

Karolis Kirna

BEPILOČIO KVADRAKOPTERIO DINAMINIŲ PROCESŲ TYRIMAS RESEARCH OF PILOTLESS QUAD COPTER DYNAMIC PROCESSES

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621E20003
Transporto technologinių sistemų inžinerijos specializacija
Sausumos transporto inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2016

TVIRTINU Katedros vedėjas

(Parašas) **prof. Marijonas Bogdevičius** (Vardas, pavardė)

(Data)

Karolis Kirna

BEPILOČIO KVADRAKOPTERIO DINAMINIŲ PROCESŲ TYRIMAS RESEARCH OF PILOTLESS QUAD COPTER DYNAMIC PROCESSES

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621E20003
Transporto technologinių sistemų inžinerijos specializacija
Sausumos transporto inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

habil. dr. prof. M. Bogdevičius

Lietuvių kalbos konsultantė lekt. A. Petrėtienė

Vilnius, 2016

Sausumos transporto inžinerija studijų kryptis

Transporto inžinerija studijų programa, valstybinis kodas 621E20003

Transporto technologinių sistemų inžinerijos specializacija

TVIRTINU Katedros vedėjas

> (Parašas) prof. Marijonas Bogdevičius (Vardas, pavardė)

> > (Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO UŽDUOTIS

.....Nr. Vilnius

Studentui Karoliui Kirnai

Baigiamojo darbo tema: Bepiločio kvadrakopterio dinaminių procesų tyrimas

patvirtinta 2014 m. lapkričio 21 d. dekano potvarkiu Nr. 452ti

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2016 m. gegužės 25d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Sukurti kvadrakopteri kurio masė būtų iki 1,5 kg. Jis turi gebėti pakelti krovinį kurio masė nebūtų didesnė nei 1 kg. Ištirti sukonstruoto bepiločio kvadrakopterio dinaminius procesus ir sukurti matematini modeli. Atlikti kvadrakopterio dinaminių procesų teorinius ir eksperimentinius tyrimus. Pateikti apibendrintas išvadas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai: Lekt. Angelika Petrėtienė

Vadovas

..... (Parašas)

habil. Dr. Prof. Marijonas Bogdevičius

Užduotį gavau

(Parašas)

Karolis Kirna

(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universite	etas	ISBN	ISSN
Transporto inžinerijos fakultetas		Egz. sk	
Transporto technologinių įrenginių ka	redra	Data	
Antrosios pakopos studijų Transporto	inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas		
Pavadinimas	Bepiločio kvadrakopterio dinaminių procesų tyrimas		
Autorius	Karolis Kirna		
Vadovas	Marijonas Bogdevičius		

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame darbe nagrinėjamas specialiai šiam tyrimui sukonstruotas bepilotis kvadrakopteris. Atlikta mokslinių darbų, nagrinėjančių bepiločių skraidyklių dinaminius procesus, analizė. Sukurtas kvadrakopterio matematinis modelis, kurį sudaro elektros variklis ir kvadrakopterio judėjimo lygtys. Gauti kvadrakopterio elektros variklio ir bendros kvadrakopterio sistemos charakteringi parametrai. Atlikti eksperimentiniai matavimai esant nesubalansuotiems ir subalansuotiems kvadrakopterio elektros varikliams bei propeleriams. Atlikta gautų matavimų lyginamoji analizė. Atlikti teoriniai kvadrakopterio sistemos tyrimai. Pateikiami pagrindinių kvadrakopterio charakteristikų grafikai. Atlikta gautų grafikų analizė. Darbo pabaigoje pateikiamos išvados. Darbą sudaro 7 dalys: įvadas, tyrimo objektas, mokslinių darbų apžvalga, eksperimentiniai tyrimai, teoriniai tyrimai, išvados ir rekomendacijos, literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 80 puslapių be priedų, 65 iliustracijos ir 6 lentelės. Darbo priedai pateikiami pabaigoje – eksperimento duomenų lentelės, matavimo stendų brėžiniai, vibracijų tyrimo grafikai ir straipsnis.

