūlytas sistemos variantas, matuojantis orlaivio atakos ir slydimo kampus. Sistema susideda iš keleto daviklių, mažiausiai dviejų, kurie sumontuoti taip, kad galėtų reaguoti į oro srauto pokyčius aplink daviklius. Taip pat sistemos sudėtyje yra valdiklis, sukonfigūruotas priimti signalus iš daviklių ir nustatyti atakos bei slydimo kampus.

Atakos ir slydimo kampai yra parametrai, naudojami orlaivių, ginklų ir nepilotuojamų orlaivių skrydžio valdymui. Iš esmės yra du būdai, kaip išmatuoti atakos ir slydimo kampus. Pirmuoju metodu naudojami atskiri mechaniniai *alfa* ir *beta* kampų matuokliai, sumontuoti ant orlaivio fiuzeliažo. Antruoju atveju naudojami arba šeši tikslūs absoliutaus slėgio davikliai arba du tikslūs absoliutaus slėgio davikliai ir du skirtuminio slėgio davikliai.

Abu apibūdinti sprendimai *alfa* ir *beta* kampų matavimui yra gana brangūs. Abu variantai yra kompleksinės sistemos, todėl joms reikalingi tikslūs davikliai, tikslūs modeliavimo algoritmai ir kompleksinė kontrolerio programinė ir aparatinė įranga. Dėl aukštos kainos pastarosios sistemos per daug didelės ir sunkios ir todėl netinkamos mažesniems orlaiviams, tokiems kaip sklandytuvai ar bepiločiai orlaiviai.

Išradimo aprašymas. 17 pav. pavaizduota blokinė atakos ir slydimo kampų matavimo sistemos diagrama. Tiksliau sakant, sistema nustato AK ir SK naudodama tris mažus, lengvus ir pigius oro srauto daviklius. Be to, sistemos kaina yra žymiai mažesnė negu įprastus daviklius naudojančios AKS ir SKS sistemos.

Sistemoje taip pat yra procesorius, kuris priima duomenis apie oro srautus iš daviklių. Kartu su procesoriumi yra įmontuoti atmintis, ir/arba įėjimo/išėjimo valdiklis. Tai įgalina sistemą teikti atakos ir slydimo kampų reikšmes kitoms sistemoms, vaizduokliams.



17 pav. Blokinė atakos ir slydimo kampų matavimo sistemos schema [7]

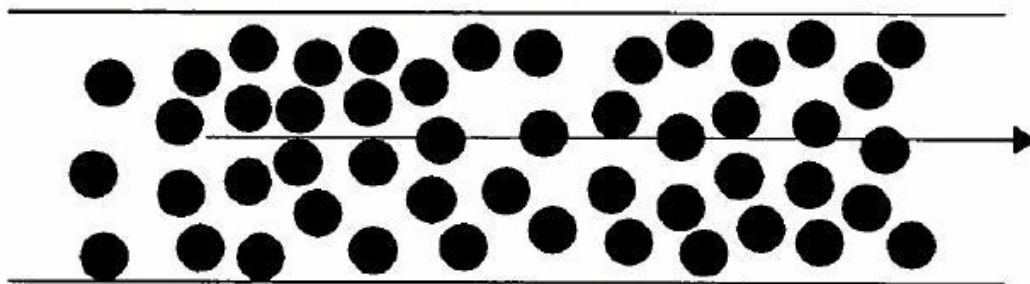
Pirmasis oro srauto daviklis (V_t) sistemoje yra skirtas nustatyti atakos kampą ir teikia informaciją apie skirtuminį oro srauto slėgį. Antrasis srauto daviklis (V_a) skirtas matuoti slydimo kampą ir taip pat reaguoja į skirtuminį oro srauto slėgį. Kaip matyti iš 17 pav. pateiktos schemos, duomenys apie diferencinį slėgį siunčiami į procesorių. Trečiasis oro srauto daviklis (V_β) yra sukonfigūruotas kaip pilnutinio orinio slėgio daviklis. Jutiklis tiekia informaciją, kuri leidžia panaikinti oro srauto nepastovumą į AOA ir AOS prievadus, kaip temperatūros ir slėgio funkciją. Procesorius atakos ir slydimo kampus skaičiuoja pagal šias lygybes:

$$AOA = \frac{V_{\alpha 1} - V_{\alpha 2}}{KV} \quad (3)$$

$$AOS = \frac{V_{\beta 1} - V_{\beta 2}}{KV} \quad (4)$$

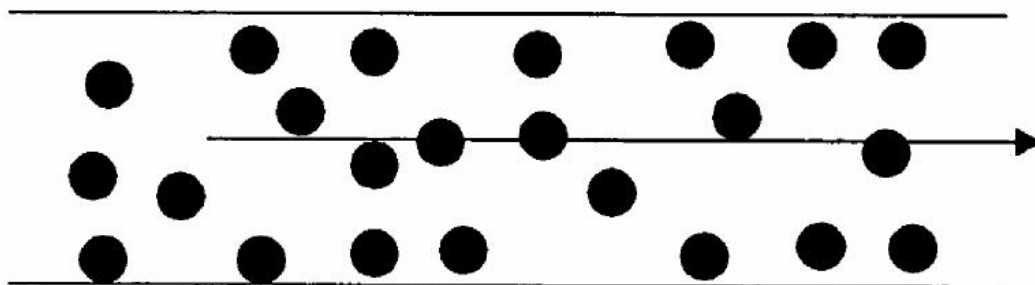
Verta paminėti, kad slėgio davikliai pagaminti taip, kad gali veikti atšiauriomis sąlygomis. Davikliai gali reaguoti į oro srautus, didesnius nei 30 g/cm^2 per vieną sekundę. Daviklių veikimo diapazonas yra 1000:1 (pavyzdžiui, davikliai gali fiksuoti srautą nuo $30 \text{ g/cm}^2/\text{s}$ iki $0,030 \text{ g/cm}^2/\text{s}$). Zondai yra dvikrypčiai. Tai reiškia, kad jie gali matuoti srautą dvejomis kryptimis.

Davikliai matuoja faktinį dujų srautą. Tikrasis dujų (oro) srautas yra varomas slėgių gradiento – srautui tekant iš didesnio į žemesnio slėgi sritį. Zondai matuoja oro masės srautą, kuris yra oro tankio funkcija, kai tuo tarpu tankis yra slėgio ir temperatūros funkcija. Apskritai davikliai yra temperatūriškai kompensuojami ir dėl to jų rodmenys nekinta kaip temperatūros funkcijos kintant aukščiui.



18 pav. Molekulių diagrama esant žemesnei temperatūrai ir didesniame slėgiui: oro srautas pastovus (g/s), tūrinis srautas sumažėjęs (cm³/s) [4]

18 paveiksle pateikta diagrama, iliustruojanti molekulių judėjimą mažesnėje temperatūroje arba didesniame slėgyje (tokios sąlygos susidaro mažame aukštyje). Siekiant išlaikyti oro srautą pastovų, tūrinis srautas kubiniais metrais per sekundę turi būti sumažintas



19 pav. Molekulių diagrama esant aukštesnei temperatūrai ir mažesniame slėgiui: oro srautas pastovus (g/s), tūrinis srautas padidėjęs (cm³/s) [4]

19 pav. matyti molekulių judėjimas aukštesnėje temperatūroje ir mažesniame slėgyje (tokios sąlygos susidaro didesniame aukštyje). Tam, kad išlaikytume oro srautą pastovų, tūrinis srautas turi būti padidintas.

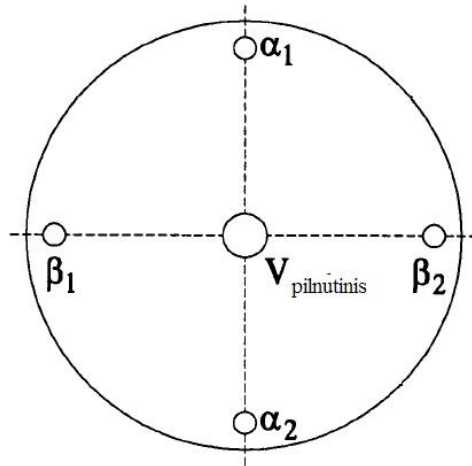
Pilnutinio srauto davikliai (3 vienetai) verčia slėgio reikšmes į oro slėgį panaudojant šią lygybę:

$$Q = \bar{m}nRT / mP; \quad (5)$$

kur pilnutinio srauto greitis $\bar{m}$ yra išmatuojamas. Kiti kintamieji: $n = 1$, $R = 82,1 \text{ cm}^3 \text{ atm/mol } ^\circ\text{K}$, m – oro masė gramais į molį, P – slėgis atmosferomis (pvz., aukščio funkcija), ir T – temperatūra kelvinais (pvz., aukščio ir aplinkos temperatūros funkcija).

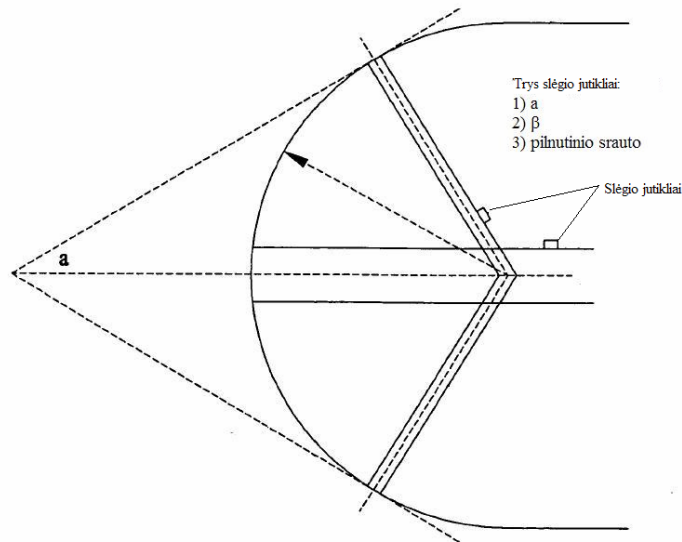
Ryšys tarp slėgio ir temperatūros:

$$T = (-0,00189 \times aukštis + 15) + 273,15; \quad (6)$$



20 pav. Sudėtinio slėgio daviklio vaizdas iš priekio [7]

20-ame pav. pavaizduotas slėgio daviklių išdėstymas ant zondo (pvz., pusrutulinio). Atakos kampo (AK) daviklių angos pažymėtos a_1 ir a_2 . Slydimo kampo (SK) daviklių prievadaai paveiksle pažymėti β_1 ir β_2 . Pilnutinio slėgio daviklio padėtis pažymėta $V_{pilnutinis}$.

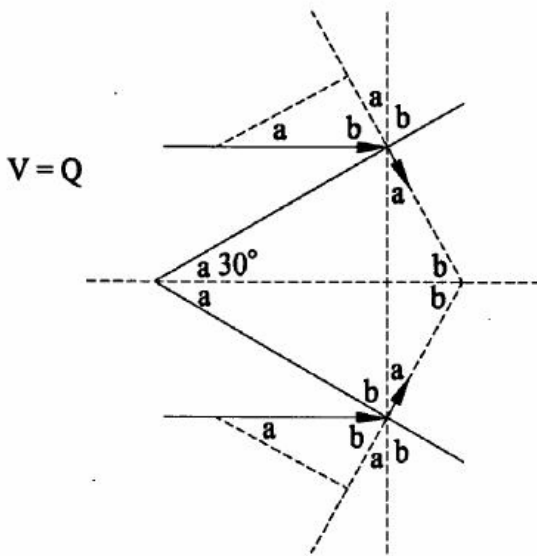


21 pav. Pusrutulinio zondo šoninis vaizdas [7]

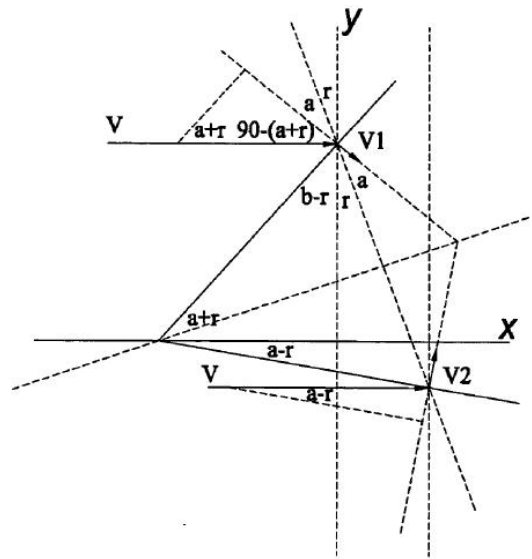
21 pav. pavaizduotas šoninis pusrutulinio zondo vaizdas. Jame pavaizduoti ertmės orui, atakos kampui, bei pilnutiniam slėgiui nustatyti.

Darant prievadus (pvz., a_1 , a_2 , β_1 ir β_2) tiksliai nustatytose vietose ant zondo paviršiaus, diferencinis oro srautas gali būti nustatytas sumontavus daviklius (21 pav.). Tuomet daviklių rodmenų skirtumas bus proporcingas orlaivio atakos ir slydimo kampams (atakos kampas proporcingas $Va_1 - Va_2$, o slydimo kampas proporcingas $V\beta_1 - V\beta_2$, kur V yra greitis).

22–ame paveiksle matyti oro srautų tekėjimo angomis kryptys, kai prievadai išdėstyti skirtingais kampais, kai atakos kampas lygus 0° . Kaip pavaizduota, AOA prievadai (pavyzdžiui, a_1 ir a_2 prievadai) yra išdėstyti 30° laipsnių kampu. Atakos kampui esant 0° laipsnių, $Va_1 = Va_2$, nes į kiekvieną prievadą patenka toks pat oro srautas. Kai orlaivis leidžiasi (atakos kampas neigiamas), tuomet Va_1 tampa didesnis negu Va_2 . Skirtumas didėja, didėjant oro srautui tekančiam į a_2 prievadą, ir skirtumas $Va_1 - Va_2$ yra proporcingas atakos kampui, kaip parodyta 23 paveiksle. Panašiai kaip ir atakos kampui, aprašytas veikimas tinka ir slydimo kampui, kai orlaivis suka į šoną su slydimo kampu. Esant slydimo kampui 0° laipsnių ($AOS = 0$), $V\beta_1 = V\beta_2$, nes vienodas oro srautas patenka į abu AOS prievadus. Orlaiviui sukant kairėn (neigiamas slydimo kampas), greitis $V\beta_1$ tampa didesnis negu $V\beta_2$. Oro srautų greičių skirtumas $V\beta_1 - V\beta_2$ proporcingas slydimo kampui.



22 pav. Oro srautų kryptys, kai $AOA = 0^\circ$ [7]



23 pav. Oro srautų kryptys, kai $AOA < 0^\circ$ [7]

Dydžių Va ir $V\beta$ kitimas kaip aukščio ir temperatūros funkcija gali būti eliminuotas panaudojant kitą srauto daviklį išmatuoti pilnutinį oro srautą $V_{pilnutinis}$ (20 ir 21 paveikslai) ir tada panaudojant radiometrinį matavimą. Orlaivio AOA ir AOS tuomet gaunami tiesiogiai panaudojant šias lygybes:

$$AOA = (Va_1 - Va_2) / kV_{pilnutinis} ; \quad (7)$$

$$AOS = (V\beta_1 - V\beta_2) / kV_{pilnutinis} ; \quad (8)$$

kur k yra kampas tarp atakos kampo prievadų, kampo tarp slydimo kampo prievadų ir $V_{pilnutinis}$ funkcija.

2.2 Atakos ir slydimo kampų matavimas be specialių daviklių

2010 metais išradėjas Alberto Chiesa pasiūlė būdą, kaip apskaičiuoti orlaivio atakos bei slydimo kampus.

Šis metodas apima atskirų valdymo plokštumų skaičių: matuojamas efektyvusis sukimosi apie išilginę, skersinę ir vertikalią ašis sukimosi greitis. Linijinis šio matavimo būdo modelis:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + L\delta y; \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (9)$$

kur u – vektorius, kuriame yra valdymo plokštumų skaičius, x – vektorius su apskaičiuotais atakos ir slydimo kampais, ir sukimosi apie tris ašis (išilginę, skersinę ir vertikalią) greičiais (*angl.* Roll, Pitch, Yaw), δy – paklaidos vektorius, į kurį įeina paklaidos tarp išmatuoto ir apskaičiuoto greičio, y – matavimo vektorius, kuriame yra apskaičiuoto greičio reikšmės, A , B , C , D – matricos apibūdinančios orlaivio judėjimą, L – grįžtamoji matrica. Atakos ir slydimo kampai randami naudojantis matematiniu modeliu.

Atakos ir slydimo kampai turėtų visada būti tarp atitinkamų maksimalių reikšmių, pavyzdžiui $\alpha = 10^\circ$ ir $\beta = 5^\circ$ civiliniams orlaiviams. Šių reikšmių viršijimas gali įtakoti orlaivio nestabilumą, tai gali būti neatitaisoma situacija.

Sutartinai *alfa* ir *beta* kampai yra apskaičiuojami pagal žinomus būdus, matuojant oro slėgį orlaivio išorėje. Slėgis išmatuojamas montuojant matuoklius orlaivio išorėje, ir žinomi kaip *Pitoto* vamzdeliai. Alternatyvus matavimo metodas – naudojant judamus daviklius – flugerinius matuoklius.

Naudojant *Pitoto* vamzdelius, jų perkaitimas, ar kitoks gedimas gali būti pastebimas pagal valdymo signalus. Naudojant flugerinius daviklius gedimai, mechaniniai pažeidimai pastebimi sunkiau. Mechaniniai matuoklio pažeidimai gali įtakoti matuojamų parametrų tikslumą.

Atsižvelgiant į aptartus trūkumus, norint padidinti patikimumą, montuojama daugiau daviklių, nei jų reikia matavimams atlikti. Dažniausiai tai būna 4–5 vienetai. Tai, žinoma, nulemia bendrą orlaivio kainą.

Alberto Chiesa pasiūlytas AOA ir AOS matavimo metodas nereikalauja slėgio matavimų, ir, aišku, daviklių sumontuotų ant orlaivio išorės.

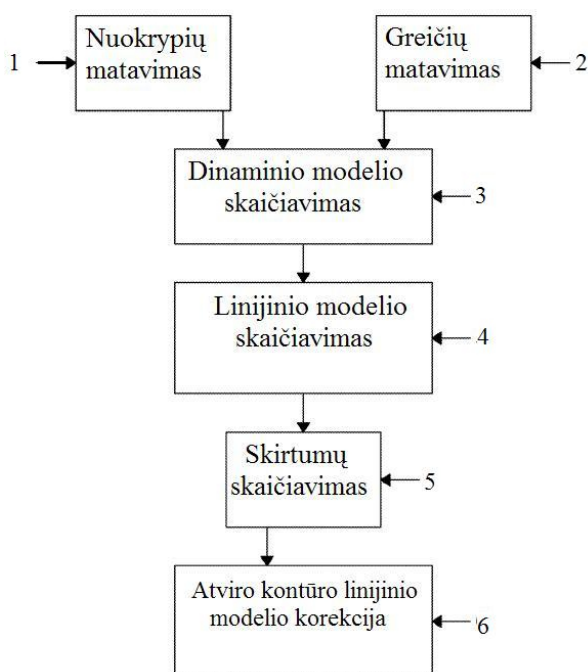
Trumpai tariant, jo metodas apima orlaivio modelio skaičiavimą. Modelis naudojamas atlikti atvirojo kontūro sistemos įvertinimą. Tačiau atviro kontūro sistema negali gauti tikrų

duomenų dėl trikdžių, parametrų netikslumo, ir nemodeliuojamų kintamųjų, tokių kaip vėjo greitis.

Vis dėlto, atvirojo kontūro sistema yra pataisoma panaudojant kontrolinį kontūrą, tiksliau sakant skaitmeninį valdymo filtrą, kuris užtikrina modelio ir išmatuotų davikliais kintamųjų sujungimą, taip eliminuojant išorinius trikdžius.

Atviro kontūro lygtis yra pakoreguojama kontrolinio kontūro reikšmėmis, kurios yra atvirkščiai proporcingos paklaidai, gaunamai dėl modelio ir išmatuotų kintamųjų nevienodumo.

Buvo nustatyta, kad jeigu realių matavimų rinkinys yra pakankamai tipinis, tuomet netgi dydžiai, kuriems nėra tiesioginių matavimų, atitinka realias reikšmes. Kampinių greičių matavimai yra pakankami, kad būtų galima atkurti atakos bei slydimo kampus, kurie nebuvo išmatuoti tiesiogiai. 24 paveiksle pateikta išradimą apibūdinanti struktūrinė veikimo schema.



