



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INTITUTAS

AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Silvestras Moldovancevas

**DAUGIASRAIGČIO SUKASPARNIO PANAUDOJIMO GINKLUI NEŠTI
TYRIMAS**

**REASERCH OF THE IMPLEMENTATION OF MULTIROTOR
ROTORWING FOR WEAPON CARRYING**

Baigiamasis magistro darbas

Orlaivių pilotavimo studijų programa, valstybinis kodas 601H41001

Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2016

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS

AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Silvestras Moldovancevas

**DAUGIASRAIGČIO SUKASPARNIO PANAUDOJIMO GINKLUI NEŠTI
TYRIMAS**

**REASERCH OF THE IMPLEMENTATION OF MULTIROTOR
ROTORWING FOR WEAPON CARRYING**

Baigiamasis magistro darbas

Orlaivių pilotavimo studijų programa, valstybinis kodas 601H41001

Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

doc. dr. Domantas Bručas

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

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

lekt. Angelika Petrėtienė

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

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2016

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAČIO AVIACIJOS INSTITUTAS
AVIACIJOS TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Technologijos mokslo sritis

Aeronautikos inžinerija studijų kryptis

Orlaivių pilotavimas studijų programa, valstybinis kodas 601H41001

OPfa-11 grupė

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

2015-11-16 Nr.11-OP

Vilnius

Studentui (ei) **SILVESTRI MOLDOVANCEVUI**

(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: **DAUGIASRAIGČIO SUKASPARNIO PANAUDOJIMO GINKLUI
NEŠTI TYRIMAS**

**RESEARCH OF THE IMPLEMENTATION OF MULTIROTOR ROTORWING FOR
WEAPON CARRYING**

patvirtinta 2015 m. lapkričio 16 d. dekanų potvarkiu Nr. 201ai

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2016 m. gegužės 30 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

1. Išanalizuoti mokslinę literatūrą baigiamojo darbo tema;
2. Paruošti daugiasraigčių sukasparnį orlaivį tinkamą nedidelio dujinio ginklo nešimui
3. Atlikti šaudymo bandymus iš daugiasraigčio nuotoliniu būdu valdomo orlaivio
4. Ištirti ginklo taiklumą bei jo nukreipimo kokybę artimomis realioms sąlygoms
5. Įvertinti ginklo įtaką orlaivio skrydžio parametrams, pageidautiną orlaivio konstrukciją
6. Suformuluoti darbo išvadas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

.....
.....

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Vadovas
(Parašas)

doc. dr. Domantas Bručas
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
(Parašas)

.....
(Vardas, pavardė)

.....
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Antano Gustaičio Aviacijos Institutas
Aviacijos technologijų katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-....-....

p

Orlaivių pilotavimo studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Daugiasraigčio sukasparnio panaudojimo ginklui nešti tyrimas**

Autorius **Silvestras Moldovancevas**

Vadovas doc. dr. **Domantas Bručas**

Kalba

X

lietuvių

užsienio

Anotacija

Šiame baigiamajame magistro darbe atliekamas daugiasraigčio sukasparnio panaudojimo ginklui nešti tyrimas. Darbe nagrinėjami kitų su daugiasraigčiais sukasparniais atlikti tyrimai, bei jų rezultatai. Analizuojama sukasparnio skrydžio teorija, pagrindinių jo sudėtinių dalių veikimas bei specifiška. Darbe taip pat aprašomas ginklo veikimo principas. Analizuojami sukasparnių modeliavimo bei parametrų parinkimo specifikos bei algoritmai.

Aprašomas sukasparnio modeliavimo procesas, parametrų parinkimas bei skaičiavimas, braižymas kompiuterinio modeliavimo programa „SolidWorks“, detalių gaminimas, bei visos skraidančios platformos su apačioje prikabintu šaunamuoju ginklu surinkimas.

Teoriškai, pasitelkiant sukamojo judėjimo kinematikos ir judėjimo lygtis, įvertinama šūvio atotrūkio įtaka sukasparnio pusiausvyrai.

Aprašyti su paruošta eksperimentine skraidančia platforma atliekami šaudymo bandymai, statistiniais taiklumo analizės metodais įvertinamas ginklo taiklumas, bei šūvių glaustumas. Aptarus rezultatus suformuluojamos išvados bei siūlymai.

Darbą sudaro: 84 puslapiai teksto be priedų, 45 paveikslai, 7 lentelės ir 33 literatūros šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: daugiasraigčio sukasparnis, šaunamasis ginklas, „SolidWorks“, šaudymo bandymai, šūvių sklaida,

Vilnius Gediminas Technical University
Antanas Gustaitis aviation institute
Department of aviation technologies

ISBN ISSN
Copies No.
Date-....-....

Aircraft piloting study programme bachelor (master) thesis.

Title: **Research of implementation of multicopter rotorwing for weapon carrying**

Author **Silvestras Moldovancevas** Academic supervisor **doc. dr. Domantas Bručas**

Thesis language

☒ Lithuanian

☐ Foreign (English)

Annotation

In this master thesis the research of implementing multicopter rotorwing for weapon carrying is presented. In this master thesis, the research regarding the multicopters made by other authors are analyzed. The theory of multicopter flight, working principle of separate components and different component selection, modeling methods and algorithms are presented.

The process of modelling, calculating different parameters, drawing with computer program „SolidWorks“ and constructing the multicopter is described.

The impact on multicopter stability is theoretically calculated using rotational kinematics and dynamics equations.

Shooting experiment with armed multicopter is described, results are gathered and analyzed using statistical methods of marksmanship evaluation. As results were analyzed, the conclusions were made and presented together with future perspectives.

Thesis consist of: 84 p. text without appendixes, 45 pictures, 8 tables, 33 bibliographical entries.

Keywords: Multicopter rotorwing, weapon, handgun, „SolidWorks“, marksmanship, propeller

Turinys

Lentelių sąrašas.....	10
Įvadas.....	11
1. Literatūros analizė	14
2. Sukasparnio skrydžio teorija bei pagrindiniai komponentai	21
2.1. Sukasparnio skrydžio principai	21
2.2. Svarbiausi sukasparnio komponentai ir jų veikimas	24
2.3. Skirtingų konfigūracijų palyginimas, bei parinkimas eksperimentui atlikti	34
2.4. Pistoletų veikimo principas	37
3. Sukasparnio platformos parametrų skaičiavimas, parinkimas, modeliavimas bei gaminimas	38
3.1. Sukasparnio platformos maketavimas ir gaminimas.....	38
3.2. Propelerių traukos skaičiavimas.....	40
3.3. Naudingo baterijos veikimo laiko skaičiavimas.....	43
3.4. Sukasparnio konstrukcijos bei įrangos parinkimas	45
4. Šūvio atotrūkio įtakos sukasparnio padėčiai bei šaudymo kokybės statistinis analitinis tyrimas.....	52
4.1. Šūvio atotrūkio įtakos sukasparnio padėčiai erdvėje skaičiuojamoji analizė.....	52
4.2. Eksperimentinė šūvių taiklumo statistinė analizė	65
Išvados ir siūlymai.....	78

Literatūra.....	80
-----------------	----

Simboliai

a – pagreitis

Ah – elektrinė talpa ampervalandėmis

CSG – šūvių grupės centras

D – propelerio skersmuo

DCM_S – šūvių vidutinė kvadratinė paklaida matuojant nuo taikinio centro

DCM_{SG} – šūvių grupės centro atstumas nuo taikinio centro

E_{kk} – kulkos kinetinė energija

E_{kp} – pistoleto kinetinė energija

e – proceso klaida

F_{ξ} – šūvio jėga

g – laisvojo kritimo pagreitis

h_v – vertikalus nuokrypis

I_e – elektros srovės stipris

K_d – diferencialinis koeficientas

K_i – integralusis koeficientas

s – nueitas atstumas

K_p – proporcinis koeficientas

K_{pr} – propelerio konstanta

M_{ξ} – šūvio momentas

k – perdavimo koeficientas

μ – momento pagreitis

M – momentas

MR – standartinis nuokrypis

m – masė

n – šūvių skaičius

P – galia

Pf – galios faktorius

T – trauka

U – įtampa

l – ginklo vamzdžio ilgis

r – atstumas, spindulys

φ_{tv} – kampinė padėtis po traukos vystymo

rpm – sūčiai per minutę Δv – greičio pokytis

δ – traukos vystymo pagreitis

t – laikas

ε – kampinis pagreitis

Δt –laiko pokytis

ρ – tankis

m_{sk} – sukasparnio masė

u – įtampos priklausomybė

n_v –variklių skaičius

v – greitis

s_0 – pradinis atstumas

S_H – standartinis horizontalus nuokrypis

S_V – standartinis vertikalus nuokrypis

t_{ξ} – šūvio laikas

t_v – traukos vystymo laikas

v_0 – pradinis greitis

$\bar{x}$ – šūvių centro koordinatė x

x_i – šūvio koordinatė x

$\bar{y}$ – šūvių centro koordinatė y

y_i – šūvio koordinatė y

ω_{ξ} – kampinis greitis po šūvio

ω_{tv} – kampinis greitis traukos vystymo pabaigoje,

φ_{ξ} – kampinė padėtis po šūvio

Paveikslų sąrašas

1 pav. Sukasparnio svyravimas apie pusiausvyros padėtį veikiant išoriniams veiksniams matematinis (viršuje kairėje) ir realūs eksperimentų rezultatai	15
2 pav. Sukasparnio prisitaikančio valdiklio veikimo schema	16
3 pav. Sukasparnio judėjimas aplink savo ašis veikiant įprastam ir prisitaikančiam valdikliui	17
4 pav. Ginkluotas robotas su ties taikinosi linija pritaisyta kamera, kalibruota su ginklo taikikliu ..	18
5 pav. Objekto sekimas naudojant vizualią atskaitos sistemą	19
6 pav. Sukasparnio variklių sukimosi kryptys (Latorre 2011: 6).....	21
7 pav. Sukasparnių variklių sukimosi kryptys ir momentai atliekant skirtingus manevrus.....	22
8 pav. Variklio be šepetėlių schema.....	26
9 pav. Elektroninio sukimosi greičio valdiklio principinė jungimo schema.....	28
10 pav. Baterijos elementų jungimo schemas.....	30
11 pav. Autopilotas „Pixhawk“.....	32
12 pav. Keturių variklių sukasparnis.....	34
13 pav. Šešių variklių sukasparnis	35
14 pav. Šešių variklių sukasparnis	36
15 pav. Pusiau automatinio pistoleto sudėtinės dalys	37
16 pav. Modeliavimo proceso eilės tvarka.....	39
17 pav. Propelerių esant skirtingiems sūkiams	43
18 pav. Baterijos išsikrovimo laiko priklausomybė nuo variklių sūkių.....	44

19 pav. Trimačio frezavimo staklės „High-Z S-1000”	46
20 pav. Sukasparnio karkaso centrinė plokštė, suprojektuota programa „SolidWorks“	46
21 pav. Sukasparnio pradinis modelis sumodeliuotas programa“ SolidWorks“	47
22 pav. Sukasparnio centrinės plokštės ir variklius laikančios kojelės.....	49
23 pav. „Solidworks“ apkrovos simuliacija.....	49
24 pav. Kompiuterinio modeliavimo programa „SolidWorks“ sumodeliuotas daugiasraigtis sukasparnis su apačioje prikabinu ginklu	50
25 pav. Surinktas unikalus daugiasraigtis sukasparnis „Meganeuropsis“ su prikabinu ginklu ir valdymo mechanizmu	51
26 pav. programos „SolidWorks“ darbinis langas	56
27 pav. Sukasparnio skrydžio duomenys, varikliams suteikiama galia keičiant kampinę padėtį (raudona linija – priekiniai varikliai, žalia linija – galiniai varikliai.)	59
28 pav. Sukasparnio kampinės padėties kitimas aplink masės centrą, veikiant šūvio jėgai ir po jos, iki sugrįžtant į nulinio kampo padėtį.....	60
29 pav. Sukasparnio kampinės padėties kitimas veikiant dujiniam Beretta šratasvydžio pistoletui. 61	
30 pav. Sukasparnio nuokrypiai veikiant išoriniams veiksniams (Sámano <i>et al.</i> 2013).....	62
31 pav. Tiriamojo sukasparnio polinkio skrydžio duomenys	62
32 pav. Tiriamojo sukasparnio polinkis spaudžiant ginklo nuleistuką	63
33 pav. Sukasparnio aukščio nuokrypis veikiant skirtingų pistoletų šūvio jėgoms.....	64
34 pav. Tiriamojo sukasparnio aukščio kitimas.....	65
35 pav. Šaudymo bandymas skrendant.....	66
36 pav. Vaizdas matomas ekrane.....	66

37 pav. Taiklumo ir glaustumo pavyzdžiai (Johnson 2001)	67
38 pav. Šaudymo paklaidų parametrai (Johnson 2001)	69
39 pav. Šūvių grupės atstumas nuo taikymosi centro didėjant atstumui	71
40 pav. Šūvių grupės atstumas nuo taikinio centro, DCMsg	72
41 pav. Vidutinė šūvių kvadratinė paklaidai matuojant nuo taikinio centro DCMs.....	73
42 pav. Šūvių grupės vidutinis spindulys arba standartinis nuokrypis, MR	74
43 pav. Standartinis horizontalus nuokrypis nuo šūvių centro S_H	75
44 pav. Standartinis vertikalus nuokrypis nuo šūvių grupės centro, S_V	75
45 pav. Šūvių grupės išsibarstymo plotas	76

Lentelių sąrašas

1 lentelė Elektros variklio be šepetėlių privalumai ir trūkumai	27
2 lentelė Ličio polimero baterijų privalumai ir trūkumai (Latorre 2011)	31
3 lentelė Preliminari komponentų masė.....	40
4 lentelė Gamintojų propelerių modeliai su jiems priskirtais koeficientais	42
5 lentelė Pasvertų komponentų masė	48
6 lentelė Skirtingų ginklų tipų pagrindiniai parametrai (<i>Ginkluotė ir karinė technika</i> 2009)	54

IVADAS

Aktualumas

Šiais laikais aviacijos technologijų ir įvairių skraidančių aparatų technologijos yra labai išstobulintos ir pritaikytos įvairiose srityse. Lėktuvai ir sraigtasparniai yra naudojami: komercinėje aviacijoje gabenant žmones bei krovinius, moksliniuose tyrimuose – stebint meteorologinius reiškinius bei fotografuojant žemės paviršių, karyboje – objektams sekti, stebėti bei taikiniams naikinti taip pat žvalgybai. Įvairūs nepilotuojami ir autonominiai aparatai (lėktuvai ir sraigtasparniai) naudojami moksliniais tikslais: žemėlapiams sudaryti, reljefui nustatyti, gyvūnams stebėti, ir kt.

Skraidančių aparatų panaudojimo potencialą galima plėsti ir toliau vykdant tyrimus šioje srityje, ypač mažų aparatų, tokių kaip daugiasraigčiai sukasparniai, kurių tyrimai reikalauja mažiau lėšų lyginant su dideliais orlaiviais. Šie sukasparniai tinka daryti nuotraukas bei stebėti objektus realiuoju laiku perduodant vaizdą į valdytojo ekraną. Dar viena jų panaudojimo galimybė yra panaudoti sukasparnį ginklui nešti, nusitaikyti bei taikiniui sutramdyti arba sunaikinti. Ši koncepcija galėtų būti vienas svarbių žingsnių padedant valstybės teisėsaugos bei krašto apsaugos institucijoms užtikrinti valstybės vidaus bei išorinį saugumą.

Naujumas

Pasaulyje ši technologija tik pradėta taikyti JAV teisėsaugoje bei mėgėjiškuose projektuose, tačiau tyrimų atlikta nedaug bei jų rezultatai nėra viešai skelbiami moksliniuose straipsniuose. Lietuvoje iš viso nebuvo atlikta panašių tyrimų. Ginkluotas nuotoliniu būdu valdomas sukasparnis galėtų būti naudojamas pavojingiems asmenims persekioti mažu atstumu, jiems stebėti ar pažaboti bei kaip pagalbinė priemonė įvairiose taktinėse operacijose, užuot naudojus vien tik gyvąją jėgą – ginkluotus pareigūnus arba karius, rizikuojant jų sveikata ar gyvybe.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Šio baigiamojo darbo tikslas – sukonstruoti nuotoliniu būdu valdomo daugiasraigčio sukasparnio modelį ir pritaikyti jį dujinio šaunamojo ginklo nešimui bei panaudojimui pasirinktiems

taikiniams naikinti, eksperimentiniu būdu išbandyti ginklo taiklumą artimomis realioms sąlygomis bei įvertinti ginklo panaudojimo įtaką sukasparnio skrydžio stabilumo charakteristikoms.

Siekiant įgyvendinti šio darbo tikslą, yra keliami tokie uždaviniai:

- Atlikti literatūros analizę darbo tema, apžvelgti jau sukurtus ir realiai naudojamus sukasparnius bei su jais atliekamus tyrimus.
- Taikant teorinius bei praktinius projektavimo metodus parinkti tinkamas sukasparnio struktūros dalis bei parametrus ir paruošti daugiasraigį sukasparnį skirtą nedideliame dujiniame ginklui nešti;
- Teoriškai įvertinti ginklo šūvio įtaką orlaivio skrydžio parametrams, palyginti stabilumą su įprastomis skrydžio sąlygomis;
- Atlikti šaudymo bandymus iš daugiasraigčio nuotoliniu būdu valdomo orlaivio;
- Ištirti ir įvertinti ginklo taiklumą bei jo nukreipimo kokybę artimomis realioms sąlygomis;
- Suformuluoti darbo išvadas.

Taikoma metodika

Pagal teorinius modeliavimo ir skaičiavimo principus kompiuterinio modeliavimo programą „SolidWorks“ sumodeliuojama skraidanti sukasparnio bei vėliau su turimomis medžiagomis pagal modelį sukonstruojama ir pritaikoma tyrimui. Teoriniais skaičiavimais ir kompiuterinio modeliavimo programa „SolidWorks“ apskaičiuojamas platformos inercijos momentas, teoriškai apskaičiuojamos realų ginklą veikiančios jėgos šūvio metu ir nustatomas ginklo atitransos poveikis sukasparnio stabilumui. Atliekami skrydžio bei šaudymo bandymai, įvertinama vaizdo perdavimo kokybė bei pataikymo į taikinį kokybė naudojant šūvio koordinatų ir sklaidos nustatymo statistinės analizės metodiką. Rezultatai užrašomi ataskaitoje.

Problema

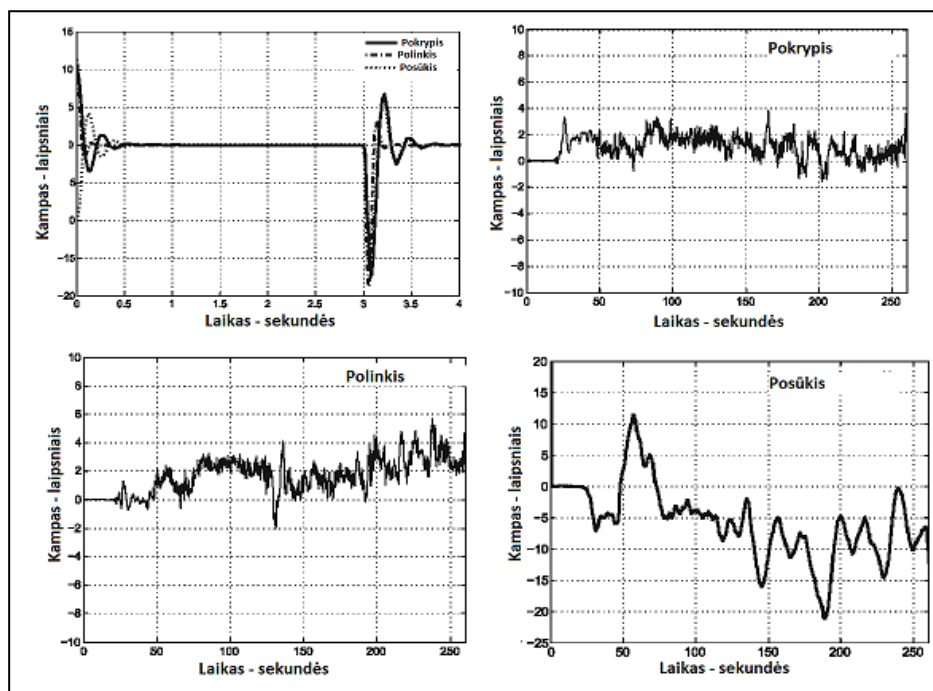
Iki šiol oficialiuose studentams prieinamuose moksliniuose šaltiniuose nėra aprašyta ginklą nešančio sukasparnio koncepcija. Sukasparnio stabilumą įprastomis skrydžio sąlygomis palaiko elektroniniai valdikliai. Nėra žinoma ir aprašyta, kaip pasikeistų sukasparnio stabilumas apie simetrijos ašis išvestas iš konstrukcijos masės centro veikiant ginklo atatrakai. Taip pat nėra ištirtas šaudymo taiklumas šaudant iš tokio skrendančio orlaivio.

1. LITERATŪROS ANALIZĖ

Šiame skyriuje nagrinėjami kitų mokslininkų ir akademinų bendruomenių atlikti tyrimai susiję su daugiasraigčiais sukasparniais. Nagrinėjant kitų atliktus darbus, galima nustatyti, kas nebuvo ištirta ir nagrinėta. Literatūros nagrinėjimas taip pat suteikia galimybę sužinoti, kokios būna tyrimo metodikos, jas palyginti ir pritaikyti jas savo darbe.

Konkreči literatūra susijusi būtent su ginkluotu sukasparniu, nėra oficialiai paskelbta. Pastaruoju metu galima rasti tik mėgėjiškų moksliniais straipsniais neaprašytų bandymų nuotraukų arba vaizdo įrašų. Pagrindiniai literatūros šaltiniai apie daugiasraigčius sukasparnius yra moksliniai straipsniai arba tiriamieji darbai, nagrinėjantys jų valdumo bei stabilumo problematiką. Daugelis nagrinėjamų šaltinių apie sukasparnių tyrimus yra parašyti tik anglų kalba. Stabilumo ir valdumo bandymai bei metodai atskleidžia, su kokiomis problemomis galima susidurti kuriant daugiasraigčių sukasparnį.

A. Samano *et al.* 2013 savo moksliniame straipsnyje „Modeling and Stabilization of a Multi-Rotor Helicopter“ nagrinėja šešių variklių sukasparnio modelio stabilizavimą siekiant užtikrinti jo kybojimą ore kuo mažiau svyruojant. Eksperimento rezultatai pavaizduoti 1 paveiksle.



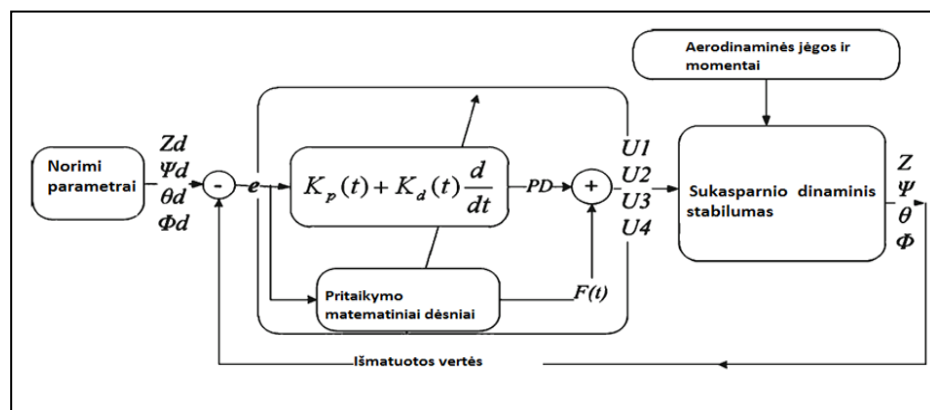
1 pav. Sukasparnio svyravimas apie pusiausvyros padėtį veikiant išoriniams veiksniams matematinis (viršuje kairėje) ir realūs eksperimentų rezultatai (Sámano *et al.* 2013)

Iš grafiko matyti, jog realiai išmatuotos maksimalios nukrypimų vertės bei atitinka matematinę modelį pavaizduota kairiajame viršutiniame grafike.

Straipsnio autoriai pabrėžia, kad pastarajame dešimtmetyje nepilotuojamų orlaivių pritaikymas įvairioms užduotims sparčiai išaugo tokiose srityse: fotografavimas iš oro, atmosferos analizė prognozėms sudaryti, žvalgyba bei paieška. Akademinėje visuomenėje daugiasraigčiai orlaiviai sudaro tinkamą platformą naujos kartos jutikliams bei medžiagoms taip pat ir kontrolės mechanizmams plėtoti. Nepaisant to, augantis orlaivių dydis bei apkrovos įvairiuose eksperimentuose privertė akademinę bendruomenę plėtoti naujus daugiasraigčių sukasparnių kontrolės mechanizmus siekiant juos stabilizuoti. Sámano *et al.* 2013 Straipsnyje yra sumodeliuotas matematinis sukasparnio modelis ir taikomas matematinis eksperimentas ir realus eksperimentas siekiant ištirti valdiklio, užprogramuoto specialiu algoritmu, darbą. Realus eksperimento rezultatai atskleidžia, kad valdiklis užtikrina sukasparnio stabilumą pageidautinose ribose ir daugmaž atitinka matematinį stabilizavimo eksperimentą.

Dėl didelio daugiasraigčių sukasparnių manevringumo bei mechaninės struktūros paprastumo daugiasraigčių sukasparnių konfigūracijos ir stabilumo tyrimai sulaukia daugiau

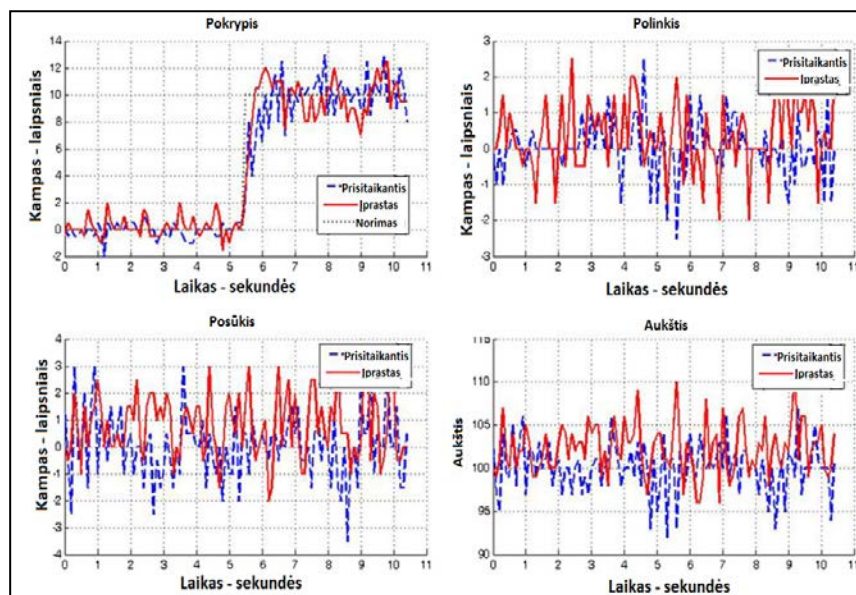
dėmesio nei kitų nepilotuojamų mažų orlaivių. Mohammadi Shahri 2013 savo moksliniame straipsnyje „Adaptive Nonlinear Stabilization Control for a Quadrotor UAV: Theory, Simulation and Experimentation“ Daugiasraigtį sukasparnį stabilizuojančio valdiklio kūrimas apima daugybę užduočių susijusių su nesumodeliuota dinamika, posistemių tarpusavio sąveika, netiksliais matavimais, kintančiais fiziniais parametrais, išoriniais trukdžiais ir mechaniniais valdymo netobulumais. Sukasparnio konstrukcijos masė nekinta, tačiau įvairioms užduotims atlikti gali reikėti ant jo sumontuoti tam tikros įrangos, todėl turi būti sukonstruota sistema, prisitaikanti prie kintančių sąlygų ir gebanti palaikyti sukasparnio stabilumą. 2 paveiksle pavaizduota prisitaikančio valdiklio veikimo schema.



2 pav. Sukasparnio prisitaikančio valdiklio veikimo schema (Mohammadi, Shahri 2013)

Valdiklis lygina išmatuotus padėties signalus ir pagal numatytus pritaikymo algoritmus koreguoja sukasparnio padėtį.

Mohammadi ir Shahri straipsnyje aprašomas eksperimentas, kuriame yra lyginamas sukasparnio atsakas į įprasto bei prisitaikančio valdiklio kontrolės signalus. Įprastas valdiklis yra užprogramuotas būtent pagal tam tikrą modelį, o prisitaikantis sugeba valdyti bet kokių dinaminių ir fizinių parametrų modelį ir išlaikyti jį stabilų. 3 paveiksle pavaizduoti eksperimento rezultatai, kurio metu buvo naudojamas prisitaikantis ir įprastas valdiklis.



3 pav. Sukasparnio judėjimas aplink savo ašis veikiant įprastam ir prisitaikančiam valdikliui (Mohammadi Shahri 2013)

Simuliacinis matematinis eksperimentas parodė, kad prisitaikantis valdiklis geba geriau išlaikyti sukasparnį pusiausvyroje, o nukrypimai nuo pusiausvyros padėties yra mažesni.

Tyrimai atliekami ir nuotoliniu būdu valdomose ginklo sistemose. Vienas tokių nuotolinio ginklo pritaikymų yra aprašomas Wang et al. straipsnyje „Application of a remote image surveillance system in a robotic weapon“. Jame aprašoma nuotoliniu būdu valdomo ginklo sistema. Straipsnio autoriai teigia, kad ginkluotas robotas gali padėti gelbėjimo personalui apžiūrėti nelaimės vietas tada, kai tai padaryti yra sudėtinga nerizikuojant pačių gelbėtojų gyvybėmis. (Wang et al. 2010) Vienas iš didesnių atliktų žingsnių kuriant autonomines ginklų sistemas yra mechanizmo schemas bei žmogus-mašina sąsajos naudojant grafinę programą „LabVIEW“ sukūrimas. Ji leidžia operatoriui valdyti ginklą kompiuterio klaviatūra arba specialiai pritaikyta pele. Šiems pasiekimams sukurti buvo padaryta daug naujų darbų programos kodų bei sąsajos grandinių srityse. (Wang et al. 2010) Moksliniame straipsnyje aprašomas eksperimentas vaizduojantis nuotoliniu būdu valdomo ginkluoto roboto praktinį efektyvumą operacijose, vykstančiose pastatuose ar tankiose miesto vietovėse. Aprašoma viso mechanizmo konstrukcija bei veikimas. Taip pat aprašomas bandymas naudojant programą „LabVIEW“. Veikimas buvo tiriamas eksperimentiniais praktiniais metodais. Aprašyti atlikti eksperimentiniai šaudymo bandymai ir užrašyti jų rezultatai. 4 paveiksle pavaizduotas robotas su prie jo pritaisytu nuotoliniu būdu valdomu ginklu.

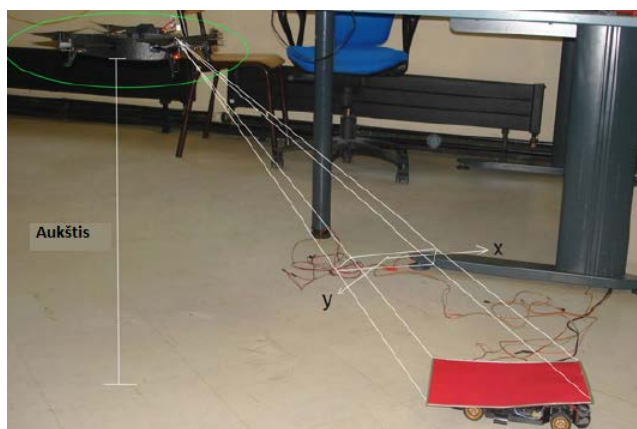


4 pav. Ginkluotas robotas su ties taikinosi linija pritaisyta kamera, sukalibruota su ginklo taikikliu (Wang *et al.* 2010)

Ginklas ant specialaus stovo prikabintas prie judančios konstrukcijos, o jo gale pritaisyta kamera leidžianti tiesiogiai stebėti taikinius ir taikiklio padėtį jų atžvilgiu. Straipsnis vertingas tuo, kad parodo, ko reikia norint sukurti veikiantį nuotoliniu būdu valdomą ginklą, kas būtent yra reikalinga šio baigiamojo darbo projektuojamoje konstrukcijoje.