Prasminiai žodžiai: kvadrakopteris, bepilotė skraidyklė, matematinis modelis, elektros variklis, elektros variklio keliamosios jėgos matavimas, elektros variklio sukimo momento matavimas, kvadrakopterio elektros variklių balansavimas, pagrindinės kvadrakopterio charakteristikos.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Transport Engineering
Department of Transport Technological Equipment

ISBN ISSN Copies No. Date-...

 Master Degree Studies Transport Engineering study programme Master Graduation Thesis

 Title
 Research of pilotless quad copter dynamic processes

 Author
 Karolis Kirna

 Academic supervisor
 Marijonas Bogdevičius

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The purpose of this research is to analyze dynamic processes of the custom made quad copter. Analyzed relevant literature and analysis of scientific works, helps to locate the main sources of quad copter vibrations. The thesis provides a mathematical model of the quad copter and its electric motors which allows to study the dynamics of this pilotless quad copter in great detail. The work includes experiments of two types – theoretical and practical – in order to fully understand all of the movements of this particular system. Two special stands were constructed in order to accurately measure thrust force and torque of quad copter electric motors. Electric motors were tested in a balanced and unbalanced conditions. The conclusions and all the results of both – theoretical and practical – experiments can be found in this master degree thesis. Research thesis volume is comprised of 80 pages without appendix, 65 illustrations, research article and schemes of experimental measurement stands.

Keywords: quad copter, unmanned aerial vehicle, mathematical model, electric motor, thrust force measurements of the electric motor, toque measurements of the electric motor, quad copter electric motor balancing, main quad copter characteristic.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo organizavimo tvarkos aprašo 2 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Karolis Kirna, 20092252

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)					
Transporto inžinerijos fakultetas					
(Fakultetas)					
Transporto inžinerija, TTSfm-14					
(Studijų programa, akademinė grupė)					

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2016 m. gegužės 11 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema "Bepiločio kvadrakopterio dinaminių procesų tyrimas" patvirtintas 2014 m. lapkričio 21 d. dekano potvarkiu Nr. 452ti, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: prof. habil. dr. Marijonas Bogdevičius. Mano darbo vadovas prof. habil. dr. Marijonas Bogdevičius.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

(Parašas)

Karolis Kirna (Vardas ir pavardė)



Karolis Kirna

BEPILOČIO KVADRAKOPTERIO DINAMINIŲ PROCESŲ TYRIMAS RESEARCH OF PILOTLESS QUAD COPTER DYNAMIC PROCESSES

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621E20003
 Transporto technologinių sistemų inžinerijos specializacija
 Sausumos transporto inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2016

PAVEIKSLŲ TURINYS	9
LENTELIŲ SĄRAŠAS	12
SANTRUMPOS	13
ĮVADAS	14
1. TYRIMO OBJEKTAS	16
1.1. Problemos aktualumas	17
1.2. Darbo tikslas ir uždaviniai	18
1.3. Bepiločių orlaivių teisinis norminimas JAV	19
1.4. Dronų naudojimas Europoje ir Lietuvoje	20
2. MOKSLINIŲ DARBŲ APŽVALGA	22
2.1. Donald Norris eksperimento metodika ir naudoti prietaisai	22
2.2. L. Reitsma eksperimento metodika ir naudoti prietaisai	25
2.3. G. N. M. Plasencia et al. eksperimento metodika ir naudoti prietaisai	27
2.4. Jizhou Lai et al. eksperimento metodika	30
2.5. Autorių gautų rezultatų lyginamoji analizė	32
3. KVADRAKOPTERIO EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI	34
3.1. Sukonstruoto kvadrakopterio elementai	34
3.2. Sukonstruoto tyrimo objekto vaizdas	
3.3. Tiriamoms objekto savybėms įtakos turintys veiksniai	
3.4. Eksperimento įranga	40
3.5. Eksperimentų algoritmai (eiga)	47
3.7. Eksperimento matavimų rezultatai	49
 3.7.1. Matavimų rezultatai ant bandymų stendų	49 53 56
3.8. Eksperimento apibendrinimas ir išvados	59
4. KVADRAKOPTERIO TEORINIAI TYRIMAI	60
4.1. Kvadrakopterio dinaminis modelis	60