24 pav. Struktūrinė veikimo schema [8]

Kaip žinoma, orlaivį sudaro daug valdymo plokštumų, pavyzdžiui, ant sparnų sumontuoti eleronai, ant uodegos – aukščio vairas ir posūkio vairas. Ramybės būsenoje pastarosios plokštumos yra susilygiavusios su atitinkamomis plokštumomis, atitinkamai: eleronai – su sparnais, aukščio vairas – su stabilizatoriumi, posūkio vairas – su vertikaliąja uodega. Toliau, aprašant išradimą, terminas „nuokrypis“ bus suprantamas kaip kampas, susidaręs tarp valdymo plokštumos ir atitinkamos plokštumos, ant kurios jis pritvirtintas.

24 pav. 1 žingsnyje išmatuojami valdymo plokštumų nuokrypiai (d_1 – eleronų nuokrypis, d_2 – aukščio vairo nuokrypis ir d_3 – posūkio vairo nuokrypis). Užsparnių, išdėstytų ant sparnų,

nuokryptai taip pat yra matuojami. Nuokryptai matuojami, pavyzdžiui, davikliais, išdėstytais tam tikrais atstumais nuo valdymų plokštumų, kurie siunčia signalus, atitinkančius nuokryptus.

2 žingsnyje matuojami inerciniai greičiai, kurie yra: efektyvusis posūkio greitis p_E , efektyvusis nuolydžio greitis q_E , ir efektyvusis pokrypio greitis r_E . Pastarieji greičiai atspindi orlaivio sukimąsi apie 3 pagrindines ašis: x, y ir z.

3 žingsnyje sukuriamas orlaivio judėjimo erdvėje dinaminis modelis (su šešiais laisvės laipsniais). Modelis kuriamas pagal gautus duomenis, orlaivį įdėjus į oro tunelį.

Kitame žingsnyje, nr. 4, iš dinaminio medelio gaunamas linijinis modelis. Linijinis modelis toliau naudojamas kaip atviro kontūro sistema (*angl.* Open-loop estimator). Pastarasis modelis aprašomas lygčių sistema (5).

Matricos A pavyzdys turistiniam lėktuvui, esančiame 2000 pėdų aukštyje ir skrendančiam 350 km/h greičiu:

$$\begin{pmatrix} \dot{a}_s \\ \dot{\beta}_s \\ \dot{p}_s \\ \dot{q}_s \\ \dot{r}_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2,629 & 0 & 0 & 0,95414 & 0 \\ 0 & 0,4154 & 0,03543 & 0 & -0,999 \\ 0 & -1,578 & -6,497 & 0 & 2,258 \\ -8,106 & 0 & 0 & -2,23 & 0 \\ 0 & 6,548 & -0,4943 & -0,8744 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_s \\ \beta_s \\ p_s \\ q_s \\ r_s \end{pmatrix}; \quad (8)$$

kurioje yra įvertintas vektorius x:

$$x = \begin{pmatrix} a_s \\ \beta_s \\ p_s \\ q_s \\ r_s \end{pmatrix}; \quad (9)$$

Kita matrica B atspindi valdymo plokštumų atlinkimo poveikį orlaivio būsenai ore. Matricos B pavyzdys sudarytas tokiomis pačiomis sąlygomis kaip ir matrica A (turistiniam orlaiviu, kurio aukštis 2000 pėdų, o greitis 350 km/h):

$$\begin{pmatrix} \dot{a}_s \\ \dot{\beta}_s \\ \dot{p}_s \\ \dot{q}_s \\ \dot{r}_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -0,1176 & 0 \\ 0,05399 & 0 & 0,0986 \\ 36,47 & 0 & 0,196 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0,7896 & 0 & 0,7896 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix}; \quad (10)$$

Matrica C yra skirtumas tarp kintamųjų, kurie gali būti išmatuoti fiziškai ir tų kintamųjų, kurie iš esmės apskaičiuojami. Tai yra matrica su nuliais, kurie yra išdėstyti tokiu būdu, kad

susiprastintų su nustatytu atakos kampu a_S ir slydimo kampui β_S , esančiais vektoriuje x , iš kurio padauginta matrica C . C matricos sudarymo sąlygos atitinka matricų A ir B sudarymo sąlygas:

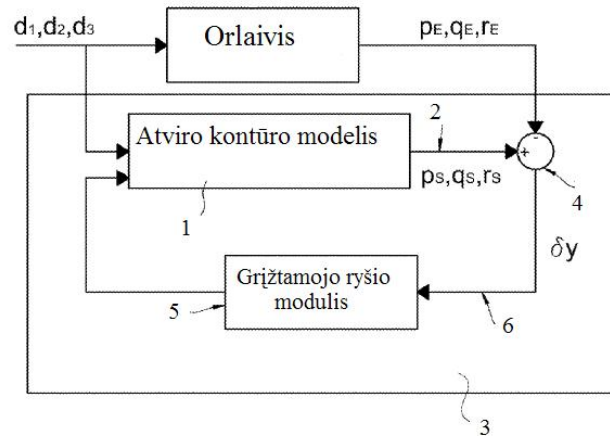
$$\begin{pmatrix} p_M \\ q_M \\ r_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_S \\ \beta_S \\ p_S \\ q_S \\ r_S \end{pmatrix}; \quad (11)$$

Matrica D visada yra 0.

5-ame žingsnyje randami skirtumai tarp nustatytų greičių ir atitinkamų išmatuotų greičių. Skirtumai apskaičiuojami norint rasti klaidos vektorių δy , kurio, pavyzdžiui, pirmasis komponentas yra skirtumas tarp efektyvaus posūkio greičio p_E ir išmatuoto p_S , antrasis komponentas – nuolydžio greičių q_E ir q_S skirtumas, ir trečiasis komponentas – pokrypių greičių r_E ir r_S skirtumas.

6 – ame žingsnyje atviro kontūro linijinis modelis yra pataisomas panaudojant paklaidos vektorių δy , pagal (5) lygybes. 5 – oje lygybėje matrica L yra grįžtamoji matrica, kurioje yra kontrolinių filtrų stiprinimai, aprašyti toliau.

25 pav. yra blokinė schema, tinkama įgyvendinti aprašomą išradimą.



25 pav. Sistemos struktūrinė schema [8]

Į sistemos sudėtį įeina orlaivis, valdomas plokštumomis, kurių atsilenkimą nuo atitinkamų plokštumų pažymėjome d_1 , d_2 ir d_3 . Orlaivio faktinis posūkio greitis p_E , nuolydžio greitis q_E ir pokrypio greitis r_E yra išmatuojami.

Signalai, atitinkantys nuokrypius d_1 , d_2 ir d_3 siunčiami į valdymo bloko 3 atviro kontūro modulį 1. Atviro kontūro modulis 1 apskaičiuoja sistemos atviro kontūro linijinį modelį ir duomenų linija 2 siunčia nustatytus posūkio greitį p_S , nuolydžio greitį q_S ir pokrypio r_S .

Tolesnis valdymo bloko komponentas – atimties modulis, skirtas skaičiuoti skirtumus tarp tikrųjų ir nustatytų greičių (skaičiuoja vektorių δy). Galiausiai, grįžtamojo ryšio grandinėje 6 yra grįžtamojo ryšio modulis 5. Pastarasis modulis formuoja uždara kontūrą ir skaitmeninį valdymo filtrą. Filtras yra formuojamas naudojantis Kalmano optimizacijos metodika. Filtro struktūra – Luenbergerio.

Filtro stiprinimo reikšmės yra grįžtamojo ryšio matricoje L . Kiekviena matricos eilutė reiškia sistemos struktūros kintamųjų korekciją. Trys korekcijos koeficientai, po vieną kiekvienam kampiniam greičiui, yra stulpeliuose. Filtro stiprinimo reikšmės yra siunčiamos į atviro kontūro modulį 1, kuris modifikuoja atviro kontūro linijinį sistemos modelį, panaudojant minėtąjį filtrą taip, kad sujungtų nustatytus ir tikruosius orlaivio greičius.

Kai greičių sujungimas atliktas, apskaičiuotieji atakos kampas α_S ir slydimo kampas β_S taip pat yra susiję su tikruoju atakos kampu α_E ir tikruoju slydimo kampu β_E atitinkamai. Tikrieji atakos ir slydimo kampai tokiu būdu gali būti randami be būtinybės juos matuoti įprastais davikliais.

2.3. Skyriaus apibendrinimas

Skyriuje buvo aptari atakos ir slydimo kampų matavimo metodai naudojant vamzdelio tipo daviklius ir kampų matavimai nenaudojant specialių tam skirtų daviklių. Pirmuoju atveju aptarta sistema, sudaryta iš matuoklių ir duomenis apdorojančio kompiuterio. Matuoklio ypatybė – slėgio jutikliai montuojami pačiame vamzdelyje. Tokiu būdu gaunamas įrenginys, kuris generuoja slėgį atitinkantį elektrinį signalą. Signalai toliau apdorojami kompiuteryje – gaunami atakos ir slydimo kampai.

Antruoju atveju aptartas matavimo metodas, kai kampų apskaičiavimui reikalingi duomenys apie orlaivio valdymo plokštumų padėtis. Taip pat reikalingi duomenys apie greičius x , y ir z ašimis. Metodo privalumas – nereikalingi specialūs α ir β kampų matuokliai.

3. ATAKOS IR SLYDIMO KAMPŲ MATAVIMO TIKSLUMAS

3.1 Matuoklių tikslumą įtakojančios veiksniai

Atakos kampo matavimo tikslumą, kai matuojama *Pitoto* vamzdeliu, įtakojančius veiksnius galima skirstyti į dvi grupes: sisteminis netikslumas ir konstrukcinis netikslumas (paklaidos gaminant įrenginį).

Sisteminiai faktoriai, įtakojančys matavimo netikslumą:

***Pitoto* vamzdelio užsikimšimas svetimkūniais.** Užsikimšęs *Pitoto* vamzdelis turi įtakos netiksliams dinaminio slėgio parodymams. Tai turi įtakos ir greičio parodymams. Tokiu atveju oro greičio indikatorius gali rodyti greičio didėjimą orlaiviui kylant, nors jo greitis yra konstanta. Taip nutinka todėl, kad slėgis *Pitoto* vamzdelyje išlieka pastovus, kai, tuo tarpu atmosferos slėgis (ir statinis slėgis) mažėja. Ir atvirkščiai – oro greičio indikatorius rodys greičio mažėjimą orlaiviui leidžiantis. *Pitoto* vamzdelis yra linkęs užsikimšti ledu, vandeniu, vabzdžiais ar kitais pašaliniais objektais. Dėl šios priežasties, aviacijos reguliavimo tarnybos Jungtinėse Valstijose (FAA) rekomenduoja vizualiai patikrinti *Pitoto* vamzdelius prieš skrydį. Tam, kad nesusidarytų ledas, dažniausiai *Pitoto* vamzdeliai būna šildomi. Šildomi orinio slėgio davikliai privalomi visuose orlaiviuose, sertifikuotose instrumentiniams skrydžiams, išskyrus sertifikuotus kaip eksperimentiniai.

Statinių prievadų užsikimšimas. Užsikimšusi statinio slėgio anga įtakoja visus pagrindinius orlaivio instrumentus. Dažniausiai pasitaikanti statinio slėgio angos užsikimšimo priežastimi yra fiuzeliažo apledėjimas. Užsikimšus daviklio angai aukštimalis užstringa fiksuotoje padėtyje – prietaisas rodo tą aukštį, kuriame užšalo statinio slėgio anga. Vertikalaus greičio indikatorius taip pat užstringa ties nuline padėtimi, ir nekinta, nepriklausomai nuo to ar orlaivis kyla ar leidžiasi. Orinio greičio indikatorių statinio slėgio angos užsikimšimas įtakos priešingai nei *Pitoto* vamzdelio užšalimas – didėjant aukščiui greitis bus rodomas mažesnis nei yra. Ir atvirkščiai – leidžiantis orinio greičio parodymai bus didesni. Daugelyje orlaivių su nehermetiška kabina naudojamas atsarginis statinio slėgio imtuvas.

Būdingosios paklaidos. Būdingosios paklaidos skirstomos į kelias kategorijas, įtakojančias skirtingus indikatorius. Orinio tankio paklaida įtakoja greičio ir aukščio netikslumus. Šio tipo paklaida įtakoja atmosferos oro slėgio ir temperatūros kitimo. Spūdumo paklaida gali atsirasti kai dėl oro srauto spaudimo, *Pitoto* vamzdelyje susispaudžia oras. Standartiniame jūros lygyje pastarosios paklaidos nėra. Didesniuose aukščiuose spūdimas nėra tiksliai apskaičiuojamas. Dėl to greičio indikatorius rodo didesnę greitį, nei tikrasis. Korekcijos gali būti gaunamos iš diagramų. Spūdumo paklaida tampa reikšminga aukščiuose, didesniuose nei 10000 pėdų (3000 m), ir kai greitis didesnis nei 200 mazgų (370 km/h). Histereze vadinamos

paklaidos, įtakojamos mechaninių veiksnių, atsirandančių aneroidinėse kapsulėse, patalpintose prietaisuose. Kapsulės, skirtos nustatyti slėgių skirtumą, turi savybę priešintis pradinės formos kitimui. Reversinės paklaidos atsiranda dėl klaidingai išmatuoto statinio slėgio. To priežastimi gali būti neįprastai didelis orlaivio atakos kampas. Didelis atakos kampo padidėjimas įtakoja momentinį netikrų greičio ir aukščio parodymą. Reversinės paklaidos veikia altimetrus ir vertikalų greičio indikatorius.

Padėties paklaidos. Kita būdingų paklaidų grupė – padėties paklaidos. Pastaroji paklaida atsiranda dėl to, kad statinis slėgis prie orlaivio fiuzeliažo yra ne toks pat, kaip slėgis esantis toliau nuo orlaivio. Greitis, kurio oro srautas apteka statinio slėgio matuoklį, nėra lygus oriniam orlaivio greičiui. Padėties paklaidos gali įtakoti teigiamas arba neigiamas paklaidas, priklausomai nuo vieno iš kelių faktorių. Tie faktoriai yra orinis greitis, atakos kampas, lėktuvo svoris, pagreitis, konfigūracija. Padėties paklaida skirstoma dar į dvi kategorijas: fiksuotos paklaidos ir kintamos paklaidos. Fiksuotos – paklaidos, būdingos tam tikram orlaivio modeliui. Kintamos – įtakojamos išorinių veiksnių, tokių kaip fiuzeliažo deformacijos, veikiančio oro srautą. [9]

3.2 Srauto krypties ir greičio vektoriaus matavimas

Išskyrus paprasčiausius oro srauto judėjimo konfigūracijas, dažniausiai srauto kryptis yra nežinoma. Nors statinis ir dinaminis (*pitoto*) vamzdeliai matuoja optimalias slėgio reikšmes, kai teisingai sulygiuoti, jie niekada nenaudojami tiesioginiam tikslaus slėgiui nustatyti. Šiuo tikslu, standartinių konfigūracijų modifikacijos yra dažnai atliekamos, tolesniam jautrumo didinimui. Nors yra platus slėgio matavimo daviklių pasirinkimas, projektavimo principai yra gana paprasti ir stereotipiški. Visi projektavimai susideda iš vienos ar dviejų porų simetriškai paliktų kiaurymių daviklių priekyje, kurie sudaro vienodus, bet priešingus polinkius į oro srautą. Bendru atveju, davikliai su kiaurymėmis, paliktomis jo priekyje, yra lengviau pagaminami, negu tie, kurių korpuse yra išgręžtos skylutės slėgiui matuoti. Projektavimas su viena pora kiaurymių yra naudojamas dviejų dimensijų oro srauto matavimams, o su dviem porom – trijų dimensijų matavimams. Kombinacijos panaudojant suspaustą angą turi privalumą leidžiantį suminį greičio vektorių išmatuoti vienoje padėtyje. Tokie greičio vektoriaus nustatymo davikliai yra apriboti naudojimui ikigarsiniams greičiams, nes daviklio priekyje gaunamas asimetrinis srauto sujaukimas viršgarsiniuose greičiuose neleis naudotis prietaisu, kol daviklis neturės atitinkamo polinkio.

Yra du būdai, kuriais gali būti panaudoti slėgiui jautrūs davikliai. Paprasčiausias ir labiausiai tiesioginis metodas yra nulio metodas. Tokiu atveju daviklis yra pritvirtinamas prie laikiklio ir oro srauto kampas nustatomas balansuojant slėgį, išmatuotą priešingoje pusėje negu

kiaurymės. Priklausomai nuo to, ar oro srautas matuojamas dviem ar trimis dimensijomis, laikiklis turi turėti kampo nustatymo galimybę viena arba dviem kryptimis atitinkamai.

Alternatyvus metodas, kai zondas yra fiksuotoje padėtyje atsuktas į oro srautą, yra išmatuojami slėgio skirtumai tarp simetriškai išdėstytų kiaurymių ir srauto kryptis yra nustatoma pagal išankstinius teorinius skaičiavimus.

3.2.1 Oro klampumo, spūdumo ir pilnutinio slėgio gradiento poveikis

Esant ikigarsniams greičiams, teisingai suprojektuotas ir pagamintas nulinio tipo slėgio daviklis neturėtų būti veikiamas Reinoldso (*angl.* Reynolds) ir Macho (*angl.* Mach) greičio pokyčių, kol oro srautas yra simetrinis daviklio ašies atžvilgiu. Nulio sistema labiausiai tinkama kombinuotų daviklių projektavimui, kadangi statinis ir dinaminis slėgiai gali būti išmatuoti tiksliausiai, kai daviklis sulygiuotas su oro srautu. Kita vertus, fiksuotos padėties davikliai reikalauja išankstinio kalibravimo žinomame sraute ir rezultatų tikslumas esant skirtingiems pilnutinio slėgio gradientams yra abejotinas.

Viršgarsiniuose greičiuose, nulio sistemos tikslumas sumažės, jei daviklio ašis nustatyta lygiagrečiai oro srautui. Taip yra todėl, kad oro sujaukimas susiformavęs prieš daviklį bus simetriškas apie nulinę ašį. Kita vertus, fiksuotas daviklis, kuris priklauso nuo slėgio skirtumo matavimų tarp atskirų ertmių, gali būti klaidingas, nes oro srauto sujaukimas, veikiantis vieną ertmę gali būti skirtingas nuo veikiančio kitą kiaurymę. Papildomai, asimetriniai srautai turės įtakos aptekančio srauto kryptčiai, todėl matavimai bus netikslūs.

Oro slėgiui jautraus daviklio elgsena tampa neapibrėžta, kai oro srauto greitis artėja prie garso greičio.

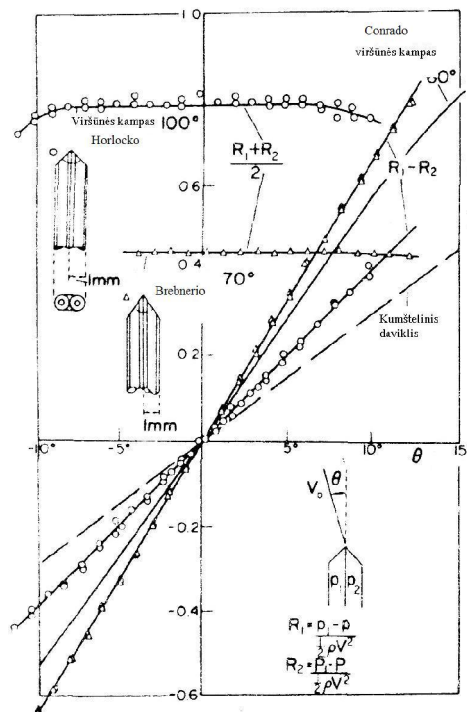
3.3 Dviejų matmenų davikliai

3.3.1 Kumštelinis daviklis

Kumštelinis (*angl.* Claw probe) daviklis yra sukonstruotas su dviem vamzdeliais, palinkusiais į oro srautą 45° kampu, didžiausiam jautrumui pasiekti. Šie vamzdeliai išdėstyti vienoje plokštumoje, statmenoje sukimosi ašies atžvilgiu, kuri praeina per gana atsitiktinai nustatytą „atskaitos tašką“.

Conradas pateikė kumštelinio daviklio charakteristikas, palygindamas jas su savo suprojektuotu dviejų vamzdelių nuokrypio kampo (*angl.* Yawmeter) matuokliu. Abu jie pavaizduoti 26 paveiksle, pateiktame grafike, iš kurio matyti, kad Conrado daviklis yra jautresnis.