Viešai skelbtoje literatūroje plačiai analizuojamos daugiasraigčių sukasparnių valdymo bei stabilumo problemos. Daugelyje jų yra naudojami matematiniai modeliavimo tyrimo metodai bei simuliacijos. Taip pat matematiniams metodams patvirtinti atliekami ir eksperimentai su realiomis platformomis, kurie patvirtina matematinius modelius. (Ariffanan *et al.* 2015; Bonak *et al.* 2012; Chasapogiannis *et al.* 2014; Escareño *et al.* 2013; Efraim *et al.* 2015; Hehn *et al.* 2012; Yu & Ding 2012; Liu *et al.* 2014; Mohammadi & Shahri 2013; Sámano *et al.* 2013; Santos *et al.* 2013)

Duomenų bazėse publikuojama nemažai tyrimų susijusių su autonominių sukasparnių savarankišku objektų sekimu. (Gomez-Balderas *et al.* 2013; Kadouf & Mustafah 2013; Kim *et al.* 2014; Rilanto Trilaksono *et al.* 2011) Vienas iš pavyzdžių yra pateiktas 5 paveiksle.



5 pav. Objekto sekimas naudojant vizualią atskaitos sistemą (Gomez-Balderas *et al.* 2013)

Čia sukasparnio procesoriai analizuoja vaizdinę medžiagą ir lygindami ją su savo duomenų baze ir algoritmais sugeba sekti judančius tam tikrų formų ar spalvų objektus.

Literatūros šaltiniuose taip pat aptinkama ir tyrimų susijusių su objektų autonominiu orientavimusi uždarose erdvėse bei kliūčių vengimu (Bry *et al.* 2015; Sanahuja & Castillo 2013). Taip pat išsamiai aptariamas sukasparnių panaudojimas įvairiose mokslo šakose tokiose kaip žemėlapių sudarymas, reljefo sudarymas, ir t.t. (Tahar *et al.* 2014; Tonkin *et al.* 2014; Lucieer *et al.* 2014).

Literatūroje taip pat aptinkama straipsnių, kuriuose aprašomi šaudymo kokybės tyrimai, bei statistinės analizės metodai. Šie metodai taikome vertinti karių šaudymo taiklumui, jiems judant ir šaudant stacionariai, bei veikiant įvairiems išoriniams bei vidiniams psichologiniams veiksniams (Johnson 2001; Morrison *et al.* 1998; Common *et al.* s.a.)

Taigi, atlikus literatūros analizę matyti, jog studentams prieinamose nemokamose duomenų bazėse nėra pateikta straipsnių aprašančių sukasparnio naudojimą būtent ginklui nešti, taigi ir ginklo panaudojimo įtakos sukasparnio skrydžio charakteristikoms. Literatūroje aprašyti įvairūs bandymai, susiję su sukasparnio stabilumu ir jam įtaką darančiais veiksniais. Šių tyrimų išvados ir medžiaga bus naudojama, siekiant bent teoriškai nustatyti realaus ginklo atotrūkio įtaką sukasparnio stabilumui ir vaizdo perdavimui. Išnagrinėjus gausybę šaltinių, vis dėl to buvo atrasta, jog buvo atliekami bandymai susiję su nuotoliniu ginklo valdymu ir tiesioginio vaizdo perdavimu. Ginklo taiklumo sklaidos vertinimo statistinės analizės metodas kaip tinkamiausias pasirinktas naudoti šiame darbe. Stabilumo ir valdymo bandymų rezultatai ir metodai vertingi tuo, jog padės įvertinti ginklo įtaką orlaivio skrydžio parametrui bei pageidautiną tam pritaikytą konstrukciją. Dėl

konkrečių šaltinių stokos, ginklo pakabinimo ir stabilizavimo įtaisas bus parinktas remiantis stabilizavimo įtaisais naudojamais kamerų vaizdui stabilizuoti

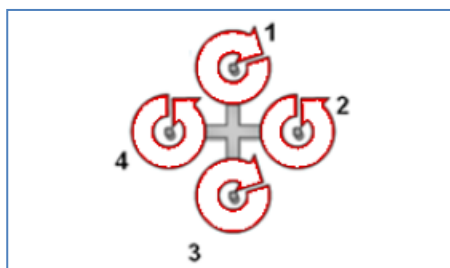
Kitame skyriuje yra nagrinėjama šaltiniuose aprašyta bendroji sukasparnių skrydžio teorija ir atskirų komponentų veikimas.

2. SUKASPARNIO SKRYDŽIO TEORIJA BEI PAGRINDINIAI KOMPONENTAI

Norint suprojektuoti ir sukonstruoti tinkamą eksperimentinį sukasparnį, gebantį nešti ginklą ir efektyviai išnaudoti jo galimybes reikia suprasti ir išnagrinėti jo veikimo, konstrukcijos ir komponentų ypatybes bei svarbiausius parametrus, lemiančius ekonomišką, efektyvų, stabilų skrydį, kuris atitiktų jam keliamus reikalavimus. Norint nustatyti ginklo įtaką įprastoms sukasparnio skrydžio charakteristikoms, reikia žinoti jo veikimo principą bei šūvio metu veikiančias jėgas. Šiame skyriuje nagrinėjami sukasparnio veikimo principas, atskirų jo komponentų svarba visam orlaiviui. Taip pat bus trumpai apžvelgiamas ginklo veikimo principas.

2.1. Sukasparnio skrydžio principai

Daugiasraigtis nepilotuojamas sukasparnis – tai autonominis arba nuotoliniu būdu valdomas orlaivis, turintis keletą simetriškai vienas kito atžvilgiu išdėstytų sraigčių, esančių vienoje horizontalioje plokštumoje (Latorre 2011: 6). Jo gretutinių sraigčių sukimosi kryptis yra priešinga. Tipinio sukasparnio variklių sukimosi kryptys pavaizduotos priešingos.



6 pav. Sukasparnio variklių sukimosi kryptys (Latorre 2011: 6)

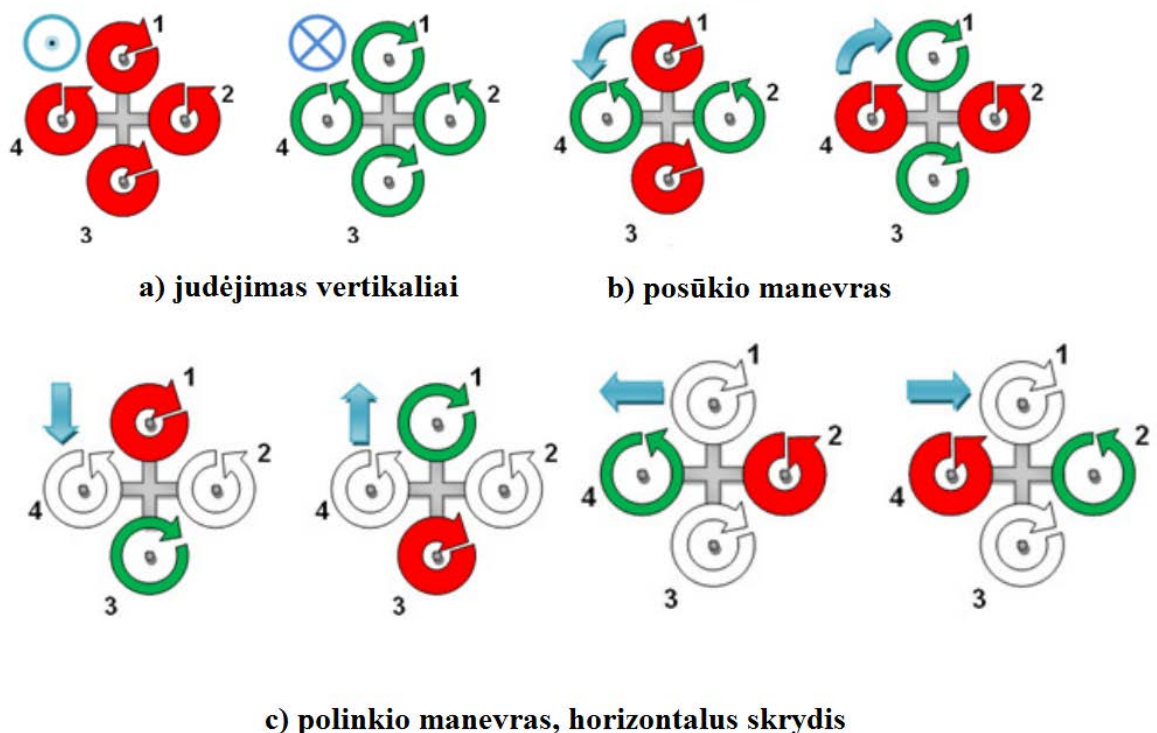
Dėl paprastumo daugelyje literatūros šaltinių sukasparnių variklių sukimosi kryptys vaizduojamos keturių variklių platformoje. Varikliai pritvirtini ant juos laikančių kojelių, kurios pačios yra pritvirtintos prie centrinės plokštės, laikančios akumuliatorių, valdymo bloką, navigaciją ir kitą reikiamą įrangą. Šių skraidančių aparatų konfigūracija ypač tinka tvirtinti įvairių tyrimams skirtą įrangą, pavyzdžiui, kamerą, matavimo įrenginius arba šio tyrimo objektą – nuotoliniu būdu valdomą ginklą su stabilizacijos mechanizmu.

Sukasparnis yra valdomas naudojant diferencinę trauką ir sukimo momentą. Tai reiškia, jog orlaivio skrydžio manevrai priklauso nuo variklių sukimosi greičio. Galimi pagrindiniai sukasparnio manevrai yra:

- kybojimas;
- skrydimas vertikalia trajektorija;
- posūkis;
- horizontalus skrydimas: polinkis, pokrypis.

Kybant orlaivis išlaiko savo horizontalią ir aukštį žemės atžvilgiu. Kybojimas pasiekiamas, kada kiekvieno jo variklio trauka yra lygi viso sukasparnio svoriui, padalintam iš variklių skaičiaus, o variklių, besisukančių pagal ir prieš laikrodžio rodyklę, sukimo momentų suma yra lygi nuliui.

Atliekant manevrus, sukasparnio varikliai sukuria skirtingą trauką arba sukimo momentus. Skirtingų manevrų principinė schema bei vizualizuotos sukimosi kryptys pavaizduotos 7 paveiksle.



7 pav. Sukasparnių variklių sukimosi kryptys ir momentai atliekant skirtingus manevrus (Latorre 2011)

Orlaiviui skrendant vertikalia trajektorija (7 pav. a), jis išlaiko savo horizontalią padėtį paviršiaus atžvilgiu, bet keičia aukštį. Šiuo atveju variklių bendra trauka didinama arba mažinama, bet sukimo momentų suma apie vertikalią ašį išlieka lygi nuliui. Matematiškai šio manevro sąlyga užrašoma:

$$\sum T \neq mg \quad (2.1)$$

$$\sum M = 0 \quad (2.2)$$

čia $\sum T$ – variklių traukos suma, $\sum M$ – momentų suma.

Darant posūkį į kairę arba į dešinę (7 pav. b) horizontalioje padėtyje, pusė sukasparnio variklių padidina trauką, o pusė – sumažina. Taip bendra trauka lieka pastovi, tačiau sukimo momentas apie vertikalią ašį, kurią šiuo atveju pažymėsime x , nebūna pusiausvyroje. Šis sukimo momentas sukelia sukimąsi apie sukasparnio masės centrą horizontalioje plokštumoje. Šiuo atveju aukštis, polinkis ir pokrypis išlieka pastovūs. Šio manevro matematinė išraiška:

$$\sum T = mg \quad (2.3)$$

$$\sum M_{xx} \neq 0 \quad (2.4)$$

Tam, kad sukasparnis galėtų judėti horizontalioje plokštumoje ne vien apie savo masės centrą, bet ir pats keisti padėtį į priekį, atgal ir į šonus, sukasparniai atlieka pokrypio ir polinkio manevrus (7 pav. c). Mėlyna rodyklė 7 paveiksle žymi viso sukasparnio judėjimo kryptį horizontalioje plokštumoje. Žinant sukasparnio konfigūraciją, kur yra priekis ir kur galas, judėjimas į priekį atliekamas keičiant priekinių ir galinių variklių sūkius šoninių variklių sūkių nekeičiant. Gale esančių variklių sūčiai padidėja, o priekinių sumažėja, taip sukasparnis priverčiamas palinkti ir judėti į priekį, o jam palinkus, trauka išlyginama ir sukasparnis palinkęs nuo vertikalios padėties sukuria horizontalią traukos dedamąją. Analogiškai atliekamas judėjimas atgal. Atliekant polinkio manevrą apie ašį y priekinių ir galinių variklių trauka nesikeičia, o vieno iš šoninių variklių trauka padidėja, o kito sumažėja. Dėl traukų skirtumo orlaivis pakrypsta ir pakrypęs skrenda atitinkami į vieną ar kitą šoną. Matematinė šio manevro išraiška:

$$\sum T_{y,z} \neq \sum T \sin(\gamma) \quad (2.4)$$

$$\sum T_x \neq \sum T \cos(\gamma) \quad (2.5)$$

$$\sum M_{z,y} \neq 0 \quad (2.6)$$

čia γ – sukasparnio normalės nuokrypis nuo vertikalės, $T_{y,z}$ – horizontali traukos dedamoji, T_x – traukos dedamoji. Atliekant polinkio ar pokrypio manevro bendra sukasparnio traukos vertikalė dedamoji sumažėja. Vertikali ir horizontali dedamosios būna atitinkamai:

Iš formulių matyti, jog horizontali dedamoji tuo didesnė, kuo didesnis nukrypimas nuo vertikalės. Vertikali dedamoji didėjant nukrypimui nuo vertikalės mažėja, todėl atliekant manevrą norint neprarasti aukščio trauką būtina padidinti. Dėl šios priežasties sukasparnis turi maksimalų savo polinkio kampą, o priartėjęs prie jo, net ir papūtus menkam vėjo gūsiu gali prarasti vertikalų stabilumą.

Sukasparnio dinamika yra labai specifinė. Rankiniu būdu išlaikyti šio orlaivio stabilumą būtų itin sudėtinga, todėl siekiant išlaikyti jį pusiausvyroje, yra naudojama speciali elektroninė įranga. Pagrindinė dalis, atliekanti stabilizavimą, yra autopilotas. Šis įtaisas pagal elektroninių giroskopų surinktus duomenis nustato sukasparnio padėtį erdvėje. Su esama padėtimi lygindamas jam valdymo pulto nustatomus signalus bei iš globaliosios navigacinės sistemos (toliau – GPS) įrangos imtuvo priimtus duomenis, autopilotas per sujungtus variklių įtampos reguliatorius reguliuoja variklių sūkius. Taip pasiekiamas norimas skrydžio režimas ir judėjimas.

Modeliuojant sukasparnių platformas dėmesys turi būti skiriamas kiekvienam sudėtiniam elementui. Dėl šios priežasties toliau bus nuodugniau apžvelgiama sudedamųjų dalių specifika ir paaiškintas jų veikimas.

2.2. Svarbiausi sukasparnio komponentai ir jų veikimas

Karkasas

Visi sukasparnio komponentai dirba išvien. Karkasas yra dalis, kuri laiko visas dalis vienoje vietoje. Karkasai gali būti įvairių konfigūracijų. Atskiros dalys gali būti pagamintos iš skirtingų medžiagų. Kad ir kokia būtų konfigūracija, svarbu yra, kad atskiras detales veikiančios apkrovos

neviršytų medžiagų stiprumo ribos. Įtempis – dydis, aprašantis jėgą, tenkančią ploto vienetui (Juodis *et al.* 2009).

Karkasą dažniausiai sudaro kelios pagrindinės dalys. Centrinėje dalyje yra sudėti pagrindiniai elektronikos komponentai ir baterijos. Iš centrinės dalies išeina kojelės, skirtos varikliams laikyti, bei variklių laikikliai kojelių gale. Varikliai gali būti pritvirtinti tiesiogiai prie kojelių nenaudojant laikiklių.

Komponentai dažniausiai būna sudaryti iš šių medžiagų:

- anglies pluošto;
- aliuminio lydiniai;
- faneros.

Anglies pluoštas pasižymi itin geru atsparumu apkrovoms ir svorio santykiu. Ši medžiaga taip pat yra sugerianti vibracijas, todėl tinka sukasparnių konstrukcijoms, ant kurių tvirtinama vibracijai jautri įranga. Anglies pluoštas yra santykinai brangus lyginant su kitomis medžiagomis. Karkasų konstrukcijose naudojami aliuminio lydiniai yra patys populiariausi sukasparnių konstrukcijose dėl jų santykinai geros kainos, mažo svorio ir pakankamo tvirtumo. Tačiau aliuminio lydiniai nėra tokia atsparūs vibracijoms kaip anglies pluoštas, todėl esant didesnėms vibracijoms gali trikdyti jutiklių signalus. Fanera puikiai sugeria vibracijas ir yra pigi, tačiau nėra pakankamai tvirta didelėms apkrovoms atlaikyti, todėl konstruojant didesnes skraidančias platformas naudojama ne pagrindiniuose konstrukcijos elementuose.

Konstruojant karkasus patiems ir žinant, kokį svorį turi pakelti sukasparnis, karkasą būtina suprojektuoti taip, kad liktų vietos propeleriams ir apskaičiuoti, jog elementai, kuriems tenka didesnė apkrova, turėtų pakankamą stiprumo ribą.

Propeleriai

Propelerių trauka – pagrindinis parametras, pagal kurį jie yra parenkami. Komercinių mėgėjiškų propelerių gamintojai nesuteikia mokslinės informacijos, susijusios su jų aerodinamika ir kitais parametrais. Tiekėjai pateikia tik apytiksles traukos lenteles esant tam tikriems variklio sūkiams. Siekiant užtikrinti tinkamą trauką, esant tam tikrai masei kitoje skyrelio dalyje, remiantis

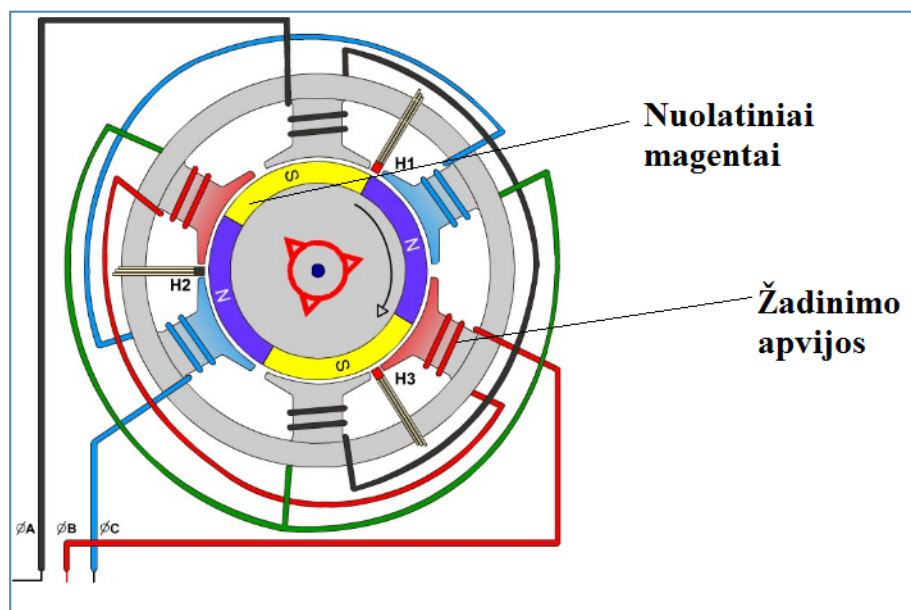
literatūroje pateikiamomis formulėmis bei koeficientais, bus skaičiuojama apytikslė propelerio trauka bei parenkamas propeleris, tinkamas konstrukcijos masei išlaikyti.

Varikliai

Parinkus tinkamus propelerius, kitas svarbus elementas projektuojant sukasparnį yra variklio parinkimas. Bandant nustatyti, kurie varikliai yra patys efektyviausi, buvo atliekama daugybė tyrimų, kurie dėl įvairių variklių gamintojų gausos darėsi vis sudėtingesni.

Pagrindinė elektros variklio funkcija yra sukuti tam tikros masės ir dydžio rotorius tam tikru greičiu. Perduodant variklio galią propeleriui ir oro srautui, svarbu variklį priderinti prie propelerio. Per mažas variklis gali perkaisti ir sugesti. Per didelio variklio naudingumo koeficientas bus sumažėjęs dėl didesnės masės bei elektros energijos suvartojimo. Norint parinkti tinkamiausią ir naudingiausią variklį reikia aptarti sukasparniuose naudojamus variklius. Toliau aptariama kintamosios srovės be šepetėlių specifika, privalumai ir trūkumai (Latorre 2011).

Varikliai be šepetėlių sukelia daug mažiau šalutinio triukšmo ir dirba sklandžiau nei su šepetėliais, todėl pastaruoju metu tarp mėgėjų modeliotojų tampa vis populiaresniai. Šie varikliai dažniausiai būna trijų fazių ir sujungti žvaigždės schema. Jo vidinė struktūra primena kintamosios srovės generatorių sudarytą iš nuolatinių magnetų rotoriaus, kuris sukasi palei elektromagnetų apvijas (8 pav.)



8 pav. Variklio be šepetėlių schema (Latorre 2011 p. 27).

Kadangi šepetėliai čia nenaudojami, srovės žadinimas yra perduodamas elektromagnetinės indukcijos principu. Siekiant pasukti rotorį, statoriaus apvijos yra žadinamos paeiliui. Norint geriausiai perduoti jėgos momentą, srovę reikia sužadinti kada magneto poliaus pozicija yra tinkamiausia. Ji yra nustatoma matuojant magneto padėtį specialiais statoriuje įtaisytais jutikliais. Išmatuoti signalai perduodami elektroninėms schemoms, kurios nustato tikslų statoriaus apvijų žadinimo laiką. Indukciniuose varikliuose rotorius būna sudarytas iš pasyvių apvijų, kurios elektromagnetiniame lauke įsimagnetina, tačiau nuolatiniai magnetai lyginant s pasyviomis apvijomis sukuria didesnę masės ir galios santykį. Nepaisant daugelio variklio parametrų, svarbiausias veiksnys, lemiantis variklio efektyvumą, yra sudėtinga elektroninė veikimo kontrolės sistema.

Šie varikliai gali būti dviejų tipų: su išoriniu rotoriumi ir su vidiniu rotoriumi. Išorinį rotorį turintys varikliai turi nuolatinį magnetą, besisukantį aplink viduje esančias statoriaus apvijas, o vidinį rotorį turinčiuose varikliuose vidinės apvijos sukasi apie išorėje esančius stacionarius magnetus.

Varikliai su išoriniu rotoriumi turi žemesnę K_V charakteristiką ir didesnę sukimo momentą negu varikliai su vidiniu rotoriumi dėl didelės besisukančios magnetų masės. K_V charakteristika nusako, kiek sūkių per minutę tenka vienam įtampos voltui. (Latorre 2011) Tokie varikliai yra tinkamesni didesniems propeleriams sukuti, kai kuriais atvejais jie netgi naudojami su pavaromis norint jais varyti mažesnius propelerius. Kita vertus varikliai su vidiniu rotoriumi, turi gerokai aukštesnius sūkius per voltą, tačiau žemesnę sukimo momentą. Tokie varikliai labiau tinkami varyti mažesnius propelerius arba didesnius per specialią pavarą. Šių variklių privalumai ir trūkumai pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė Elektros variklio be šepetėlių privalumai ir trūkumai

Privalumai	Trūkumai
Daugiau elektros energijos paverčiama mechanine energija, mažesni įtampos praradimai, nes nenaudojami šepetėliai.	Naudojamos brangesnės dalys iš retų ir brangių magnetinių metalų.
Galimybė panaudoti daugiau magnetų bei preciziškai sinchronizuoti jų veikimą, mažinant triukšmą.	Sudėtingesnė konstrukcija.

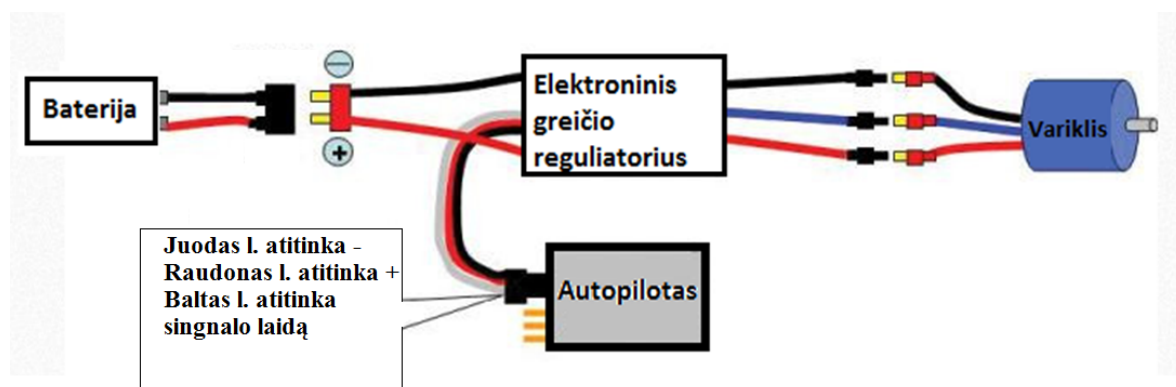
Stacionarūs elektromagnetai gali būti efektyviau vėsunami	Išorinis žadinimas, reikalaujantis naudoti elektronines mikroschemas.
Mažesni priežiūros reikalavimai, ilgesnė tarnavimo trukmė.	Vidinių įtampos jutiklių būtinybė.

Taigi, apibendrinant galima teigti, jog varikliai be šepetėlių suteikia didesnę apsisukimo greitį, efektyvumą bei sukimo momentą, tačiau yra brangesni ir sudėtingesnės konstrukcijos negu varikliai su šepetėliais.

Elektroniniai greičio reguliatoriai

Naudojant variklius be šepetėlių neišvengiamai reikalingi ir elektroniniai sukimosi greičio reguliatoriai (angl. *electronic speed control* – ESC). Kadangi varikliai be šepetėlių yra trijų fazių, tiesiog prijungti srovės tiekimą ir priversti juos sukis nėra galimybės. Variklis reikalauja fazės kontroliuojančio elektroninio priedo, gebančio generuoti tris skirtingų fazių aukšto dažnio signalus. Jis taip pat gali gebėti praleisti didelę srovę, kadangi varikliai naudoja nemažai galios.

Elektroniniai greičio reguliatoriai yra elektroninės schemos, turinčios maitinimo jungtį ir trijų fazių išeities signalo jungtis, sujungtas su variklio fazėmis. Principinė tokio reguliatoriaus schema pavaizduota 9 paveiksle.



9 pav. Elektroninio sukimosi greičio valdiklio principinė jungimo schema (*Florentrevest* 2011).

Jo veikimo principas grindžiamas nuolatinės baterijos srovės pavertimu į tris pulsuojančius apvijų žadinimo įtampos impulsus, tarp kurių fazių yra 120° skirtumas. Esant mažesniems nei maksimalūs sūkiams trifaziai impulsai yra sukarpyti nustatytu dažniu pagal trukmės ciklą, kuris priklauso nuo valdymo pulto nustatytos traukos varikliui. Esant maksimaliai užduotai traukai, impulsai nebėra sukarpyti ir gaunamas maksimalus sūkių skaičius ir sukimo momentas. (*Motors* 2010)

Šios mikroschemos gali būti įvairiausių konfigūracijų. Vienas svarbiausių veiksmų juos parenkant yra galimybė juos programuoti. Programuojami valdikliai leidžia geriau prisitaikyti prie konfigūracijos sukasparnio konfigūracijos ir taip geriau išnaudoti jo efektyvumą.

Akumulatoriai

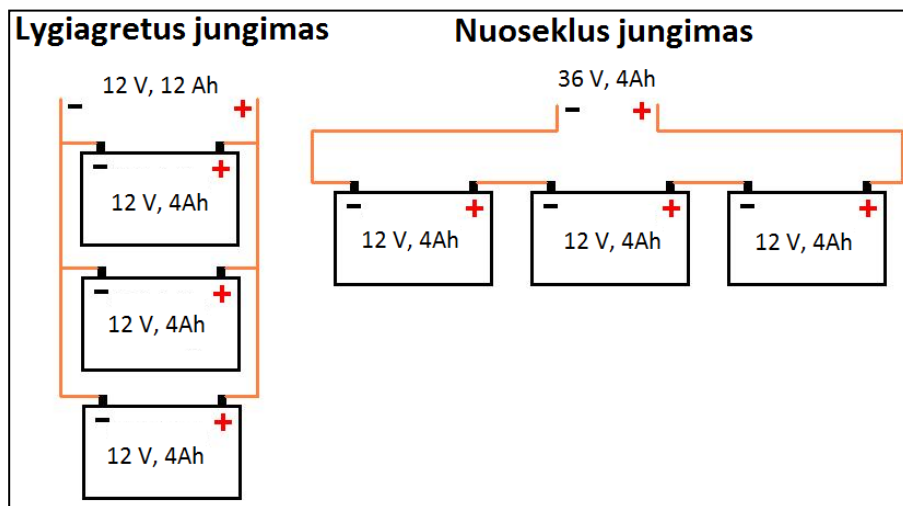
Šiuolaikiniuose nepilotuojamuose ar radijo bangomis valdomuose lengvuose mėgėjiškuose orlaiviuose, taip pat ir sukasparniuose dažniausiai naudojamas akumuliatorių tipas yra ličio polimero akumulatoriai. Šie elektros energijos kaupimo įtaisai gali būti pakartotinai įkraunami. Jie technologiškai išsivystė iš ličio jonų akumuliatorių. Priešingai negu ličio jonų baterijose, ličio polimero energijos kaupikliuose druskos elektrolitas laikomas ne organiniame tirpiklyje, o kietame polimero kompozite.

Šie akumulatoriai dažniausiai būna sudaryti ne iš vienos, o iš kelių dalių, supakuotų į foliją. Tokios dalys yra vadinamos elementais puikiai tinka formuoti daug elementų sudarančias plokščias baterijas, kurios gali būti lengvai ir patogiai įtalpinamos įvairiose vietose. Senesnio modelio ličio jonų baterijos, saugumo ir patikimumo tikslais būdavo talpinamos į tvirtesnes ir sunkesnes metalines pakuotes ar specialias dėžes. Talpinimas į lengvą foliją gali sutaupyti daugybę vietos ir svorio, todėl yra itin tinkamas lengviems orlaiviams modeliavimui ir konstruoti.

Nors ličio polimero baterijos elementai turi nustatytą 3,7 voltų vidutinę nominalią reikšmę, kuri naudojama skaičiuojant, šios vertės gali būti atitinkamai: minimali –2,7 voltai kai elementas pilnai iškrautas ir 4,23 voltai, kai elementas yra visiškai įkrautas. Šie elementai turi būti apsaugomi nuo perkrovimo, jų krovimo įtampą ribojant iki 4,235 voltų kiekvienam elementui su kitais sujungtam nuosekliai. Išsikrovimo atveju baterijos turi būti atjungtos, kai elemento įtampa nukrinta žemiau 3,0 voltų elementams esant sujungtiems nuosekliai, priešingu atveju, esant per dažnam tokiame iškrovime, baterijos elementai gali nebesikrauti. Šiems elementams naudojami specifiniai

krovimo įtaisai, ribojantys krovimo įtampą ir ją atjungiantys, baterijos įtampai pasiekus nustatytas vertes.