Turinys

4.2. Kvadrakopterio matematinis modelis	61
4.3. Teorinio tyrimo duomenys ir rezultatai	65
4.4. Teorinio tyrimo apibendrinimas ir išvados	74
IŠVADOS, REKOMENDACIJOS	76
LITERATŪROS SĄRAŠAS	78
PRIEDAI	80

PAVEIKSLŲ TURINYS

1 pav. Kvadrakopteris	14
2 pav. Prastos kokybės nuotrauka	17
3 pav. Geros kokybės nuotrauka	18
4 pav. <i>Arduino uno R3</i> mikrovaldiklis	18
5 pav. Donald Norris eksperimento schema	22
6 pav. Tyrimo stendas	22
7 pav. Eksperimentinės schemos vizualizavimas	23
8 pav. Optinis tachometras	23
9 pav. Eksperimento elektrinė schema	23
10 pav. Giroskopas	25
11 pav. Radijo bangomis valdomas kvadrakopteris	26
12 pav. Grafinis rezultatų pateikimas	26
13 pav. ULL laboratorijos eksperimentinis sraigtasparnio modelis	27
14 pav. Poslinkių priklausomybė nuo vibracijų dažnio x ašies atžvilgiu	29
15 pav. Poslinkių priklausomybė nuo vibracijų dažnio z ašies atžvilgiu	29
16 pav. Pasvirimo kampų apie pagrindines X, Y, Z ašis sklaida naudojant vieno bandinio al	goritmą .31
17 pav. Pasvirimo kampų apie pagrindines X, Y, Z ašis sklaida naudojant keturių bandinių	
algoritmą	
18 pav. DJI 2212 modelio varikliai	34
19 pav. <i>Hobbyking</i> 8 x 4,5 modelio propeleriai	35
20 pav. DYS SimonK 30 A modelio ESC	35
41 pav. <i>Q450</i> modelio rėmas	
22 pav. <i>KK</i> 2.1.5 modelio mikrovaldiklis	
23 pav. Turnigy 5000 mAh 4S 40C modelio baterija	
24 pav. <i>Turnigy 9X 9Ch</i> imtuvas ir <i>8Ch 9X8C</i> modelio siųstuvas	
25 pav. Sukonstruotas bepilotis orlaivis	
25 pav. Variklių testavimo stendo prijungimo schema	40