Kumšteliniai davikliai dabar jau yra išstumiami kitų, kompaktiškesnių, kurių skersiniai matmenys neviršija 3 mm. Taip pat jie mažiau sujaukia aplink ir prieš juos esantį oro srautą ir duoda tikslesnius rodmenis.



26 pav. Conrado dviejų vamzdelių daviklių kalibravimo kreivės [10]

3.3.2 Conrado arba „kobra“ davikliai

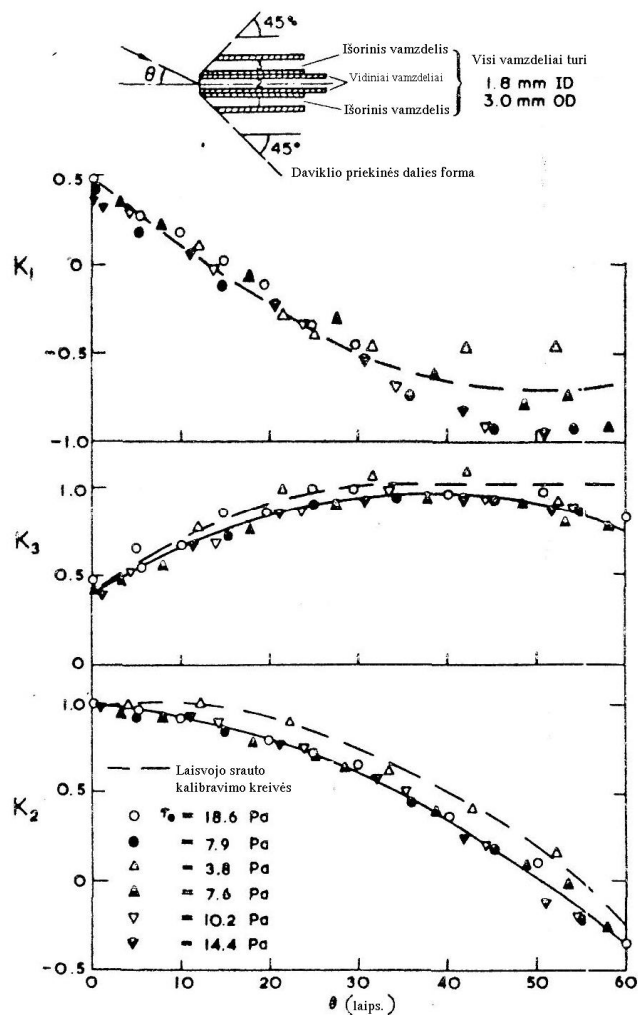
Tai turbūt geriausi iš nulinių daviklių oro srauto matavimams. Jie yra nebrangūs, lengvai sukonstruojami, suformuoti iš dviejų ar trijų vamzdelių, sulituotų kartu. Dviejų vamzdelių Conrado daviklis turi minimalų atstumą tarp vamzdelių ir yra pranašesnis naudoti oro srauto srityse, turinčiose staigius greičio gradientus. Papildomo vamzdelio įmontavimas neabejotinai sutrikdo gerą dviejų vamzdelių daviklio tikslumą, padidindamas atstumą tarp vamzdelių. Esant šioms sąlygoms, trijų vamzdelių „kobra“ davikliai išlaiko savo pranašumą palyginus su kito tipo davikliais. Kai naudojamas fiksuotas daviklis, dviejų vamzdelių Conrado daviklio pokrypio charakteristikos yra susijusios su slėgio skirtumu išmatuotu abiem vamzdeliais: kol jų suma siejasi su pilnutiniu oro srauto slėgiu. Abi – pokrypio ir pilnutinės daviklio galo charakteristikos dviejų vamzdelių Conrado davikliams, turinčios skirtingus viršūnių kampus (*angl.* apex angle) yra palygintos 26 paveiksle. Viršūnių kampai tarp 40° ir 120° (10° žingsniais) buvo naudojami įvairių tyrinėtojų. Conrado manymu maksimalus jautrumas pasiekiamas ties 60° viršūnės kampu, tačiau, kaip teigia Horlockas ir Brebneris, didžiausias jautrumas yra ties 70° .

Pagrindinis dviejų vamzdelių daviklio nepatogumas yra tas, kad jis negali duoti srauto parametrų išmatavimų vienoje padėtyje. Tačiau Brebneris atrado metodą, pagal kurį srauto kryptis, greitis, statinis ir pilnutinis slėgiai gali būti rasti iš jų pagrindinio srauto reikšmių imant keturis matavimus, kurie nustatyti, kai daviklis nukreiptas dviem kryptimis, kai žinomas sukimosi kampas tarp jų. Kita vertus, visi šie parametrai gali būti gauti iš slėgio matavimų panaudojant trijų vamzdelių daviklį. Šio metodo veikimo analizė pateikta Crabtreeo, imant skirtuminio slėgio tarp šoninių ir centrinio vamzdelių linijinę priklausomybę. Tačiau šis metodas tinkamas tik esant gana siauram polinkio kampo diapazonui. Kalibravimo funkcijų panaudojimas žymiai išplečia daviklio pritaikymą didesniai pokrypio kampo diapazonui. Šiuo atžvilgiu, Rajaratnamas ir Muralidharas paruošė pranešimą apie kalibravimo rezultatus trijų vamzdelių Conrado davikliui, pokrypio kampams iki 60° . Daviklis, panaudotas gauti šioms kreivėms, buvo pagamintas iš nerūdijančio plieno vamzdelių, kurių išorinis diametras 3 mm, o vidinis 1,8 mm. Galūnės kampas 90° . Argumentai, panaudoti gauti kalibravimo kreivėms buvo tokie: kai trijų vamzdelių „kobra“ yra pakreiptas kampu θ į oro srauto kryptį, slėgio reikšmės užfiksuotos vamzdelių gali būti aprašytos šiomis lygybėmis:

$$p_1 = p_0 + K_1 \Delta p; \quad (12)$$

$$p_2 = p_0 + K_2 \Delta p; \quad (13)$$

$$p_{31} = p_0 + K_3 \Delta p. \quad (14)$$

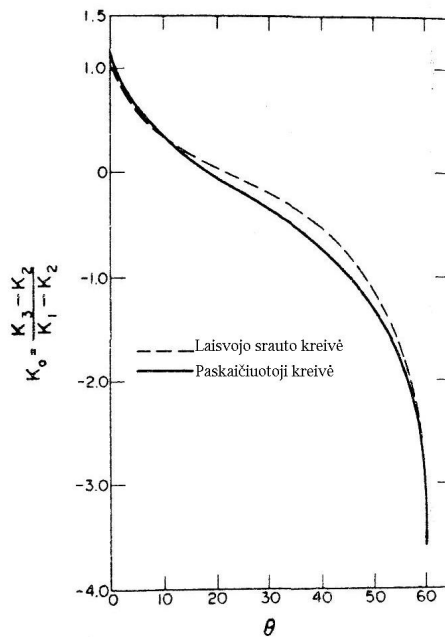


27 pav. Kalibravimo funkcijos K_1 , K_2 ir K_3 dviejų dimensijų kobra davikliui [10]

Buvo atrasta, jog kalibravimo faktoriai K yra pokrypio kampo θ funkcijos. Šios funkcijos taip pat pateiktos 27 – amje paveiksle. Tinkamai sukombinavus lygybes (12) – (14), galima gauti tokią koeficiento K_0 išraišką:

$$\frac{p_3 - p_2}{p_1 - p_2} = \frac{K_3 - K_2}{K_1 - K_2} = K_0 \quad (15)$$

K_0 kitimas priklausomai nuo kampo θ pateiktas 28 pav.



28 pav. Kalibravimo funkcija K_0 kobra davikliui [10]

Tokiu būdu, turint slėgių p_1 , p_2 ir p_3 reikšmes, gautas iš daviklio esančio fiksuotoje padėtyje, koeficientas K_0 gali būti apskaičiuotas pagal 4 lygybę. Tai leidžia išskaičiuoti pokrypio kampą θ iš 28-ame paveiksle pateikto grafiko, o K_1 , K_2 ir K_3 iš grafiko 27-ame paveiksle. Pilnutinis ir dinaminis slėgiai tuomet gali būti apskaičiuoti iš (1) – (3) lygybių. Dėl reliatyviai didesnio skirtumo tarp laisvojo srauto ir pertvaros kalibravimo koeficientui K_2 , rekomenduojama vengti lygybės (2) naudojimo skaičiuojant p_0 ir p .

Eichenbergeris nustatė, kad dviejų vamzdelių Conrado daviklis gali sukelti oro srautus viduje iki $0,2^\circ$. Jis taip pat pažymėjo pastovią paklaidą greičio gradiento vienetai: $0,65^\circ$ dydžio davikliui, sudarytam iš dviejų vamzdelių, kurių skersmuo 0,51 mm, sudarančių 60° laispnių kampą su oro srautu. Papildomai buvo nustatyta, kad Conrado daviklis gali duoti tikslus parodymus, jei atakos kampas vietinio oro srauto atžvilgiu neviršija 6° .

3.3.3 Gembinis cilindras

Tai labai paprastas, tvirtas, dviejų dimensijų daviklis. Kai norima matuoti oro srautą, dvi statinės angos turi būti prijungtos prie atskirų kanalų. Jei abu, oro srautas ir statinis arba dinamis slėgis yra generuojami, statinė ir dinaminė angos turi būti išlaikomos viename lygyje.

Oro srauto sujaukimai priešais daviklį susidarys esant Macho skaičiams tarp 0,55 ir 1,0, taigi, srauto matavimas nėra įmanomas šiame greičių diapazone. Šio prietaiso jautrumas yra 5 %

nuo slėgio vienam polinkio kampo laipsniui. Tai daro jį naudingą matavimams $0,1^0$ tikslumu greičiams virš 30 m/s.

3.3.4 Pleištas

Pleištas yra kitas paprastas, tvirtas, dviejų dimensijų daviklis. Kritinis Macho skaičius, ties kuriuo atsiranda oro sujaukimai, t.y., ties daviklio pleištu yra pleišto funkcija. Dėl šios priežasties pageidautini mažo kampo pleištai. Tai taip pat sumažina tarpus tarp ertmių ir dėl šio priežasties greičio gradiento paklaidas.

3.4 Trijų matmenų davikliai

3.4.1 Kūginis daviklis

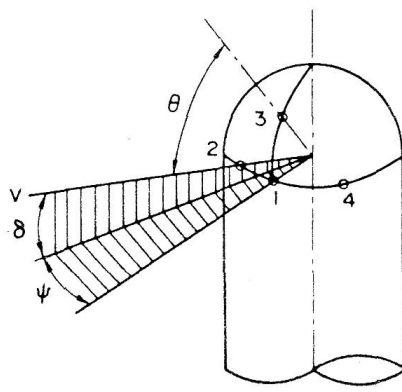
Kai naudojamosi nulinė sistema, yra nedidelis skirtumas tarp šio tipo daviklio ir Conrado trijų vamzdelių daviklio. Tačiau dėl kūginio daviklio pranašumo analitiniuose tyrimuose prieš kitas geometrines figūras esant viršgarsiniams greičiams, oro srauto kampai taip pat gali būti nustatyti su fiksuotos padėties davikliu naudojant statinio slėgio matavimus. Šio daviklio panaudojimas fiksuotoje padėtyje buvo aprašytas Cooperio ir Websterio abiem *Macho* skaičiams ir oro srauto kampo nustatymams. Pagrindinė problema, aišku, yra tikslumas, su kuriuo esanti teorija gali būti panaudota konvertuojant slėgio parametrus į laisvojo srauto parametrus.

Testų rezultatai, gauti prie 1,59 *Macho* rodo, kad atakos ir pokrypio kampai gali būti prognozuojami ne daugiau kaip $0,5^0$ įvairioms šių kampų kombinacijoms, kai pokrypio kampas mažesnis už atakos.

Taip pat buvo nustatyta, kad *Macho* skaičiaus ir srauto kampo sumažinimas atliekant slėgio matavimus leidžia naudoti linijinę ir nelinijinę teoriją iš esmės su tuo pačiu tikslumu. Iš to daroma išvada, kad slėgio koeficientai abiem atvejais yra maždaug vienodi, esant tam pačiam srauto kampo diapazonui.

3.4.2 Gembinis cilindras

Tai yra vienintelis trijų dimensijų daviklis, išlaikantis dviejų dimensijų daviklio kompatiškumą ir tvirtumą. Tačiau jis skiriasi nuo paskutiniojo, kur kiaurymės yra išdėstytos daug arčiau pusrutulinio antgalio, ant kurio taip pat išgręžta kita slėgio matavimo anga. Tokia keturių skylių konfigūracija parodyta 4 pav.



29 pav. Keturių ertmių geminio cilindro geometrija ir nomenklatūra [10]

Ši papildoma kiaurymė reikalinga suteikti, kartu su kitomis kiaurymėmis, papildomą informaciją apie srauto atakos kampą. Dėl jos atstumo iki viršūnės, reikalingas išankstinis kalibravimas dėl srauto iškraipymų apie kiaurymes. Dar viena priežastis, dėl ko reikalingas kalibravimas, yra tai, jog daviklis tiesiogiai gali nustatyti tik pokrypio kampus taikant nulinį metodą, o atakos kampai gali būti nustatyti iš slėgio matavimų, naudojant kalibravimo kreives. Tai ištyrė Markowskis ir Moffattas panaudodami parametrus M_R ir θ_R , aprašomus žemiau teikiamomis lygybėmis:

$$M_R = \frac{p_1 - p_2}{p_1}; \quad (16)$$

$$\theta_R = \frac{p_1 - p_3}{p_1 - p_2}; \quad (17)$$

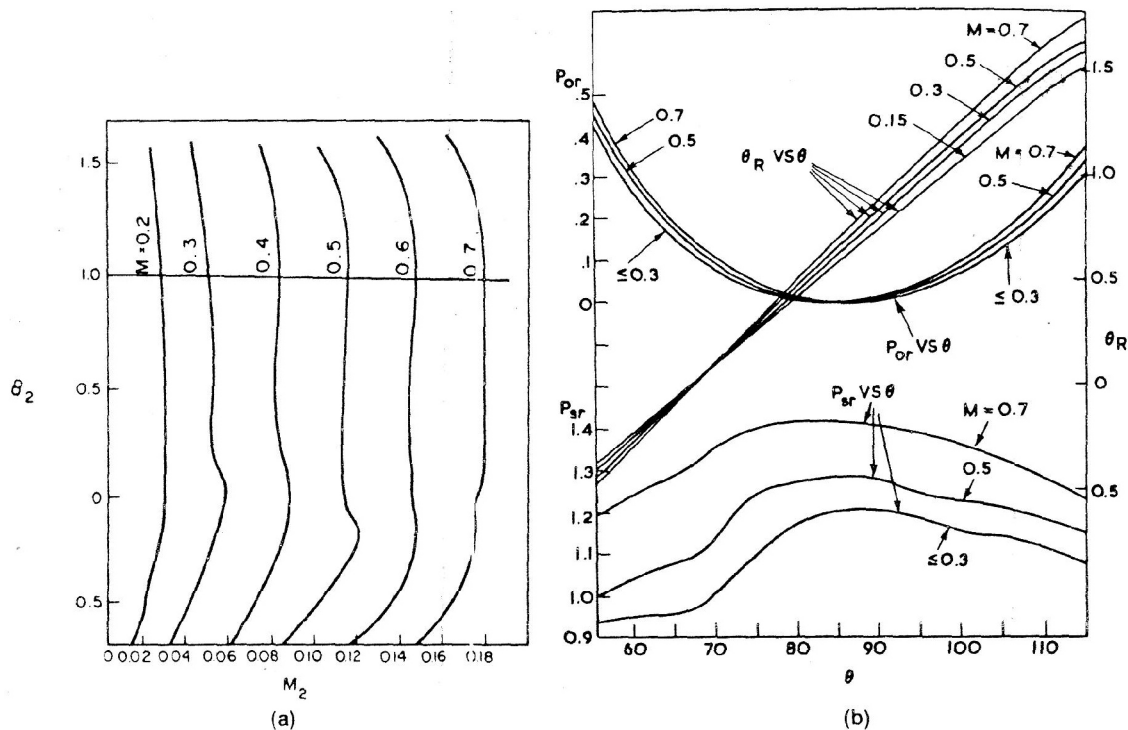
Šie apibrėžimai leidžia nustatyti oro srauto Macho skaičių iš 30a pav. Tai, kartu su θ_R , apibrėžia atakos kampą θ (pavyzdžiui, atakos kampas $= 90^\circ - \theta$) ir du slėgio parametrus p_{0r} ir p_{sr} iš grafiko 30b. Iš šių slėgio parametrų, srautas, slėgis daviklio antaglyje ir statinis slėgis gali būti apskaičiuoti remiantis tokiomis lygybėmis:

$$p_0 = p_1 + p_{0r}(p_1 - p_2); \quad (18)$$

$$p_s = p_1 + p_{sr}(p_1 - p_2); \quad (19)$$

Markowskis ir Moffattas nustatė, kad atakos kampas gali būti nustatytas $\pm 2^\circ$, o p_0 ir p_s , iki 2 % nuo greičio slėgio, kampo θ diapazonui esant nuo 40° iki 120° .

Atsižvelgiant į gana didelius tarpus tarp ertmių ant šio daviklio, jis negali būti naudojamas srautams su dideliais greičio gradientais.



30 pav. Kalibravimo diagrama keturių ertmių gembiniam davikliui: (a) Macho skaičiaus charakteristikos, (b) pilnutinio, statinio slėgio charakteristikos, parametrai [10]

3.4.3 Penkių skylių davikliai

Iš esmės šie davikliai sudaryti iš simetriško ašies atžvilgiu korpuso, turinčio penkias kiaurymes korpuso priekyje. Viena iš jų, vidurinioji, rodo suspausto oro slėgį, o likusios keturios periferinės ertmės, išdėstytos 90° kampų viena kitos atžvilgiu, reikalingi krypties indikatoriams. Naudojami sferiniai elipsoidiniai ir kiti daviklių antgaliai. Penkių vamzdelių Conrado daviklis yra dar viena įmanoma konfigūracija.

Sferinis daviklis sudarytas iš mažos sferos pritvirtintos ant stiebo, kuris gali būti sumontuotas tiek lygiagrečiai, tiek statmenai oro srauto judėjimo kryptiai. Ši konfigūracija išlaiko 4 skylių gembinio cilindro kompaktiškumą, bet turi mažesnius tarpus tarp ertmių. Tačiau, dėl asimetrijos, atakos kampo ertmės turi būti sukalibruotos prieš naudojimą, netgi nulinio sistemoje. Galutinės kalibravimo kreivės šiam davikliui buvo gautos Van der Hegge Zijeno. Jos buvo atkurtos Bryerio ir Pankhursto.

Kai stiebas yra išilgai oro srauto, kompaktiškiausia konfigūracija yra pusrutulio formos daviklis, kurio dydis ekvivalentiškas minimaliam stiebo dydžiui, reikalingam pritaikyti skirtingoms slėgio linijoms. Šis daviklis gali būti naudojamas nulinio sistemoje be išankstinio kalibravimo dėl savo simetriškos konstrukcijos.

Emmonsas apibūdino nekalibruotos sferos (ar pusrutulio) panaudojimą oro srauto kampo matavimui su fiksuotos padėties davikliu. Kai atakos kampas ψ lygus 0, pokrypio kampas α gali būti aprašytas:

$$\alpha = \frac{p_1 - p_3}{p_{01} - p_3} \lambda \quad (20)$$

kur slėgių indeksai atitinka slėgio kiaurymių numeraciją 6 b paveiksle, o p_0 atitinka tikrąjį slėgį daviklio priekyje. Parametras λ yra apibrėžiamas tokia lygybe:

$$\lambda = \frac{1}{4,5 \sin 2\theta} \quad (21)$$

kur θ yra kampas tarp periferinės angos ir centrinės ertmės ant sferos. Esant mažiems atakos kampams, λ tampa:

$$\frac{1}{\lambda} = -4,5 \sin 2\theta \{1 - 2 \cos^2(\psi \times \theta)\} \quad (22)$$

Pastaroji lygybė parodo, jog parametras λ kinta apie 4% apie atakos kampą, kai $\theta = 45^\circ$.