Baterijų elementai gali būti sujungti dvejopai: nuosekliai arba lygiagrečiai (10 pav.)



10 pav. Baterijos elementų jungimo schemas (Gatti *et al.* 2015)

Elementams esant sujungtiems nuosekliai, bendra baterijos jungimo gnybtų įtampa yra lygi atskirų elementų įtampų sumai, o talpa lygi kiekvieno elemento talpai. Padidėjus įtampai, gaunama didesnė galia, tačiau trumpesnis veikimo laikas, kadangi talpa nepadidėja. Matematiškai galima užrašyti:

$$U_{nuos} = U_1 + U_2 + \dots + U_n \quad (2.7)$$

$$Ah_{nuos} = Ah_1 = Ah_2 = \dots = Ah_n \quad (2.8)$$

Elementus jungiant lygiagrečiai, bendra baterijos gnybtuose esanti įtampa yra lygi atskirų elementų įtampai. Kadangi bendra įtampa nepadidėja, galia nepadidėja, tačiau padidėja talpa ir veikimo laikas būna ilgesnis.

$$U_{lyg} = U_1 = U_2 = \dots = U_n \quad (2.9)$$

$$Ah_{lyg} = Ah_1 + Ah_2 + \dots + Ah_n \quad (2.10)$$

Ličio polimero baterijos dažniausiai būna sudarytos iš dviejų ar daugiau elementų sujungtų nuosekliai siekiant suteikti didesnę įtampą. Siekiant padidinti baterijos talpą, elementai ar jų grupės, kurios būna sujungtos nuosekliai, būna jungiamos lygiagrečiai. Gamintojai elementų jungimo būdą

nurodo etiketėse, pavyzdžiui: 6S2P, jog bateriją sudaro dvi nuosekliai (angl. *series*) sujungtų 6 elementų grupės, kurios yra sujungtos lygiagrečiai (angl. *parallel*).

Baterijos talpa yra matavimo vienetas nurodantis, kiek energijos gali talpinti baterija. Ji yra matuojama Ah – ampervalandėmis. 1 Ah reiškia, jog baterija gali prietaisui 1 valandą tiekti 1 ampero srovę. Norint prailginti sukasparnio skrydžio trukmę, baterijos talpa turi būti padidinta, tačiau dėl masės apribojimų, projektuojant sukasparnius, baterijos talpa taip pat būna apribota.

Dar viena baterijos charakteristika yra maksimali srovės talpa. Ji apibūdina, kaip greitai baterija gali išsikrauti, matuojant valandomis. Ši charakteristika yra nurodoma gamintojų ir žymima C. Pavyzdžiui, 1 C charakteristikos baterija išsikrauna per vieną valandą o 2 C charakterizuojama baterija galia išsikrauti per pusę valandos. Pavyzdžiui 3Ah baterija iškraunama 9 A turi 3C charakteristiką. Kuo didesnis C, tuo brangesnė baterija. Ličio polimero baterijų privalumai ir trūkumai pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė. Ličio polimero baterijų privalumai ir trūkumai (Latorre 2011)

Privalumai	Trūkumai
Priešingai negu ličio baterijose naudojamas organinis tirpiklis, kietas polimero elektrolitas yra nedegus įprastomis sąlygomis, išskyrus atvejus kada baterija perkraunama.	Turi papildomus saugumo reikalavimus, kadangi jose naudojamas lakus elektrolitas, šios baterijos gali užsidegti ar net sprogti esant trumpam jungimui arba pradūrus elemento pakuotę.
Baterija nereikalauja tvirto metalinio apvalkalo, todėl yra lengvesnė ir lengviau telpa įvairiose vietose.	Naudojant ilgiau reikalauja daugiau priežiūros nei kitų rūšių baterijos.
To paties svorio baterija gali saugoti iki 20 % daugiau energijos negu ličio jonų baterija.	Trumpesnis gyvavimo laikas, tik iki 300 - 400 įkrovimo ir iškrovimo ciklų.
Šių baterijų savaiminio išsikrovimo laikas daug ilgesnis negu kitų tipų baterijų.	Brangesnės negu kitų tipų baterijos.

Centrinis blokas (autopilotas)

Pats sukasparnis yra labai nestabilus skraidymo aparatas. Rankiniu būdu jį suvaldyti būtų itin sudėtinga arba neįmanoma. Dirbtiniam stabilumui palaikyti yra naudojamas centrinio valdymo

blokas dar vadinamas autopilotu. Veikiant menkiausiam vėjo gūsiui, reikalingas staigus stabilizuojantis atsakas, kuris yra pasiekiamas keičiant variklių sūkius. Populiariaus mėgėjiškuose modeliuose naudojamas autopiloto modelis „Pixhawk“ pavaizduotas 11 paveiksle.



11 pav. Autopilotas „Pixhawk“ (Roastcopter...2013)

Autopilotas fiksuoja sukasparnio padėtį ir ją lygindamas su nustatyta, siunčia valdymo signalus į variklių įtampos reguliatorius, per kuriuos yra keičiami variklių sūkliai. Iš tiesų sukasparnį valdo autopiloto procesorius šimtus kartų per sekundę atlikdamas korekcijas, o žmogus valdymo pultu tik nustato jam komandas.

Autopilotuose naudojama PID korekcijos sistema. Ji paprastai gali būti užrašoma tokia lygtimi:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.11)$$

čia K_p proporcingumo (angl. proportional) koeficientas, K_i – integralinis koeficientas, K_d – išvestinis koeficientas. Iš šių raidžių susidaro trumpinys PID. $e(t)$ yra proceso klaida, kuri apibrėžia skirtumą tarp nustatytos reikšmės ir esamos reikšmės. Pavyzdžiui, sukasparniui parinkus, pokrypio greitį $5^\circ/\text{s}$ kampiniu greičiu, o jis verčiasi $4^\circ/\text{s}$ kampiniu greičiu, klaidos vertė bus 1° .

Kiekvienas anksčiau užrašytos lygties narys atlieka savo funkciją. Iš lygties pašalinę integralinį ir išvestinį narius gauname supaprastintą lygtį, turinčią vieną narį:

$$u_p(t) = K_p e(t); \quad (2.12)$$

Ši lygtis rodo, jog dabar korekcijos išėjimo signalas yra tiesiog proporcingas klaidai. Šiuo supaprastintu atveju koeficientas tiesiog parenkamas iš valdymo pulto ir padauginus jį iš proceso

klaidos gaunama atitinkama vertė, kuri yra pridėjama prie vieno ar kito variklio. Kai kuriais atvejais būna taip, jog varikliams neužtenka laiko taip staigiai įsisukti ir norima klaida nebūna taip greitai ištaisoma, kaip tikėtasi. Kuo didesnis šis koeficientas, tuo greičiau klaida būna ištaisoma. PID valdiklio prisitaikymo laikas priklauso nuo daugelio faktorių tokių kaip: variklių galia, propelerių, greičio reguliatorių, baterijos įtampos, karkaso konfigūracijos, masės ir t.t. (Informacija konstruktoriams, 2010) Kada šis koeficientas būna per mažas, link norimos korekcijos artėjama lėčiau ir sukasparnis skrenda nepakankamai stabiliai. Nustačius per didelį K_p norima klaida taisoma per greitai. Šiuo atveju galimas norimos padėties peršokimas, tada aparatas turi būti stabilizuotas jau į priešingą pusę. Taip gali atsirasti svyravimų arba purtymų, todėl, anot sukasparnių konstruktorių tinkamiausia K_p reikšmė yra šiek tiek mažesnė nei reikalinga.

Kadangi šis lygties narys yra tiesiog proporcingas klaidai $e(t)$, vienas jis veikia efektyviai tik tada, kada klaida yra pakankamai didelė, šis narys nebesugeba sugeneruoti pakankamai galios ir stabilizacijos procesas gali sustoti, todėl veikdamas vienas šis narys gali tik apytiksliai taisyti klaidas, o dėl nuolat klaidas sukeliančių faktorių tokių kaip masės centro nesutapimas su geometrinio centru, pučiantis vėjas ar jo gūsiai, visavertiškai stabilizuoti sukasparnį yra sudėtinga, todėl šiuo atveju jam gelbsti kitas integralusis lygties narys, kuris užrašomas:

$$u_i(t) = K_i \int_0^{t_k} e(\tau) d\tau; \quad (2.13)$$

Kadangi valdiklio procesorius yra diskretinis įrenginys, negalintis skaičiuoti integralų, šis integralas pakeičiamas suma, o lygties nariai $e(\tau)d\tau$ yra pakeičiami į $e(t)\Delta t$, kur Δt yra laikas tarp dviejų veiksmų. Gaunama lygtis:

$$u_i(t) = K_i \sum_i^k e(t_i) \Delta t; \quad (2.14)$$

Šis narys yra visų per daug ciklų išmatuotų klaidų $e(t)$ suma. Didėjant klaidai ši suma atitinkamai auga, o klaidai mažėjant, mažėja ir šio nario vertė. Pagal šio nario vertę yra generuojami atitinkamai signalai, koreguojantys sukasparnio padėtį. Anksčiau minėtas proporcingasis narys nesugebėdavo susitvarkyti, kada klaidos būdavo mažos, o integralusis narys per tam tikrą laiką iš mažų klaidų sukaupti pakankamas reikšmės korekciniam signalui generuoti. Jis gali „išmokti“ klaidas ir nuolat generuoti reikiamą signalą. Šis narys lėtai, bet užtikrintai atlieka korekcinius veiksmus, kada proporcingasis narys jam padeda savo greitu atsaku. Integralusis narys taip pat gali prašokti savo reikšmę ir po to generuoti priešingus signalus taip sukeldamas drebinimą, tačiau

šis drebėjimas bus kur kas lėtesnis negu veikiant tik proporciniam korekcinės lygties nariui. Dėl integralaus nario pastovumo daugiasraigčiai sukasparniai geba išlaikyti savo stabilumą net ir ne visai simetriškai sukonstravus skraidantį aparatą. (*Konstruktoriams...*2012)

Paskutinis 2.7 lygties narys nusako klaidos pokytį per laiko vienetą. Jis nurodo, ar klaidos taisymas eina teisinga linkme, taip leisdamas padidinti korekcijos signalų tikslumą ir pritaikydamas net prie smulkiausių destabilizuojančių veiksnių.

2.3. Skirtingų konfigūracijų palyginimas, bei parinkimas eksperimentui atlikti

Dėl ypatingos paskirties, šio baigiamojo darbo eksperimentinė platforma turi atitikti jai prisiskiriamus tam tikrus reikalavimus:

- ✓ Gebėjimas pakelti tam tikrą įrangos masę.
- ✓ Pakankamos stabilumo ir valdymo charakteristikos.
- ✓ Gebėjimas skristi ore net ir sugedus vienam varikliui.
- ✓ Komponentų ir konstrukcijos kaina turi būti prieinama.

Daugiasraigčiai sukasparniai būna daugybės skirtingų konfigūracijų. Pagrindinis elementas charakterizuojantis sukasparnio konfigūraciją yra variklių skaičius. Siekiant eksperimentui išsirinkti tinkamiausią, reikia žinoti jų privalumus ir trūkumus.

Keturių variklių sukasparnis

Šio tipo skraidantys aparatai (12 pav.) yra patys populiariausi rinkoje.



12 pav. Keturių variklių sukasparnis(Santos *et al.* 2013)

Jie yra patrauklūs savo paprasta konstrukcija ir santykinai nedidele kaina. Jų varikliai dažniausiai būna išdėstyti kvadrato arba skritulio forma aplink centrinę dalį. Šie sukasparniai pradėti naudoti dėl to, kad keturi varikliai gali pakelti daugiau masės bei skristi didesniu greičiu nei, pavyzdžiui, vieno sraigto sraigtasparnio modelis. Jie pasižymi maža santykinė kaina, bei geromis manevringumo charakteristikomis, be to išvysto pakankamai galios papildomai įrangai prikabinti.

Pagrindinis trūkumas lyginant su daugiau sraigtų turinčiais modeliais yra tas, jog jų pakeliama masė nėra tokia didelė, todėl jų gebėjimas nešti papildomą įrangą yra labiau apribotas.

Šešių variklių sukasparnis

Šie sukasparniai (13 pav.) geba sukurti daugiau traukos lyginant su keturių variklių, todėl jų galios ir masės santykis yra didesnis.



13 pav. Šešių variklių sukasparnis (Liu *et al.* 2013)

Šie sukasparniai yra optimalus pasirinkimas atsižvelgiant į kainą ir norimos nešti įrangos masę. Jie išvysto didesnę galią bei geba skristi didesniu greičiu nei keturių variklių sukasparniai. Jų maksimalus kybojimo aukštis yra didesnis negu keturių variklių sukasparnių. Vienas svarbiausių tokių skraidančių aparatų pasirinkimą lemiančių ypatumų yra tas, kad netgi sugedus vienam varikliui, jis geba skristi ir netgi saugiai nutūpti nepatirdamas papildomos žalos. Pagrindinis jų privalumas yra didesnė bendra galia, dėl to – ir pakeliama masė. Taip pat – didesnis greitis bei pakilimo aukštis. Šie sukasparniai taip pat yra ir manevringesni, bei pasižymi gebėjimu skristi net ir sugedus vienam varikliui.

Nepaisant minėtų privalumų, šie sukasparniai yra daug brangesni nei keturių variklių platformos. Jie yra didesni, todėl juos nelengva valdyti apribotose erdvėse. Didesnis propelerių

skaičius lemia mažesnę bendrą efektyvumą bei energijos vartojimo ekonomiškumą. Šis sukasparnis modeliuotojų įvardijamas kaip geriausias kompromisas atsižvelgiant į jo charakteristikas ir kainą. Jų skrydimo charakteristikos daug geresnės negu keturių variklių platformos, tačiau jie nėra tokie brangūs, kaip aštuonių variklių sukasparniai.

Aštuonių variklių sukasparnis

Šio tipo sukasparniai savo charakteristikomis yra laikomi geriausiais, tačiau ir pačiais brangiausiais iš visų plačiai naudojamų daugiasraigčių sukasparnių (14 pav.)



14 pav. Šešių variklių sukasparnis (Sámano *et al.* 2013)

Jie turi visus šešių variklių platformos privalumus, tačiau sugeba išvystyti dar daugiau galios, todėl geba nešti dar didesnės masės įrangą ir yra plačiai naudojami nešant sunkius geros kokybės nuotraukas darančius fotoaparatus. Šie sukasparniai pasižymi puikiomis greičio, valdymo ir stabilumo charakteristikomis, bei dar mažesne sudužimo rizika. Nepaisant minėtų privalumų, šie sukasparniai taip pasižymi dideliais gabaritais, santykinai didele kaina ir mažu energijos efektyvumu.

Didelė kaina ir trumpas baterijos gyvavimo laikas – pagrindiniai veiksniai, skatinantys modeliuotojus nesirinkti šio sukasparnio tipo.

Šio baigiamojo darbo eksperimentinė platforma turi gebėti pakelti nemažą masę, todėl nors ir būtų ekonomiškai efektyvus ir lengviau pagaminamas, keturių variklių sukasparnis neatitiktų šio reikalavimo arba dėl galingų variklių būtų išskirtinai brangus, be to, neatitiktų trokštamo dužimo rizikos išvengiamumo sugedus vienam varikliui. Aštuonių variklių skraidanti platforma būtų idealus variantas dėl savo stabilumo ir gebėjimo pakelti didelę masę, tačiau dėl didelių konstrukcijos ir

komponentų kaštų nėra pasirenkama šiam eksperimentui. Išnagrinėjus skirtingų sukasparnių privalumus ir trūkumus, šiam baigiamajam darbui pasirinkta šešių variklių skraidanti platforma, užtikrinanti gebėjimą pakelti reikiamą įrangą bei atitinkanti saugumo reikalavimus.

2.4. Pistoletų veikimo principas

Norint įvertinti ginklo šaudymo įtaką sukasparnio skrydžio charakteristikoms, svarbu žinoti, kaip veikia pats ginklas. Standartinis pusiau automatinis pistoletas yra sudarytas iš šių pagrindinių dalių pavaizduotų 15 paveiksle.



15 pav. Pusiau automatinio pistoleto sudėtinės dalys (*Naudinga...2009*)

1 – kryptukas, 2 – spyna, 3 – vamzdis, 4 – gražinamoji spyruoklė, 5 – rėmas su nuleistuku, 6 – nuleistukas, 7 – šovinių dėtuve, 8 – spynos ir vamzdžio laikiklis, 9 – dėtuvės fiksatorius, 10 – kriaunos, 11 – gaidukas, 12 – saugiklis, 13 – šovos mechanizmas, 14 – vamzdžio šovinio lizdas su daužikliu, 15 – rantai, 16 – taikiklis, 17 – šovinio tūtos ištraukiklis, 18 – tūtelės išmetimo langelis

Šovinį sudaro kulka ir parako pripildyta tūta. Pistoletas kulka įgreitinti naudoja šovinio parako sprogimo metu atsiradusią suspaustų dujų energiją. Į pistoleto rankeną įstačius dėtuvę su šoviniais ir patraukus užtaisymo spyną atgal šovinys patenka į šovinio lizdą, kur yra paruoštas

iššauti, o gaidukas tuo metu būna atlenkiamas. Pirštui paspaudus nuleistuką, gaidukas smūgiuoja į daužiklį, kuris perduoda smūgio energiją į šovinio dugnelį, kur uždegamas šovinyje esantis parakas. Degimo metu dujų slėgis viduje didėja taip priversdamas kulką pajudėti iš vietos ir išlėkti iš pistoleto vamzdžio. Pistoletų vamzdis turi graižtvas išsukančias kulką apie savo ašį. Šis išcentrinis sukimasis pagerina kulkos skridimo charakteristikas.

Skirtingų pistoleto tipų kulų pradiniai greičiai būna išmatuoti ir pateikti gamintojų. Žinant kulkos pradinį greitį vamzdžio gale bei masę, galima apskaičiuoti ginklų šūvio metu veikiančias jėgas. Šie skaičiavimai bus atlikti kitoje šio baigiamojo darbo dalyje.

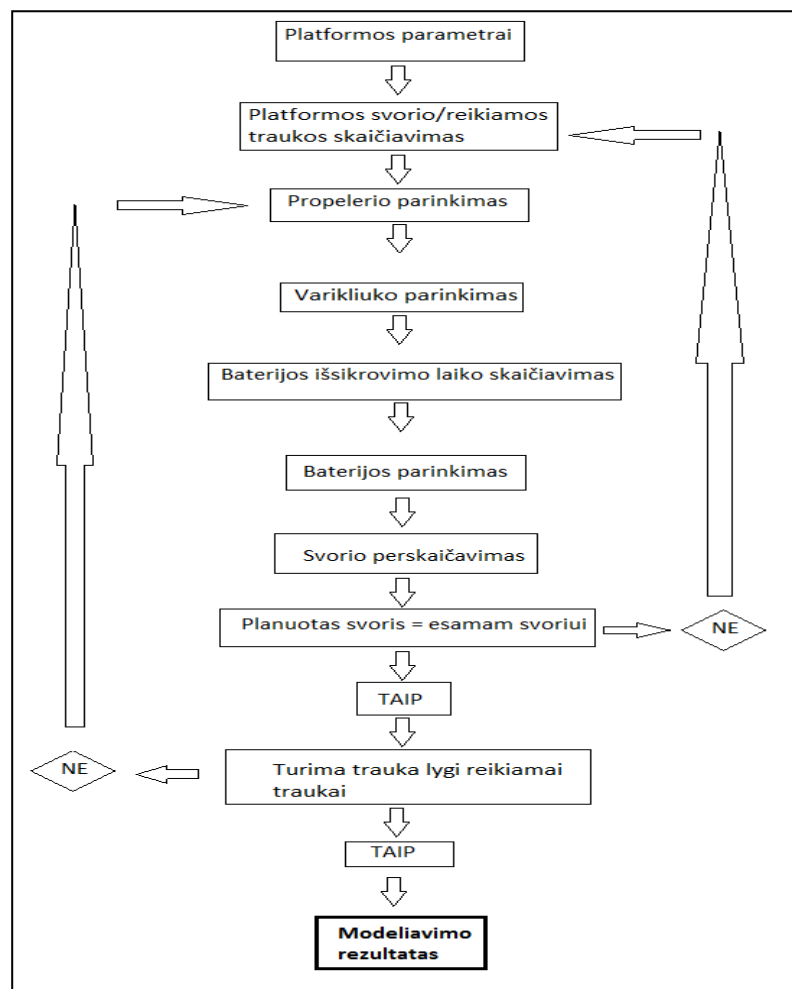
3. SUKASPARNIO PLATFORMOS PARAMETRŲ SKAIČIAVIMAS, PARINKIMAS, MODELIAVIMAS BEI GAMINIMAS

Šiame skyriuje aprašomas sukasparnio projektavimas, parametrų skaičiavimas bei parinkimas. Siekiant sėkmingai atlikti tyrimą pirmiausia siekiama pasidaryti tyrimo platformą – t.y. patį sukasparnį. Tam, kad sukasparnis skristų ir pakeltų reikiamą įrangą, reikia apskaičiuoti ir parinkti tinkamus jo geometrinius bei fizinius parametrus.

3.1. Sukasparnio platformos maketavimas ir gaminimas

Pagrindinis didelę įtaką turintis parametras projektuojant sukasparnį yra masė, o pagal ją yra parenkami ir kiti parametrai. Kiekvienas variklis turi sugebėti pakelti savo paties svorį, jam tenkančią elektronikos, karkaso bei papildomo krovinio masės dalį bei turėti traukos atsargos manevravimui bei stabilumui palaikyti.

Projektavimo ypatybės susideda iš variklių, propelerių, baterijų bei karkaso parametrų parinkimo. Šį procesą sudaro keli vienas po kito einantys etapai pavaizduoti 16 paveiksle.



16 pav. Modeliavimo proceso eilės tvarka (Latorre 2011)

Iš pradžių preliminarai nustatomi būsimi komponentai ir jų masė. Masė yra prilyginama reikiamai variklių statinei traukai. Tada nustatoma reikiama vieno variklio trauka. Tada remiantis teorinėmis formulėmis yra apskaičiuojama propelerių trauka ir parenkamas tinkamiausias propeleris. Pagal biudžeto galimybes parenkami elektros varikliai. Žinant variklių naudojamą įtampą apskaičiuojamas baterijos išsikrovimo laikas ir parenkama baterija, kuri atitiktų bent minimalius reikalavimus. Žinant baterijų svorį perskaičiuojamas tikrasis svoris ir prilyginamas planuojamam. Esant nesutapimams platformos svoris skaičiuojamas iš naujo, bandomos parinkti kitos detalės, siekiant sumažinti svorį. Jeigu svoris atitinka reikiamas sąlygas, tada dar kartą patikrinama, ar variklių trauka lygi reikiamai traukai. Propeleriui neatitikus šios sąlygos reikia parinkti kitą propelerį, kuris suteiktų pakankamai traukos.

3.2. Propelerių traukos skaičiavimas

Sukasparnio pakilimui reikia gauti pakankamai statinės traukos siekiant stabiliai išlaikyti tam tikros masės sukasparnį ore. Pagal reikiamus parametrus galima parinkti tinkamos galios variklius ir reikiamo skersmens propelerius. Norint nustatyti reikiamą trauką, pirmiausia reikia nustatyti, kokia bus planuojamo skraidančio aparato masė. Prieš perkant atskirus komponentus, preliminarini planuojamo modelio masė pateikta 3 lentelėje.

3 lentelė. Preliminari komponentų masė

Komponentas	Žinoma arba planuojama komponento masė
Sukasparnio karkasas	1-1,5 kg
Varikliai	6 x 0,15 kg = 0,9 kg
Akumuliatoriai	2 x 1,1 kg = 2,2 kg
Elektronikos komponentai	Apie 0,5 kg
Dujinis ginklas su valdymo mechanizmu	Iki 1 kg

Maksimaliai planuojama kelti masė yra apie 6,1 kg. Taigi, norint kyboti ore vieno variklio trauka turėtų būti apie 1 kg.

Projektuojant skraidančią platformą, reikia parinkti tinkamų parametrų variklius ir propelerius. Statinė trauka – propelerio sukuriamą trauką orlaiviui nejudant oro atžvilgiu (Sforza 2012a) Šie paskaičiuoti parametrai daugeliu atvejų yra svarbiausi sukasparniams, kadangi jie daugiausiai naudojami skrendant nedideliais greičiais ar kybant ore. Toliau pateikiami skaičiavimai plačiai pritaikomi mažų greičių sąlygomis. Tačiau būtina paminėti, kad šie skaičiavimai yra tik apytiksliai, todėl bandymų rezultatai gali skirtis nuo paskaičiuotų. (Sforza 2012b)

Platformai parinkti mažesnės kainos elektros trifaziai elektros varikliai be šepetėlių EMAX MT4114. Šie varikliai yra plačiai naudojami didesnės masės sukasparniuose. Gamintojų pateikiamose specifikacijose jiems rekomenduojami didesni propeleriai, kurių skersmuo prasideda nuo 13 colių, o variklio sūkių veikimo skaičiuojamasis diapazonas yra nuo 2000 iki 6500 sūkių per minutę (*Multiicopter motor*, 2012)

Skaiciuodami statinę trauką pradžioje apibrėžiame propelerių perduodamą galią esant tam tikriems sūkiams. (*Static thrust ...* 2010) Tai apibrėžiama empirine 3.1 formule:

$$P = K_{pr} \times rpm^{Pf} \quad (3.1)$$

čia P – galia, K_{pr} – propelerio konstanta, rpm – sūčiai per minutę, Pf – galios faktorius.

Kitas žingsnis apima propelerio generuojamos traukos nustatymą, kuris apibrėžiamas formule:

$$T = \frac{\pi}{2} D^2 \rho v \Delta v \quad (3.2)$$

čia D yra propelerio skersmuo v – oro greitis ties propeleriu, o Δv – propelerio srauto greičio pagreitinimas. Plačiai naudojama taisyklė, kuri sako, kad oro greitis ties propeleriu yra lygus pusei srauto pagreitėjimui t. y. $\frac{1}{2} \Delta v$. Remiantis tuo, išvedama lygtis:

$$T = \frac{\pi}{8} D^2 \rho (\Delta v)^2 \quad (3.3)$$

Propelerio absorbuota galia iš variklio yra:

$$P = \frac{T \Delta v}{2} \rightarrow \Delta v = \frac{2P}{T} \quad (3.4)$$

Įstatę į 3.3 gauname

$$T = \left[\frac{\pi}{2} D^2 \rho P^2 \right]^{1/3} \quad (3.5)$$

Įstatę 3.1 lygtį į 3.5 ir padalinę iš laisvojo kritimo pagreičio, gauname variklio sukuriamą trauką kilogramais:

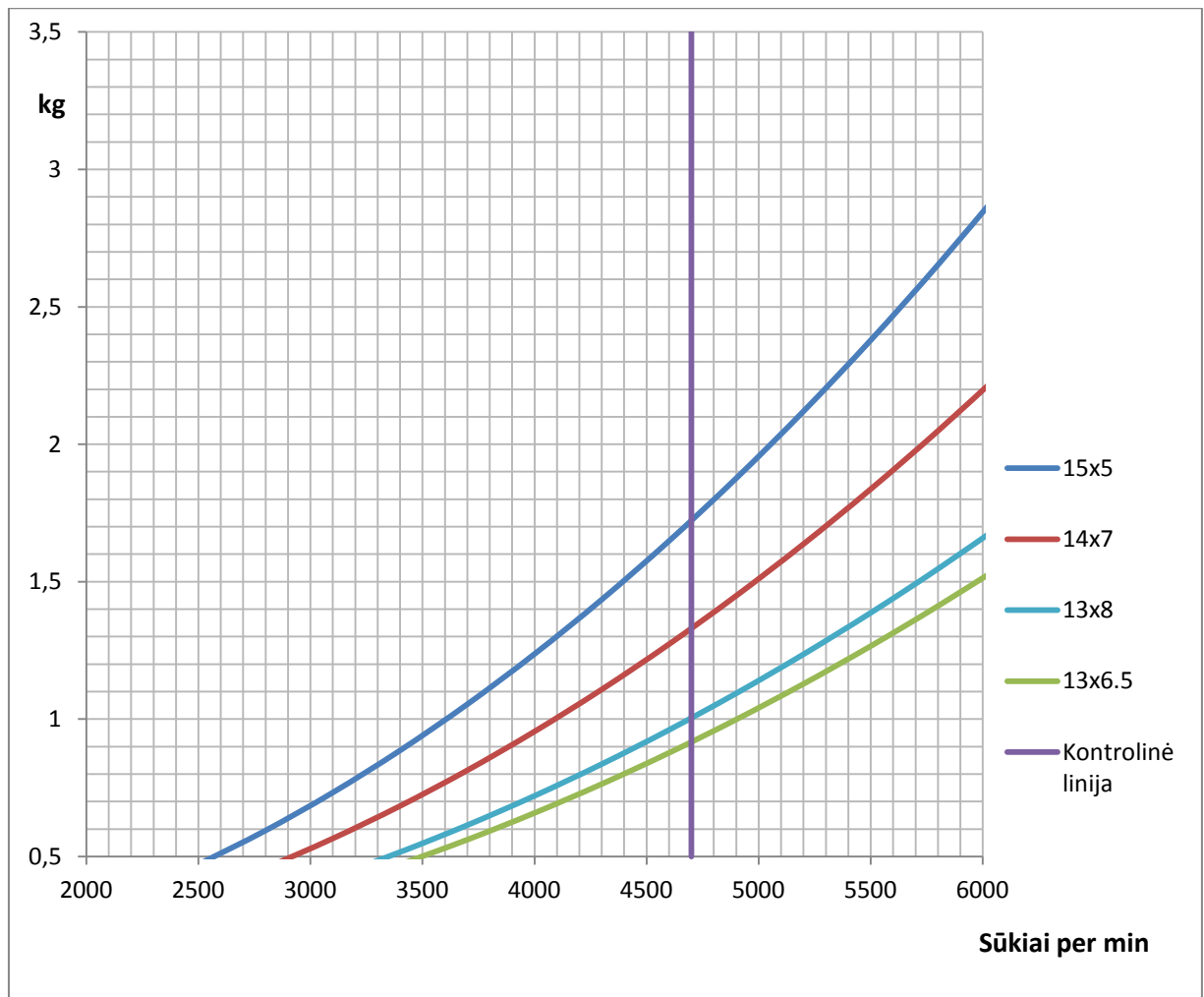
$$m = \frac{\left[\frac{\pi}{2} D^2 \rho (K_{pr} \cdot rpm^{Pf})^2 \right]^{1/3}}{g} \quad (3.6)$$

Skaičiuojame 13 x 6.5, 13 x 8, 14 x 7 ir 15 x 5 colių propelerius, kur pirmasis indekso skaitmuo yra propelerio skersmuo coliais, o antrasis yra propelerio žingsnis coliais. Colis apytiksliai lygus 2.54 cm. 4 lentelėje pateikiami propelerių modeliams gamintojų nustatyti koeficientai.