26 pav. Variklio traukos bandymų stendas4	0
27 pav. Kinematinė traukos stendo schema4	1
28 pav. Variklio sukimo momento testavimo stendas	2
29 pav. Sukimo momento stendo kinematinė schema	2
30 pav. "Sound meter" programos aplinka ir eksperimento rezultatai	3
31 pav. Arduino IDE programavimo aplinka	4
32 pav. Variklių greičio reguliatoriaus ir sūkių matuoklio schema	4
33 pav. Propelerių balansavimo stendas	-5
34 pav. Svarstyklės	-5
35 pav. "Turnigy" elektros parametrų matuoklis	6
36 pav. Kvadrakopterio rėmo pagreičių vibracijų matavimo įranga4	6
37 pav. Elektros variklio išmatuotų sūkių priklausomybė nuo nustatytų sūkių	9
38 pav. Elektros variklio išmatuotos jėgos priklausomybė nuo nustatytų sūkių	60
39 pav. Triukšmo lygio priklausomybė nuo nustatytų sūkių5	60
40 pav. Elektros srovės priklausomybė nuo nustatytų sūkių	51
41 pav. Elektros įtampos priklausomybė nuo nustatytų sūkių naudojant 5000 mAh bateriją5	51
42 pav. Elektros įtampos priklausomybė nuo nustatytų sūkių naudojant 2500 mAh bateriją5	52
43 pav. Elektros galios priklausomybė nuo nustatytų sūkių5	52
44 pav. Elektros variklio sukimo momento priklausomybė nuo nustatytų sūkių5	63
45 pav. Visos kvadrakopterio sistemos elektros srovės priklausomybė nuo nustatytų sūkių	63
46 pav. Visos kvadrakopterio sistemos triukšmo lygio priklausomybė nuo nustatytų sūkių	64
47 pav. Visos kvadrakopterio sistemos elektros įtampos priklausomybė nuo nustatytų sūkių	64
48 pav. Visos kvadrakopterio sistemos keliamosios galios priklausomybė nuo nustatytų sūkių5	5
49 pav. Vieno elektros variklio pagreičių vibracijos esant 50 % nuo maksimalių elektros variklio	
sūkių5	6
50 pav. Vidutinių vibracijų reikšmių priklausomybė nuo nustatytų sūkių po ir prieš balansavimą5	7
51 pav. Vidutinių pagreičio vibracijų reikšmių priklausomybė nuo nustatytų sūkių po ir prieš	
balansavimą5	8
52 pav. Kvadrakopterio dinaminis modelis	j 1

53 pav. Kvadrakopterio i-tojo variklio dinaminis modelis61
54 pav. c_{F_k} traukos jėgos koeficiento reikšmių priklausomybė nuo nustatytų sūkių po ir prieš
balansavimą67
55 pav. $c_{M_{y}}$ sukimo momento koeficiento reikšmių priklausomybė nuo nustatytų sūkių po ir prieš
balansavimą67
56 pav. Kvadrakopterio traukos jėgos proporcingumo koeficiento optimizavimo grafikas68
57 pav. Kvadrakopterio sukimo momento proporcingumo koeficiento optimizavimo grafikas68
58 pav. Elektros variklio sukimo momento $M_{\nu 2}$ kitimas laike
59 pav. Elektros variklio sukimo momento M_{v1} kitimas laike
60 pav. Pirmo ir antro elektros variklių sūkių kitimas laike70
61 pav. Kvadrakopterio pirmojo elektros variklio sūkių kitimas laike
62 pav. Kvadrakopterio sistemos bendrojo reaktyvinio momento kitimas laike
63 pav. Kvadrakopterio vieno elektros variklio traukos jėgų kitimas laike
64 pav. Pirmo kvadrakopterio elektros variklio traukos jėgos kitimas laike72
65 pav. Kvadrakopterio posūkio kampo kitimas laike
66 pav. Kampinio kvadrakopterio sukimosi greičio apie X ašį kitimas laike
65 pav. Kvadrakopterio masės centro Y ir Z koordinačių kitimas laike

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Nuorodų į žodį UAV santykiniai kiekiai 2005 – 2013 m	17
2 lentelė. Donald Norris eksperimento duomenys	
3 lentelė. Kvadrakopterio 4 variklių darbo parametrai	24
4 lentelė. Pagrindiniai sraigtasparnio parametrai	27
5 lentelė. Kvadrakopterio pagrindiniai parametrai	65
6 lentelė. Masių inercijos momentų skaičiavimo rezultatai	66

SANTRUMPOS

- GPS globali pozicionavimo sistema (angl. global positioning system);
- UAV bepilotis skraidantis objektas (angl. unamnned aerial hehicle);
- FAA Federalinės aviacijos administracija (angl. federal aviation administration);
- JAV Jungtinės Amerikos Valstijos;
- CAA Civilinės aviacijos administracija;
- ESC elektroninis greičio valdiklis (angl. electronic speed controller);
- DC nuolatinė srovė (angl. direct current);
- USB universalioji jungtis (angl. universal serial bus);
- SINS inercinės navigacijos sistema (angl. strapdown inertial navigation system)
- IMU inercijos parametrų matavimo įrenginys (angl. inertial measurement unit);
- ULL Luizianos universitetas, esantis Lafayette (angl. university of Louisiana at Lafayette);
- CW pagal laikrodžio rodyklę (angl. *clockwise*);
- CCW prieš laikrodžio rodyklę (angl. counterclockwise);
- BEC įtampos sumažinimo elektros grandinė (angl. battery eliminator circuit).