Kombinuojant (20) ir (21) lygybes, kalibruota funkcija sferiniui ir pusrutulio tipo davikliui gali būti tokia:

$$\frac{p_1 - p_3}{p_0 - p_3} = -4,5 \sin 2\theta (1 - 2\psi^2 \theta^2), \text{ esant mažiems } \psi. \quad (23)$$

Emmonsas pasiūlė naudoti p_5 ir p_0 be korekcijos. Nėra abejonių, kad korekcijos yra būtinos dėl greičio gradiento, atsirandančio dėl davikliui būdingų didelių tarpų tarp ertmių. Korekcijos dėl spūdumo ikigarsiniuose, artimuose garsui ir mažuose viršgarsiniuose greičiuose, buvo aptartos Bryerio ir Pankhursto.

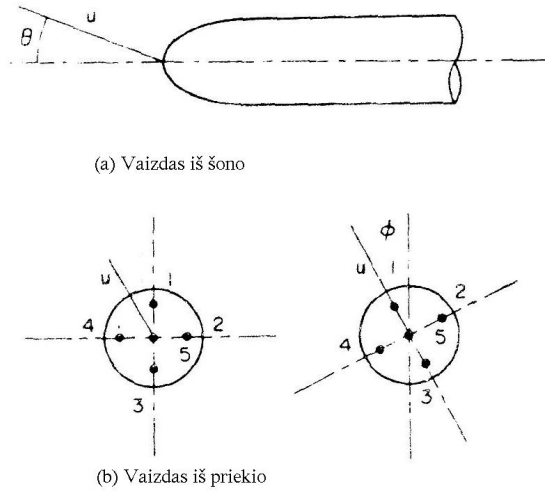
Norint išsamiai apibūdinti oro srautą, reikalingas ir dinaminis slėgis. Tai įgalina laisvojo srauto statinį slėgį surasti po to, kai slėgis priešais daviklį išmatuojamas tiesiogiai. Tuo atveju, kai oras nesuspaustas, dinaminis antgalis gali būti įvertintas iš p_1 bet kurioje periferinėje ertmėje naudojant potencinio srauto priklausomybę:

$$P_0 - p = \frac{p_5 - p_1}{\frac{9}{4} \sin^2 \theta} \quad (24)$$

Lygybė (23) tinkama tai atvejais, kai naudojami pakankamai dideli Reynoldso skaičiai, kad klampumo efektas būtų nereikšmingas, ir su tokiais pokrypio ar atakos kampų diapazonais, kuriuose pilnutinis ir statinis slėgiai gali kompensuoti vienas kitą.

Dideliems kampams eksperimentinis kalbravimas tampa neišvengiamas. Jegorovas aprašė kreivių šeimą sferiniams davikliams, naudojamiems fiksuotose sistemose. Pokrypio ir atakos kampų diapazonas $\pm 60^\circ$, tikslumas $\pm 0,3^\circ$ atakos kampui, $\pm 1\%$ dinaminiam ir $\pm 1\%$ statiniam slėgiams.

Dau'as pasklebe pranešimą apie elipsoidinį penkių ertmių daviklį, pavaizduotą 31 a paveiksle.



31 pav. Penkių ertmių daviklio geometrija ir nomenklatūra [1]

Daviklis yra sumontuotas taip, kad galėtų sukis apie išilginę ašį. Kai jis laikomas sraute, sukimosi kampas Φ gali būti nustatytas tiesiogiai sukanč daviklį tol, kol slėgių skirtumas tarp ertmių 2 ir 4 pasidarys lygus 0. tai leidžia daryti prielaidą, kad srautas šalia daviklio yra tolygus. Po daviklio sulygiavimo, slėgis visose penkiose ertmėse priklauso nuo θ , p ir q reikšmių – tai sudaro srauto parametrus. Šie parametrai reiškia vietinį atakos kampą, vietinį statinį slėgį ir vietinį dinaminį slėgį. Slėgio koeficientas ertmei i gali būti aprašytas taip:

$$C_{pi} = \frac{p_i - p_r}{q} \quad (25)$$

Gali būti parodyta, kad šie koeficientai yra tik kampo θ funkcijos:

$$\frac{C_{p1} - C_{p3}}{C_{p5} - C_{p3}} = \frac{p_1 - p_3}{p_5 - p_3} = F(\theta), \quad (26)$$

kur imant atvirkštinę (14) reikšmę skaičiuojame:

$$\theta = f\left\{\frac{p_1 - p_3}{p_5 - p_3}\right\} \quad (27)$$

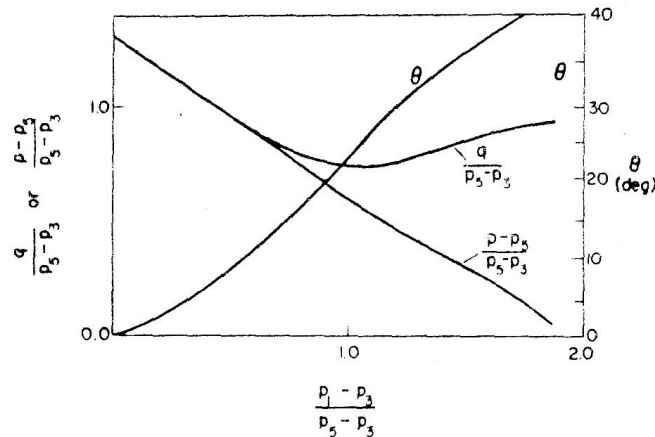
Panašiai galima parodyti, jog:

$$\frac{q}{p_5 - p_3} = g\left\{\frac{p_1 - p_3}{p_5 - p_3}\right\} \quad (28)$$

ir

$$\frac{p - p_3}{p_5 - p_3} = h \left\{ \frac{p_1 - p_3}{p_5 - p_3} \right\} \quad (29)$$

Kalibravimo funkcijos f , g ir h buvo paruoštos Dau'o, ir pateiktos 7 pav. Tikslumas, automatiniam davikliui panaudojant servomotorą, valdomą slėgio signalais iš antros ir ketvirtos kiaurymės daviklio pasukimui, ir analoginio kompiuterio bei programinės įrangos, yra nuo 2 % iki 5 % statinio ir dinaminio slėgio koeficientams, apie 2° kampui θ ir 3° kampui Φ , priklausomai nuo θ reikšmės.



32 pav. Eksperimentinės kalibravimo kreivės penkių skylių davikliui [10]

Bryeris ir Pankhurstas paruošė kalibravimo kreivių šeimas penkių skylių Conrado davikliams, panaudotų fiksuotoje padėtyje. Tokios kreivės yra kompleksinės – joms reikia skirtuminio slėgio iš abiejų porų šoninių daviklių srauto parametrus apibrėžti.

3.5 Skyriaus apibendrinimas

Kaip žinoma, yra du pagrindiniai būdai orlaivio atakos kampo matavimui: vamzdelis ir fliugerinis daviklis. Tiriamajame darbe aptartas pirmasis būdas bei įvairios vamzdelių konfigūracijos. Palyginti įvairių tipų, su skirtingais ertmių skaičiais davikliai. Aptarti jų trūkumai bei privalumai, jų veikimas įvairiais greičių diapazonais: (ikigarsiniais, artimais garso ir viršgarsiniais greičiais), nors kalbant apie sklandytuvus aktualūs greičiai yra ikigarsiniai. Pateiktos daviklių kalibravimo charakteristikos. Išankstinis daviklių kalibravimas reikalingas dėl jų darbo metu atsirandančių oro srauto pokyčių.

4. DINAMINIS – MATEMATINIS SKLANDYTUVO MODELIS

4.1 Programinės įrangos parinkimas

Dinaminio – matematinio sklandytuvo modelio kūrimui buvo pasirinkta programa *Matlab 2009b* su *Simulink* posisteme. *Matlab* (iš angl. žodžių *MATrix LABoratory*) yra daugiaterpė *MathWorks* programinė įranga, skirta įvairių mokslo šakų problemoms spręsti, ypač matematinėms. Kaip galima spręsti iš pavadinimo, turi puikias galimybes manipuliacijoms su matricomis – būtent toks buvo pirmas šios programos tikslas. Dabar tai yra didžiulis ir galingas paketas, turintis savitą lengvai perprantamą programavimo kalbą.

Nors simbolinėms matematinėms manipuliacijoms geriau tinka *Maple* ir *Mathematica* produktai, su *MathCad* pradedantis vartotojas gali greičiau gauti pirmuosius rezultatus, *Matlab* kaip programavimo kalba turi didesnę lankstumą, kuris naudingas įvairiems fizikos, biologijos bei kitiems matematiniams modeliams kurti ir tirti. Bioinformatiniuose tyrimuose *Matlab* neretai naudojamas kaip „žvalgybinis“ paketas: pasiteisinę matematiniai modeliai vėliau perrašomi *C* programavimo kalba lygiagrečiam vykdymui superkompiuteriuose.

Matlab posistemė *Simulink* - komercinis *MathWorks* produktas, skirtas dinaminių sistemų modeliavimui, simuliacijai ir analizavimui. Pagrindinė sistemos sąsaja yra grafinis sistemos modeliavimas blokais. Blokai patalpinti bibliotekose, ir jie gali būti koreguojami. *Simulink* glaudžiai siejasi su *Matlab* aplinka – modelio kumuliacija gali būti vykdoma iš *Matlab*. *Simulink* plačiai naudojamas kontrolės sistemų teorijoje ir skaitmeninių signalų apdorojime.

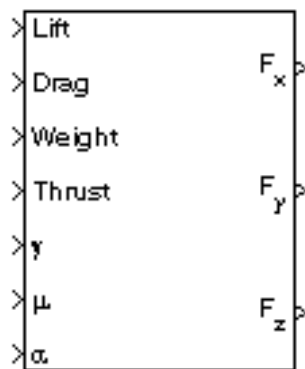
Sklandytuvo modelio kūrimui buvo naudojamos *Aerospace Blockset* ir *Simulink* bibliotekos.

4.2 Modelio kūrimas

Sklandytuvo matematinis – dinaminis modelis skirtas *alfa* ir *beta* kampų skaičiavimas pagal pasirinktas sąlygas. Atakos kampas skaičiuojamas nurodant sklandytuvo trajektoriją vertikalioje ašyje, o slydimo kampas – simuliuojant šoninį vėją: greitį ir kryptį.

Sudedamosios modelio dalys:

Sklandytuvą veikiančių jėgų skaičiavimas. Sklandytuvą veikiančių jėgų skaičiavimui, iš *Simulink Aerospace Blockset* buvo parinktas blokas, skaičiuojantis jėgas F_x , F_y ir F_z . Indeksai x , y ir z žymi jėgų veikimo kryptis, atitinkamai F_x – jėga veikianti x ašies kryptimi, F_y – jėga veikianti y ašies kryptimi ir F_z – jėga veikianti z ašies kryptimi (34 pav.)



33 pav. Orlaivį veikiančių jėgų skaičiavimui skirtas blokas

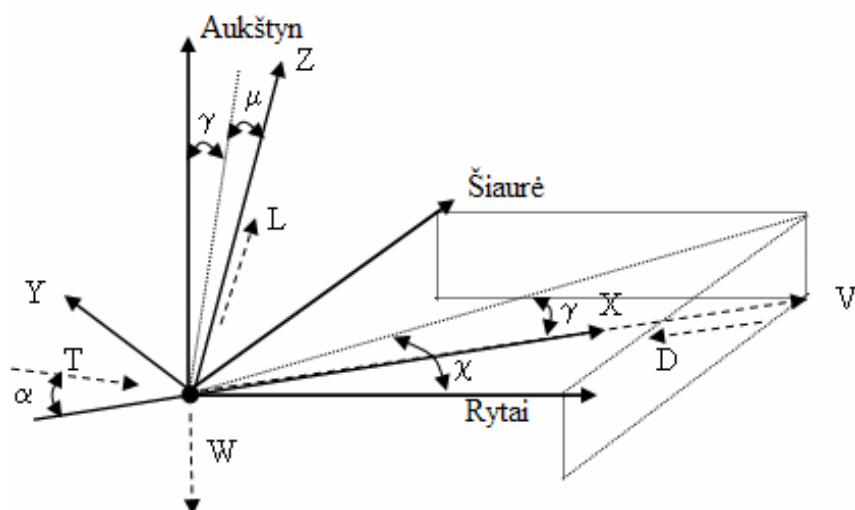
33 pav. pavaizduotas blokas skaičiuoja vieną ar kelis orlaivio taškus veikiančias jėgas. 1 lentelėje aprašyti visi bloko įėjimai, 2 lentelėje - išėjimai.

1 lentelė. Bloko įėjimai

Įėjimas	Aprašymas
Lift	Keliamoji jėga (N)
Drag	Pasipriešinimas (N)
Weight	Svoris (N)
Thrust	Trauka (N)
γ	Skrydžio trajektorijos kampas (rad)
μ	Pokrypio kampas (rad)
α	Atakos kampas (rad)

2 lentelė. Bloko išėjimai

Išėjimas	Aprašymas
F_x	Jėga veikianti x ašies kryptimi (N)
F_y	Jėga veikianti y ašies kryptimi (N)
F_z	Jėga veikianti z ašies kryptimi (N)



34 pav. Koordinačių sistema ir sklandytuvą veikiančios jėgos: T –trauka, D- pasipriešinimas, L – keliamosios jėgos vektorius ir V- greičio vektoriaus kryptis

Veikiančios jėgos $[F_x \ F_y \ F_z]^T$ yra apibrėžiamos x ašies atžvilgiu, orlaivio judėjimo kryptimi, z ašis nukreipta aukštyn, y ašis yra paskutinė rėmelio (34 pav.) sudedamoji dalis ir. Ašys x , y ir z yra keliamosios jėgos (L), pasipriešinimo (D), traukos (T), svorio (W) skrydžio trajektorijos kampo (γ), atakos kampo (α) ir pokrypio kampo (μ) funkcijos:

$$F_x = T \cos \alpha - D - W \sin \gamma; \quad (30)$$

$$F_y = (L + T \sin \alpha) \sin \mu; \quad (31)$$

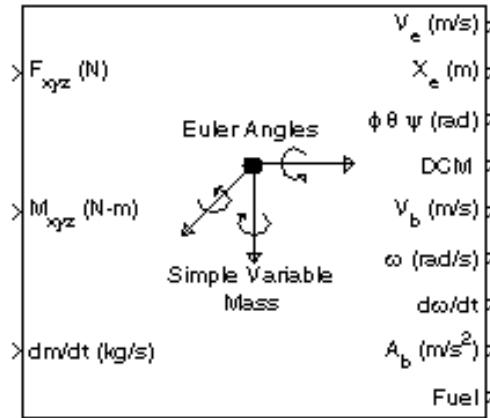
$$F_z = (L - T \sin \alpha) \cos \mu - W \cos \gamma; \quad (32)$$

Prielaidos ir apribojimai. Skaičiuojant jėgas F_x , F_y ir F_z laikoma, kad orlaivio skrydis yra pilnai koordinuotas, pvz. nėra šoninių jėgų (vėjo) ir slydimo kampas visada lygus 0.

Simuliuojant sklandytuvo skrydį, į jėgų bloko įėjimus paduodami duomenys:

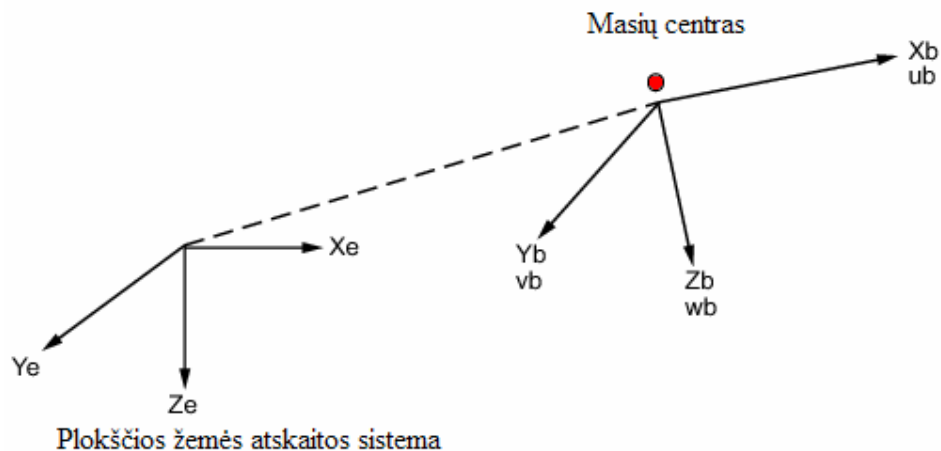
- Keliamoji jėga (*angl.* Lift) 2900 N;
- Pasipriešinimas (*angl.* Drag) 1000 N;
- Svoris (*angl.* Weight) 2900 N. Tam, kad sklandytuvas skristų tiesiai, nežemėtų ir neaukštėtų: $Svoris = Keliamoji\ jėga$. $F = mg$, kur m – sklandytuvo masė ($m = 290\ kg$), g – laisvo kritimo pagreitis ($g = 10\ m/s^2$);
- Trauka (*angl.* Thrust) 1000 N. tam, kad sklandytuvo greitis būtų pastovus $Trauka = Pasipriešinimas$;
- Skrydžio trajektorijos kampas 0 rad;
- Pokrypio kampas 0 rad;
- Atakos kampas 0 rad.

Orlaivio judėjimo lygčių skaičiavimas. Sekanti sklandytuvo modelio dalis – judėjimo lygčių (*angl.* Equations of motion) skaičiavimas. Tam tikslui iš *Simulink* bibliotekos *Aerospace Blockset* buvo parinktas blokas „Simple Variable Mass 6DoF (Euler Angles)“ (35 pav.). Bloko paskirtis – kintamos masės šešių laisvės laipsnių judėjimo lygčių skaičiavimas.



35 pav. Judėjimo lygčių skaičiavimo blokas

6 laipsnių judėjimo lygčių skaičiavimo blokas (Eulerio kampai) skaičiuoja orlaivio koordinatų sistemos (X_b , Y_b , Z_b) sukimosi žemės koordinatų ašių (X_e , Y_e , Z_e) atžvilgiu. Orlaivio koordinatų sistemos pradžia yra laikomas jo masių centras (36 pav.) , laikant kad lėktuvo korpusas yra standus ir masių centras nekinta. Dėl to nereikia nagrinėti jėgų poveikio kiekvienam orlaivio taškui. Plokščios žemės atskaitos sistema yra laikoma inertiška.



36 pav. Orlaivio ir žemės koordinatų sistemos

Toliau pateiktos lygybės, aprašančios orlaivio koordinatų perskaičiavimą. Lygtyse $[F_x \ F_y \ F_z]^T$ yra jėgos orlaivio koordinatų sistemoje:

(33)

$$\underline{F}_b = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = m(\underline{V}_b + \underline{w} \times \underline{V}_b) + m\underline{V}_b;$$

$$\underline{V}_b = \begin{bmatrix} u_b \\ v_b \\ w_b \end{bmatrix}; \quad (34)$$

$$\underline{w} = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}; \quad (34)$$

Orlaivio koordinačių sistemos sukimasis aprašytas toliau pateiktomis formulėmis. Formulėse $[L \ M \ N]^T$ – veikiantys momentai.

$$\underline{M}_B = \begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} = I\underline{w} + \underline{w} \times (I\underline{w}) + I\underline{w}; \quad (36)$$

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yz} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}; \quad (37)$$

Santykis tarp kampinio greičio lėktuvo koordinačių sistemoje $[p \ q \ r]^T$ ir Eulerio kampų kitimo greičio $[\phi \ \theta \ \psi]^T$ gali būti nustatytas perskaičiuojant Eulerio kampus į orlaivio koordinačių sistemą:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \equiv J^{-1} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (38)$$

Invertuojant J gaunama lygybė, reikalinga Eulerio vektoriaus nustatymui:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & (\sin \phi \times \tan \theta) & (\cos \phi \times \tan \theta) \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \frac{\sin \phi}{\cos \theta} & \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (39)$$

2 lentelėje aprašyti visi bloko įėjimai, 4 lentelėje - išėjimai.