4 lentelė Gamintojų propelerių modeliai su jiems priskirtais koeficientais (*Aircraft datasheet*, 2011)

Propelerio modelis	Atvaizdas	Galios faktorius P_f	Propelerio konstanta K_{pr}
„Aeronaut Cam“ 13 x 6.5		3,08	0,56
„Aeronaut Cam“ 13 x 8		3,08	0,642
„T motor“ 14 x 7		3,08	0,909
„T motor“ 15 x 5		3,08	1,25

Sukasparnio kybojimui turi būti naudojama ne daugiau nei 75 % traukos, kadangi likusi traukos atsarga turi likti stabilumui palaikyti bei manevruoti. Reali pasiekiamą propelerio efektyvumą vertė yra nuo 80 iki 88 % (Bručas 2012). Siekiant apsidrausti imama pesimistiškiausia efektyvumo vertė t. y. 80 %. Vienas propeleris pagal turimus parametrus turi generuoti apie 1100 g traukos. Apskaičiuotos traukos vertės prie tam tikrų sūkių pavaizduotos 17 paveiksle.



17 pav. Propelerių esant skirtingiems sūkiams

Matyti, kad ties 4700 sūkių per minutę 14 x 7 ir 15 x 5 propeleriai atitinka reikiamas traukos sąlygas. Projektavimui imame 15 x 5 colių propelerius dėl galimybės vėliau pridėti papildomo svorio. 15 x 5 colių propeleriu varomas variklis ties 4700 sūkių per minutę generuoja 1,6 kg trauką. Esant 6 varikliams bus gaunama 7,6 kilogramų trauka. Tai leis pridėti daugiau nei 1500 g krovinio ar įrangos bei palieka nemažai atsargos masės skaičiavimo paklaidoms.

3.3.Naudingo baterijos veikimo laiko skaičiavimas

Skraidančio aparato praktiniam panaudojimui užtikrinti reikia žinoti jo gebėjimo išbūti ore laiką. Dėl šios priežasties, šiame poskyryje bus atliekamas baterijos naudingo laiko skaičiavimas.

Iš bendrosios fizikos žinoma, jog energijos išnaudojimo laikas yra lygus energijos kiekiui, arba šiuo atveju baterijos talpai, padalintai iš naudojamos galios.

$$t = \frac{Ah}{P}; \quad (3.7)$$

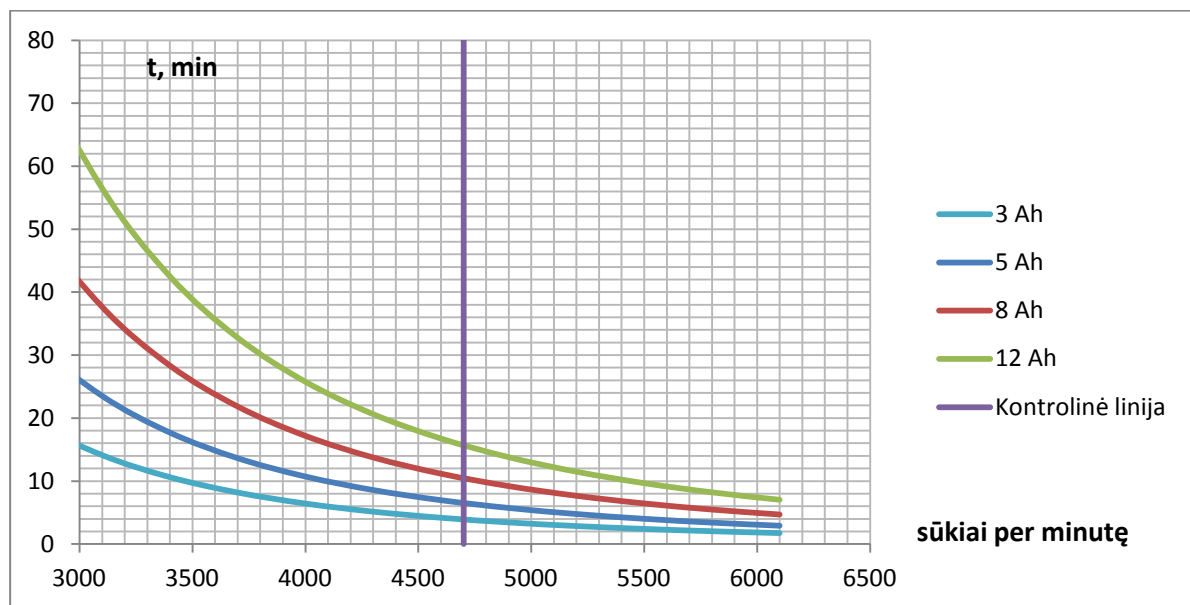
Taigi, žinodami baterijos talpą ir variklių naudojamą galią, galime sužinoti visos elektrą naudojančios sistemos veikimo laiką. Žinodami variklių naudojamą įtampą U ir panaudoję 3.14 galios formulę, gauname vieno variklio naudojamą elektros srovės priklausomybę nuo variklio sūkių:

$$I_e = \frac{K_{pr} \times rpm^{P_f}}{U}; \quad (3.8)$$

Tada žinant baterijos talpą Ah skaičiuojamą ampervalandėmis, galima apskaičiuoti baterijos išsikrovimo laiką:

$$t = \frac{Ah \times U}{K_{pr} \times rpm^{P_f} \times n_v}; \quad (9)$$

Čia n_v - variklių skaičius. Naudojant parinkto propelerio galios faktorių ir koeficientą, gauname skirtingos talpos baterijų išsikrovimo laiko priklausomybę nuo variklio sūkių (18 pav.)



18 pav. Baterijos išsikrovimo laiko priklausomybė nuo variklių sūkių

Žinant, kiek laiko veikia baterijos esant tam tikriems sūkiams, suprojektavus sukasparnį ir žinant kitų komponentų masę, galima parinkti tinkamą bateriją, kuri atitiktų bandymui nustatytus skrydžio laiko reikalavimus neviršijant leidžiamos masės.

3.4. Sukasparnio konstrukcijos bei įrangos parinkimas

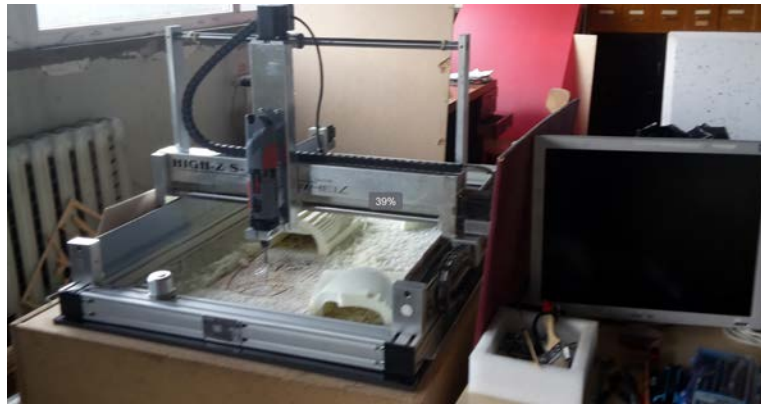
Tam, kad sukasparnio konstrukcija gebėtų sutalpinti pakankamai įrangos, bet nebūtų per didelių gabaritų, būtina suprojektuoti ir parinkti tinkamus geometrinius sukasparnio parametrus.

Tinkamai sukasparnio statinei traukai išvystyti pasirinkti 15 colių (38,1 cm) skersmens propeleriai. Tam, kad platformos konstrukcija leistų įtalpinti tinkamus propelerius ir atlaikytų apkrovas, reikia nustatyti sukasparnio geometrinius parametrus. Pradžioje reikia susiprojektuoti geometrinį modelį.

Įvairių modelių projektavimui plačiausiai naudojamos kompiuterinio modeliavimo programos „AutoCAD“, „Catia“ ir „SolidWorks“. Iš trijų paminėtų programų SolidWorks yra palankiausia paprastam vartotojui braižant trimačius modelius, todėl ji ir buvo pasirinkta virtualiam projektavimui. „SolidWorks“ yra kompiuterinio modeliavimo programa daugiausiai naudojama kietiems kūnams modeliuoti, palaikoma „Microsoft Windows“ operacinėje sistemoje. Ji yra naudojama daugiau nei 2 milijonų viso pasaulio inžinierių ir modeliotojų iš 165 000 kompanijų.

Ši programa paremta parametrine objektų bei jų rinkinių formavimo prieiga. Ji paremta Parasolid-kernel programavimo kalba. Kuriant objektus yra įvedami apribojantys parametrai, nusakantys objekto formą. Šie parametrai gali būti skaitiniai, vektoriniai arba geometriniai. Nubraižius atskiras projektuojamo objekto dalis, jas galima sujungti į vieną kompleksą, bei matmenis sujungti ryšiais, kuomet keičiant vienus parametrus yra keičiami ir kiti. Taip pat galima nustatyti sąveiką tarp skirtingų surinkimo detalių, matuoti veikiančias jėgas ir kitus parametrus. Nustačius komponentų masę, programa leidžia paprastai apskaičiuoti masės centro padėtį bei inercijos momentus reikalingus šio baigiamojo darbo tyrimui.

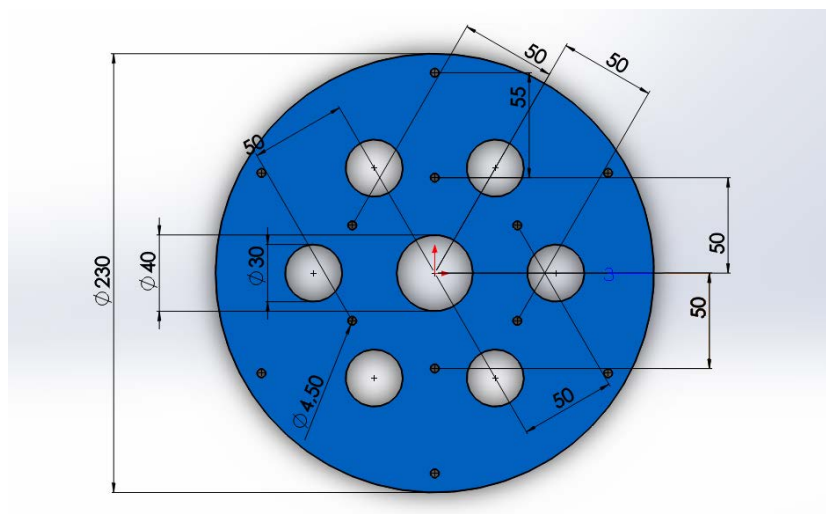
Taip SolidWorks programos laikmeną galima lengviau konvertuoti į elektroninių trimačio frezavimo staklių „High-Z S-1000“ (19 pav.) vektorinę programinę laikmeną.



19 pav. Trimačio frezavimo staklės „High-Z S-1000”

Šios staklės suteikia galimybę iš pasirinktos medžiagos preciziškai tiksliai išpjauti norimą trimatę detalę.

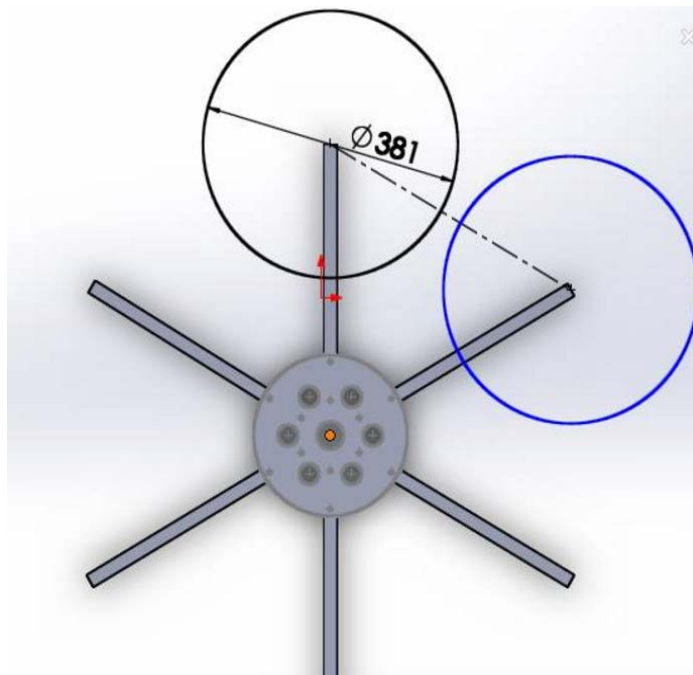
Pradžioje suprojektuojama centrinė sukasparnio dalis, prie kurios bus tvirtinamos kitos dalys ir elektroninė įranga (20 pav.)



20 pav. Sukasparnio karkaso centrinė plokštė, suprojektuota programa „SolidWorks“

Pagal bendrus sukasparnių modeliavimo principus, plokštė parenkama skritulio formos, kadangi taip lengviausia užtikrinti simetriją, bei paliekama vietos įrangai dėti. Nubraižomos skylės tam, kad būtų galima išvedžioti komponentus jungiančius laidus.

Taip pat suprojektuojamos ir variklius laikančios kojelės (21 pav.).



21 pav. Sukasparnio pradinis modelis sumodeliuotas programa“ SolidWorks“

Netoli jų galų nubrėžiami 38,1 cm apskritimai. Kojelių ilgis koreguojamas tiek, kad tilptų parinkti propeleriai, tarp jų paliekant minimalų tarpą.

Prenkami varikliai EMAX MT4114, rekomenduojami gamintojų, tinkantys 15 x 5 propeleriams, išvystantys pakankamai traukos ir galios pagal gamintojų pateiktas išmatuotas vertes.

Iš baterijos išsikrovimo grafiko, (19 pav.), matyti, jog 3 Ah ir 5 Ah talpos baterijų veikimo trukmė nesiekia nė 10 minučių. Jų masė atitinkamai yra 0,4 ir 0,65 kg. Pagal preliminarų masės nustatymą, galime rinktis didesnės masės baterijas. 12 Ah baterijų veikimo laikas yra pakankamai ilgas, tačiau tokios baterijos masė viršija 1,4 kg, todėl parenkamos 8 Ah talpos baterijos, kurių masė yra 1,1 kg. Jos bus dedamos dvi, taigi, bendras skrydžio laikas su dvejomis baterijomis turėtų būti apie 24 minutes.

Ginklo prikabinimo mechanizmo su servo varikliais masė nustatyta apie 0,65 kg. Dar kartą pasvėrus visus komponentus gaunamas sukasparnio konstrukcijos bendras svoris. Komponentų masė pateikta 5 lentelėje.

5 lentelė Pasvertų komponentų masė

Aliuminio variklio tvirtinimo kojelė	110 g x 6 = 660 g
Anglies pluošto plokštė	125 g x 2 = 250 g
Variklis su laidais	160 g x 6 = 960 g
Akumulatorius	2 x 1100 g
Valdiklis	30 g x 6 = 180 g
Ginklo stabilizatoriaus variklis	205 g
Ginklas	400g
Ginklo stabilizatoriaus konstrukcija	650 g
Elektronika ir laidai	150g

Pasvėrus komponentus nustatyta, jog visų komponentų masė apytiksliai lygi 5650 g.

Pagal anksčiau pateiktą modeliavimo algoritmą (žr. 3.1 poskyrį), sulyginamas esamas svoris su planuoju bei turima trauka su reikiama trauka. Matyti, jog rezultatai atitinka reikiamas sąlygas, todėl modeliavimas laikomas baigtu.

Centrinėms plokštėms naudojamas anglies pluoštas. Anglies plokštės gaminamos klijuojant anglies pluošto sluoksnius epoksidine derva. Dėl tvirtumo dedama 10 sluoksnių, tarp jų tepant dervą. Dervai sukietėjus gaunamos plokštės, iš kurių galima išpjauti norimą detalę.

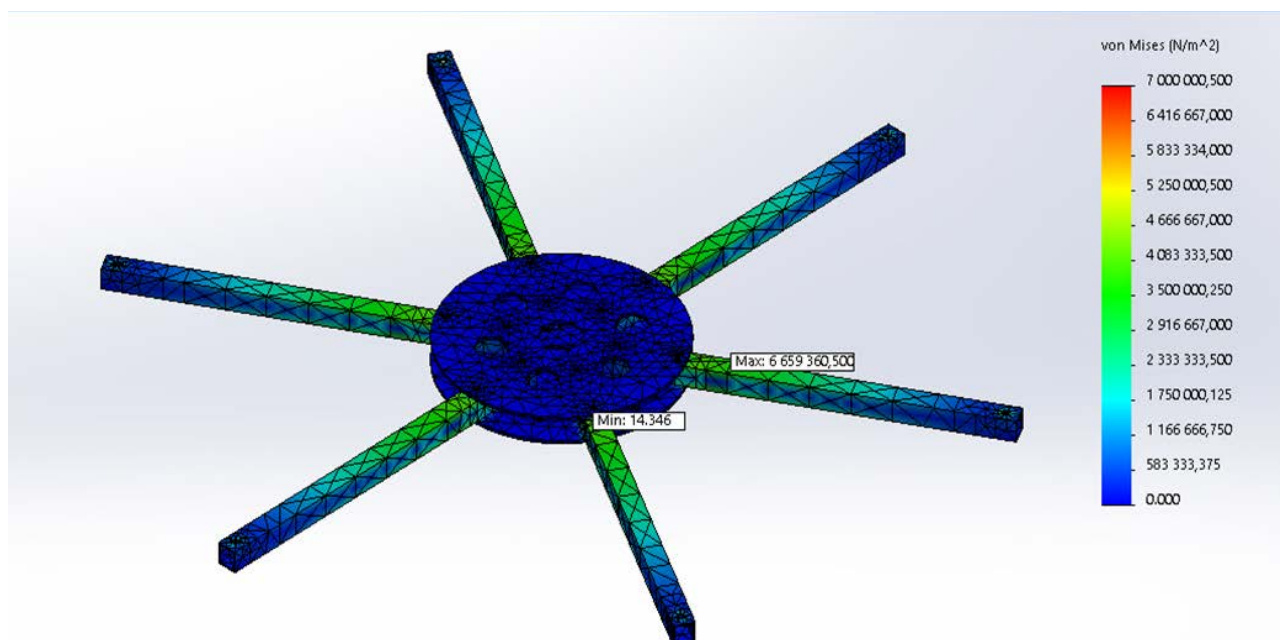
Perkėlus „SolidWorks“ programa nubraižytą centrinės plokštės modelį į kompiuterines stakles „High-Z S-1000“ iš sukljuotų anglies pluošto plokščių yra išpjauamos centrinės plokštės modeliai. (22 pav.)



22 pav. Sukasparnio centrinės plokštės ir variklius laikančios kojelės

Taip pat iš aliuminio kvadratinių vamzdžių išpjaunamos reikiamo ilgio kojos. Šios dalys – tai sukasparnio griaučiai, laikantys visas apkrovas tenkančias visai konstrukcijai.

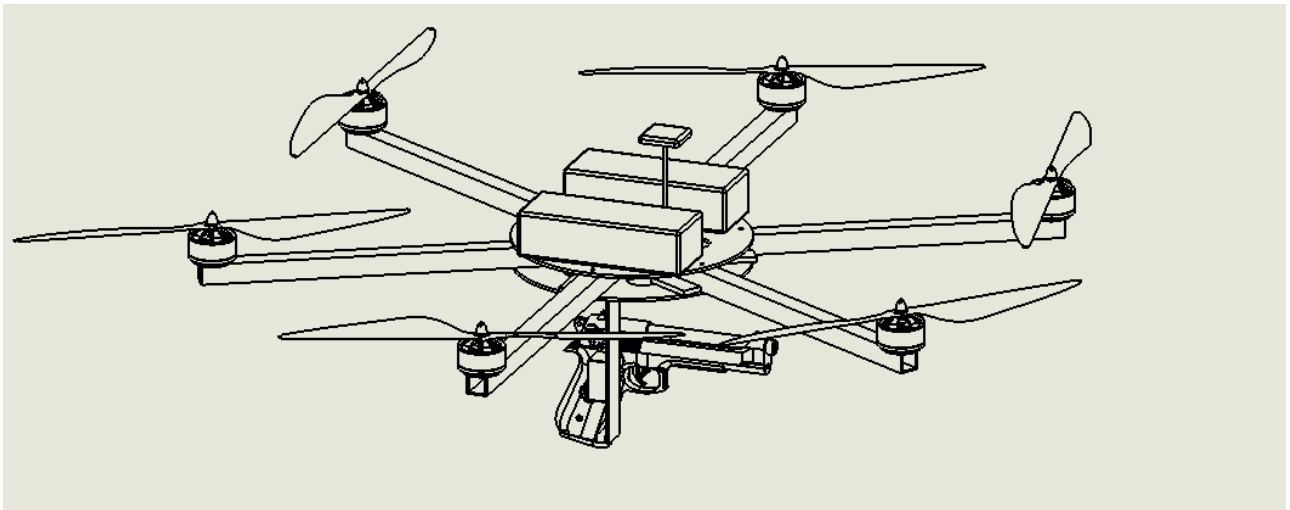
Siekiant patikrinti, ar konstrukcija atlaikys apkrovą, buvo atlikta simuliacija programa „SolidWorks“ (23 pav.)



23 pav. „Solidworks“ apkrovos simuliacija

Simuliacijos metu konstrukcijai ties kojų galais buvo pridedamos variklių traukos jėgos, o plokštės fiksuojamos vienoje vietoje. Taip gauti lenkimo momentai bei atitinkamų verčių įtempimai. Aliuminio stačiakampio profilio 2 x 2 ir anglies pluošto stiprumo riba yra pakankama. Atlikus simuliaciją paaiškėjo, jog įtempiai tenkantys konstrukcijai neviršija maksimalių leistinų įtempimų.

Programa „SolidWorks“ galutinai sumodeliuojamas sukasparnio modelis pavaizduotas 24 paveiksle.



24 pav. Kompiuterinio modeliavimo programa „SolidWorks“ sumodeliuotas daugiasraigis sukasparnis su apačioje prikabinu ginklu

Kojos varžtais sujungiamos su plokštėmis ir varikliais. Elektronikos dalys sulituojamos ir išvedžiojamos į atitinkamus variklius. Apačioje sumontuojamas ginklas su jį stabilizuojančiu ir nuleistuką spaudžiančiu servo mechanizmais bei maža kamera, skirta tiesioginiam vaizdui matyti. Galutinai surinktas sukasparnis pavaizduotas 25 paveiksle.



25 pav. Surinktas unikalus daugiasraigis sukasparnis „Meganeuropsis“ su prikabintu ginklu ir valdymo mechanizmu

Kiekvienas variklis yra atitinkamai sujungtas su savo elektroniniu valdikliu, kurie vėliau būna sujungti į vieną grandinę, iš kurios išvesti maitinimo laidai. Elektroniniai variklių sūkių reguliatorių signalų laidai sujungiami į centrinį bloką (autopilotą), į kurį taip pat yra įjungti ir GPS sistemos priedėlis, bei imtuvas, į autopilotą perduodantis iš valdymo pulto priimtus signalus.

Taigi, pagal bendrus modeliavimo algoritmus, sumodeliuota skraidanti platforma ir paruošta skrydžio bei šaudymo bandymams.

4. ŠŪVIO ATATRANKOS ĮTAKOS SUKASPARNIO PADĖČIAI BEI ŠAUDYMO KOKYBĖS STATISTINIS ANALITINIS TYRIMAS

4.1. Šūvio atatranks įtakos sukasparnio padėčiai erdvėje skaičiuojamoji analizė

Kampinės padėties skaičiavimas ir vertinimas

Šaudant, ginklą veikia atatranks jėga, kuri per konstrukciją yra perduodama ir pačiam sukasparniui. Siekiant nustatyti šios jėgos poveikį sukasparniui, šiame poskyryje teoriškai skaičiuojama ginklo atatranks jėga bei jos poveikis sukasparnio padėčiai erdvėje.

Žinant viso sukasparnio inercijos momentą, masės centro padėtį bei pistoleto vamzdžio atstumą iki masės centro arba jėgos veikimo petį, galima nustatyti šūvio jėgos poveikį sukasparnio kampinei padėčiai. Norint nustatyti šūvio veikimo jėgą ir jos veikimo trukmę, pakanka žinoti kulkos masę, greitį vamzdžio gale, vamzdžio ilgį bei atatranks perdavimo dalį.

Pradžioje išvedama kinematinė kulkos judėjimo lygtis, kuri leis nustatyti jos judėjimo pagreitį. Siekiant supaprastinti skaičiavimą, kulkas pagreitis bus laikomas pastoviu ir kulkos judėjimas bus nagrinėjamas pasitelkiant taško kinematikos lygtis.

Kinematika – mechanikos dalis kurioje nagrinėjamos geometrinės kūnų judėjimo savybės, neatsižvelgiant į judančių kūnų inertiškumą ir juos veikiančias jėgas. Mechanikoje judėjimu laikomas kūnų padėties kitimas per tam tikrą laiką kitų kūnų atžvilgiu. Sprendžiant daugelį judėjimo uždavinių, dideli ir maži kūnai gali būti laikomi taškais ir jų judėjimą galima nagrinėti kaip taško judėjimą (Paliūnas 1997).

Kulkos judėjimui pasitelkiama tolygiai kintamo taško judėjimo lygtis. Tolygiai kintamu vadinamas toks taško judėjimas, kai jo tangentinio pagreičio a didumas visą laiką yra pastovus (Paliūnas 1997):

$$a = \frac{dv}{dt} = \text{const} \quad (4.1)$$

Suintegravus šią lygtį $v = \int a dt$ gaunama taško greičio lygtis:

$$v = at + C_1 \quad (4.2)$$

Čia C_1 yra konstanta, kur nutarus, kad pradinio laiko momentu taško greitis buvo lygus v_0 gaunama lygtis:

$$v = v_0 + at \quad (4.3)$$

Kadangi $v = \frac{ds}{dt}$, 4.3 formulę galima užrašyti:

$$ds = v dt = v_0 dt + at dt \quad (4.4)$$

Šią lygtį suintegravus $s = \int (v_0 + at) dt$ ir priėmus, kad pradinio momentu nueitas kelias buvo s_0 , gaunama nueito kelio priklausomybė nuo pagreičio:

$$s = \frac{at^2}{2} + v_0 t + s_0 \quad (4.5)$$

Iš 4.3 lygties išsireiškę laiką t , įrašę į 4.5 lygtį ir pertvarę gauname:

$$s = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} + s_0 \quad (4.6)$$

Pradinį nueitą atstumą s_0 ir pradinį greitį v_0 prilyginus 0, išsireiškus pagreitį ir nueito kelio simbolių, s , pakeitus vamzdžio ilgio simboliu, gaunama pagreičio išraiška, kuri priklauso nuo taško arba kulkos galutinio greičio ir ginklo vamzdžio ilgio.

$$a = \frac{v^2}{2l} \quad (4.7)$$

Čia l – ginklo vamzdžio ilgis.

Pritaikius II Niutono dėsnį $F = ma$, gaunama ginklų šūvio metu veikiančios jėgos išraiška:

$$F_s = m_k \frac{v^2}{2l} \quad (4.8)$$

Čia F_s – šūvio jėga, m_k – kulkos masė, v – kulkos greitis vamzdžio gale.

Kulka ir pistoletas po šūvio įgauna atitinkamą kinetinę energiją. Kulkos kinetinė energija apskaičiuojama pagal formulę

$$E_{kk} = \frac{mv_k^2}{2} \quad (4.9)$$

Čia E_{kk} – kulkos kinetinė energija.

Kadangi didžioji dalis energijos suteikiama kulakai, energiją suteiktą pistoletui apskaičiuojama pagal iš energijos tvermės dėsnio išvestą formulę:

$$E_{kp} = E_{kk} \cdot \frac{m_k}{m_p} \quad (4.10)$$

Čia E_{kp} – pistoleto kinetinė energija, m_p – pistoleto masė. Dalis energijos taip pat nueina ir šovinio tūtai spynos judėjimui bei šilumos išskyrimui. Kiekvienas ginklas atitinkamai turi savo perdavimo koeficientą k (Handgun... 2004). Jis nusako energijos dalį tenkančią pistoletui. Skaičiuojant šūvio poveikį kampinei sukasparnio padėčiai, aktuali yra ir šūvio trukmė, kurią galima išsireikšti iš 4.5 ir 4.7 lygčių. Čia analogiškai taško pradinis greitis nueitas prilyginamas nuliui, o nueito kelio simbolis pakeičiamas ginklo vamzdžio ilgiu:

$$t = \frac{2l}{v} \quad (4.11)$$

Realybėje suspaustos besiveržiančios dujos kurį laiką kulka veikia ir po to, kai ji išlekia iš vamzdžio, tada dujų slėgis pradeda staigiai mažėti. Tačiau skaičiavimams supaprastinti laikoma, kad jėga veikia tik iki kulkos išlėkimo iš vamzdžio. Skirtingų pistoletų tipų bei jų naudojamų šovinių duomenys būna nurodyti gamintojų.

6 lentelėje pateikti populiariausių pistoletų, naudojamų ginkluotųjų pajėgų, tarp jų ir Lietuvos, parametrai, kurie yra reikalingi skaičiavimams.

6 lentelė Skirtingų ginklų tipų pagrindiniai parametrai (*Ginkluotė ir karinė technika* 2009)

Ginklo tipas	Kalibras, mm	Kulkos masė, kg	Kulkos greitis vamzdžio gale, m/s	Ginklo masė, kg	Vamzdžio ilgis, m	k
„Colt 1911“	11,43	0,0186	246	1,247	0,127	0,175
„Glock 17“	9,0	0,008	360	0,902	0,114	0,15
„Browning“	9,0	0,008	350	0,95	0,118	0,16
„USP“	9,0	0,008	350	0,805	0,108	0,18
„Beretta 92“	9,0	0,008	375	1,1	0,125	0,19
PM	9,0	0,006	315	0,79	0,0935	0,21
„Desert Eagle“	11,1	0,015	435	1,7	0,21	0,134
„Bereta 92“ šratasvydis	Plastikiniai šratai 6 mm	0,0002	105	0,35	0,125	1

Lentelėje taip pat įrašytas ir „Desert Eagle“ pistoletas pasižymintis viena iš didžiausių atatrakos verčių lyginant su kitais pistoletais, ir „Beretta 92“ replika – šratasvydžio dujinis pistoletas naudojamas šiame baigiamajame darbe jį prikabinant prie sukasparnio.

Žinant atstumą nuo šūvio linijos iki masės centro, galima apskaičiuoti šūvio sukkelto momento vertę:

$$M_{\xi} = F_{\xi} r_{\xi} \quad (4.12)$$

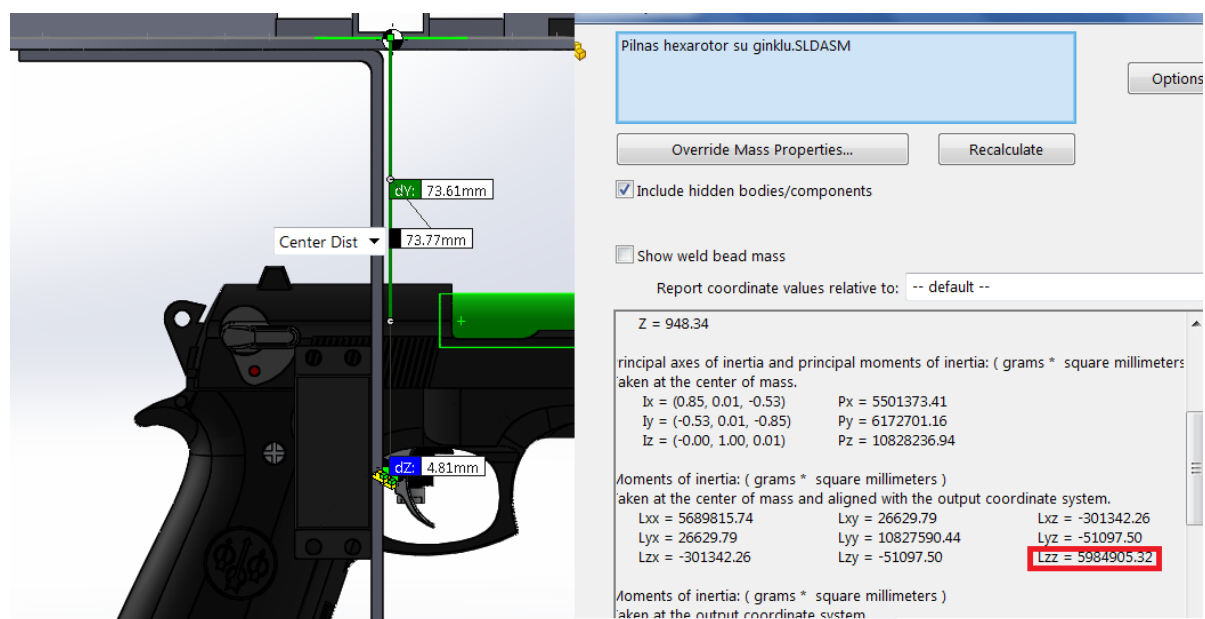
Kadangi ginklas yra prikabinamas žemiau masės centro, šūvio metu atsiranda destabilizuojantis momentas. Analogiškai antrąjį Niutono dėsnį galima užrašyti ir sukamajam judėjimui:

$$\varepsilon = \frac{M}{I} \quad (4.13)$$

Či ε – kampinis pagreitis, M – sukimo momentas atsiradęs veikiant šūvio atatrakai, I – inercijos momentas, kuris nusako kūno pasipriešinimą sukamajam judėjimui. Jis yra lygus visų kūno materialiuųjų taškų masių ir atstumų iki jų kvadratų sandaugų sumai:

$$I = \int m r^2 \quad (4.14)$$

Kompiuterinio modeliavimo programa „SolidWorks“ leidžia atskiriems elementams priskirti tam tikrą masę, nustatyti visos konstrukcijos masės centro padėtį, bei sudėtingų kūnų inercijos momentą (26 pav.).