ĮVADAS

Transportas, transportavimas – žmonių ar krovinių perkėlimas iš vienos vietos į kitą. Žodis kilęs iš lotyniškų žodžių *trans* (per, skersai) ir *portare* (nešti, gabenti) (*Dabartinės...*). Transportui tenka svarbus vaidmuo kuriant materialines vertybes, racionaliai išdėstant gyventojų susisiekimo poreikius. Jis yra būtinas atliekant vežimus tarp įmonių, rajonų, šalių. Lietuvos Respublikos Vyriausybė transporto sistemos plėtojimą laiko prioritetiniu, reikalaujančiu daug pastangų, milžiniškų pinigų ir laiko investicijų.

Yra keletas skirtingų transporto rūšių: vandens transportas, geležinkelių transportas, kelių transportas ir oro transportas. Greičiausiai krovinius gabenti galima oro transportu. Taipogi, jam nereikalinga nei papildoma kelių ar geležinkelių infrastruktūra. Oro transportu kroviniai gabenami vienodai efektyviai tiek žemyninėmis pasaulio dalimis, tiek vandenynais. Deja šis krovinių transportavimo būdas turi ir trūkumų. Oro transportu trumpais atstumais gabenamų krovinių vežimų kaštai yra labai dideli. Lėktuvams pakilti ir nusileisti reikalingi milžiniškus sausumos plotus užimantys aerouostai su nusileidimo takais. Taip pat krovininiais lėktuvais praktiškai neįmanoma gabenti "nuo durų iki durų", tai reiškia, kad juos dar papildomai reikia perkrauti į kitos rūšies transporto mašinas. Nuo to kenčia ne tik pristatymo laikas, bet taip pat auga krovinių gabenimo kaštai.

Norėdami išspręsti anksčiau aprašytas problemas, turime naudoti visiškai naują įrenginį, gebantį transportuoti krovinius oru. Šis įrenginys turi būti:

• manevringas, kad būtų nesunku jį valdyti mažose erdvėse,

gana greitas, jog būtų patenkintas pagrindinis šiuolaikinės visuomenės poreikis – didelė paslaugų atlikimo, transportavimo sparta,

• nesudėtingos konstrukcijos, kad būtų patikimas, lengvai taisomas ir nebrangus.

Visus anksčiau išvardytus punktus atitinka gana naujas išradimas – kvadrakopteris.



1 pav. Kvadrakopteris

Tai elektros energija varomas skraidantis mechanizmas, gebantis gabenti nedidelio svorio krovinius greitai, trumpais atstumais. Nešdamas 2,5 kg krovinį visiškai įkrauta baterija jis gali nuskristi net iki 90 km. Kvadrakopterį galima užprogramuoti visiškai savarankiškai skristi jam priskirtu maršrutu.

Į kvadrakopterį įmontavus kamerą, jį galima labai efektyviai panaudoti tiriant mašinų srautus didmiesčiuose, fiksuojant eismo įvykius. Jis gali pasiekti gana didelį aukštį, todėl nekliudytų elektros laidų ar mažesnių pastatų. Nebūtų sugaišta laiko dėl transporto spūsčių. Įdiegus GPS sistemą, būtų galima jo maršrutą užprogramuoti iš anksto, taip kvadrakopterio nereikėtų niekam valdyti.