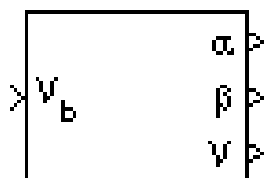
3 lentelė. Bloko įėjimai

Įėjimas	Aprašymas
F_{xyz} (N)	Trimis ašimis (x , y ir z) veikiančios jėgos (N)
M_{xyz} (N)	Trimis ašimis (x , y ir z) veikiantys momentai (N)
dm/dt (kg/s)	Masės kitimo sparta (kg/s)

4 lentelė. Bloko išėjimai

Išėjimas	Tipas	Aprašymas
V_e (m/s)	Trijų elementų vektorius	Greitis žemės koordinačių sistemos atžvilgiu
X_e (m)	Trijų elementų vektorius	Padėtis žemės koordinačių sistemos atžvilgiu
$\Phi \theta \psi$ (rad)	Trijų elementų vektorius	Eulerio sukimosi kampai [posvyrio, polinkio, pokrypio] (rad)
DCM	3×3 dydžio matrica	Naudojama koordinačių transformacijai iš žemės į orlaivio koordinačių sistemą
V_b (m/s)	Trijų elementų vektorius	Greitis orlaivio koordinačių sistemos atžvilgiu
ω (rad/s)	Trijų elementų vektorius	Kampiniai greičiai orlaivio koordinačių sistemoje (rad/s)
$d\omega/dt$	Trijų elementų vektorius	Kampiniai pagreičiai orlaivio koordinačių sistemoje (rad/s)
A_b (m/s ²)	Trijų elementų vektorius	Pagreitis orlaivio koordinačių sistemoje
Fuel	Skaliarinis dydis	Vėliavėlė, atitinkanti kuro bako būklę: ▪ 1 rodo, kad bakas pilnas ▪ 0 rodo, kad bakas nei pilnas nei tuščias ▪ -1 rodo, kad bakas yra tuščias

Atakos, slydimo kampo ir oro greičio skaičiavimas. Prie anksčiau aptarto, judėjimo lygčių skaičiavimo bloko jungiamas kitas modelio elementas – atakos, slydimo kampus ir oro greitį skaičiuojantis blokas (37 pav.) Atakos ir slydimo kampai – tai kampai tarp orlaivio ir greičio vektorių.



37 pav. Atakos, slydimo kampus ir oro greitį skaičiuojantis blokas

Blokas palaiko šešių laisvės laipsnių Eulerio kampų ir kvaterniono modelius, skaičiuodamas kampus tarp greičio vektoriaus ir orlaivio, ir taip pat pilnutinį oro greitį iš greičio komponentžių orlaivio koordinačių sistemoje.

$$\alpha = a \tan\left(\frac{\omega}{u}\right); \quad (40)$$

$$\beta = a \sin\left(\frac{v}{V}\right); \quad (41)$$

$$V = \sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2}; \quad (42)$$

5 lentelėje aprašyti visi bloko įėjimai, 6 lentelėje - išėjimai.

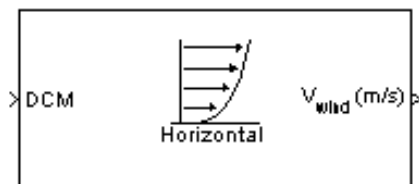
5 lentelė. Bloko įėjimai

Įėjimas	Tipas	Aprašymas
V _b	Trijų elementų vektorius	Orlaivio greitis orlaivio koordinačių sistemoje

6 lentelė. Bloko išėjimai

Išėjimas	Aprašymas
α	Atakos kampas (rad)
β	Slydimo kampas (rad)
V	Orlaivio oro greitis

Horizontalaus vėjo modelis. Šio bloko paskirtis sklandytuvo modelyje – simuliuoti šoninį vėją taip gaunant atitinkamus slydimo kampus. Horizontalaus vėjo modelis konvertuoja horizontalų vėją (šiaurines ir rytines komponentes) į vėjo greitį, kryptį orlaivio koordinačių sistemoje.



38 pav. Horizontalaus vėjo modelis

Vėjas yra aprašomas greičiu ir kryptimi žemės koordinačių ašyse. Greitis ir kryptis gali būti pastovūs arba kintantys laike. Vėjo kryptis yra kampas laipsniais nuo žemės x ašies (šiaurės) pagal laikrodžio rodyklę. Vėjo kryptis – kryptis, iš kurios vėjas pučia. Naudojant DCM (*angl.* Direction cosine matrix) matricą, vėjo greičiai yra transformuojami į koordinates orlaivio koordinačių sistemoje.

Bendras sklandytuvo modelio vaizdas pateiktas 39 pav.

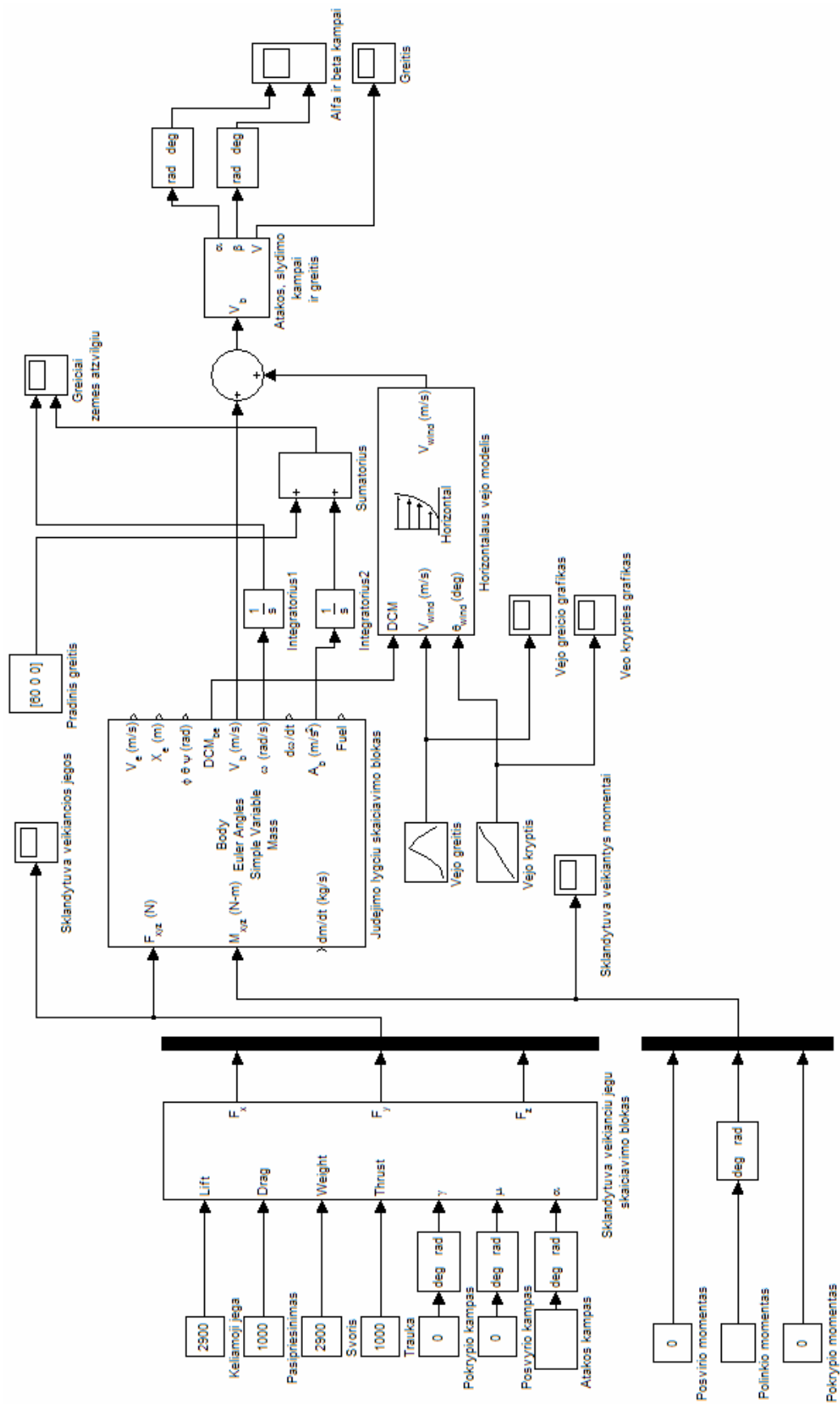
7 lentelėje aprašyti visi bloko įėjimai, 8 lentelėje – išėjimai.

7 lentelė. Bloko įėjimai

Įėjimas	Aprašymas
DCM	DCM matrica
Papildomas	Vėjo greitis pasirinktais matavimo vienetais
Papildomas	Vėjo kryptis laipsniais

8 lentelė. Bloko išėjimai

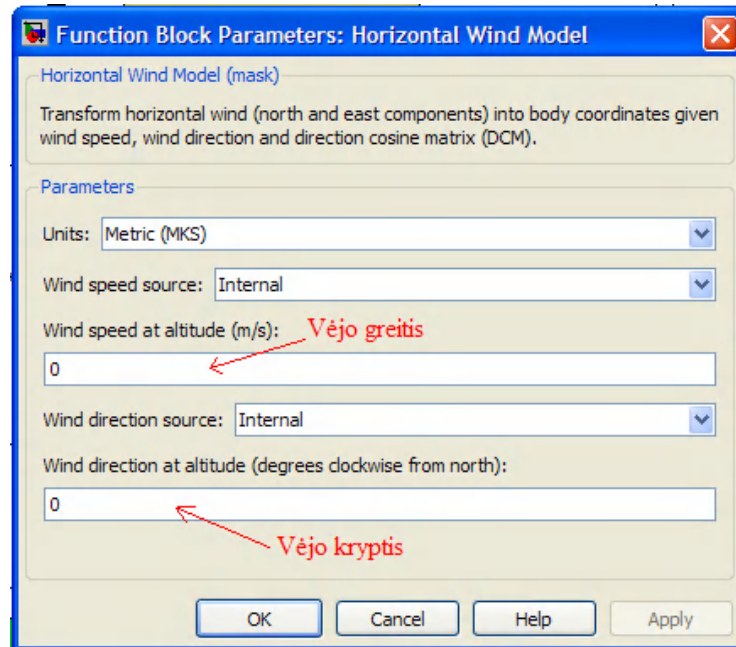
Įėjimas	Aprašymas
V_{wind}	Vėjo greitis orlaivių koordinatų sistemoje pasirinktais matavimo vienetais



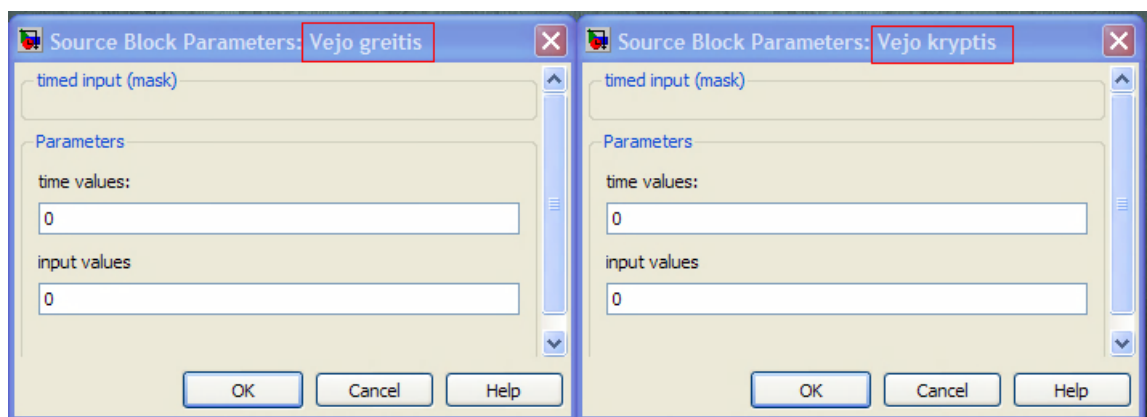
39 pav. Sklandytuvo matematinis modelis

4.3 Matematinio sklandytuvo modelio tyrimas

Slydimo kampo matavimas *Simulink* modeliu. Kaip jau buvo minėta, norint simuliuoti tam tikrą slydimo kampą, reikia imituoti tam tikrą šoninį vėją. Vėjo greitis ir kryptis nustatoma 5.2 skyrelyje aptarto horizontalaus vėjo modelio bloke. Kai vėjo kryptis ir greitis nekinta, duomenų įvedimas vykdomas bloko parametrų nustatymo lange (39 pav.). Vėjo greičiui ir kryptčiai kintant, parametrai įvedami atskiruose komandiniuose languose (modelyje pažymėta „Vėjo greitis“ ir „Vėjo kryptis“) (40 pav.).



40 pav. Horizontalaus vėjo modelio nustatymų langas



41 pav. Vėjo greičio ir krypties nustatymo langai, kai jie yra kintantys

Pradiniai modelio duomenys:

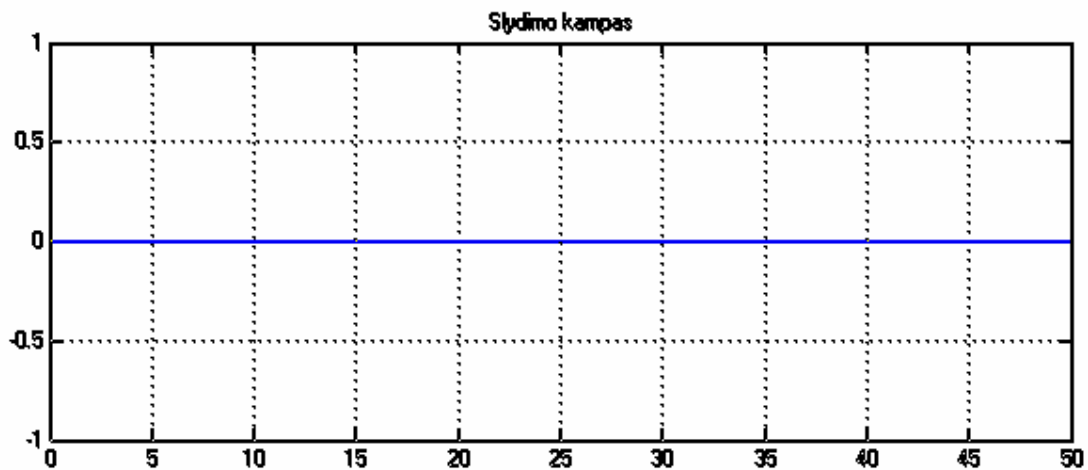
Keliamoji jėga: 2900 N ;

Pasipriešinimas: 1000 N;
Svoris: 2900 N;
Trauka: 1000 N;
Pokrypio kampas: 0^0 ;
Posvyrio kampas: 0^0 ;
Atakos kampas: 0^0 nekintantis visą simuliacijos laiką;
Posvyrio momentas: 0 Nm;
Pokrypio momentas: 0 Nm;
Polinkio momentas: 0 Nm nekintantis visą simuliacijos laiką;
Pradinis sklandytuvo greitis: 60 mazgų.

Polinkio momento kitimu valdomas orlaivio polinkis – jo trajektorija z ašyje (34 pav.). Slydimo kampo matavimui orlaivio trajektorija parinkta tiesiaieigė, todėl polinkio momentas yra 0 Nm ir nekintantis per visą simuliacijos laiką. Simuliacijos trukmė – 50 s.

Toliau pateikti slydimo kampo grafikai, esant įvairiems vėjo greičiams bei kampams.

41 pav. Pavaizduotas slydimo kampo grafikas, kai sklandytuvas juda x ašimi ir šoninio vėjo nėra. Tokiu atveju slydimo kampas lygus 0.



42 pav. Atakos kampas, kai vėjo greitis 0 m/s ir kryptis į šiaurę

Toliau bus nagrinėjami atvejai, kai :

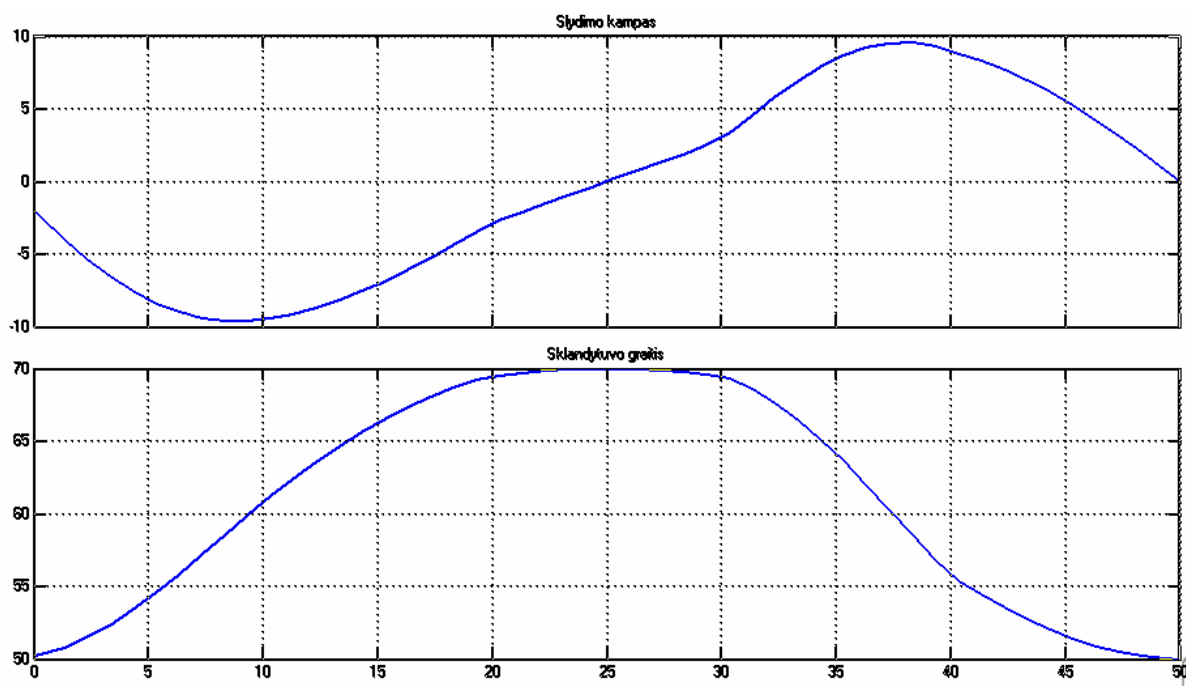
- orlaivio pradinis greitis pastovus, vėjo greitis pastovus, kryptis kintama;
- orlaivio pradinis greitis pastovus, vėjo greitis kintantis, kryptis pastovi;
- orlaivio pradinis greitis pastovus, vėjo greitis kintantis, kryptis kintanti.

Orlaivio greitis pastovus, vėjo greitis pastovus, kryptis kintanti. Sklandytuvo greitis bandymo nekintantis ir lygus *60 mazgų* arba *111 km/h*. Vėjo greitis nekintantis ir lygus 10 m/s. Vėjo krypties kitimas laike pateiktas 9 lentelėje.

9 lentelė. Vėjo krypties kitimas laike

Laikas (s)	0	10	20	30	40	50
Vėjo kryptis ($^{\circ}$)	10	90	160	200	300	360

Vėjo kryptis atskaitoma prieš laikrodžio rodyklę nuo x ašies (šiaurės).



43 pav. Sklandytuvo slydimo kampo ir greičio kitimas keičiantis vėjo kryptiai

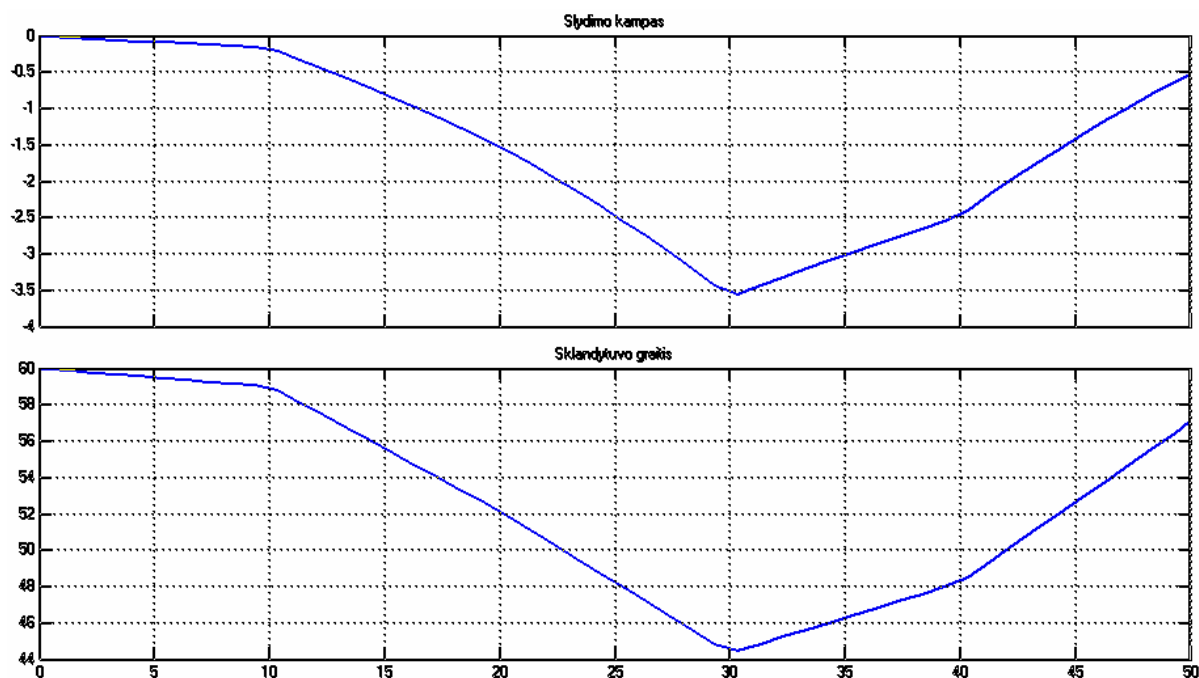
Viršutiniame grafike (42 pav.) pavaizduotas slydimo kampo kitimas kintant vėjo kryptiai, apatiniame grafike – orlaivio greičio kitimas. Greitis pavaizduotas x ašies atžvilgiu. Kaip matyti iš pirmojo grafiko, slydimo kampas stipriai priklauso nuo vėjo krypties. Slydimo kampas įgyja neigiamą reikšmę, kai vėjas orlaiviui pučia iš kairės pusės ir atvirkščiai – teigiamą, vėjui pučiant iš dešinės.