26 pav. programos „SolidWorks“ darbinis langas

Priskyrus elementams atitinkamą realiai išmatuotą masę, naudojant funkciją „Mass properties“ nustatyta sukasparnio inercijos momento vertė apie z ašį, plokštumoje xy kurioje veikia šūvio atrankos jėga. Programa „SolidWorks“ nustatomas viso sukasparnio Inercijos momentas bei vamzdžio atstumas iki masės centro, tokiu būdu randamas petys, leidžiantis apskaičiuoti šūvio metu atsirandantį sukimo momentą bei kampinį sukasparniui suteikiamą pagreitį. Atlikus skaičiavimus pagal 4.8, 4.11 ir 4.12 formules, gautos ginklų veikiančių jėgų, momentų bei trukmės vertės. Jos pateiktos 7 lentelėje.

7 lentelė Ginklų veikiančios jėga ir jos trukmė šūvio metu

Ginklo tipas	Atatrakos jėga F_s , N	Jėgos veikimo trukmė t_s , s	Momentas N · m
„Colt 1911“	886	0,001032	64,9
„Glock 17“	682	0,000633	49,9
„Browning“	830	0,000674	60,9
„USP“	884	0,000617	64,85
„Beretta 92“	945	0,000667	69,26
PM	636	0,000593	46,67
„Desert Eagle“	1351	0,000965	99,07
„Bereta 92“ šratasvydis	8,82	0,0024	0,065

Kaip ir tikėtasi, matyti, jog didžiausią destabilizuojantį momentą lyginant tikrus ginklus suteikia pistoletas „Desert Eagle“ o mažiausią PM.

Dujinio šratasvydžio ginklo veikiančių jėgų vertės daug mažesnės lyginant su tikrais pistoletais.

Nagrinėjant sukasparnio konfigūraciją matyti, jog priešingą šūvio sukeltam momentui priešingą momentą sukurti gali tikrai priekiniai bei galiniai varikliai, kadangi šoninių variklių dedamoji plokštumoje xy lygi 0. Valdiklis reaguodamas į destabilizuojantį momentą, naudodamas variklių trauką bando atstatyti sukasparnį į vertikalią padėtį. Maksimalus priešingos krypties momentas bus gaunamas, kuomet galinių variklių trauka bus minimali, o priekinių maksimali. Atstumą iki variklio pažymėję r_v ir žinodami, jog jėgos sumažėjimą galima laikyti priešingos krypties jėga, gauname:

$$M_{pr} = 2Tr_v \cos(30^\circ) - (-2Tr_v \cos(30^\circ)) = 4Tr_v \cos(30^\circ) \quad (4.15)$$

Kadangi variklių trauka yra išvystoma ne iš karto, o palaipsniui, variklių trauka turi savo kitimo greitį, kurį galima pažymėti jėgos pagreičiu δ . Tada, priešinio momento priklausomybė nuo laiko bus:

$$M_{pr} = 3,46 r_v \delta t \quad (4.16)$$

Čia skaičius 3,46 yra skaičiaus $4 \cos(30^\circ)$ sandauga. Išraišką $3,46 r_v \delta$ galima pažymėti vienu simboliu ir pavadinti jį momento kitimo greičiu μ . Tada, žinant visos konstrukcijos inercijos momentą, šūvio bei priešinio momentų vertes galima užrašyti visos sistemos kampinio pagreičio apie ašį zz išraišką:

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{I_{zz}} (M_s - \mu t) \quad (4.17)$$

Suintegravę lygtį pagal laiką gaunama kampinio greičio priklausomybė nuo laiko:

$$\omega_{zz}(t) = \int \frac{1}{I_{zz}} (M_s - \mu t) dt = \frac{1}{I_{zz}} (M_s t - \frac{\mu t^2}{2}) \quad (4.18)$$

Kadangi svarbu žinoti pasikeitusią sukasparnio kampinę padėtį, dar kartą integravę lygtį pagal laiką gaunama kampo φ priklausomybė nuo laiko:

$$\varphi_{zz}(t) = \int \frac{1}{I_{zz}} \left(M_{\xi} t - \frac{\mu t^2}{2} \right) dt = \frac{1}{I_{zz}} \left(\frac{M_{\xi} t^2}{2} - \frac{\mu t^3}{6} \right) \quad (4.19)$$

Laiko intervale nuo šūvio pradžios iki pabaigos, kai $t \leq t_{\xi}$ veikia šūvio ir variklių sukelti momentai. Šūvio laikui pasibaigus, sukasparnio kampinė padėtis priklauso nuo jam suteikto kampinio greičio ir variklių priešingų momentų, todėl, kai $t_{\xi} < t \leq t_{Tv}$, čia t_{Tv} – variklio traukos vystymo laikas, iš kampinės padėties lygties išnyksta šūvio momento narys ir prisideda jam suteikto kampinio greičio narys. Varikliams baigus greitėti iki maksimalių sūkių, kampinės padėties lygtyje lieka tik naujas kampinio greičio narys ir priešingos krypties kampinio pagreičio narys. Sutvarkius, lygtį, gaunama išraiška:

$$\varphi_{xx}(t) = \begin{cases} \frac{1}{I_{xx}} \left(\frac{M_{\xi} t^2}{2} - \frac{\mu t^3}{6} \right), & t \leq t_{\xi} \\ \varphi_{\xi} + \omega_{\xi} t - \frac{\mu t^3}{6 I_{xx}}, & t_{\xi} < t \leq t_{Tv} \\ \varphi_{tv} + \omega_{tv} t - \frac{\varepsilon t^2}{2}, & t > t_{tv} \end{cases} \quad (4.20)$$

Čia φ_{ξ} – sukasparnio kampinis nuokrypis šūvio pabaigoje, ω_{ξ} – kampinis sukasparnio greitis pasibaigus šūviui, φ_{tv} – kampinė padėtis pasibaigus traukos vystymui, ω_{tv} – kampinis greitis traukos vystymo pabaigoje,

Iki pasibaigiant šūvio trukmei φ_{ξ} apskaičiuojamas pagal 4.19 formulę. ω_{ξ} atitinkamai apskaičiuojamas pagal 4.18 formulę. φ_{Tv} kampinė padėtis apskaičiuojama pagal 4.19 formulės antrąjį narį pridėjus kampinę padėtį šūvio pabaigoje bei iki to momento įgauto kampinio greičio bei laiko sandaugos narį. Pasibaigus šūviui, kadangi šūvio jėga jau nebeveikia, ω_{Tv} apskaičiuojamas pagal 4.18 formulės antrąjį narį pridėjus prieš tai įgautą kampinio greičio vertę. Gaunamos tokios minėtų narų išraiškos:

$$\varphi_{\xi} = \frac{1}{I_{zz}} \left(\frac{M_{\xi} t_{\xi}^2}{2} - \frac{\mu t_{\xi}^3}{6} \right) \quad (4.21)$$

$$\omega_{\xi} = \frac{1}{I_{zz}} (M_{\xi} t_{\xi} - \frac{\mu t_{\xi}^2}{2}) \quad (4.22)$$

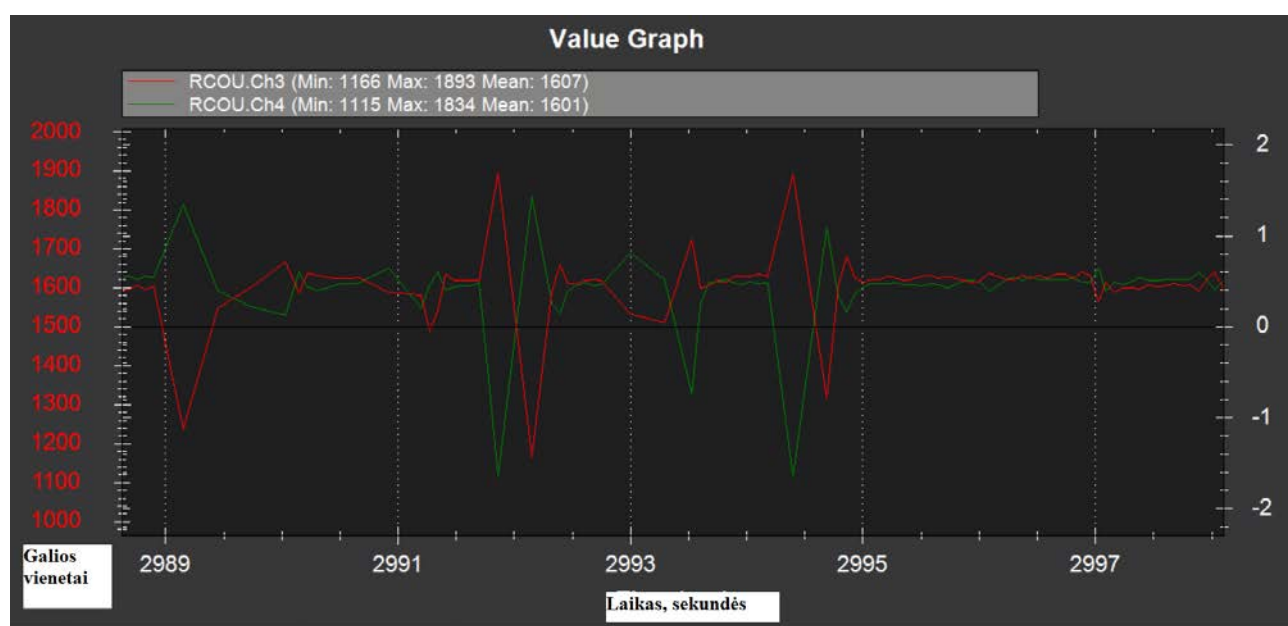
$$\varphi_{tv} = \varphi_{\xi} + \omega_{\xi} (t_v - t_{\xi}) - \frac{\mu (t_{Tv} - t_{\xi})^3}{6 I_{zz}} \quad (4.23)$$

$$\omega_{tv} = \omega_{\xi} - \frac{\mu(t_{Tv} - t_{\xi})^2}{2I_{zz}} \quad (4.24)$$

Atlikus skaičiuojamąsias simuliacijas paaiškėjo, jog sukasparniui net nespėjus išvystyti maksimalaus traukų skirtumo, jis spėja atgauti savo nulinio kampo padėtį. Tuomet 4.20 formulė suprastėja ir yra užrašoma:

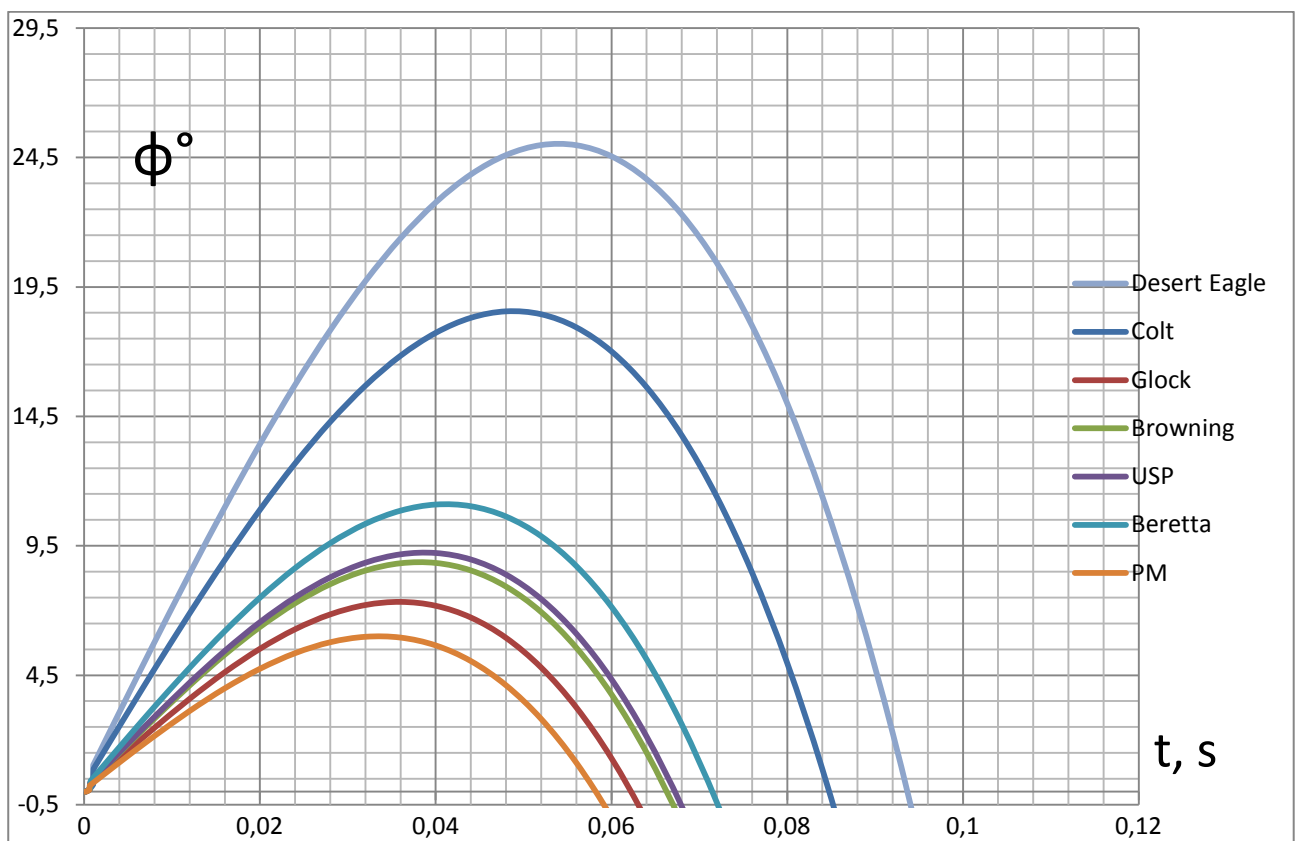
$$\varphi_{zz}(t) = \begin{cases} \frac{1}{I_{zz}} \left(\frac{M_{\xi} t^2}{2} - \frac{\mu t^3}{6} \right), t \leq t_{\xi} \\ \varphi_{\xi} + \omega_{\xi} t - \frac{\mu t^3}{6I_{zz}}, t_{\xi} < t \leq t_{tv} \end{cases} \quad (4.25)$$

Apytikslis variklių traukos kitimas parinktas išanalizavus sukasparnio autopiloto varikliams suteikiamos galios vertes bei jų vystymo laiką (27 pav.)



27 pav. Sukasparnio skrydžio duomenys, varikliams suteikiama galia keičiant kampinę padėtį (raudona linija – priekiniai varikliai, žalia linija – galiniai varikliai.)

Matyti, jog autopilotas vienų variklių galią mažina, o kitų didina. Atitinakamai maksimali ir minimali galių reikšmės pasiekiamos per maždaug 0,3 s. Kadangi laikoma, jog sukasparnis skrenda naudodamas 16 N vieno variklio trauką ir ją padidina iki 23 N traukos, šiuo atveju traukos vystymo pagreitis prilyginamas 30 N/s². Žinoma, ši vertė įsisukant gali būti didesnė, o artėjant prie maksimalių sūkių mažesnė, tačiau šiems skaičiavimams ji imama kaip vidutinė. Sukasparnio kampinė padėtis taip pat priklauso ir nuo autopiloto procesoriaus reakcijos laiko bei propelerių inercijos bei oro pasipriešinimo. Atliekant šiuos skaičiavimus, priimta, jog autopilotas pradeda reaguoti iš karto pradėjus veikti šūvio jėgai, o trauka vystoma pagal užduotą galios signalą. Atlikus skaičiavimus, gaunamas sukasparnio kampinės padėties kitimas apie masės centrą, veikiant šūvio jėgai ir po jos, iki sugrįžtant į nulinio kampo padėtį (28 pav.).

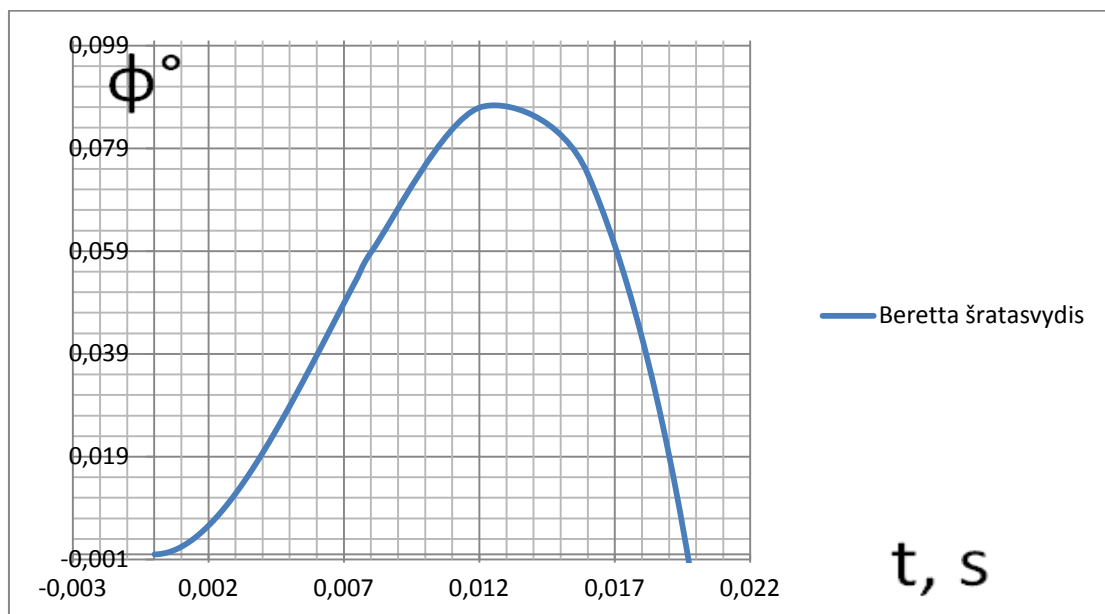


28 pav. Sukasparnio kampinės padėties kitimas aplink masės centrą, veikiant šūvio jėgai ir po jos, iki sugrįžtant į nulinio kampo padėtį

Grafiko kairiajame kampe, ties koordinatų sistemos pradžia, matyti, jog tai yra kampo kitimas veikiant šūviui. Šūvio trukmė labai trumpa, tačiau jis spėja suteikti pakankamą kampinį greitį, jog sukasparnis ir toliau veikiamas inercijos jėgų, judėtų tolyn nuo pusiausvyros padėties. Visą laiką, sukasparnio autopilotas, priklausomai nuo savo reakcijos laiko, stengiasi grąžinti sukasparnį į

pusiausvyros padėtį, varikliais vystydamas priešingą šūviui momentą. Variklių atstumas iki masės centro ir petys yra pakankamas, jog net nespėjus išvystyti maksimalaus momento, sukasparnio judėjimas nuo pusiausvyros padėties sustabdomas ir jis pradedamas grąžinti į pusiausvyros padėtį. Iš grafiko matyti, jog didžiausią energiją, lyginant su kitais, kulkai suteikiantis pistoletas „Desert Eagle“ sukasparniui suteikia didžiausią nuokrypį, net $24,5^\circ$, o mažiausią, kaip ir tikėtasi – pistoletas PM – $5,5^\circ$. Stabilumo atžvilgiu PM – pats palankiausias pistoletas kabinti po sukasparniu.

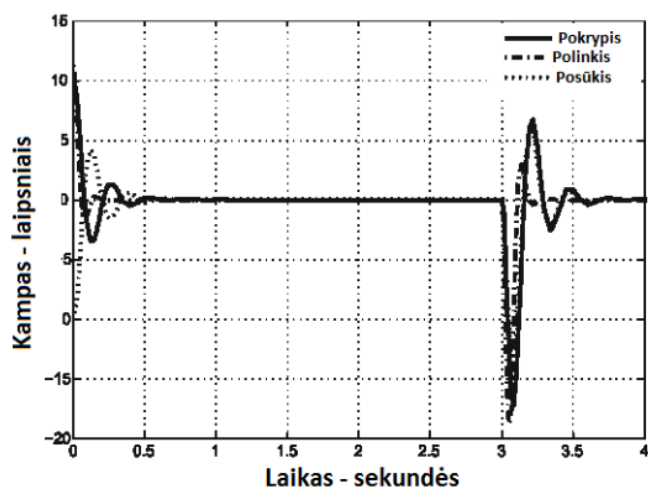
Dujinio šautuvo nukrypimo kampas toks mažas, kad jį galima pavaizduoti atskirame grafike (29 pav.).



29 pav. Sukasparnio kampinės padėties kitimas veikiant dujiniam Beretta šratasvydžio pistoletui.

Matyti, jog veikiant itin mažai šio pistoleto šūvio jėgai, nuokrypis būna itin mažas, nesiekiantis net dešimtadalio laipsnio.

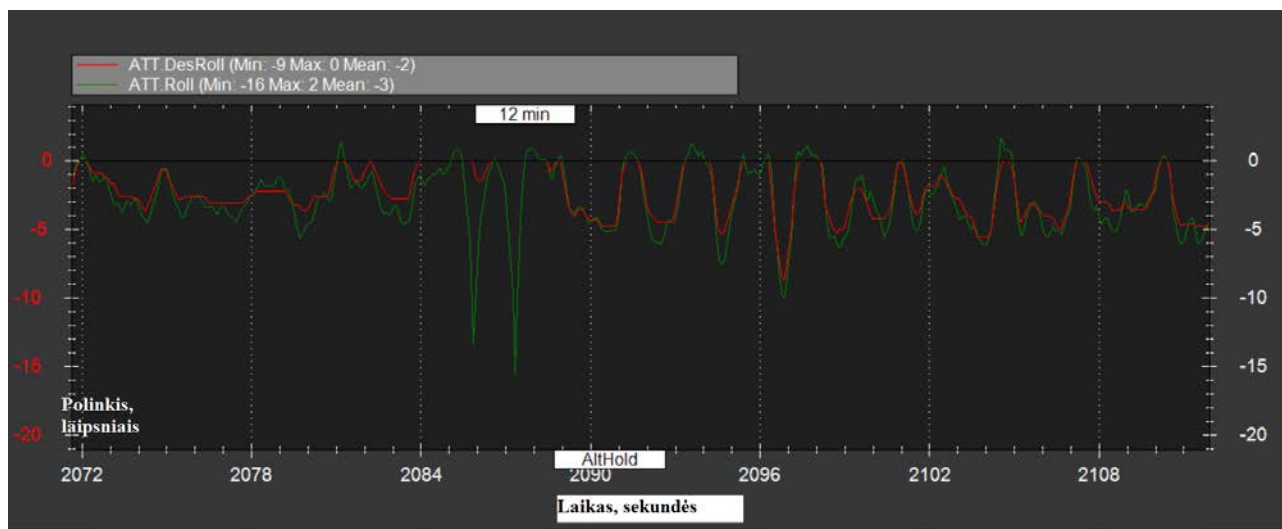
Lyginant su kituose moksliniuose straipsniuose praktiškai išmatuotais kampų nuokrypiais, pastebima, jog net veikiant skaičiuojamiems vėjo gūsiams, sukasparnis gali būti išvedamas iš pusiausvyros iki 20° (30 pav.).



30 pav. Suktasparnio nuokrypiai veikiant išoriniams veiksniams (Sámano *et al.* 2013)

Šiame paveiksle matematiškai simuliuojama vėjo įtaka suktasparnio kampinėms padėtimis ir jo gebėjimui atgauti pusiausvyrą.

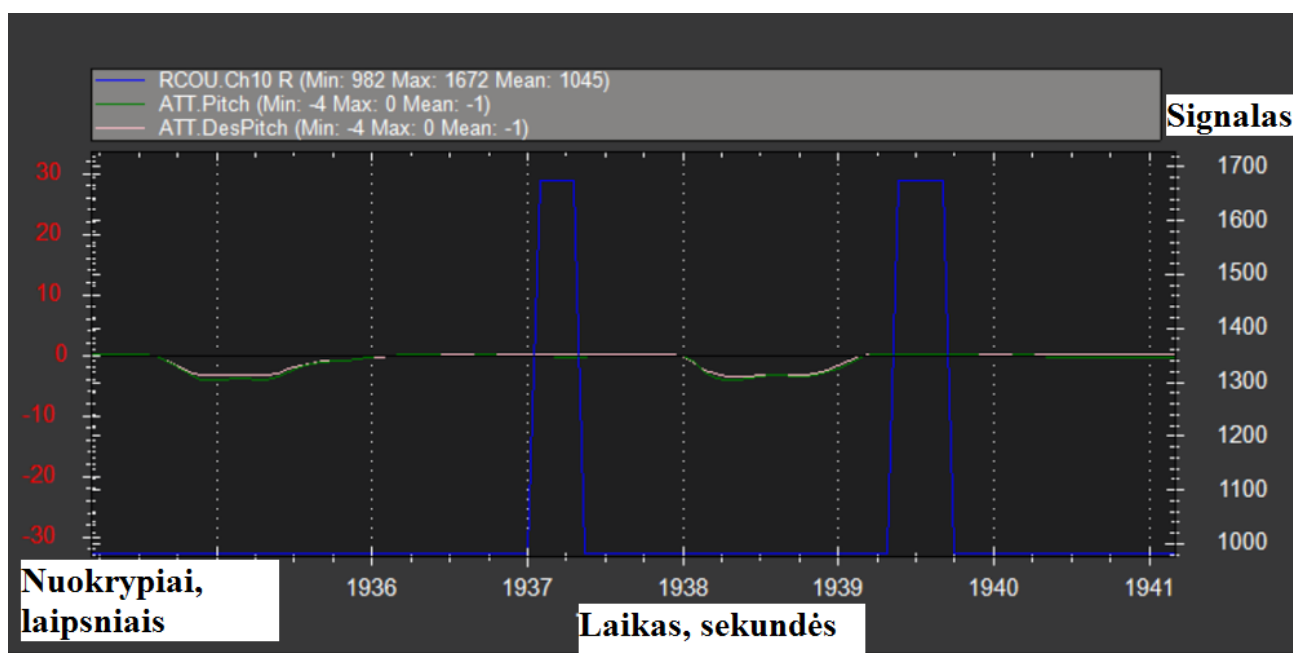
Norint palyginti nuokrypių vertes galima išanalizuoti šio baigiamojo darbo suktasparnio skrydžio metu srinktų duomenis. 31 paveiksle pavaizduoti suktasparnio „Meganeuropsis” skrydžio kampų duomenys.



31 pav. Tiriamojo suktasparnio polinkio skrydžio duomenys

Raudona linija rodo užduotą kampinę padėtį, o žalia išmatuotą. Matyti, jog net ir kybant vietoje suktasparnis patirdavo iki 17° polinkio nuokrypius.

Taip pat išanalizuoti duomenys nuleistuko paspaudimo metu (32 pav.)



32 pav. Tiriamojo sukasparnio polinkis spaudžiant ginklo nuleistuką

Signalai pavaizduoti mėlyna linija, esama padėtis – žalia linija, o balta – užduota padėtis. Matyti, jog nuleistuko paspaudimo metu, kampinės padėties kitimas nėra išmatuotas. Matomi tik padėties kitimai pagal užduotus signalus, kurie nesusiję su pistoleto veikimu. Dujinio ginklo atatranka tokia maža, jog ji nėra fiksuojama sukasparnio padėties jutikliais.

Pagal gautus rezultatus, matyti, jog tik veikiant itin didelę atatranką turintiems pistoletams, sukasparnis nukrypsta šiek tiek daugiau negu veikiant vėjo gūsiams. Veikiant silpnesniems ginklams, atatranka yra patenkinamo dydžio. Didžiausia įtaka, būtų daroma vaizdo stabilumui, bei pataikymo kokybei. Siekiant sumažinti atatrankos poveikį, galima mažinti ginklo atstumą iki masės centro, arba pritaikyti atatrankos sugerties metodikas, ties tvirtinimo mazgu prikabinant spyruokles, arba dujų amortizatorių arba mažinti paties ginklo atatranką, tobulinant patį ginklą.

Aukščio nuokrypio skaičiavimas

Sukasparniui kryptant nuo vertikalios ašies, vertikali jo traukos dedamoji mažėja. Dėl to sukasparnis gali prarasti aukščio.