Orlaivio greitis įgyja didžiausią reikšmę 25 sekundę, kai vėjas pučia x ašies kryptimi. Tada sklandytuvo ir vėjo greičiai sumuojasi.

Orlaivio pradinis greitis pastovus, vėjo greitis kintantis, kryptis pastovi. Orlaivio pradinis greitis *60 mazgų* arba *111 km/h*. Vėjo kryptis 10^0 . Vėjo greičio kitimas parodytas 10 lentelėje.

10 lentelė. Vėjo greičio kitimas laike

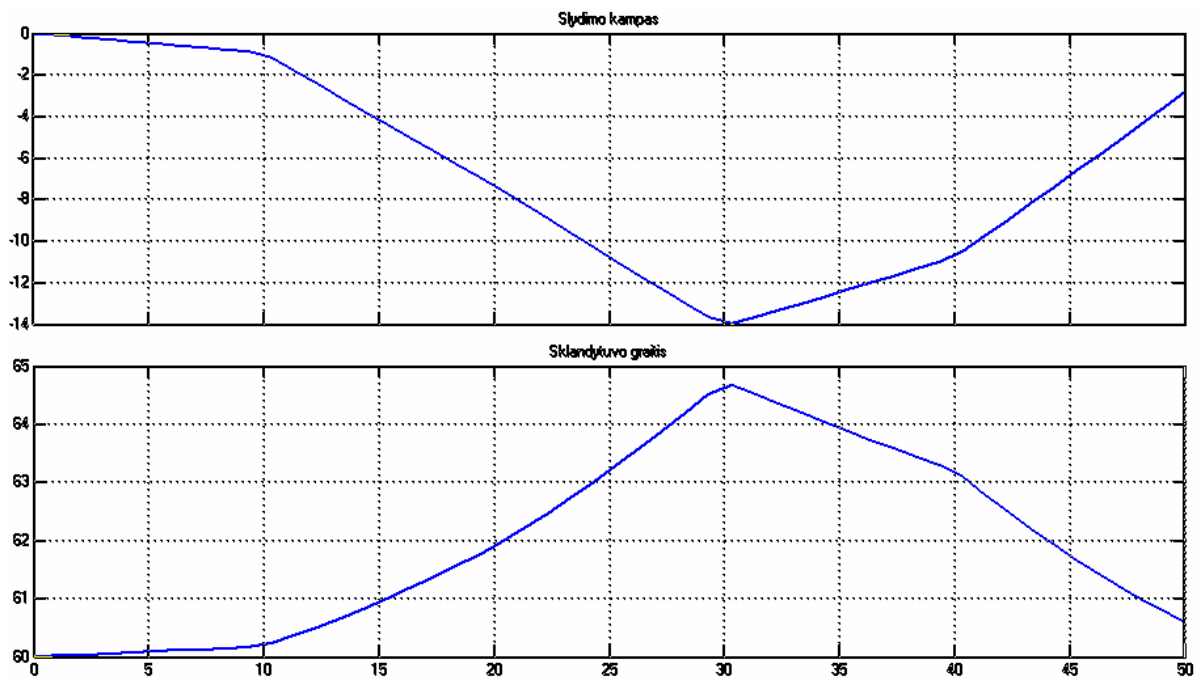
Laikas (s)	0	10	20	30	40	50
Vėjo greitis (m/s)	0	1	8	16	12	3



44 pav. . Sklandytuvo slydimo kampo ir greičio kitimas kintant vėjo greičiui

Sklandytuvo slydimo kampas didėja didėjant vėjo greičiui. Orlaivio greičio grafikas labai panašus į slydimo kampo. Greitis mažėja, ir mažiausią reikšmę pasiekia esant didžiausiam vėjo greičiui. Vėjui pučiant 10^0 kampu atsiranda jo dedamoji, kurios kryptis priešinga orlaivio judėjimo kryptiai. Dėl to mažėja sklandytuvo greitis.

44 pav. pavaizduoti *beta* kampo ir greičio grafikai, kai vėjo kampas 100^0 . Kitos sąlygos: pradinis orlaivio greitis ir vėjo greičio kitimas lieka nepakitę.



45 pav. Sklandytuvo slydimo kampo ir greičio kitimas kintant vėjo greičiui

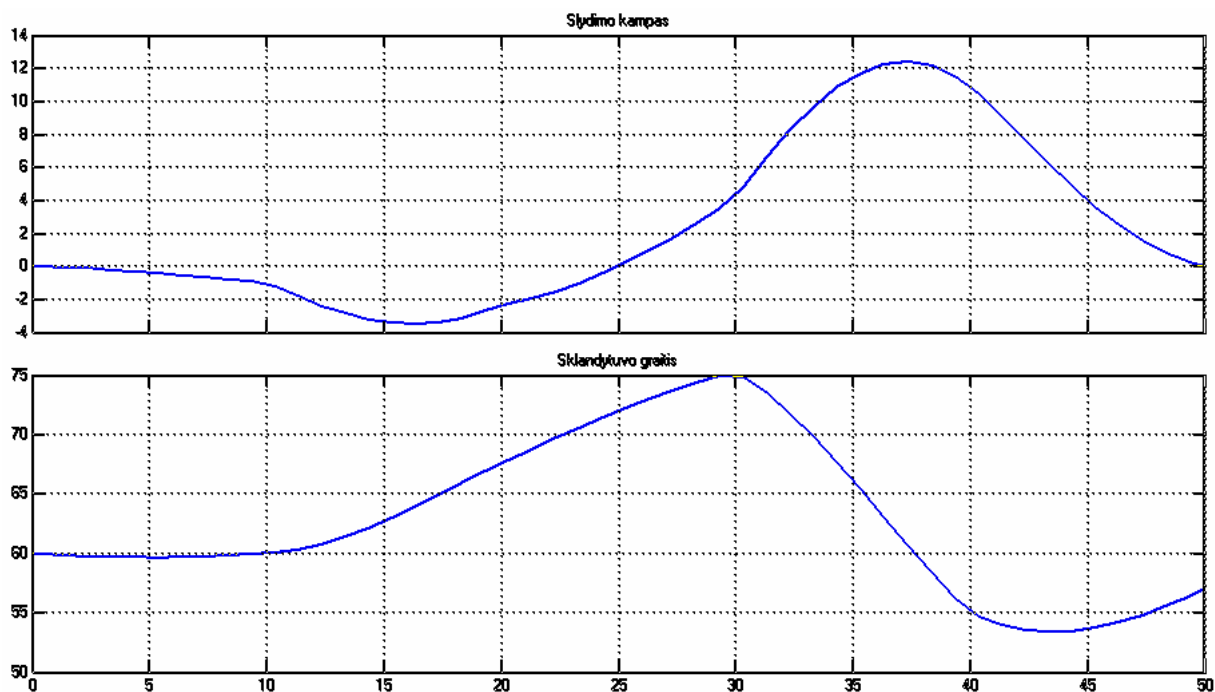
Iš 44 pav. matosi, kad pasikeitus vėjo kryptčiai į 100° , atsiranda dedamoji, kurios krypttis sutampa su orlaivio judėjimo kryptimi, dėl to padidėja jo greitis.

Orlaivio pradinis greitis pastovus, vėjo greitis kintantis, kryptis kintanti. Šiame etape bus nagrinėjama kaip kinta sklandytuvo slydimo kampas, kintant vėjo greičiui ir kryptčiai vienu metu. Pradinis orlaivio greitis *60 mazgų* arba *111 km/h*. Vėjo greičio ir krypties kitimas parodytas 11 lentelėje.

11 lentelė. Vėjo greičio ir krypties kitimas

Laikas (s)	0	10	20	30	40	50
Vėjo greitis (m/s)	0	1	8	16	12	3
Vėjo kryptis ($^{\circ}$)	10	90	160	200	300	360

Slydimo kampo ir greičio kitimas kintant vėjo greičiui ir kryptčiai parodytas 46 pav.

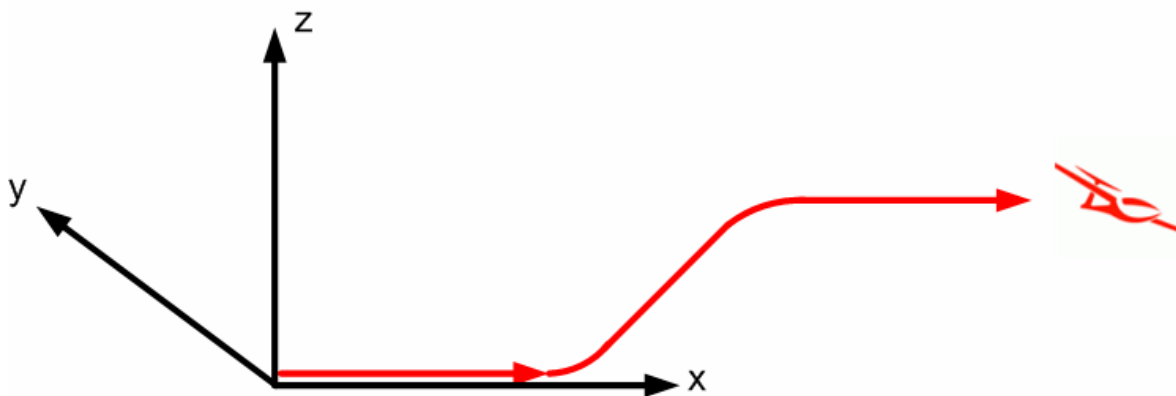


46 pav. Sklandytuvo slydimo kampo ir greičio kitimas keičiantis vėjo greičiui ir kryptčiai

Kintant vėjo greičiui ir kryptčiai pagal 11 lentelės duomenis, slydimo kampas įgyja ir teigiamas ir neigiamas reikšmes, greitis ir mažėja ir didėja. Didžiausias greičio šuolis yra ties 30 sekunde, kai vėjo greičio dedamoji x ašyje yra didžiausia.

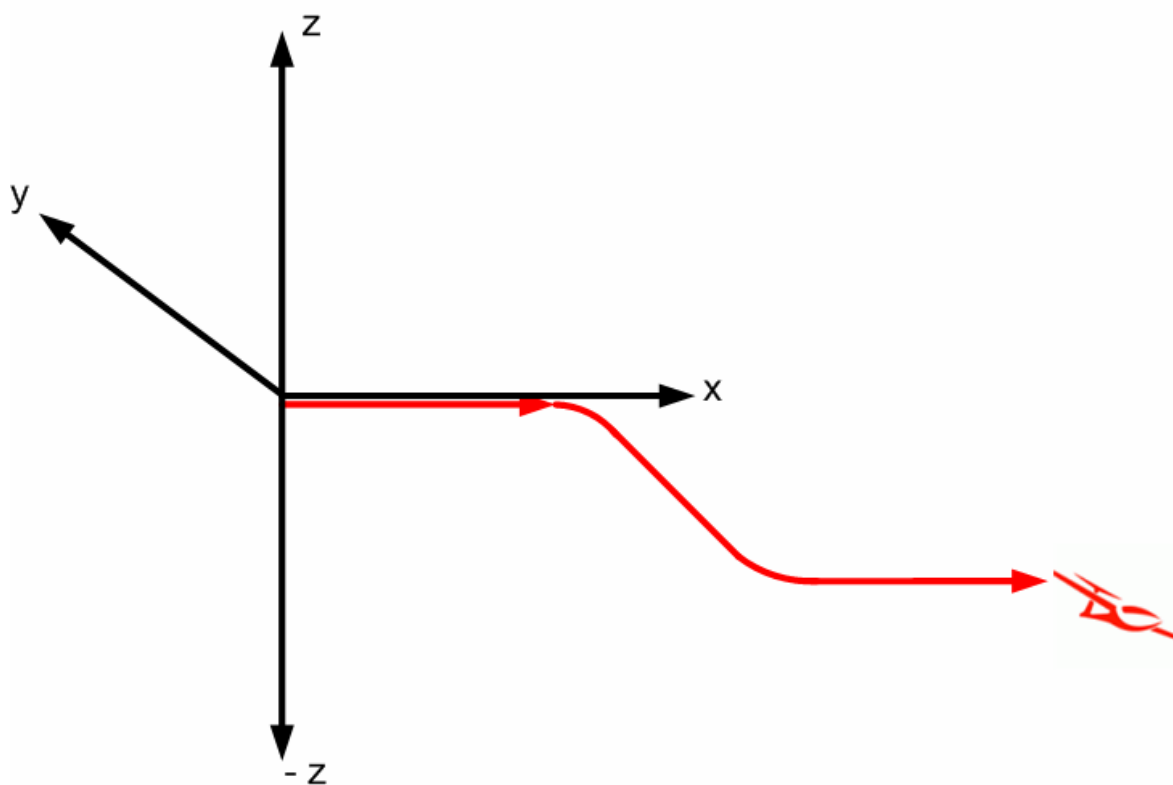
Sklandytuvo atakos kampo tyrimas *Simulink* modeliu. Norint, kad matematinis *Simulink* modelis skaičiuotų sklandytuvo atakos kampą, reikia nustatyti atitinkamą orlaivio skrydžio trajektoriją. Bus atlinkti trys bandymai, nustatant skirtingas skrydžio trajektorijas. Trajektorijos kitimas bus nustatomas tik z ašyje. Nustatomos trajektorijos:

- sklandytuvas skrenda tiesiai, po to kyla aukštyn, išsilygina ir vėl skrenda tiesia trajektorija (46 pav.);



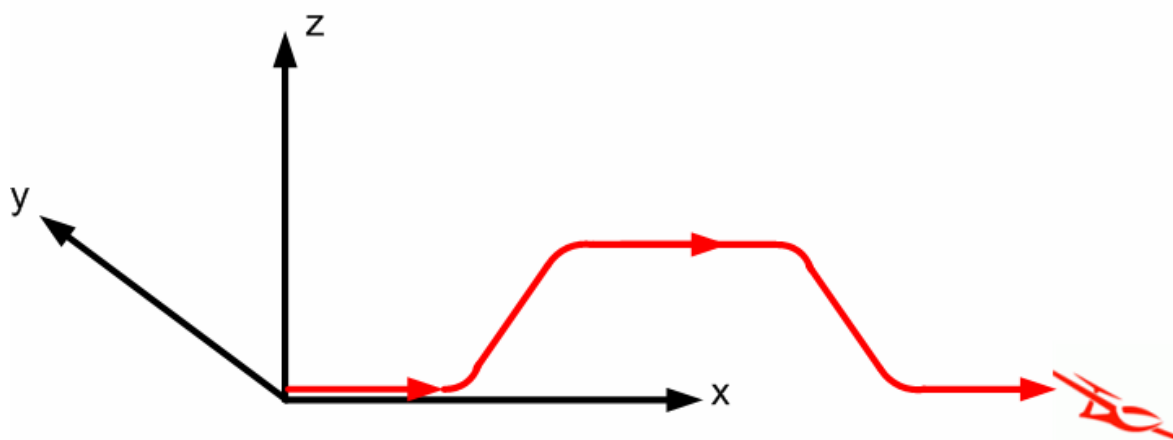
47 pav. Pirmoji sklandytuvo skrydžio trajektorija

- sklandytuvas skrenda tiesiai, po to leidžiasi žemyn, išsilygina ir vėl skrenda tiesia trajektorija (47 pav.);



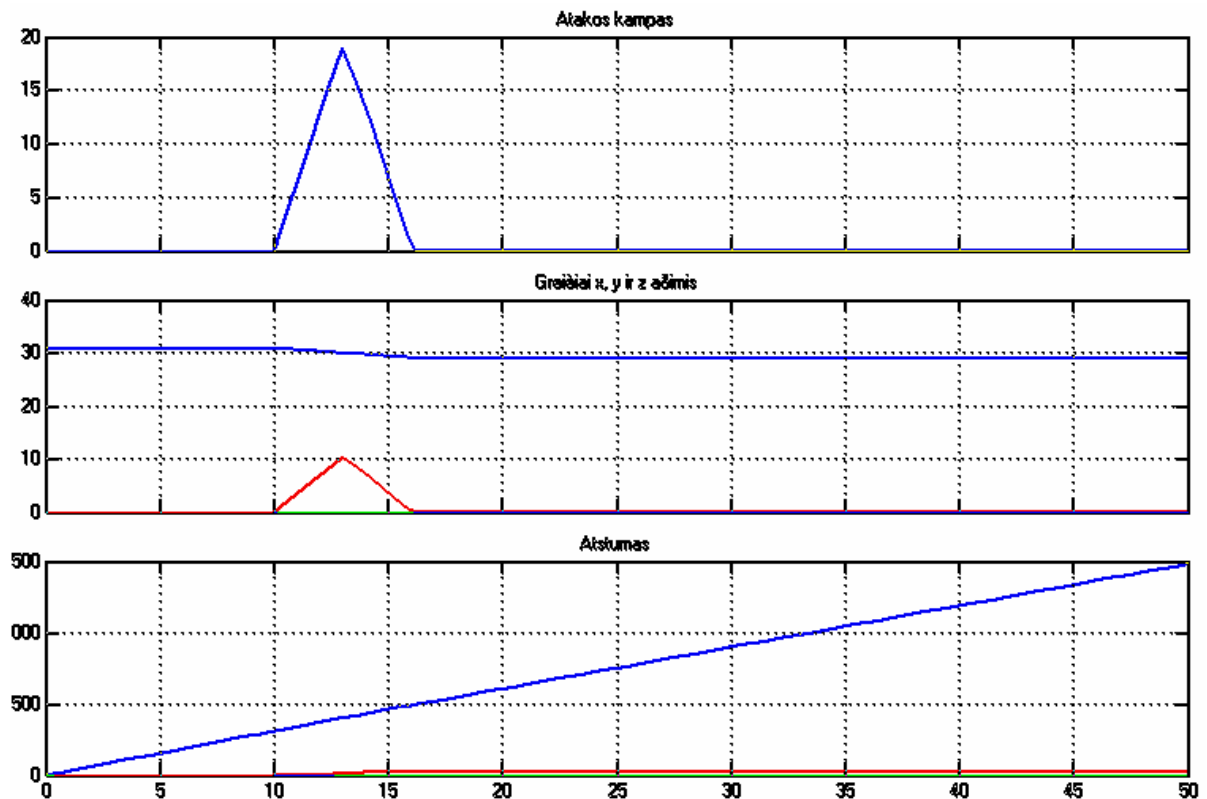
48 pav. Antroji sklandytuvo skrydžio trajektorija

- sklandytuvas skrenda tiesiai, po to kyla aukštyn, išsilygina, tam tikrą laiką tarpą skrenda tiesia trajektorija, po to leidžiasi žemyn, išsilygina ir skrenda tiesia trajektorija (48 pav.).



49 pav. Trečioji sklandytuvo skrydžio trajektorija

Sklandytuvo skrydis pagal pirmąją trajektoriją. Pagal pirmą variantą sklandytuvo trajektorija yra tokia: orlaivis skrenda tiesiai, po 10 sekundžių atakos kampas padidėja ir sklandytuvas kyla aukštyn. Po 3 sekundžių orlaivio atakos kampas ima mažėti. 16 – tą sekundę orlaivio trajektorija grįžta į pradinę būseną ir jis skrenda tiesiai (49 pav.). Pradinis orlaivio greitis x ašies atžvilgiu yra 31 m/s, y ir z ašimis greičiai yra lygūs 0 m/s.



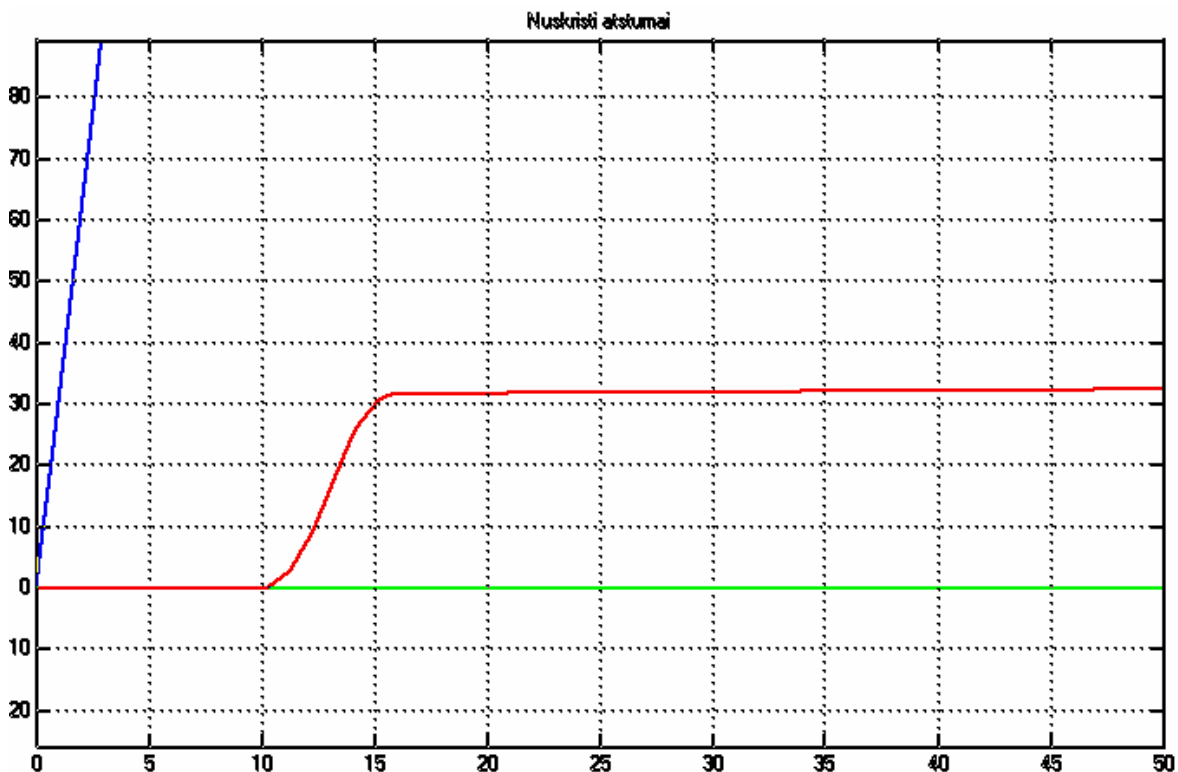
50 pav. Sklandytuvo atakos kampo, greičio x , y , z ašimis ir nuskristo atstumo grafikai

49 pav. pavaizduoti sklandytuvo atakos kampo, greičių x , y , z ašimis ir nuskristo atstumo grafikai. Nuskristo atstumo grafikas gaunamas integruojant antrojo grafiko duomenis ($\int v = s$). Kaip matyti pagal pirmąjį grafiką ir 46 pav. 10 sekundę, orlaiviui pradeda kilti aukštyn, dėl to didėja jo atakos kampas. Po trijų sekundžių atakos kampas ima mažėti ir 16 – tą sekundę kampas α tampa lygus 0.

Antrajame grafike matyti greičiai trimis ašimis. Raudonos spalvos kreivė yra greitis z ašies atžvilgiu, žalia spalva – y ašies atžvilgiu, mėlyna spalva – x ašies atžvilgiu. Pagal greičių grafiką greitis x ašies atžvilgiu skrydžio metu kinta nežymiai. Tuo metu, kai atakos kampas ima didėti, greitis x ašies atžvilgiu sumažėja dėl gravitacinės jėgos. Greitis y ašies atžvilgiu skrydžio metu nekinta, nes nėra šoninio vėjo. z ašies atžvilgiu greitis ima didėti didėjant α kampui. Greitis pasiekia didžiausią reikšmę 10 m/s kai atakos kampas lygus 20° . Atakos kampui

mažėjant mažėja ir greitis z ašimi. Kai po manevro $\alpha = 0$, greitis irgi tampa lygus 0 – sklandytuvas nustoja aukštėti ir vėl skrenda tiesia trajektorija.

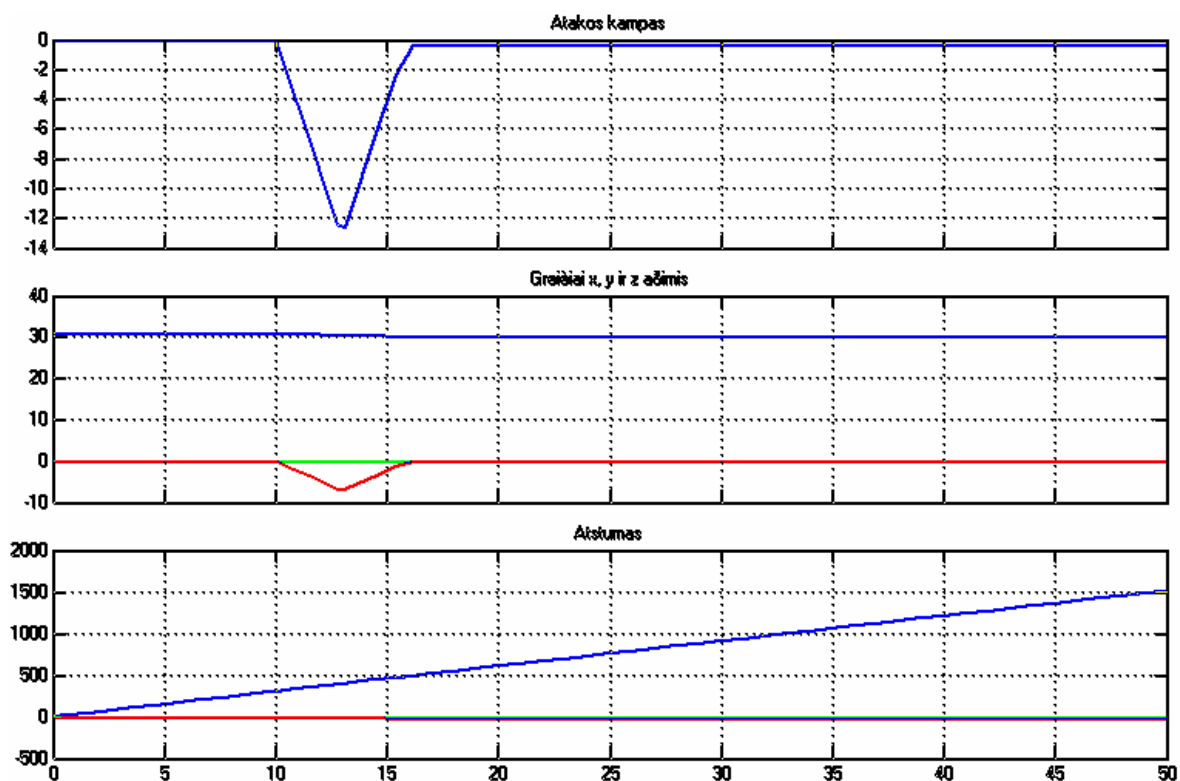
Trečiajame grafike pavaizduoti nuskristi atstumai x , y ir z ašimis. x ašimi greitis beveik nekinta, todėl nuskristas atstumas tolygiai didėja iki $\sim 1500\text{ m}$. Tam, kad pamatyti į kokį aukštį pakilo sklandytuvas manevro metu, reikia padidinti grafiką (50 pav.).



51 pav. Nuskristų atstumų grafikas

Pagal 50 pav. pateiktus grafikus matyti, kad per 50 sekundžių skrydžio sklandytuvas pakilo į maždaug 30 metrų aukštį ir jame toliau skrido.

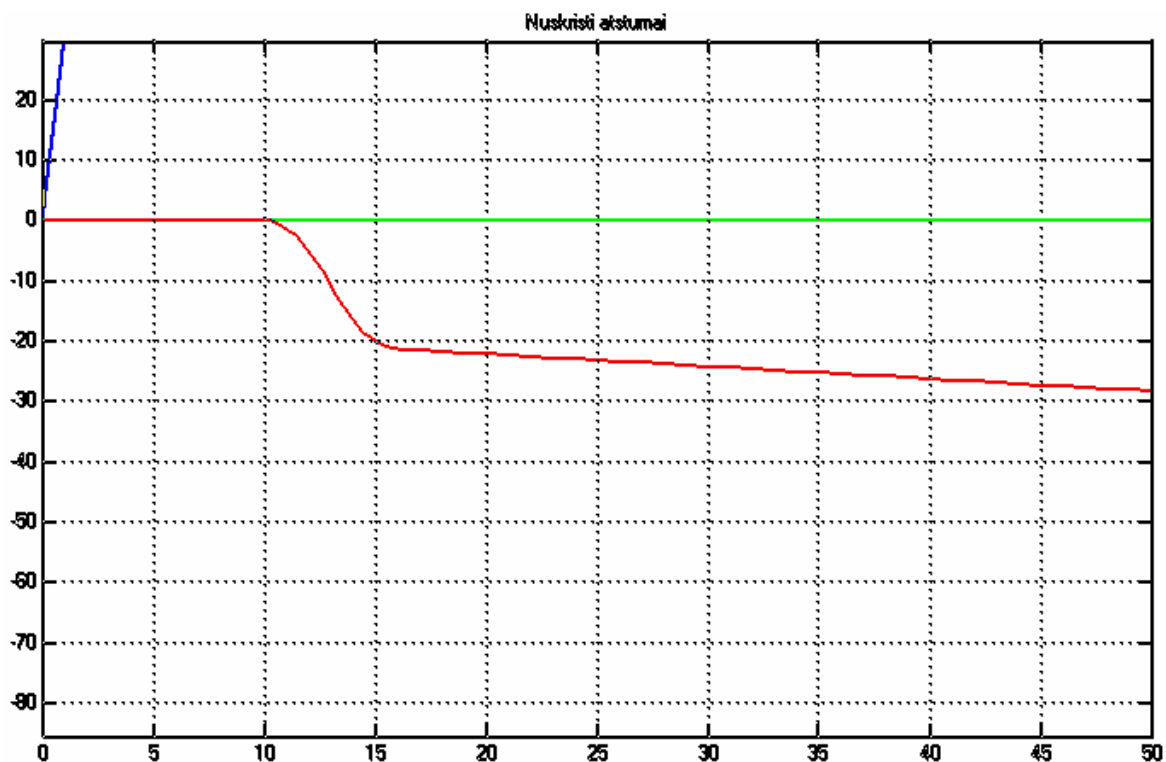
Sklandytuvo skrydis pagal antrąją trajektoriją. Pagal antrą variantą sklandytuvo trajektorija yra tokia: sklandytuvas skrenda tiesiai 10 sekundžių, po to 3 sekundes leidžiasi žemyn. Po 13 sekundžių orlaivio atakos kampas ima artėti link 0° . Po 16 sekundžių sklandytuvo skridimo trajektorija grįžta į pradinę padėtį, kuria jis skrenda toliau (47 pav.). Pradinis orlaivio greitis x ašies atžvilgiu yra 31 m/s , y ir z ašimis greičiai yra lygus 0 m/s .



52 pav. Sklandytuvo atakos kampo, greičio x , y , z ašimis ir nuskristo atstumo grafikai

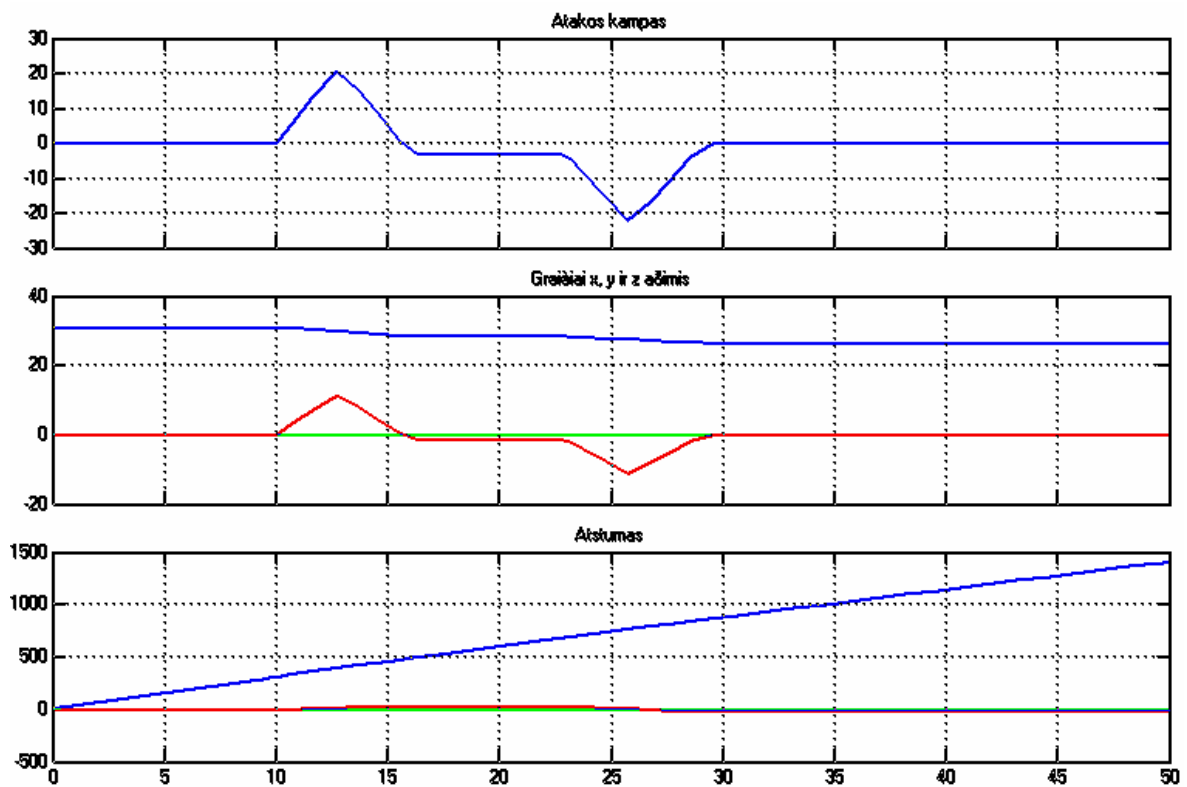
Kaip ir pirmajame nagrinėtame atvejuje, viršutinis grafikas – α kampas, antrasis – greičiai x , y , z ašimis, ir trečiasis – nuskristi atstumai x , y , z ašimis. Pagal nustatytą trajektoriją, dešimtą sekundę sklandytuvo nosis nukreipama žemyn 47 pav. Tuo momentu, kaip matyti pagal pirmą grafiką (51 pav.), tuo metu atakos kampas ima didėti, įgydamas neigiamą reikšmę. Šiuo atveju buvo parinkti mažesni momentai, veikiantys sklandytuvą, nei pirmuoju atveju (49 pav.), todėl atakos kampo modulis gaunamas mažesnis. Pasikeitus veikiančio momento kryptiai (momento dydis nesikeičia) į priešingą, tryliką sekundę α kampas ima mažėti, ir po trijų sekundžių sumažėja iki 0.

Pagal antrą grafiką matyti jog atakos kampo reikšmei didėjant orlaivis įgyja greitį – z ašies atžvilgiu. Greitis x ir y ašių atžvilgiu praktiškai nepakinta. Kaip pasikeitė sklandytuvo aukštis manevro metu, galima pamatyti iš grafiko, pateikto 52 pav. Grafike matyti, jog orlaivio aukštis sumažėjo beveik 30 metrų (mėlynos spalvos grafikas). Per tą laiką sklandytuvas nuskrido 1500 metrų (geltona kreivė).



53 pav. Nuskristų atstumų grafikas

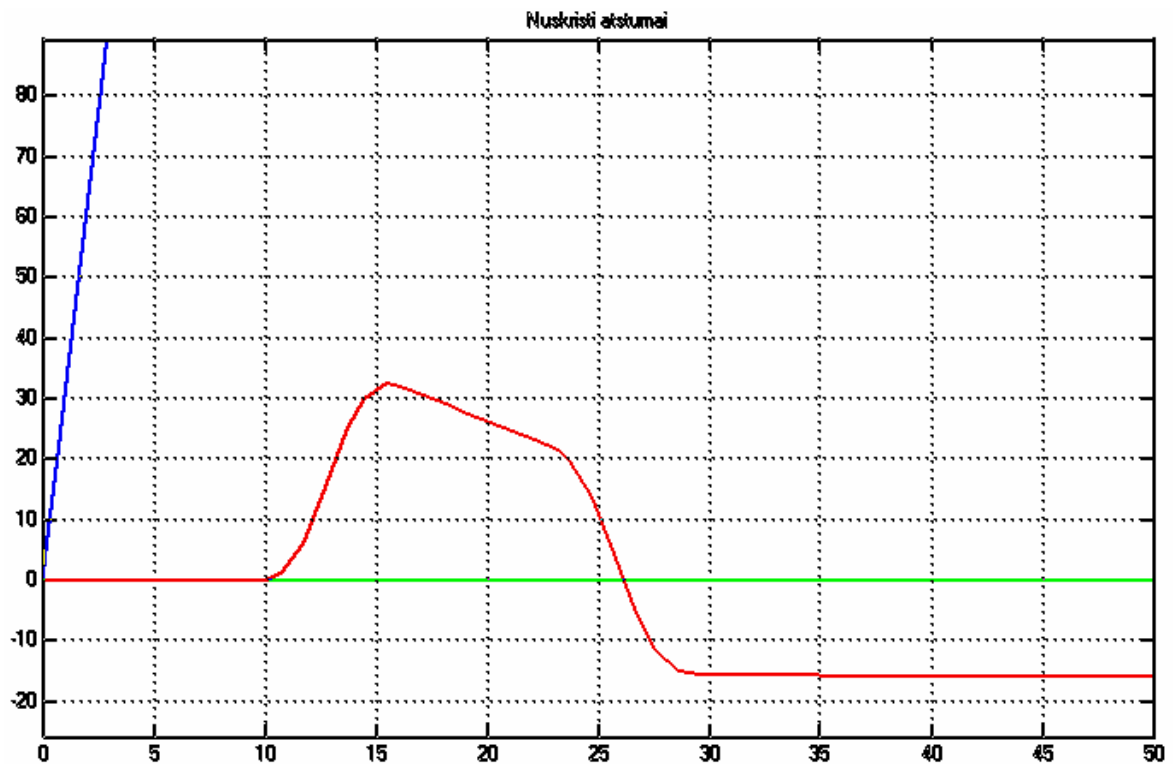
Sklandytuvo skrydis pagal trečiąją trajektoriją. Pagal nustatytą trajektoriją pradžioje skrendama tiesia trajektorija. Po 10 sekundžių orlaivis kyla aukštyn – *alfa* kampas įgyja teigiamą reikšmę. Tryliktą sekundę pradeda veikti momentas, verčiantis atakos kampą mažėti. Nuo 16 iki 23 sekundės skrendama tiesia trajektorija ($\alpha = 0$). 23 sekundę atsiranda momentas, verčiantis orlaivį kilti ($\alpha > 0$). Po 3 sekundžių ima veikti momentas, dėl kurio atakos kampas vėl įgyja nulinę reikšmę. Aprašytos sklandytuvo skridimo trajektorijos vizualizacija pateikta 48 pav. 53 pav. matyti grafikai, apibūdinantys orlaivio judėjimą skrydžio metu.



54 pav. Sklandytuvo atakos kampo, greičio x , y , z ašimis ir nuskristo atstumo grafikai

Nagrinėjamas atvejis pirmųjų dviejų atvejų junginys. Skiriasi tik momentai, kurie veikia orlaivį. Dėl nevienodų momentų yra skirtingi ir atakos kampai.

Aukščio pokytį galima pamatyti iš mėlyno grafiko, pateikto 53 pav.