Antrasis Niutono dėsnis sukasparnio vertikaliai padėčiai gali būti užrašomas:

$$a_v = \frac{1}{m_{sk}} (T \cos(\varphi) + \delta t \cos(\varphi) - m_{sk} g) \quad (4.26)$$

Čia m_{sk} – sukasparnio masė, T – trauka sukasparniui esant pusiausvyroje, δ – traukos vystymo pagreitis, φ – sukasparnio kampinis nuokrypis. Kadangi, trauka pusiausvyroje yra lygi sukasparnio sunkio jėgai, tai formulę galima perrašyti:

$$a_v = \frac{1}{m_{sk}} (m_{sk} g \cos(\varphi) + \delta t \cos(\varphi) - m_{sk} g) \quad (4.27)$$

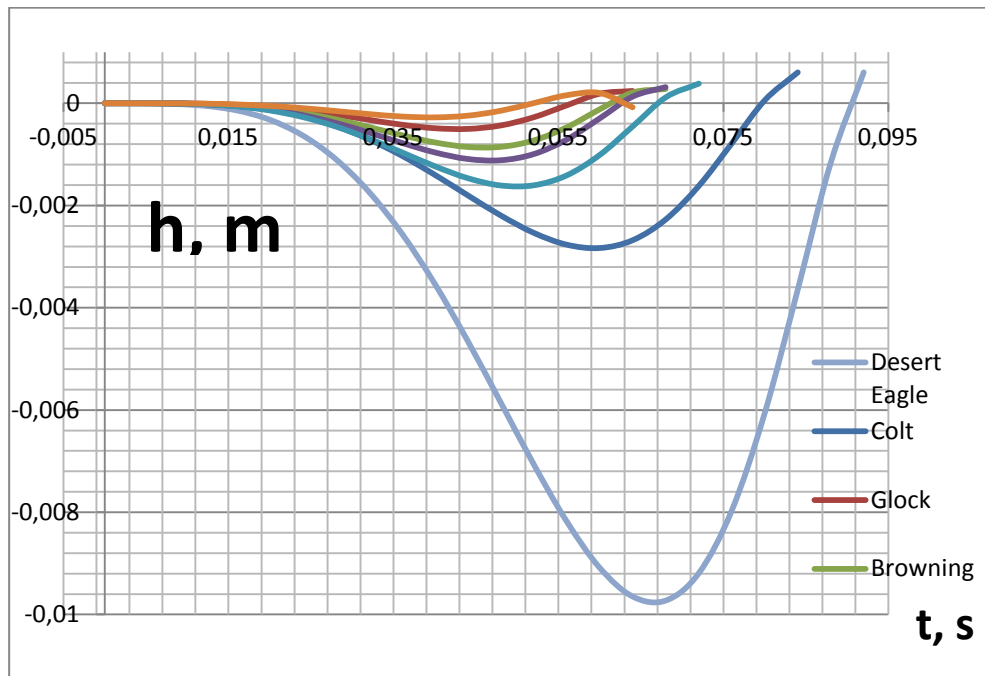
Suprastinus ir pertvarkius, gauname:

$$a_v = g(\cos(\varphi) - 1) + \frac{\delta t \cos(\varphi)}{m_{sk}} \quad (4.28)$$

Išraišką du kartus integravus lygtį pagal laiką gaunama lygtis:

$$h_v = \iint \left(g(\cos(\varphi) - 1) + \frac{\delta t \cos(\varphi)}{m_{sk}} \right) dt dt = \frac{gt^2}{2} (\cos(\varphi) - 1) + \frac{\delta t^3}{6m_{sk}} \cos(\varphi) \quad (4.29)$$

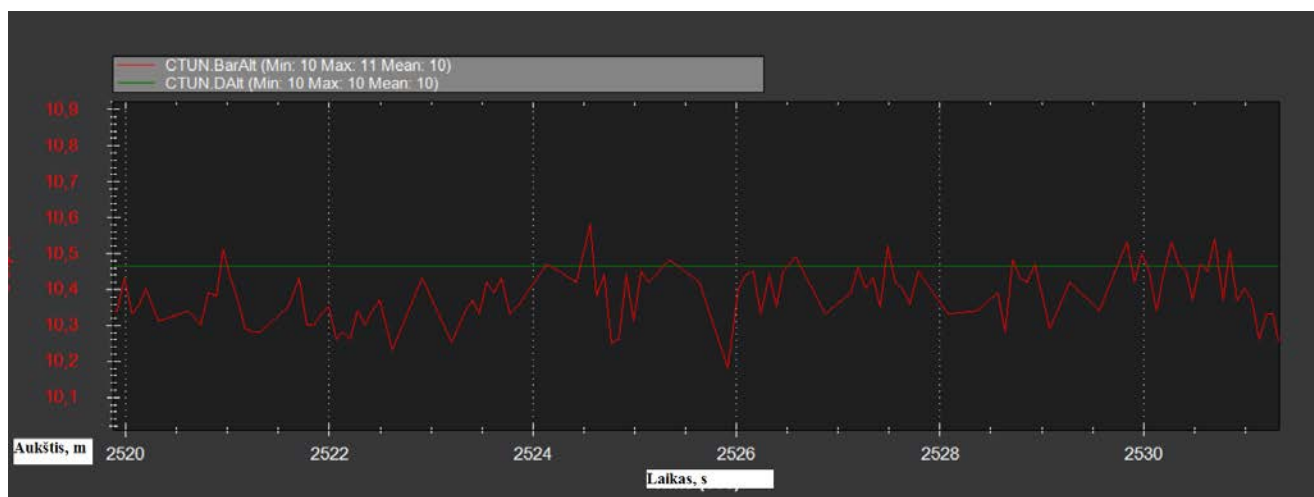
Nuokrypiai skaičiuojami intervale, kai $\varphi \neq 0$, t. y. kada sukasparnis dar yra nukrypęs nuo vertikalės. Į lygtis įstačius reikiamus dydžius ir atlikus skaičiavimus, gauname sukasparnio nuokrypio diagramą veikiant skirtingų pistolečių šūvio jėgoms (33 pav.)



33 pav. Sukasparnio aukščio nuokrypis veikiant skirtingų pistolečių šūvio jėgoms

Žinoma, jog nuokrypio reikšmei φ pasiekus 0, jėga turėtų veikti vertikaliai aukštyn, tačiau atlikus skaičiavimus matyti, jog šūvio trukmė tokia trumpa, sukasparnis spėja atgauti aukštį, kuriame buvo. Matyti, jog dėl trumpos šūvio trukmės, sukasparnis spėja prarasti ne daugiau negu 1 cm aukščio.

34 paveiksle pavaizduotas tiriamojo sukasparnio skrydžio duomenų fragmentas susijęs su aukščio išlaikymu.



34 pav. Tiriamojo sukasparnio aukščio kitimas

Žalia linija rodo – nustatytą aukštį o raudona – išmatuotą. Matyti, jog sukasparnis svyruoja aplink nustatytą aukštį daugiau negu 30 cm diapazone, todėl šūvio atatrunkos sukeltas aukščio praradimas greičiausiai nebūtų užfiksuotas.

4.2. Eksperimentinė šūvių taiklumo statistinė analizė

Šio baigiamojo darbo pagrindinis tikslas – sukonstruoti daugiasraigį sukasparnį, gebantį šaudyti ir įvertinti jo šaudymo kokybę. Šis parametras geriausiai atspindi šaudančio skraidančio aparato naudingumą. Šiame skyriuje aprašomas šaudymo eksperimentas su skrendančiu sukasparniu, skaičiuojamos šaudymo paklaidos, bei aptariami gauti rezultatai.

Siekiant nustatyti ginklo taiklumą, atlikti šaudymo bandymai (35 pav.) Bandymai atliekami stacionariai ir skrendant, esant skirtingiems atstumams, atitinkamai: 5, 10, 15, 20, 25 ir 30 m.



35 pav. Šaudymo bandymas skrendant

Kiekvienu atstumu buvo atliekama 20 -25 šūviai. Taikantis į taikinį, buvo žiūrima į ekrane esantį vaizdą (36 pav.), kuris buvo perduodamas iš ant ginklo sumontuotos kameros.



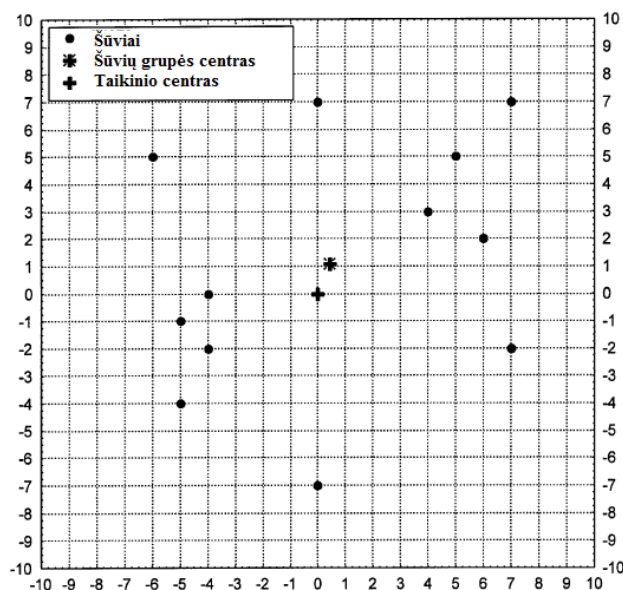
36 pav. Vaizdas matomas ekrane

Taikiniui parinktas milimetrinis didelio formato (A2, A1) popierius. Gauti rezultatai taikiniuose buvo išsaugomi ir apdorojami.

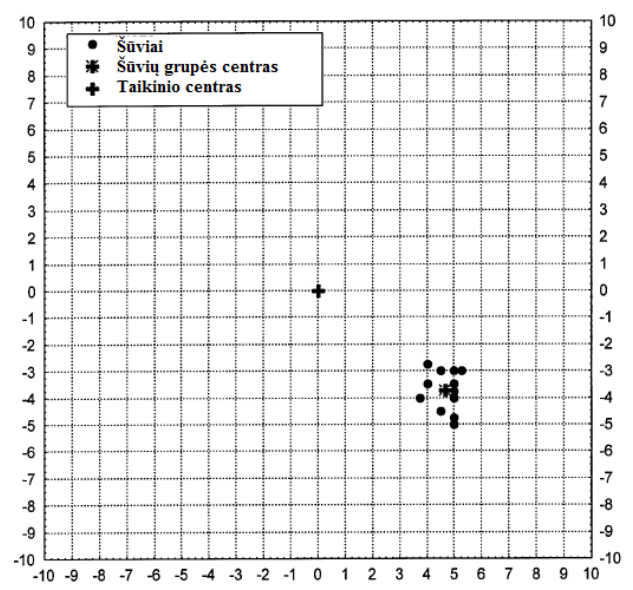
Taiklumo parametrus nustatyti pasirinkta statistinė šaudymo taiklumo analizė, plačiai taikoma JAV kariuomenėje vertinant tiek karių šaudymo įgūdžius, tiek pačių ginklų taiklumo charakteristikas. JAV karių šaudymo statistiniai tyrimai ir analizė aprašyta Richard F. Johnson veikale „Statistical measures of marksmanship“. Autorius išskiria šias pagrindines šūvių grupės charakteristikas:

- ❖ Taiklumas
- ❖ Glaustumas

Taiklumas charakterizuoja, koku atstumu yra vidutinis šūvių grupės centras nuo taikinio centro. Jis gali būti arti taikinio centro, tačiau šūviai plačiai išsibarstę (37 pav. a)



a)



b)

37 pav. Taiklumo ir glaustumo pavyzdžiai (Johnson 2001)

Matyti, jog grupės centras yra arti taikymosi centro, tačiau šūvių grupė yra mažai glausta.

Autorius išskiria, kitą pavyzdį, kuomet šūvių grupė yra glausta, tačiau koncentruota toliau nuo taikymosi centro (37 pav. b). Šį kartą šūviai yra labai arti vienas kito, tačiau šūvių grupė nutolusi žymiai labiau nuo taikymosi centro nei 31 paveikslo a dalyje pateiktame pavyzdyje.

Pagrindiniai skaičiuojami šūvių grupės parametrai yra:

- ✓ Šūvių grupės centro nuotolis nuo taikymosi centro.
- ✓ Vidutinė kvadratinė šūvio paklaida, matuojant nuo taikinio centro.
- ✓ Šūvių išsibarstymo spindulys arba standartinis nuokrypis nuo šūvių grupės centro.
- ✓ Horizontalus standartinis nuokrypis
- ✓ Vertikalus standartinis nuokrypis

Taikinio centras laikomas koordinačių atskaitos sistema. Jo koordinatės yra:

$$TC = (x, y) = (0, 0) \quad (4.30)$$

Atlikus šūvio bandymus matuojamos kiekvieno šūvio koordinatės nuo taikinio centro. Apskaičiavus koordinačių vidurkį gaunamos šūvių grupės centro koordinatės:

$$CSG = \left(\frac{\sum x_i}{n} \right), \left(\frac{\sum y_i}{n} \right) = (\bar{x}, \bar{y}) \quad (4.31)$$

Čia – n šūvių skaičius, x_i ir y_i – atskirų šūvių koordinatės.

Žinant šūvių grupės centro koordinates, galima apskaičiuoti šūvių grupės centro nuotolį nuo taikinio centro. Šis parametras parodo, koku atstumu nukrypsta šūvių grupė nuo centro, į kurį norima pataikyti ir gali būti lyginamas su sistetine paklaida. Šis atstumas apskaičiuojamas pagal nesudėtingą formulę, išvestą iš Pitagoro teoremos:

$$DCM_{SG} = \sqrt{(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2} \quad (4.32)$$

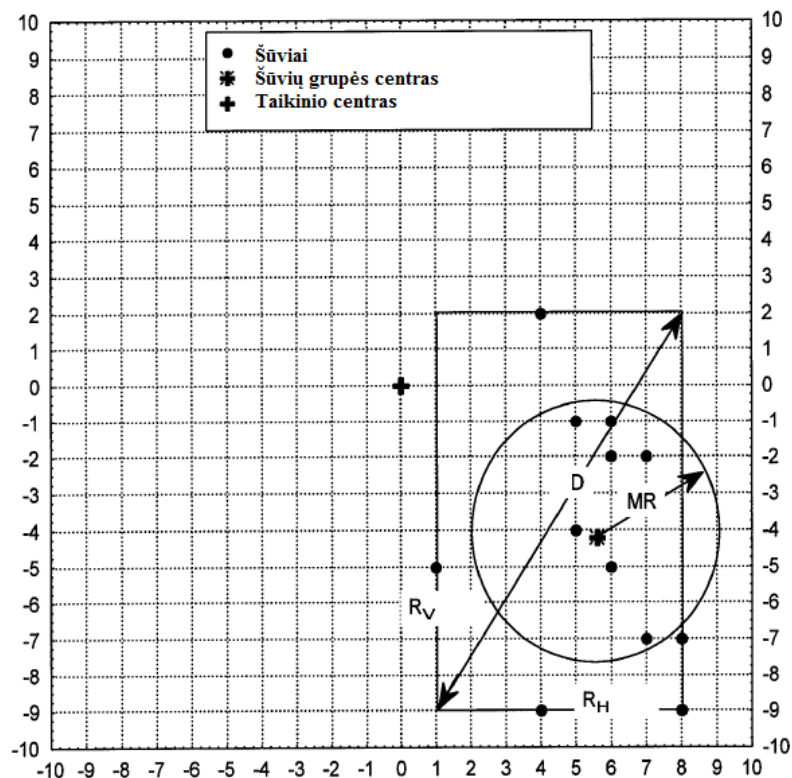
Matuojant paklaidas dažnai nutinka, jog šūvių grupės atstumas nuo taikinio centro būna mažas, tačiau individuali kiekvieno šūvio paklaida būna didelė. Šį pasiskirstymą geriausiai apibūdina vidutinė kvadratinė šūvių paklaida, kuri apskaičiuojama pagal formulę:

$$DCM_S = \frac{\sum \sqrt{(x_i)^2 + (y_i)^2}}{n} \quad (4.33)$$

Ji apibūdina vidutinį kiekvieno šūvio vidutinį nuotolį nuo taikinio centro. Už šūvių grupės centro nuotolį nuo taikinio centro šis parametras pranašesnis tuo, jog gali tiksliau nustatyti, ar šaulys šaudė arti centro ar ne. Šie du su atstumu nuo taikinio centro susiję parametrai priskiriami šaudymo tikslumo parametrais.

Kiti du parametrai vadinami šaudymo preciziškumo arba glaustumo parametrais ir nusako šūvių išsibarstymą arba suspaustumą. Šie parametrai yra glaustai susiję su atskirai horizontaliais ir vertikaliais koordinatinių komponentais.

Šūvių spindulys (38 pav.) arba standartinis nuokrypis yra matuojamas nuo šūvių grupės centro ir nusako kiek vidutiniškai nutolęs kiekvienas šūvis ne nuo taikinio centro o nuo šūvių grupės centro.



38 pav. Šaudymo paklaidų parametrai (Johnson 2001)

MR – šaudymo sklaidos spindulys, D – sklaidos ploto skersmuo, R_V – maksimalus vertikalus atstumas tarp šūvių, R_H – maksimalus horizontalus atstumas tarp šūvių.

Šis spindulys apskaičiuojamas pagal formulę:

$$MR = \frac{\sum \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2}}{n} \quad (4.33)$$

Siekiant išvengti pavienių šūvių rezultatų įtakos, standartinius nuokrypius galima apibūdinti ir detaliau. Tam naudojamai horizontalus ir vertikalus šūvių grupės standartinis nuokrypis. Jie skaičiuojami pagal formules:

$$S_H = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (4.34)$$

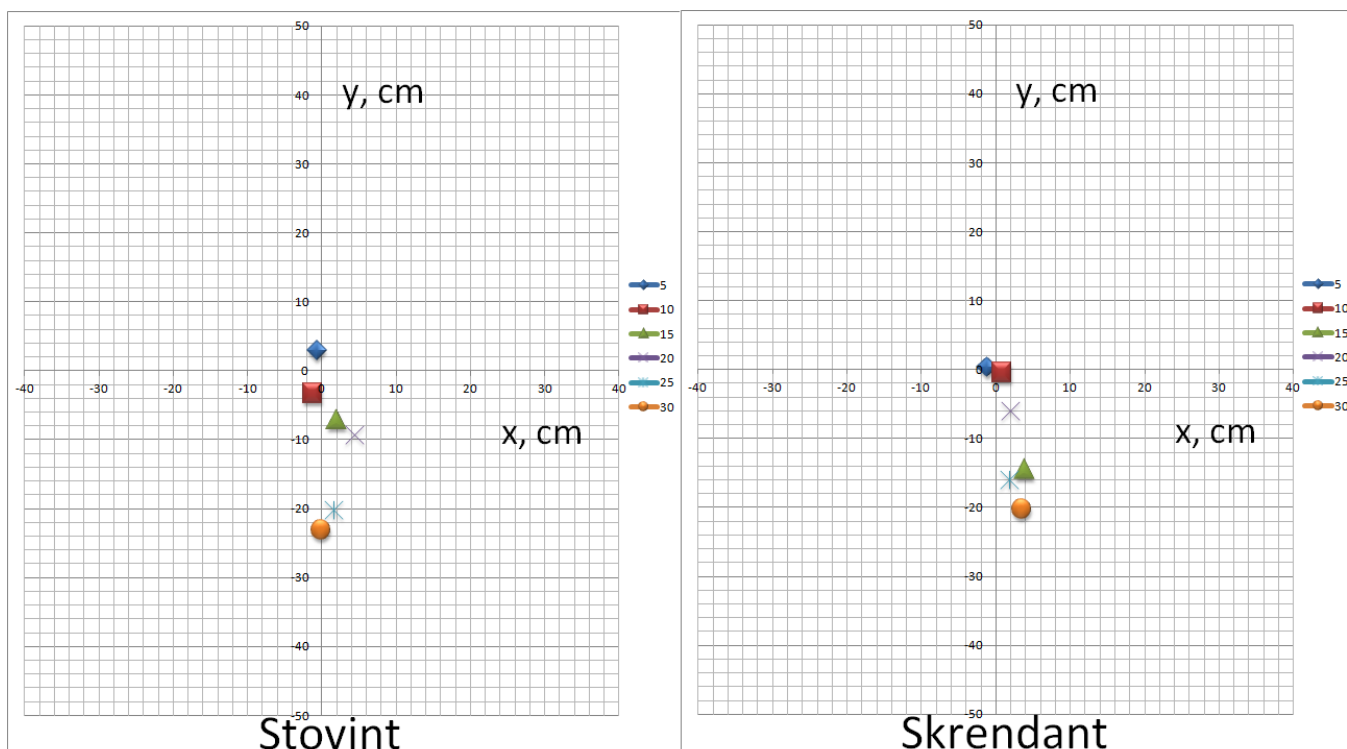
$$S_V = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}} \quad (4.35)$$

Kitas svarbus parametras yra šūvių išsibarstymo plotas, kuris apskaičiuojamas padauginus horizontalų ir vertikalų atstumus tarp tolimiausių šūvių:

$$SD = (R_h)(R_v) \quad (4.36)$$

Naudojant šūvių bandymų rezultatus surinktus nuo milimetrinio popieriaus gauti statistiniai rezultatai pavaizduoti toliau pateiktuose grafikuose.

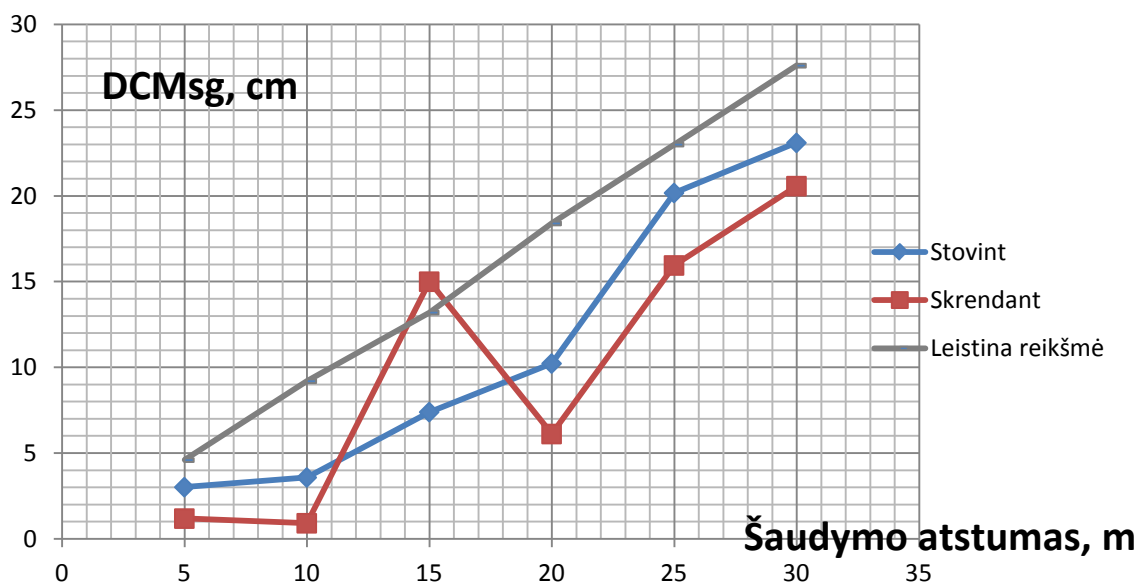
39 paveiksle pavaizduotos šūvių centrų koordinatės didėjant atstumui.



39 pav. Šūvių grupės atstumas nuo taikymosi centro didėjant atstumui

Matyti, jog didėjant atstumui šaudant iš stacionarios padėties, šūvių grupės centras leidžiasi žemyn. Taip yra dėl mažos dujinio šratasvydžio šovinio energijos. Didėjant atstumui, jo vertikalus nuokrypis arba, vadinamoji sisteminė paklaida vis didėja. Skrendant pastebima, jog mažais atstumais centro žemėjimas nėra tolygus, kadangi 15 m atstumu šūvių centras gavosi žemiau negu šaudant iš 20 m atstumo. Šis pokytis galimai atsiranda dėl sukasparnio negebėjimo tiksliai išlaikyti aukštį. Tačiau šaudant iš dar toliau centro padėtis visgi dar labiau nužemėja. Apžvelgus rezultatus matyt, jog bendru atveju tolstant nuo taikinio šūvių grupės centras po truputį žemėja. Šią sisteminę paklaidą galima lengvai koreguoti, žinant jos vertę. Šiuo atveju tolstant nuo taikinio paprasčiausiai galima tolstant kas 10 m taikytis vidutiniškai 10' aukščiau negu norima pataikyti.

Žinant šūvių grupės centro koordinatas galima nubraižyti ir atstumo nuo taikinio centro grafiką (40 pav.)



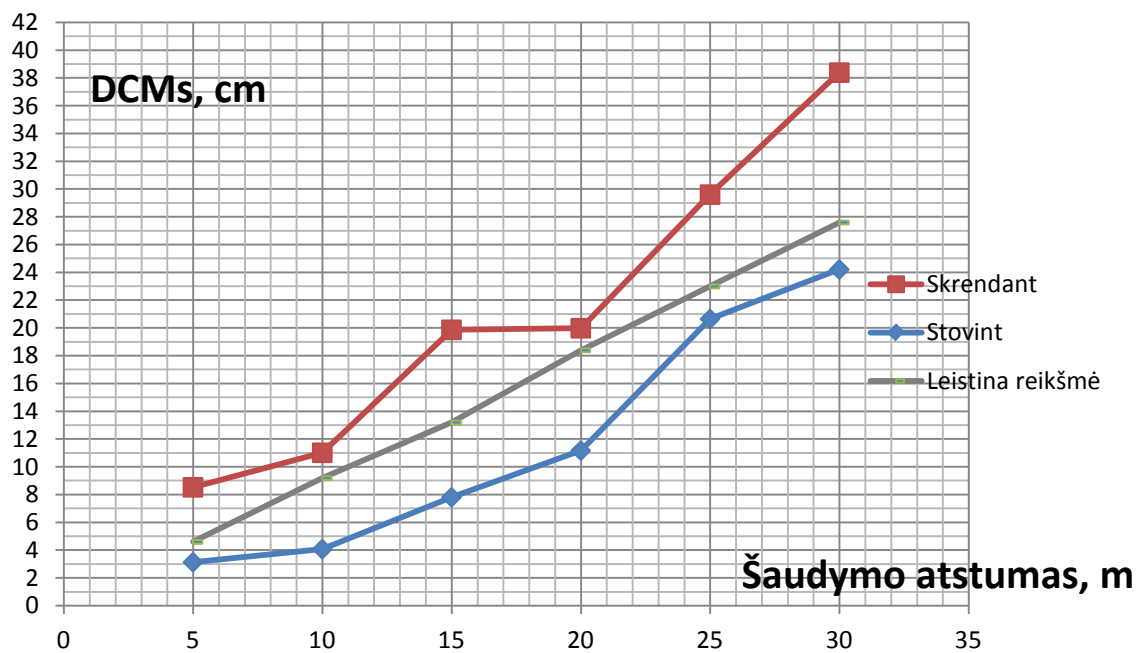
40 pav. Šūvių grupės atstumas nuo taikinio centro, DCMsg

Aišku, jog šaudant stacionariai šūvių grupės atstumas tolygiai didėja, o skrendant dėl sukasparnio svyravimų, šis atstumas kinta netolygiai. Kadangi sukasparnis išlaiko horizontalią padėtį naudodamas GPS signalus, dėl paklaidų, jis šiek tiek svyruoja horizontalioje plokštumoje.

Clemente-suarez & Robles-pérez 2015 straipsnyje aprašomas tyrimas, kuriame tiriamas karių taiklumas veikiant kofeinui, pateikiami pistoleto šaudymo taiklumo reikalavimai. Minimalūs reikalavimai laikomi tenkinamais, kuomet šaudant 5 m atstumu, paklaida neviršija 4,6 cm vertės. Atitinkamai didėjant atstumui pagal šį santykį didėja ir leistina maksimali paklaida: 10 m – 9,2 cm, 15 m – 13,8 cm ir t.t.

Žiūrint į sisteminę šaudymo paklaidą, daroma išvada, jog stovint šaudymo taiklumo reikalavimas išlaikomas, o skrydžio metu šaudant iš 15 metrų, jis viršija normą vos 2 cm, tačiau didesniais atstumais taiklumo reikalavimai vėl tenkinami. Apytiksliai vertinant, matyti, jog sukasparnis skrisdamas daugmaž pataiko į taikinį tačiau kaip ir minėta anksčiau, šis parametras nėra tiksliausiai apibūdinantis šaudymo taiklumą. Taiklumą geriau įvertina vidutinė kvadratinė paklaida, kadangi skaičiuojant atsižvelgiam į kiekvieną atskirą šūvį.

41 paveiksle vaizduojamas vidutinės kvadratinės paklaidos grafikas esant skirtingiems šaudymo atstumams.

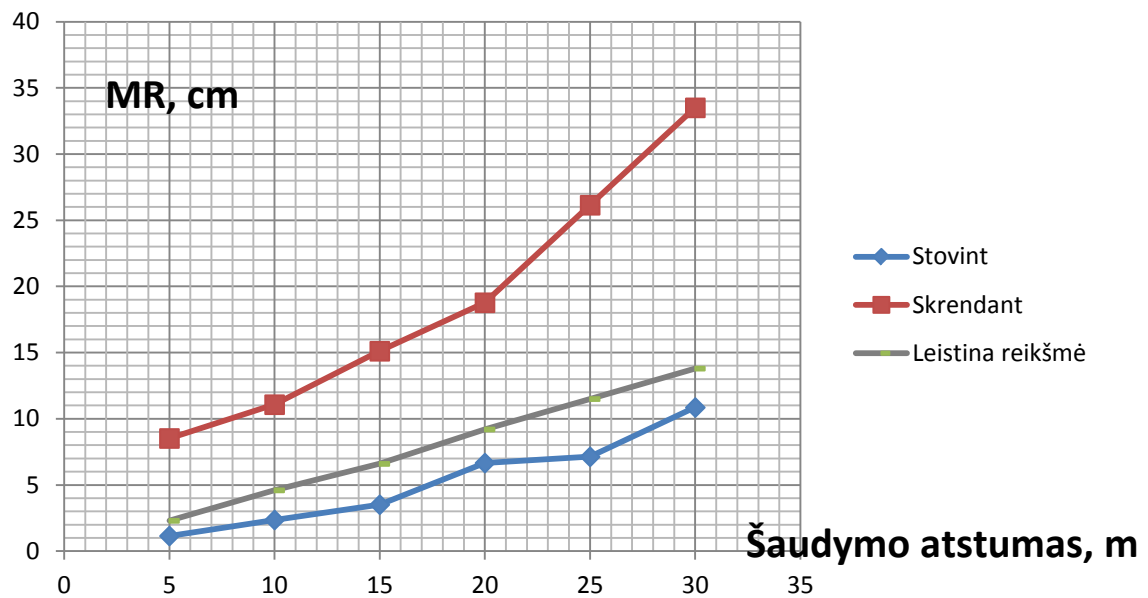


41 pav. Vidutinė šūvių kvadratinė paklaida matuojant nuo taikinio centro DCMs

Paklaida šaudant stacionariai bei šaudant didėjant atstumui taip pat tolygiai didėja, tačiau skrendant ši paklaida yra didesnė. Matyti, jog šaudant iš stacionarios padėties, ši paklaida neviršija maksimalių reikšmių, tačiau skrendant paklaidos viršija maksimalią reikmę labai nedaug (nuo 3 iki 10 cm).

Išsiaiškinta, jog taiklumo reikalavimas šaudant stacionariai yra tenkinamas skaičiuojant tiek grupės centro atstumą, tiek vidutinę kvadratinę paklaidas, o šaudant skrydžio metu, paklaidos neviršijamos tik skaičiuojant šūvių grupės atstumo paklaidą.

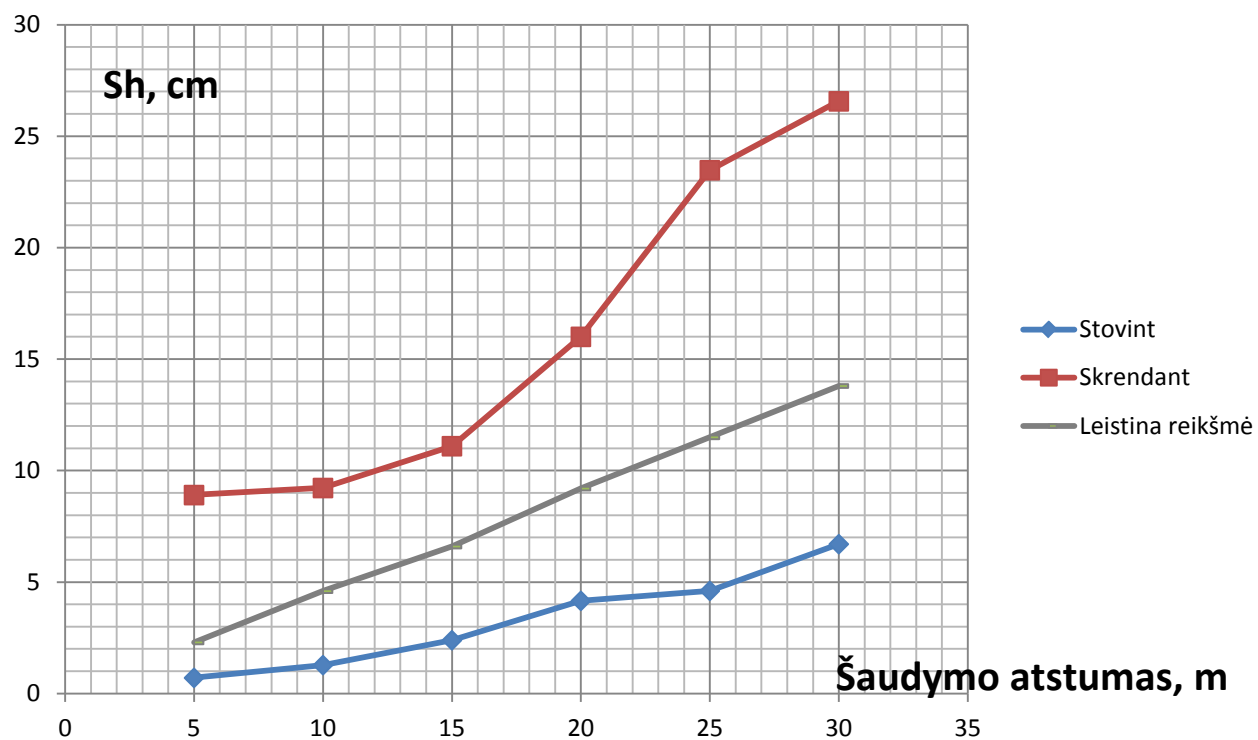
Toliau pateikiami šaudymo glaustumo rezultatai. Šūvių grupės vidutinio spindulio grafikas pavaizduotas 42 paveiksle.



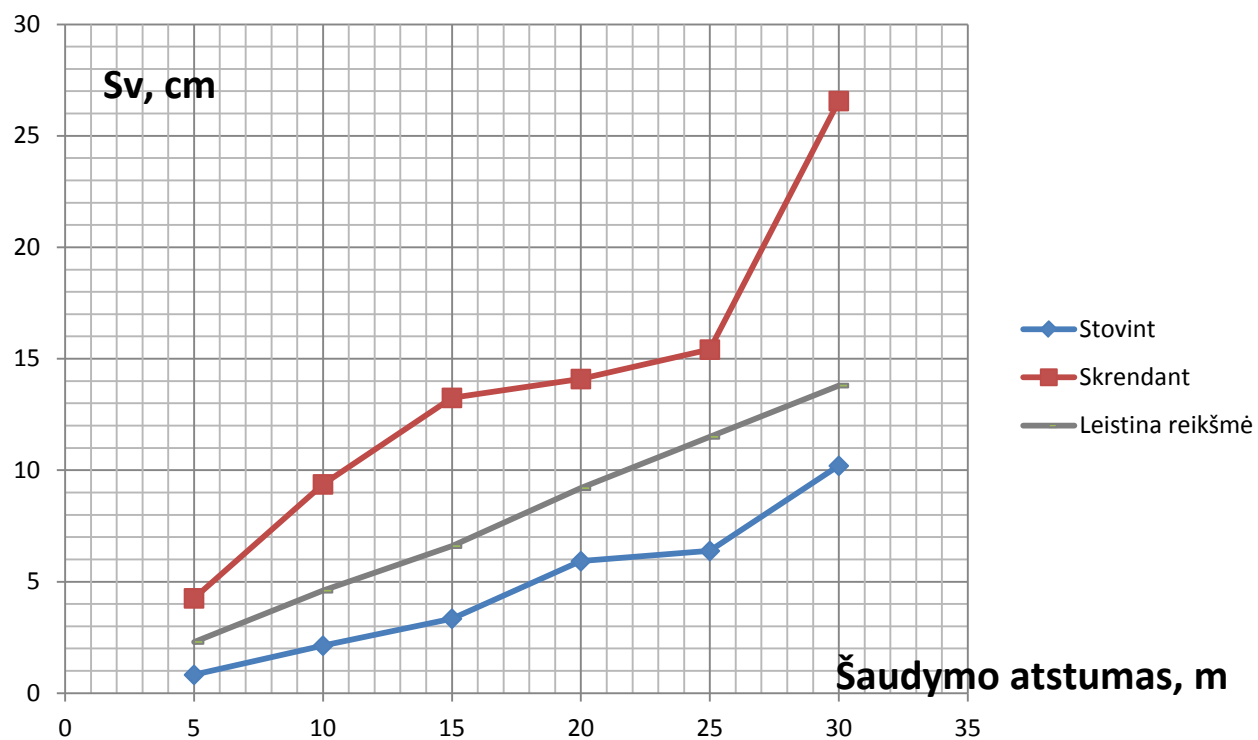
42 pav. Šūvių grupės vidutinis spindulys arba standartinis nuokrypis, MR

Šaudymo rezultatai laikomi tenkinančiais glaustumo reikalavimus, jeigu šūvių grupė sutelpta į 2,3 cm spindulio apskirtimą šaudant 5 m atstumu nuo taikinio bei pagal tą pačią proporciją tolstant nuo jo. Spindulys matuojamas nuo šūvių grupės centro. Iš grafiko matyti, jog šaudant stacionariai standartinis nuokrypis atitinka reikalavimus, tačiau šaudymo skrendant rezultatai viršija leistas ribas nuo 6 iki 19 cm.

43 ir 44 paveiksluose patikti standartiniai vertikalūs ir horizontalūs nuokrypiai. Jie kaip ir standartinis nuokrypis nurodo grupės glaustumą, tačiau ne bendrą o atskirai horizontalų ir vertikalų.



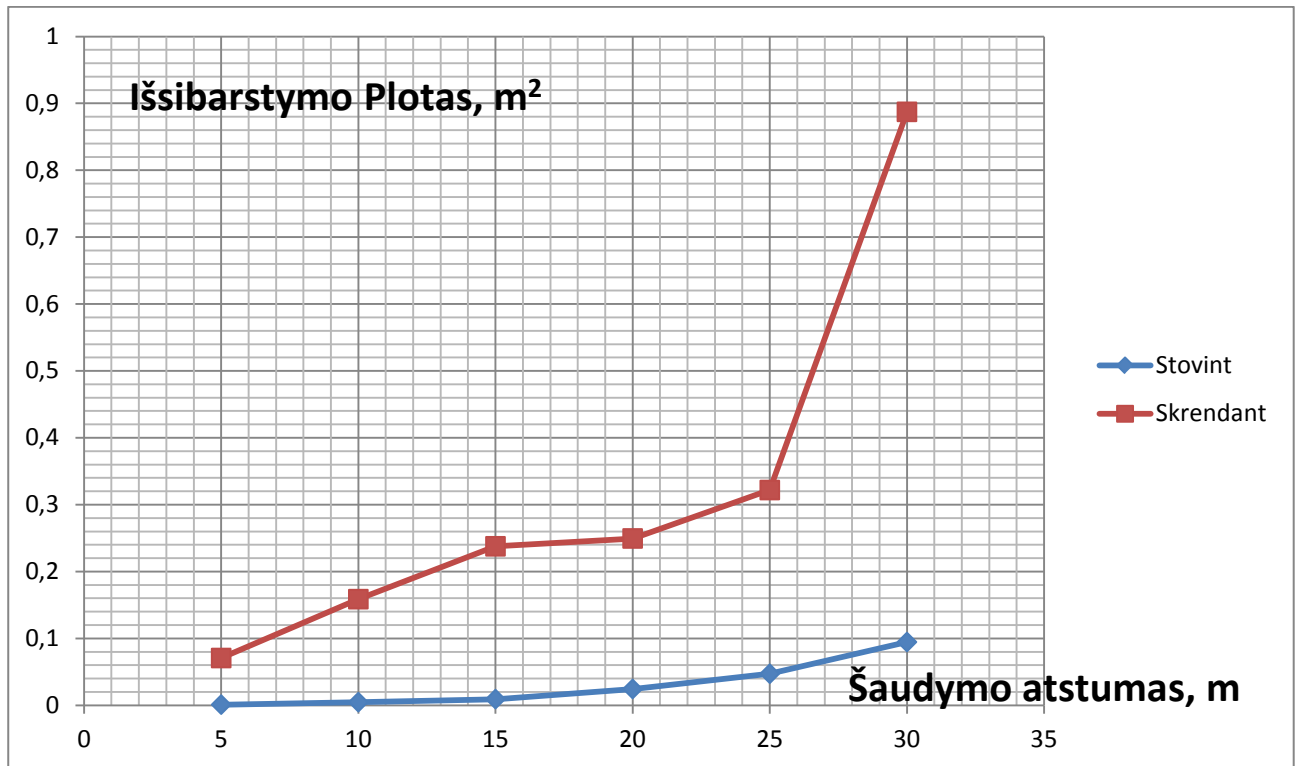
43 pav. Standartinis horizontalus nuokrypis nuo šūvių centro S_H



44 pav. Standartinis vertikalus nuokrypis nuo šūvių grupės centro, S_V

Iš grafikų matyti, jog ir vėl stacionariai šaudant šūvių grupės nuokrypiai neviršija ribos tiek matuojant vertikalia trajektorija, tiek horizontalia. Šaudant skrydžio režimu, nuokrypiai viršija nustatytas glaustumo ribas nuo 2 iki 12 cm.

45 paveiksle pavaizduotas šūvių išsibarstymo ploto grafikas.



45 pav. Šūvių grupės išsibarstymo plotas

Kaip ir tikėtasi, skrendant šūvių išsibarstymo plotas nors ir didesnis negu šaudant stacionariai, tačiau šaudant iki 25 m atstumu, išsibarstymo plotas neviršija $0,32 \text{ m}^2$. Net ir šaudant 30 metrų atstumu, jis neviršija 1 m^2 .

Apžvelgus pateiktus rezultatus, matyti, jog nors skrendant šaudymo rezultatai gaunami prastesni negu stovint, tačiau šaudant tiek stacionariai, tiek skrendant, daugmaž pavyksta išlaikyti šūvių atstumą iki taikinio centro. Didesnis rezultatų skirtumas gaunamas matuojant šūvių glaustumo parametrus. Šaudant skrydžio metu, didinant atstumą glaustumas mažėja dramatiškai, lyginant su šaudymu stovint.

Verta paminėti jog pistoletas turi trumpą vamzdį. Judant pataikyti į taikinį yra itin sunku tiek žmogui tiek. Lyginant su JAV policijos archyvų duomenimis kasmet apie 10 % pareigūnų neišlaiko

šaudymo testų pistoletu pagal minėtus standartus (*Police ...2016*). Šie šaudymo testai nustatinėjant sklaidą atliekami nejudant. Sukasparnis šaudo šiek tiek judėdamas horizontalioje plokštumoje, todėl jo šaudymo rezultatus galima laikyti gana neblogais juolab kad šūvių grupė skrendant nors ir labiau išsibarsčiusi, tačiau jos centras nutolęs nuo taikinio centro ne daugiau negu šaudant stacionariai.

IŠVADOS IR SIŪLYMAI

1. Išnagrinėta literatūra darbo tema, apžvelgti tyrimai, susiję su daugiasraigčiais sukasparniais, atrasta, jog prieinamoje literatūroje nėra aprašytų sukasparnių skirtų ginklui nešti, tačiau aprašyti atlikti tyrimai valdant nuotolinį ginklą bei vertinant ginklo taiklumą.
2. Panaudojus literatūroje siūlomus modeliavimo algoritmus, suprojektuotas ir sumodeliuotas daugiasraigtis sukasparnis, gebantis pakelti reikiamą masę ir pritaikytas nedideliame dujiniam ginklui nešti bei šaudyti.
3. Teoriškai įvertinta realių ginklų šūvio jėgos įtaka sukasparnio kampinei padėčiai vertikalioje plokštumoje. Nustatyta jog maksimalus galimas nuokrypio kampas veikiant galingiausio pistoleto atatrakai yra 25° . Tinkamiausias realus ginklas kabinti po sukasparniu – pistoletas PM, duodantis mažiausią atatraką. Lyginant su kitų mokslininkų atliktais tyrimais, aišku, jog net vėjo gūsiai sukasparnio kampinę padėtį gali pakeisti beveik tiek pat, kiek stipri ginklo atatraka. Išmatuotos tiriamojo sukasparnio nuokrypių praktinės vertės parodo jog jo polinkis net ir neveikiant šūvio atatrakai svyruoja net iki 17° . Skaičiavimai vertina tik teorinius nuokrypius, todėl norint gauti tikslius rezultatus reikalingi bandymai su realiu šaunamuoju ginklu.
4. Atlikti šaudymo bandymai su daugiasraigčiu sukasparniu jam stovint ir skrendant, surinkti ir išsaugoti bandymų rezultatai.
5. Išnagrinėti šaudymo rezultatai, pagal kuriuos matyti, jog šaudant iš stacionarios padėties paklaidų vertės atitinka nustatytus šūvių taiklumo ir glaustumo reikalavimus. Šaudant ore ir didėjant atstumui, šūvių grupės centras būna nutolęs nuo taikinio centro maždaug vienodu atstumu kaip ir šaudant stacionariai bei atitinka taiklumo reikalavimus. Vidutinė kvadratinė taiklumo paklaida skrendant viršija leistinas paklaidos ribas nuo 3 iki 10 cm. Šūvių išsibarstymo spindulys arba standartinis nuokrypis nuo šūvių centro skrendant viršija leistiną reikšmę nuo 6 iki 19 cm. Standartiniai horizontalus ir vertikalus nuokrypiai atliekant šaudymus skrendant taip pat viršija glaustumo ribas nuo 2 iki 12 cm. Šūvių išsibarstymo plotas šaudant iš skrendančio sukasparnio yra žymiai didesnis negu šaudant iš stacionarios padėties tačiau neviršija 1 m^2 šaudant 30 m atstumu.

6. Nepaisant prastesnės šaudymo kokybės skrendant, sukasparnis geba skristi, šauti ir pataikyti į taikinį.
7. Pats ginklo mechanizmas šaudant visais bandytais atstumais atitinka taiklumo reikalavimus, tačiau nustatyta, jog sukasparniui stabilizuojantis pagal GPS signalus, jis negeba labai tiksliai išlaikyti vienos kybojimo vietos, būtent dėl sukasparnio ne visai stabilaus skridimo ir prastėja šaudymo kokybė skrendant.
8. Tokios šaudymo kokybės sukasparnis galėtų būti panaudojamas užduotyse suteikiant dengiančią ugnį, nereikalaujančią didelio šūvių glaustumo.
9. Norint pagerinti tiek taiklumą, tiek glaustumą skrendant, galima diegti modernesnius ginklo ir paties sukasparnio stabilizavimo mechanizmus ir technologijas tokias kaip papildoma stabilizavimo sistema nustatanti padėtį erdvėje pagal vizualius atskaitos taškus ir gebanti itin tiksliai išlaikyti sukasparnio padėtį erdvėje.

Atlikus šį tyrimą padėtas pagrindas tolimesniam ginkluotų sukasparnių modelių vystymui tiek Lietuvoje, tiek už jos ribų. Darbe gauti šaudymo taiklumo rezultatai naudingi vertinant sukasparnio pritaikymą realiomis užduočių sąlygomis. Toks išstobulintas skraidantis aparatas būtų puiki priemonė įvairioms teisėsaugos ir krašto apsaugos užduotims vykdyti, kadangi gali kyboti ore ir veikti ganėtinai mažose erdvėse.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Aircraft Data Sheet 2010. *Hyperion* [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2016 gegužės 13]. Prieiga per internetą: <https://www.aircraft-world.com/Datasheet/en/hp/emeter/hp-propconstants.htm>

Ariffanan, M. *et al.*, 2015. Stabilization and trajectory tracking control for underactuated quadrotor helicopter subject to wind-gust disturbance. 40(August), pp.1531–1553.

Bonak, M., Matko, D. & Blai, S., 2012. Quadrocopter control using an on-board video system with off-board processing. *Robotics and Autonomous Systems*, 60(4), pp.657–667.

Bry, A. *et al.*, 2015. *Aggressive flight of fixed-wing and quadrotor aircraft in dense indoor environments*, [interaktyvus]. [Žiūrėta 2015 m. gruodžio 8 d.]. Prieiga per internetą: <http://ijr.sagepub.com/content/early/2015/03/19/0278364914558129.abstract>.

Bručas, D. 2012. *Propeleriai*, Vilnius, Technika

Chasapogiannis, P. *et al.*, 2014. Analysis of the aerodynamic performance of the multi-rotor concept. *Journal of Physics: Conference Series*, 524, p.012084.

Clemente-suarez, V.J. & Robles-pérez, J.J., 2015. Acute effects of caffeine supplementation on cortical arousal , anxiety , physiological response and marksmanship in close quarter combat. , 0139(May 2016).

Design, analysis and construction of composite material camera gimbal. 2013 [interaktyvus]. [Žiūrėta 2015 m. gruodžio 11 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822301001131>

Efraim, H., Shapiro, A. & Weiss, G., 2015. Quadrotor with a Dihedral Angle: on the Effects of Tilting the Rotors Inwards, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 80(2), pp.313–324.

Escareño, J. *et al.*, 2013. Trajectory control of a quadrotor subject to 2D wind disturbances: Robust-adaptive approach *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 70(1–4), pp.51–63.

Gatti, M., Giulietti, F. & Turci, M., 2015. Maximum endurance for battery-powered rotary-wing aircraft *Aerospace Science and Technology*, 45, pp.174–179.

Gomez-Balderas, J.E. *et al.*, 2013. Tracking a Ground Moving Target with a Quadrotor Using Switching Control, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 70(1-4), pp.65–78.

Handgun technical specifications 2004 [interaktyvus], [Žiūrėta 2016 balandžio 17]. Prieiga per internetą: <http://www.newtimes.nl/2004/01/11/technical-handgun-specs-review-170904-index/>

Hehn, M., Ritz, R. & D'Andrea, R., 2012. Performance benchmarking of quadrotor systems using time-optimal control *Autonomous Robots*, 33(1-2), pp.69–88.

Yu, Y. & Ding, X., 2012. A quadrotor test bench for six degree of freedom flight, *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 68(3-4), pp.323–338.

Kadouf, H. H. A. & Mustafah, Y. M., 2013. Colour-based Object Detection and Tracking for Autonomous Quadrotor UAV, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 53(1), p.012086.

Kim, J., Shim, D. H. & Morrison, J. R., 2014. Tablet PC-based Visual Target-Following System for Quadrotors, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 74(1–2), pp.85–95.

Liu, H. *et al.*, 2013. Robust optimal attitude control of hexarotor robotic vehicles, *Nonlinear Dynamics*, 74(4), pp.1155–1168.

Liu, H. *et al.*, 2014. Robust Tracking Control of a Quadrotor Helicopter. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 75(3–4), pp.595–608.

Lucieer, A. *et al.*, 2014. Using an unmanned aerial vehicle (UAV) to capture micro-topography of antarctic moss beds, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 27(PARTA), pp.53–62.

Mohammadi, M. & Shahri, A.M., 2013. Adaptive Nonlinear Stabilization Control for a Quadrotor UAV: Theory, Simulation and Experimentation, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 72(1), pp.105–122.

Morrison, G.B., Vila, B.J. & Morrison, G.B., 1998. Police handgun qualification : practical measure or aimless activity?

Naudinga informacija 2009. *DE* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2016 gegužės 17] Prieiga per internetą: <http://www.de2.lt/naudinga-informacija/lentel%C4%97s/3475-pistoletas-%C4%8Dz-75-sudedamosios-dalys>

Paliūnas, V. *Teorinė mechanika* p.482. Vilnius, Žuvėdra 1997

Pistol marksmanship test. 2007 [interaktyvus], [Žiūrėta 2016 gegužės 8]. Prieiga per internetą: <http://www.nltimes.nl/2016/04/13/nearly-police-pass-marksmanship-review-2400-miss-test/>

Propeller and Motor Selection *Quadcopterproject* [interaktyvus] , [Žiūrėta gegužės 1]. Prieiga per internet1: <https://quadcopterproject.wordpress.com/propeller-and-motor-selection/>

Rilanto Trilaksono, B. *et al.*, 2011. Hardware-in-the-loop simulation for visual target tracking of octorotor UAV, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* 83(6), pp.407–419.

Sámano, A. *et al.*, 2013. Modeling and Stabilization of a Multi-Rotor Helicopter. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 69(1–4), pp.161–169. Sanahuja, G. & Castillo, P., 2013. Embedded laser vision system for indoor aerial autonomous navigation, *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 69(1-4), pp.447–457.

Santos, O. *et al.*, 2013. Real-time stabilization of a quadrotor UAV: Nonlinear optimal and suboptimal control. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 70, pp.79–91.

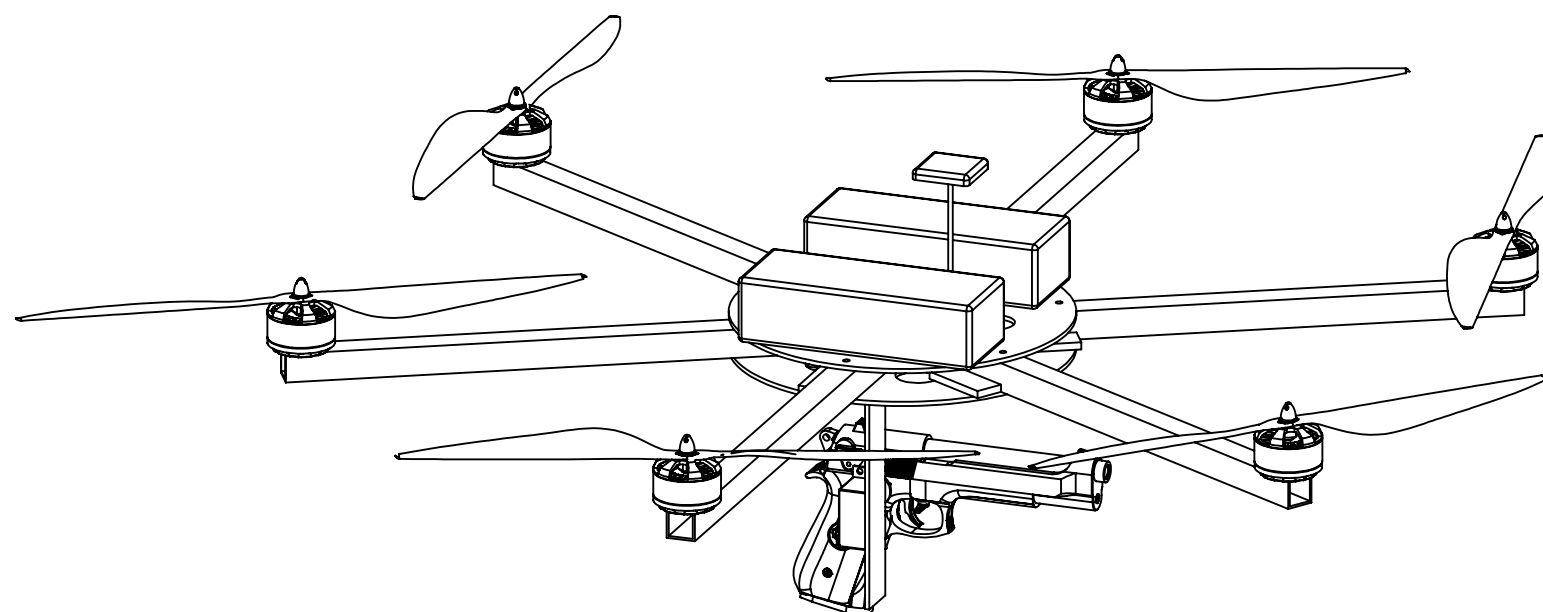
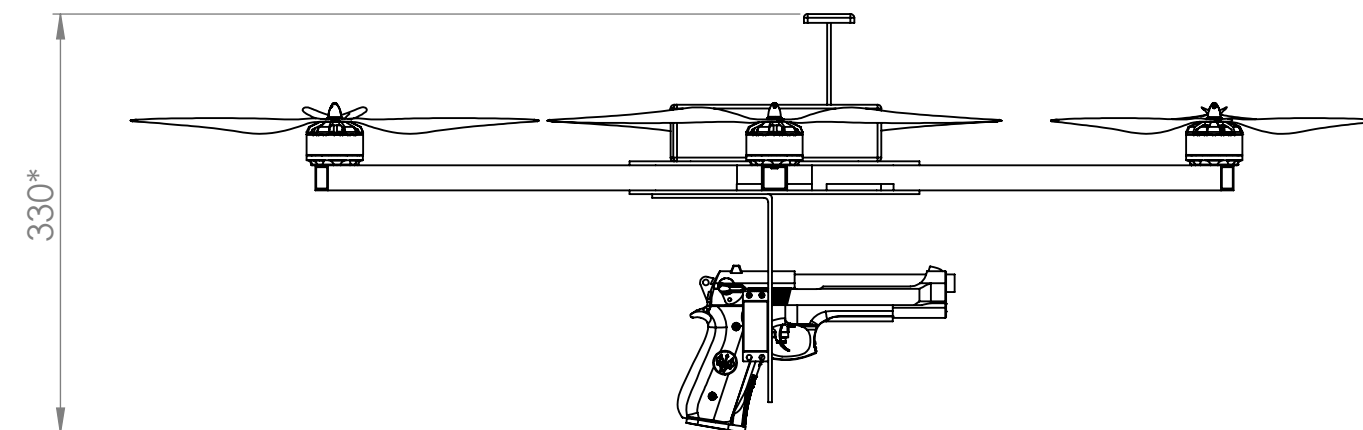
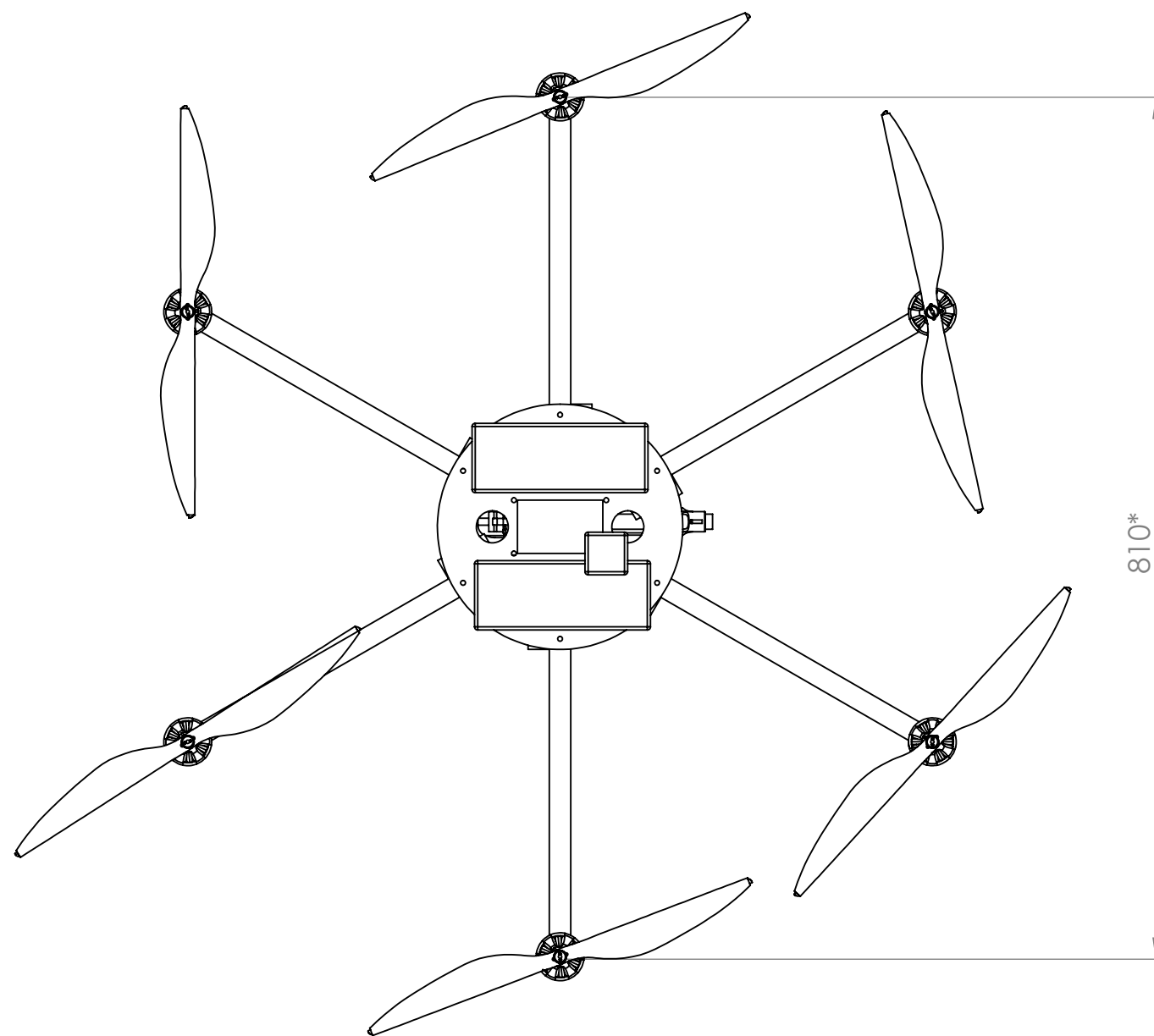
Segui-Gasco, P. *et al.*, 2014. A novel actuation concept for a multi rotor UAV, *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 74(1–2), pp.173–191.

Static thrust calculation *Quadcopterproject* [interaktyvus] , [Žiūrėta gegužės 1]. Prieiga per internet1: <https://quadcopterproject.wordpress.com/static-thrust-calculation/>

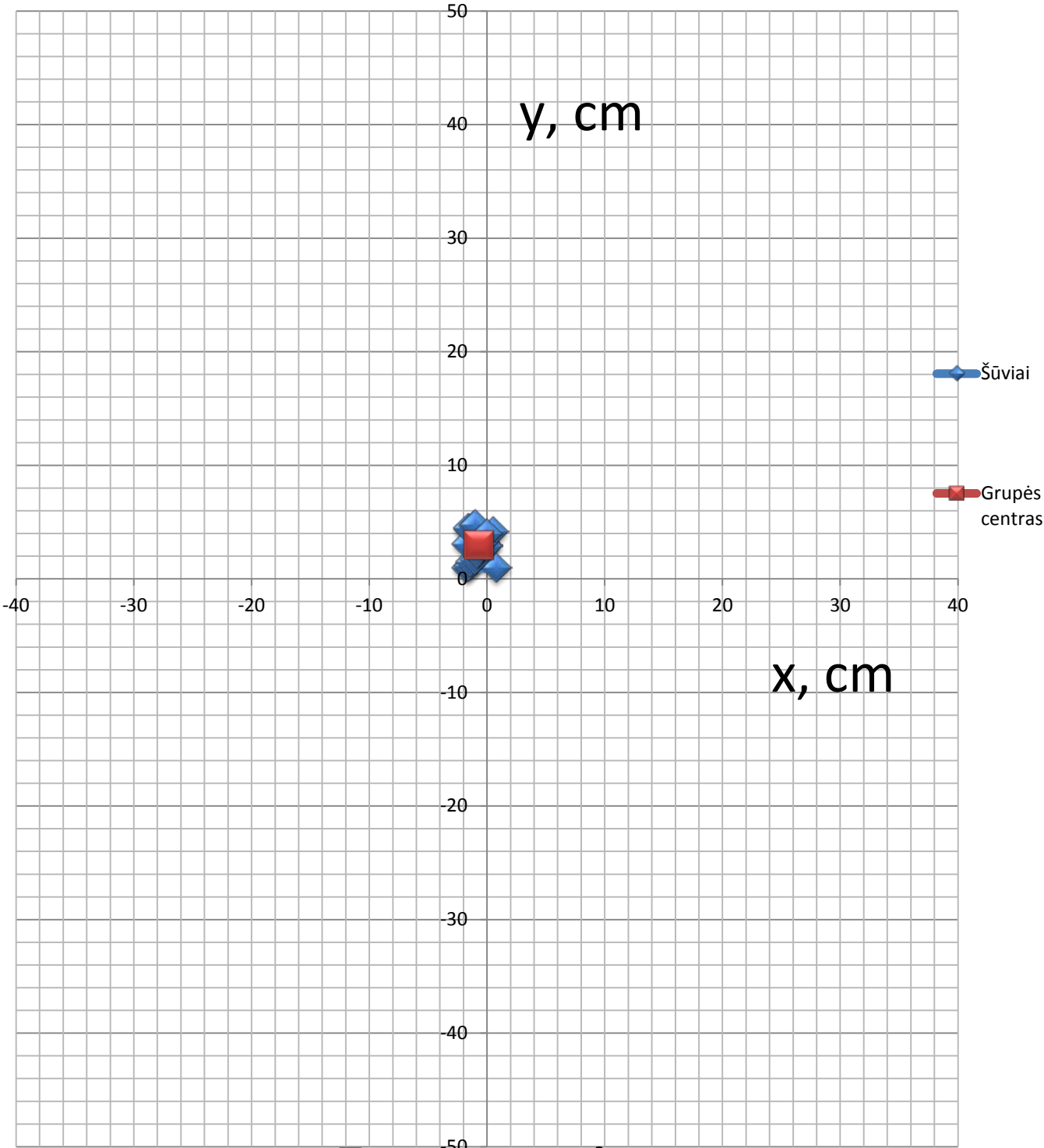
Tahar, K. N. *et al.*, 2014. A generic approach for photogrammetric survey using a six-rotor unmanned aerial vehicle, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 18(1), p.012003.