55 pav. Nuskristų atstumų grafikas

Pagal 54 pav. grafiką matyti, jog pradžioje, didėjant atakos kampui orlaivis kyla ir jo aukštis padidėja 30 metrų. Po to, mažėjant atakos kampui, aukštis mažėja iki 20 metrų. Realiai taip neturėtų būti. Pagal 48 pav. aukštis neturėtų mažėti. Modelio neatitikimą užduotai trajektorijai lemia jo neišbaigtumas: reikalinga įvertinti ir kitus faktorius, tokius kaip laisvojo kritimo pagreičio veikimo krypties pokyčio išilginės sklandytuvo ašies atžvilgiu, kai orlaivio α nelygus 0. Nuo 23 sekundės, kai $\alpha < 0$, aukštis ima mažėti, ir sumažėja iki -15 metrų ribos. -15 metrų reiškia, jog po manevro sklandytuvo aukštis sumažėjo 15 metrų nuo pradinio aukščio.

IŠVADOS

Magistro darbe aptarti praktikoje naudojami orlaivių atakos ir slydimo kampų matavimo metodai ir matuokliai, palyginti dažniausiai naudojami jutikliai, aptarti jų trūkumai bei privalumai. Aprašyti veiksniai, darantys įtaką atakos ir slydimo kampų matavimo tikslumui.

Optimalaus metodo ir matuoklio pasirinkimui atakos ir slydimo kampų matavimui baigiamojo darbo eigoje buvo sukurtas matematinis sklandytuvo dinamiką aprašantis modelis. Tam tikslui buvo pasinaudota programos *Matlab* paprograme *Simulink*. Modelis buvo išbandytas, modeliuojant sklandytuvo skrydį keliomis tipinėmis trajektorijomis, ir parodyta, kad atakos ir slydimo kampai gali būti randami, įvedus realius pradinius duomenis.

Modelio panaudojamumas:

- keičiant modelio įvesties duomenis, galima parinkti reikiamą kampų matavimo matuoklio ar metodo matavimo tikslumą;
- modeliu galima apskaičiuoti ne tik *atakos ir slydimo* kampus, bet ir sklandytuvą veikiančias jėgas, momentus, pagreičius, greičius ir kitus skrydžio parametrus, todėl jis gali būti naudojamas projektuojant sklandytuvą;
- modelis galės būti panaudojamas mokymo tikslais – yra galimybė modeliuoti sklandytuvo skrydį įvairiomis trajektorijomis;
- modelio išbaigimui, pritaikymui konkrečiam sklandytuvui su konkrečiais jutikliais reikia atlikti realius bandymus su konkrečiais atakos ir slydimo kampų matuokliais. Po to modeliavimu galima tirti daviklių veikimo ribines reikšmes bei formuluoti kriterijus kampų matavimo tikslumui ir jutikliams;
- papildžius modelį (įvedus variklio modelį), jį galima naudoti ne tik sklandytuvo skrydžio modeliavimui, bet ir skraidymo aparatams su jėgaine;
- matematinis modelis gali būti konvertuojamas į programos kodą (C kalba), todėl gali būti naudojamas praktiškai visuose kompiuteriuose, net ir neturinčiuose įdiegtos *Matlab* programos.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Lasauskas, E. 2008. Skrydžio principai: mokomoji knyga. Vilnius. Technika. 182 psl.
2. Everything depends on side string [interaktyvus]. [Žiūrėta 2011 m. gegužės 5d.]. Prieiga per internetą: <http://www.gotafly.com/EagleTreePrimer/ETP6_Sensors_Custom.html>
3. Angle of attack (AOA) sensor for small and mid sized aircraft [interaktyvus]. [Žiūrėta 2011 m. gegužės 5 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.prweb.com/releases/2008/10/prweb1446344.htm>>
4. Pileckas, E. 2004. *Aviaciniai prietaisai*: mokomoji knyga. Vilnius: Technika. 243 psl.
5. Gracey, W. 1958. *Summary of methods of measuring angle of attack on aircraft*. Washington, SpaceAge Control, Inc.
6. Savickas, A. 2005. *Orlaivių valdymas ir navigacija*: mokomoji knyga. Vilnius: Technika. 576 psl.
7. Methods and system for determining angles of attack and sideslip using flow sensors [interaktyvus]. Steven H. Thomas. 2007 [žiūrėta 2011 m. sausio 14 d].
8. Method of estimating an angle of attack and angle of sideslip of an aircraft. [interaktyvus]. Alberto Chiesa. 2010 [žiūrėta 2011 m. sausio 14 d]. Prieiga per internetą: <<http://www.freepatentsonline.com/20100185345.pdf>>
9. Pitot-static system. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2011 m. gegužės 16d.]. Prieiga per internetą: <http://en.wikipedia.org/wiki/Pitot-static_system>
10. S. H. Chue. 1975. *Pressure probes for fluid measurement*. Prog. Aerospace Sci: Pergamon Press. 147-223 psl.
11. Richard D. Colgren 2001. *Method and system for estimation and correction of angle-of-attack and sideslip angle from acceleration measurements*. United States Patent, Patent No.: US 6273370 B1
12. Glenn B. Gilyard and Daumants Belte, Jr. 1974. *Flight-determined lag of angle-of-attack and angle-of-sideslip sensors in the YF-12A airplane from analysis of dynamic maneuvers*. California, NASA Dryden flight Research centre
13. Edward A. Haering, Jr. 1995. *Air data measurement and calibration*. California, NASA Dryden flight Research center
14. Aircraft spruce & Specialty Co. Instruments – Angle of Attack indicators.[interaktyvus]. [Žiūrėta 2010 m. sausio 12 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.aircraftspruce.com/menus/in/angleofattackindicators.html>>

15. Air data probes, Air data sensors, and 3D displacement sensors. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2010 m. sausio 12 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.spaceagecontrol.com/Main/Home>>
16. Измерение и ограничение перегрузок, углов атаки и усилий в системе управления. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2010 m. sausio 12 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.airwar.ru/breo/pnk/pnk6.html>>
17. Alex G.Sim. 1990. *Flight characteristics of a modified Schweizer SGS 1-36 Sailplane at Low and Very High Angles o Attack*. California, NASA Dryden flight Research center
18. АПРИОРНАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ФЛЮГЕРНОГО ДАТЧИКА УГЛА АТАКИ. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2010 m. sausio 12 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.nbuu.gov.ua/portal/natural/Tp/2009_1/stat2.htm>
19. Flight instruments – Level 3. Pitot static system and instruments. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2010 m. sausio 12 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.allstar.fiu.edu/aero/PSSI.htm>>
20. Active Pitch Stabilizer Concept [interaktyvus]. [Žiūrėta 2010 m. balandžio 18 d.]. Prieiga per internet: <http://www.charlesriverrc.org/articles/asfwpp/lelke_activepitch.htm>

PRIEDAI

SKLANDYTUVO ATAKOS IR SLYDIMO KAMPO MATAVIMŲ TYRIMAI

Vytautas Lapinskas

VGTU AGAI Aviacijos prietaisų katedra

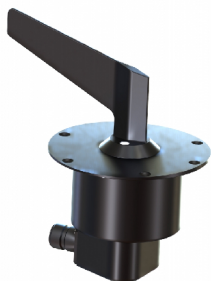
El. p. apk@ai.vgtu.lt

Anotacija. Straipsnyje aprašomas orlaivio atakos ir skydimo kampo matavimo būdas nedaudojant įprastinių daviklių (*pitoto* vamzdelio arba flugerinio daviklio). Vietoje jų panaudojami akselerometrai ir valdymo plokštumų padėties davikliai.

Reikšminiai žodžiai: Atakos kampas, slydimo kampas, daviklis, flugerinis, *Pitoto* vamzdelis

Įvadas

Dažniausiai orlaivio atakos ir slydimo kampai (dar vadinami *alfa* (α) ir *beta* (β) kampais atitinkamai) matuojami specialiai tam pritaikytais įrenginiais. Tai yra atakos kampo daviklis su mentele, kuri orientuojasi oro srauto kryptimi (1 pav.) ir vamzdelio tipo davikliai (2 pav.)



1 pav. Atakos kampo daviklis su mentele
Fig 1. Vane – type angle of attack sensor



2 pav. *Pitoto* vamzdelio tipo atakos kampo daviklis

Fig 2. Angle of attack pitot probe

Pirmojo matuoklio trūkumas – viena mentele galima matuoti tik atakos arba tik slydimo kampą. Todėl abiejų kampų matavimui reikalingi 2 tokie įrenginiai. Šio

trūkumo neturi antrasis daviklis – vienu davikliu galima matuoti atakos ir slydimo kampus vienu metu.

Egzistuoja ir kiti *alfa* ir *beta* kampų matavimo metodai. Vienas iš tokių yra kampų nustatymas panaudojant duomenis apie orlaivio greičius trimis ašimis: išilgine, skersine ir vertikaliąja. Taip pat šiam metodui reikalingi duomenys apie orlaivio valdymo plokštumų padėtis.

Metodo aprašymas

Linijinio kampų α ir β matavimo modelio matematinė išraiška:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + L\delta y, \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (1)$$

čia: u – vektorius, kuriame yra valdymo plokštumų skaičius, x – vektorius su apskaičiuotais atakos ir slydimo kampais, ir sukimosi apie tris ašis: išilginę, skersinę ir vertikaliąją greičiais, δy – paklaidos vektorius, į kurį įeina paklaidos tarp išmatuoto ir apskaičiuoto greičių, y – matavimo vektorius, kuriame yra apskaičiuoto greičio reikšmės, A , B , C , D – matricos apibūdinančios orlaivio judėjimą, L – grįžtamoji matrica.

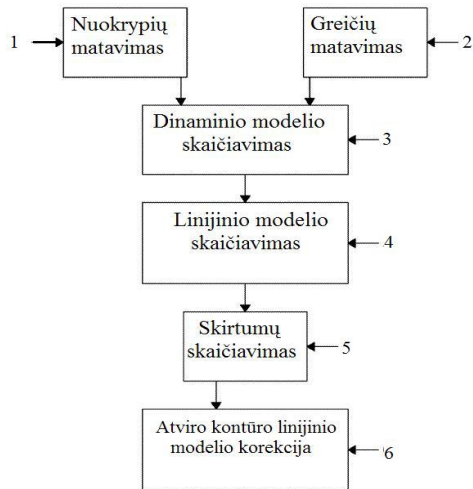
Atakos ir slydimo kampai turėtų visada būti tarp atitinkamų maksimalių reikšmių, pavyzdžiui: $\alpha = \pm 10^\circ$ ir $\beta = \pm 5^\circ$. Nustatytų kampų viršijimas gali turėti įtakos skrydžio stabilumui.

Matematinis sistemos modelis naudojamas atvirojo kontūro sistemai įvertinti. Tačiau dėl trikdžių: parametrų netikslumo, nemodeliuojamų kintamųjų, tokių kaip vėjo greitis, gaunami netikslūs atvirojo kontūro sistemos

duomenys. Šis trūkumas gali būti eliminuojamas naudojant kontrolinį kontūrą, kitaip tariant – skaitmeninį valdymo filtrą. Filtras užtikrina modelio ir išmatuotų davikliais kintamųjų apjungimą, tokiu būdu eliminuojant išorinius trikdžius.

Atvirojo kontūro lygtis pakoreguojama kontrolinio kontūro reikšmėmis. Pastarosios yra atvirkščiai proporcingos paklaidai, gaunami dėl modelio ir išmatuotų kintamųjų nevienodumo.

Jeigu faktinių matavimų rinkinys yra pakankamai charakteringas, tada netgi dydžiai, kurie nėra matuojami tiesiogiai, atitinka realias reikšmes. Todėl atakos ir slydimo kampų nustatymui pakanka kampinių greičių matavimų rezultatų. Aptariamos sistemos struktūrinė schema pateikta 3 pav.



3 pav. Struktūrinė sistemos veikimo schema

Fig 3. Structural diagram of system operation

Kaip žinoma, orlaivyje yra keletas valdymo plokštumų: eleronai, posūkio ir aukščio vairai. Ramybės būsenoje jie yra susilygiavę su atitinkamomis plokštumomis: eleronai su sparnais, aukščio vairas – stabilizatoriumi, posūkio vairas – kiliu. Toliau terminas „nuokrypis“ bus suprantamas kaip kampas, susidaręs tarp valdymo plokštumos ir plokštumos, ant kurios jis pritvirtintas.

3 pav. scheme: 1 – išmatuojami valdymo plokštumų nuokrypiai (d_1 – eleronų, d_2 – aukščio vairo ir d_3 – posūkio vairo nuokrypis). Nuokrypiai matuojami davikliais, išdėstytais atitinkamais atstumais nuo valdymo plokštumų.

2 – ajame žingsnyje matuojami inerciniai greičiai: efektyvusis posūkio greitis p_E , efektyvusis nuolydžio

greitis q_E , ir efektyvusis pokrypio greitis r_E . Pastarieji greičiai atspindi orlaivio sukimąsi apie 3 pagrindines ašis: x , y ir z .

Žingsnyje 3 sukuriamas orlaivio judėjimo erdvėje dinaminis modelis su šešiais laisvės laipsniais. Modelis kuriamas remiantis gautais duomenimis, orlaivį patalpinus į oro tunelį.

Toliau iš dinaminio modelio gaunamas linijinis modelis. Linijinis modelis toliau naudojamas kaip atviro kontūro sistema (*angl.* Open – loop estimator). Pastarasis modelis aprašomas lygčių sistema (1).

Matricos A pavyzdys turistiniam lktuvui, skrendančiame 2000 pėdų aukštyje 350 km/h greičiu:

$$\begin{pmatrix} \dot{a}_s \\ \dot{\beta}_s \\ \dot{p}_s \\ \dot{q}_s \\ \dot{r}_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2.629 & 0 & 0 & 0.95414 & 0 \\ 0 & 0.4154 & 0.03543 & 0 & -0.999 \\ 0 & -1.578 & -6.497 & 0 & 2.258 \\ -8.106 & 0 & 0 & -2.23 & 0 \\ 0 & 6.548 & -0.4943 & -0.8744 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_s \\ \beta_s \\ p_s \\ q_s \\ r_s \end{pmatrix}, \quad (2)$$

Matricoje A jau yra įvertintas vektorius x :

$$x = \begin{pmatrix} a_s \\ \beta_s \\ p_s \\ q_s \\ r_s \end{pmatrix}, \quad (3)$$

Matrica B atspindi valdymo plokštumų polinkio poveikį orlaivio būsenai ore. Matricos pavyzdys sudarytas esant tokioms pačioms sąlygoms kaip ir matricai A: turistiniam orlaiviui, skrendančiam 2000 pėdų aukštyje 350 km/h greičiu:

$$\begin{pmatrix} \dot{a}_s \\ \dot{\beta}_s \\ \dot{p}_s \\ \dot{q}_s \\ \dot{r}_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -0.1176 & 0 \\ 0.05399 & 0 & 0.0986 \\ 36.47 & 0 & 0.196 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.7896 & 0 & 0.7896 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

Matrica C yra skirtumas tarp kintamųjų, kurie gali būti išmatuoti fiziškai ir tų kintamųjų, kurie yra apskaičiuojami. Tai yra matrica su nuliais, išdėstytais tokiu būdu, kad jie susiprastintų su nustatytu atakos kampu a_s ir slydimo kampu β_s , esančiais vektoriuje x , iš kurio padauginta matrica C. C matricos sudarymo sąlygos atitinka matricų A ir B sudarymo sąlygas:

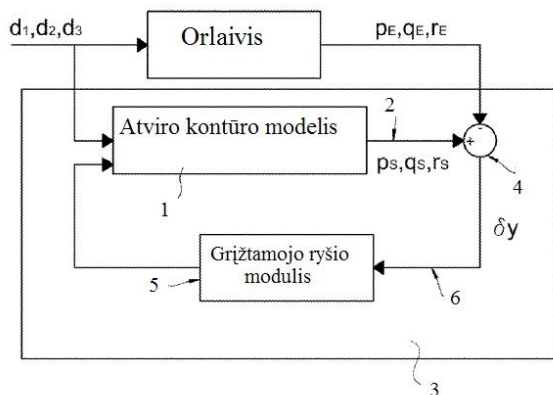
$$\begin{pmatrix} p_M \\ q_M \\ r_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_S \\ \beta_S \\ p_S \\ q_S \\ r_S \end{pmatrix}, \quad (5)$$

Matrica D visada yra 0.

5 – am žingsnyje apskaičiuojami skirtumai tarp tarp nustatytų ir atitinkamų išmatuotų greičių. Skirtumai skaičiuojami paklaidos vektoriaus δy radimui. vektoriaus δy dedamosios yra:

- 1) skirtumas tarp efektyvaus posūkio greičio p_E ir išmatuoto p_S ;
- 2) nuolydžio greičių q_E ir q_S skirtumas;
- 3) pokrypių greičių r_E ir r_S skirtumas.

6 – am žingsnyje atviro kontūro linijinis modelis yra pataisomas pagal lygybes (5) naudojant paklaidos vektorių δy . 5 – oje lygybėje L yra grįžtamoji matrica, kurioje yra kontrolinių filtrų stiprinimai, aprašyti toliau.



4 pav. Blokinė sistemos schema

Fig 4. System blok diagram

Blokinės schemos aprašymas: į sistemos sudėtį įeina plokštumomis valdomas orlaivis, kurių atsilenkimai pažymėti d_1 , d_2 ir d_3 . Orlaivio faktinis posūkio greitis p_E , nuolydžio greitis q_E ir pokrypio greitis r_E yra išmatuojami.

Signalai, atitinkantys nuokrypius d_1 , d_2 ir d_3 siunčiami į valdymo bloko 3 atviro kontūro modulį 1. Atviro kontūro modulis 1 apskaičiuoja sistemos atviro kontūro linijinį modelį ir duomenų linija 2 siunčia posūkio greitį p_S , nuolydžio greitį q_S ir pokrypio r_S atitinkančius signalus.

Sekantis valdymo bloko komponentas – atimties modulis, skirtas skaičiuoti skirtumus tarp tikrųjų ir nustatytų greičių (skaičiuoja vektorių δy). Galiausiai, grįžtojo ryšio grandinėje 6 yra grįžtamojo ryšio modulis 5. Pastarasis modulis formuoja uždara kontūrą ir skaitmeninį valdymo filtrą. Filtras yra formuojamas naudojantis Kalmano optimizacijos metodika. Filto struktūra – Luenbergerio.

Filtro stiprinimo reikšmės yra grįžtamojo ryšio matricoje L. Kiekviena matricos eilutė reiškia sistemos struktūros kintamųjų korekciją. Trys korekcijos koefficientai, po vieną kiekvienam kampiniam greičiui, yra stulpeliuose. Filtro stiprinimo reikšmės yra siunčiamos į atviro kontūro modulį 1, kuris modifikuoja atviro kontūro linijinį sistemos modelį, panaudojant minėtąjį filtrą taip, kad sujungti nustatytus ir tikruosius orlaivio greičius.

Kai greičių sujungimas atliktas, apskaičiuotieji atakos kampas a_S ir slydimo kampas β_S taipogi yra susiję su tikroju atakos kampu a_E ir tikroju slydimo kampu β_E atitinkamai. Tikrieji atakos ir slydimo kampai tokiu būdu gali būti randami be būtinybės juos matuoti įprastais davikliais.

Išvados

1. Aprašytas orlaivio atakos ir slydimo kampų matavimo metodas įgalina atsisakyti įprastinių tam skirtų daviklių.
2. Kampų matavimo metodas reikalauja papildomų įrenginių valdymo plokštumų padėčių ir greičių nustatymui.
3. Sistema gali būti naudojama *alfa* ir *beta* kampų, išmatuotų įprastais matuokliais, korekcijai.

Literatūra

1. Alberto Chiesa. 2010. Method of estimating an angle of attack and an angle of sideslip of an aircraft. Minneapolis.

RESEARCH OF MEASUREMENTS OF GLIDER'S ATTACK AND SLIP ANGLE

V. Lapinskas

Abstract

A method for estimating an angle of attack and an angle of sideslip of an aircraft has a plurality of control surfaces each adjustable with respect to an associated reference surface. The method includes measuring quantities representative of the angle formed by each control surface with respect to the associated reference surface; measuring the effective rolling speed, the effective pitching speed, and effective yawing speed of the aircraft. The estimated AOA and estimated AOS are obtained from the model to use as AOA and AOS of the aircraft.

Keywords: angle of attack, angle of sideslip, sensor, vane – type, Pitot tube.