Tonkin, T. N. *et al.*, 2014. The potential of small unmanned aircraft systems and structure-from-motion for topographic surveys: A test of emerging integrated approaches at Cwm Idwal, North Wales. *Geomorphology*, 226, pp.35–43.

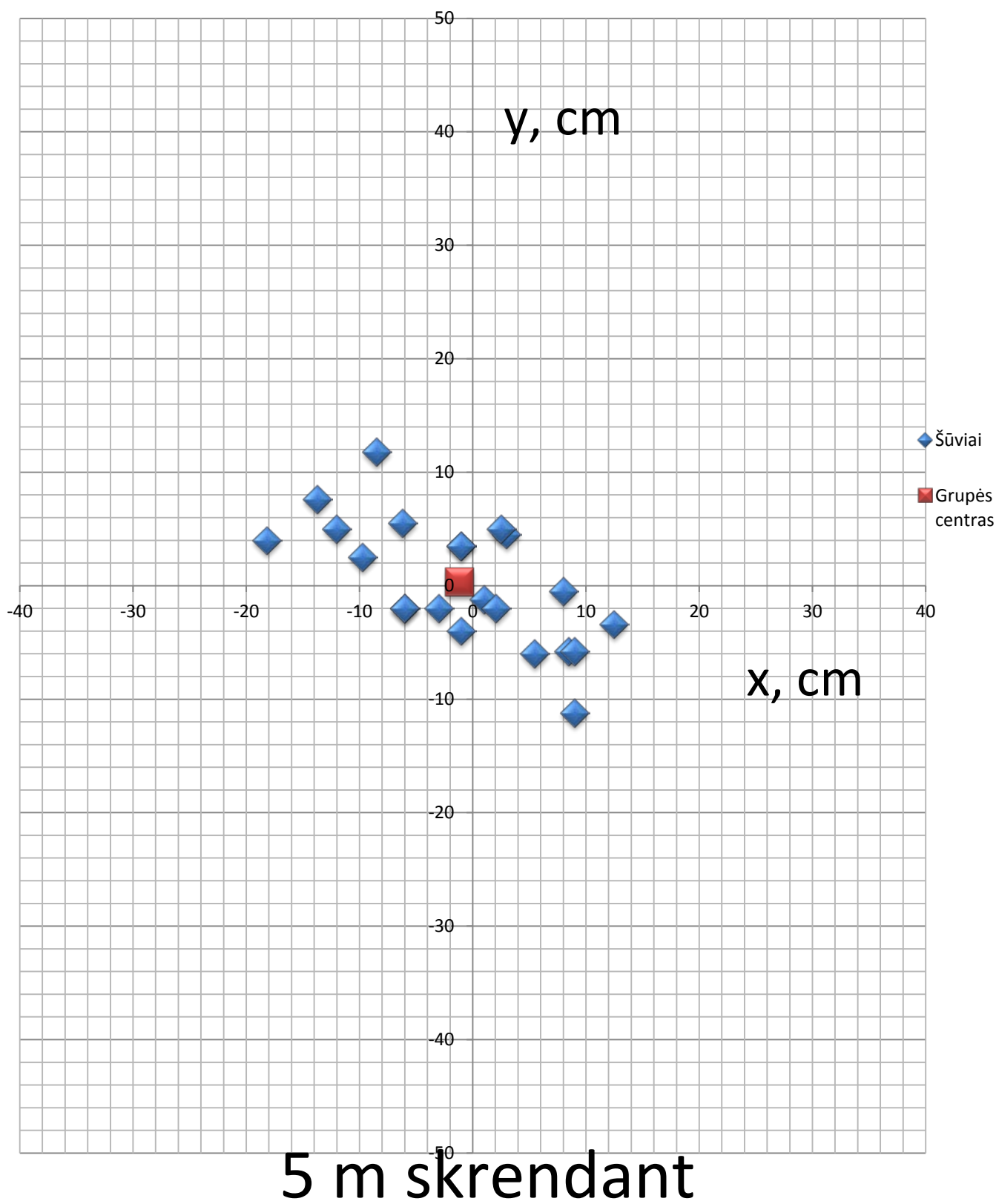
Wang, C. *et al.*, 2010. Application of a Remote Image Surveillance System in a Robotic Weapon, *Artificial Life and Robotics*, 2010(1), pp.391–394.

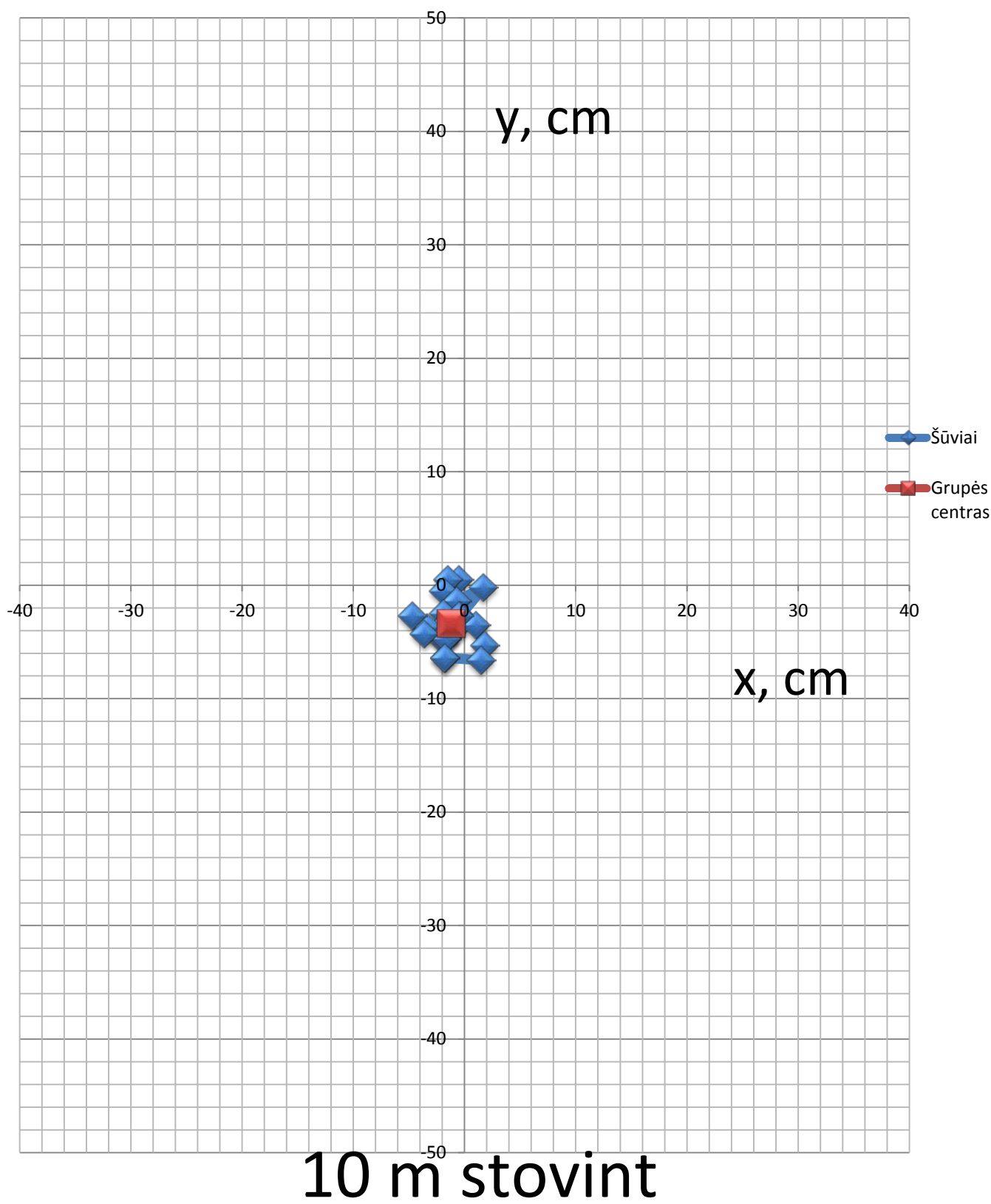


* - informacinis matmuo

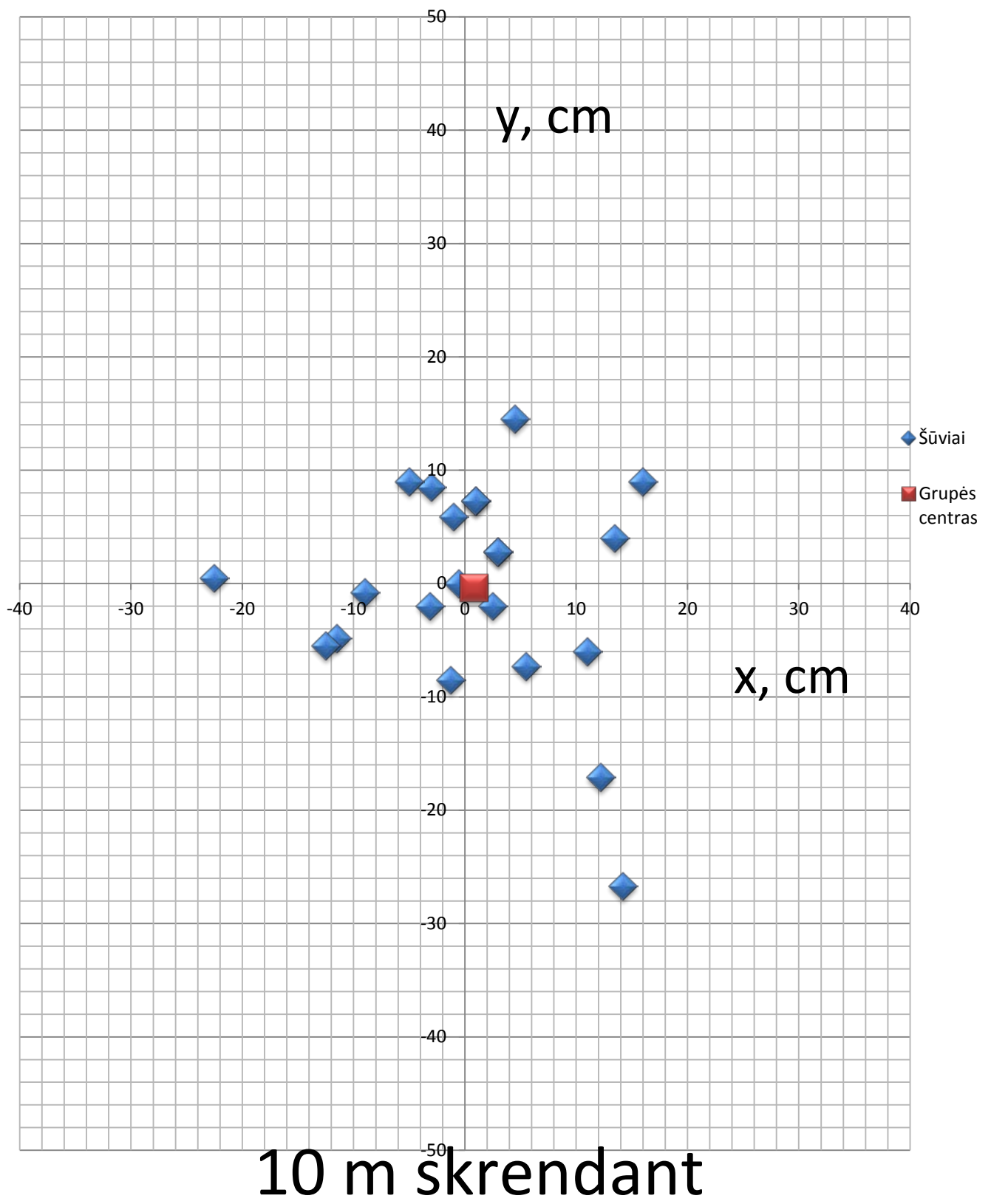


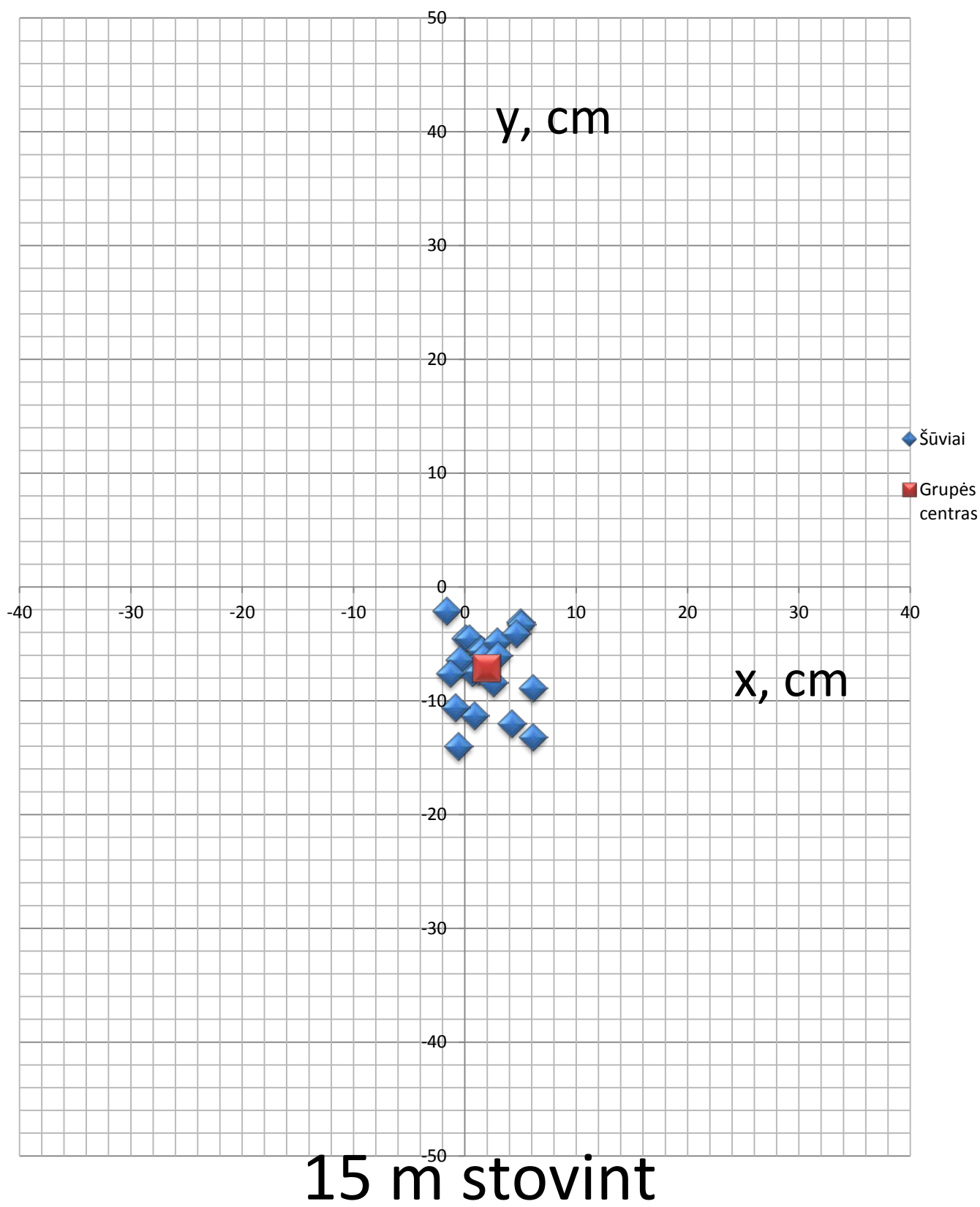
5 m stovint

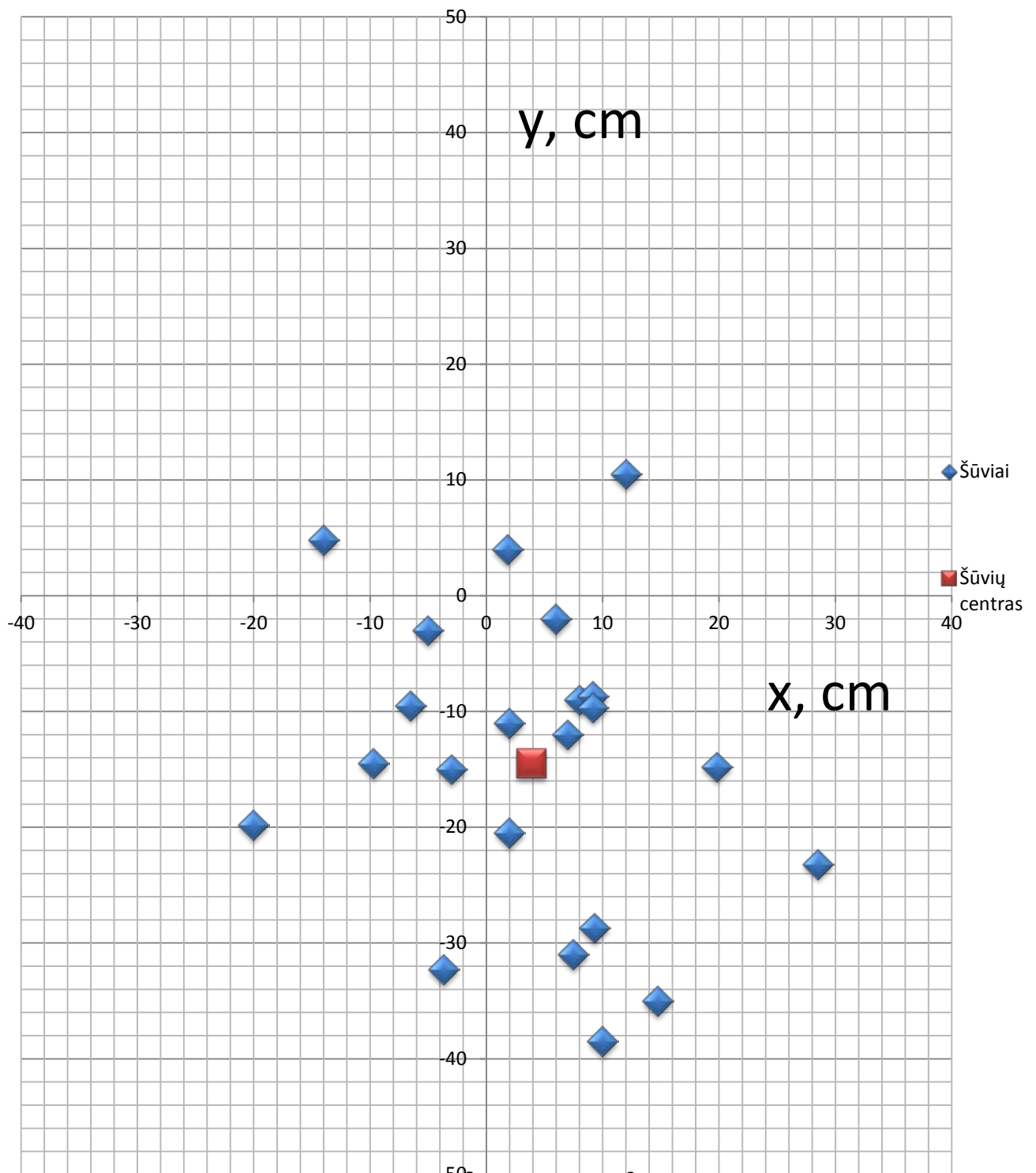




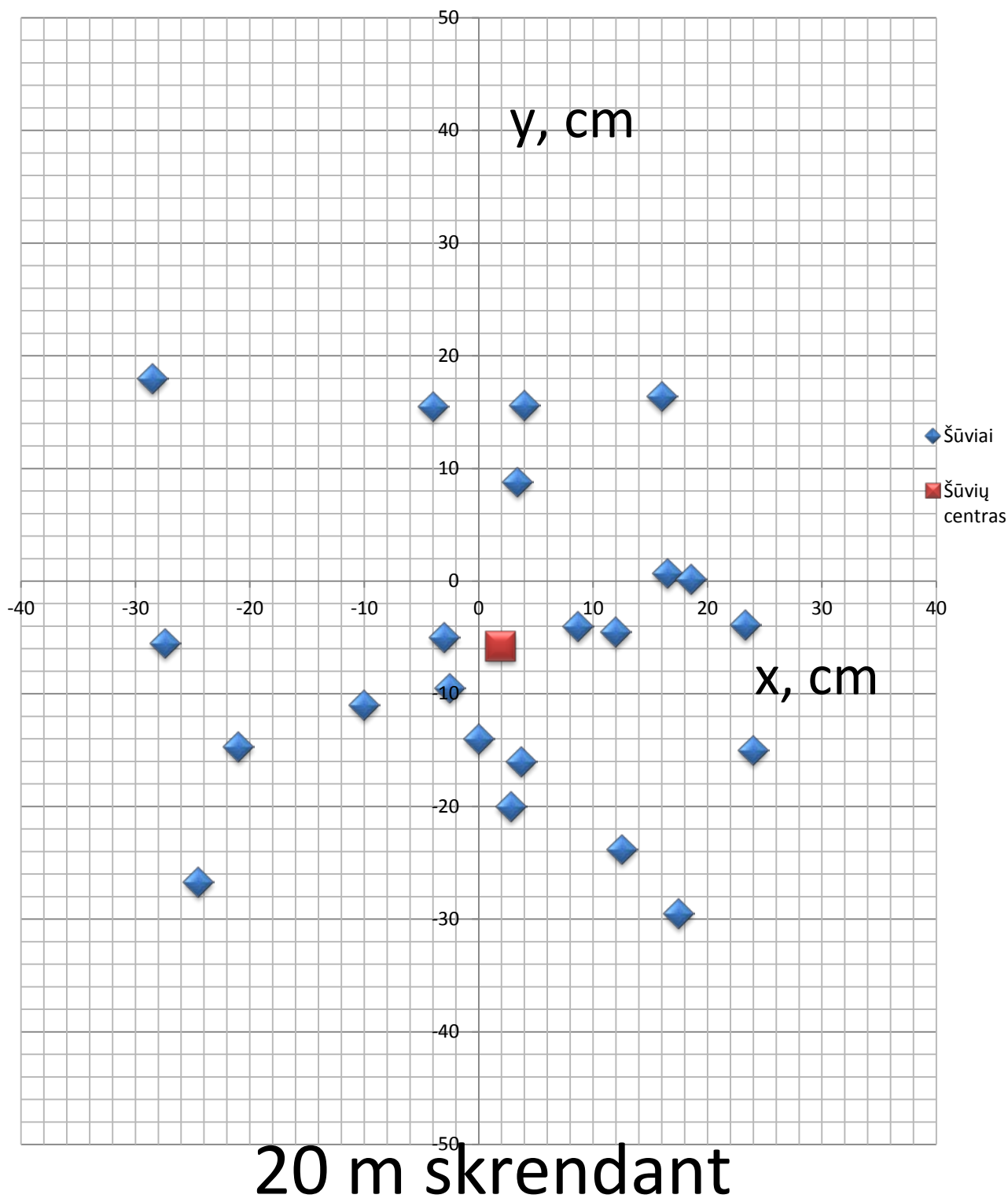
5 priedas



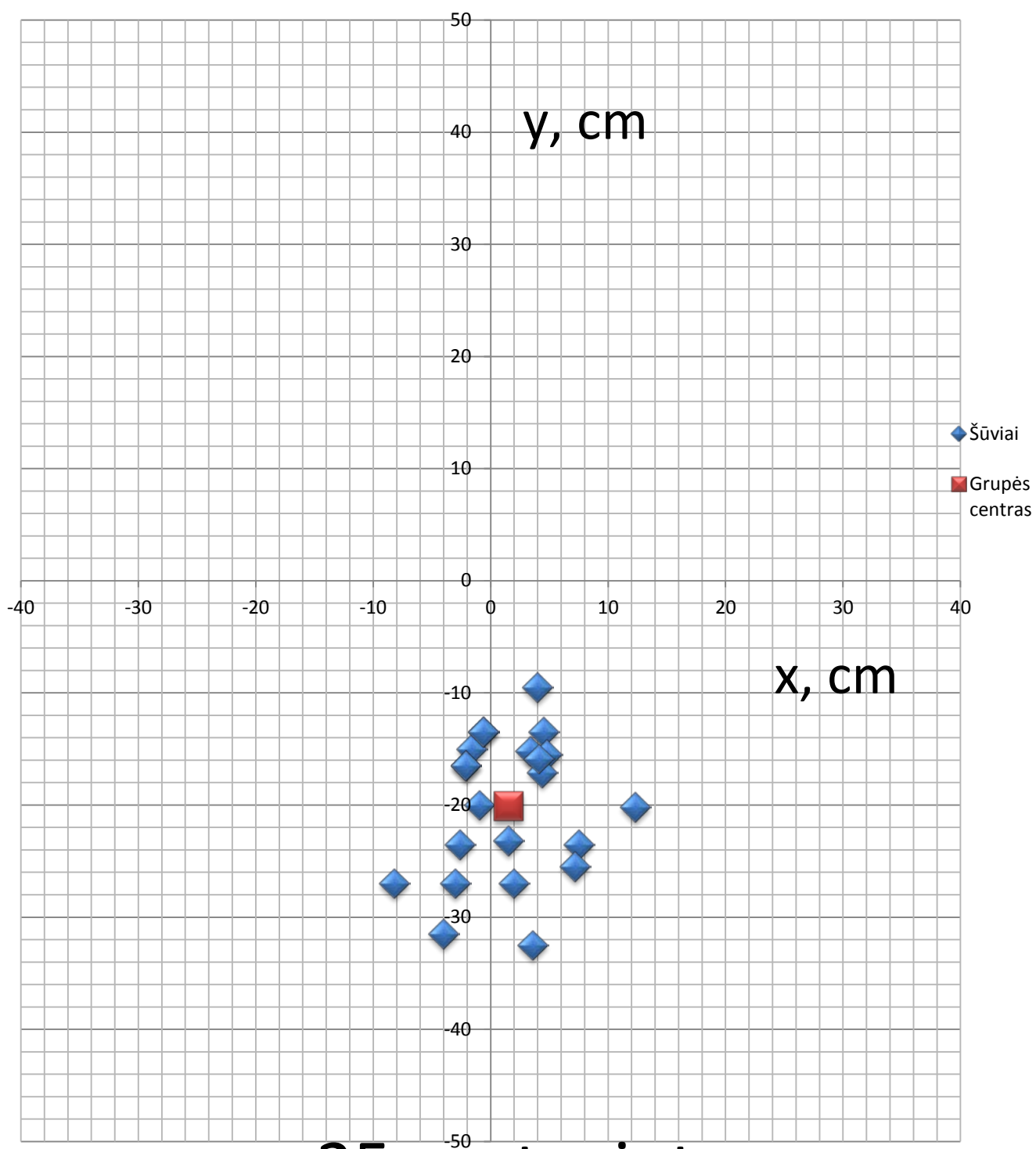




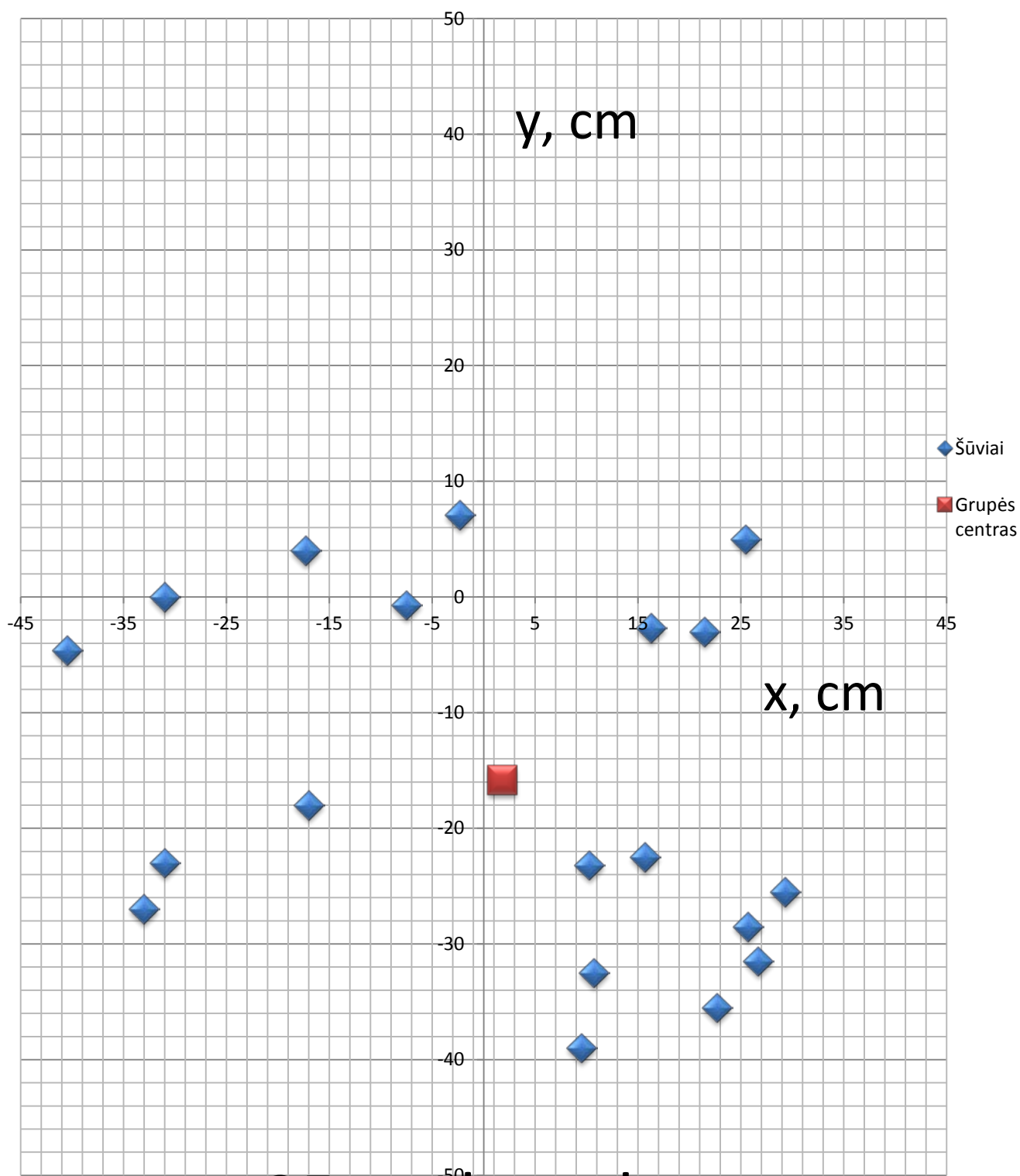
15 m skrendant



10 priedas



11 priedas



25 m skrendant

94

13 priedas