1. TYRIMO OBJEKTAS

Tyrimo objektas – kvadrakopteris. Kvadrakopteris – tai skraidymo aparatas, naudojantis 4 elektros variklius, kad sukurtų pakankamą keliamąją jėgą pakilimui nuo žemės paviršiaus. Yra skraidymo aparatų ir su 3, 6, 8 ir t. t. varikliais, tačiau pasirinkau būtent šį modelį dėl 4 pagrindinių priežasčių:

- dėl savo vidutinio svorio jis yra gana stabilus vėjuotą dieną;
- teoriškai dar įmanoma sėkmingai nusileisti sugedus vienam elektros varikliui;
- gali pasiekti ganėtinai didelį aukštį;
- nedidelė kaina palyginti su skraidymo aparatais, turinčiais daugiau elektros variklių.

Visi multikopteriai (kvadrakopteriai, trikoperiai, oktokopteriai ir t. t.) dar dažnai vadinami bepiločiais valdymo įrenginiais (angl. *Unmanned Aerial Vehicles*), dronais (angl. *drone*), naudojamas ir trumpinys UAV. 2013 metų rugsėjį į *google* paiešką įvedus anglišką žodžių junginį "Unmanned aerial vehicles" buvo galima rasti 6 milijonus įrašų šia tema ir beveik 12 milijonų įrašų buvo galima rasti įvedus trumpinį UAV. Pasinaudojus "Google Trends" duomenų baze galima rasti informacijos, kad trumpinio UAV vartojimas nuo 2005 iki 2013 metų sumažėjo praktiškai perpus. Tačiau tai nereiškia, kad šiais laikais bepiločių skraidymo įrenginių populiarumas krinta, visa ši statistika yra labai paprastai paaiškinama – bepiločiai skraidymo įrenginiai (UAV) gavo naują pavadinimą – dronai. Žodžio *dronas* vartojimas internete nuo 2005 iki 2013 išaugo net 10 kartų. Maksimali riba buvo pasiekta 2011 gruodį, kai JAV valdžia paprašė Irano valstybės grąžinti prarastą droną (Colomina *et al.* 2014). Šis paprastas tyrimas labai puikiai iliustruoja šiuolaikinį susidomėjimą bepiločiais lėktuvais ir jų tobulinimu.

1 lentelėje matyti, kad susidomėjimas bepiločių lėktuvų tobulinimu nuo 2005 išaugo net 3 kartus. Daugiausiai dronai yra tobulinami siekiant juos pritaikyti komerciniams bei civiliniams tikslams. Pats didžiausias šio tipo tobulinimų augimas pastebimas 2012 ir 2013 metais. Lentelės duomenys pateikti remiantis autorių I. Colomina ir P. Molina (2014) "Science Direct" internetiniame žurnale paskelbtu straipsniu "Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review" (Bepilotės skraidymo sistemos, naudojamos fotogrametrijai ir nuotoliniam atpažinimui: apžvalga).

Metai	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Nuorodos į UAV	544	603	789	974	1190	1244	1424	1581	1708
Gamintojai / tobulintojai	207	252	312	369	422	500	511	478	540
Mokslininkų straipsniai	20	32	34	35	38	36	54	32	48
Gaminančios šalys	43	42	48	48	50	51	51	51	53
Tobulinimo tikslai									
Civiliniai / komerciniai	55	47	61	115	150	171	175	217	247
Kariniai	397	413	491	578	683	631	674	548	564
Keletas tikslų	44	77	117	242	260	283	318	353	392
UAV tyrimas	35	31	46	54	66	66	69	73	78
UAV tobulinimas	219	217	269	293	329	301	310	187	172

1 lentelė. Nuorodų į žodį UAV santykiniai kiekiai 2005 – 2013 m. (Colomina et al. 2014)

1.1. Problemos aktualumas

Šiame magistro darbe daugiausia dėmesio skiriama civiliniam / komerciniam kvadrakopterio tobulinimui. Civilinis / komercinis bepiločių skraidymo sistemų tobulinimas – tai jų pritaikymas fotografijai, valdymo supaprastinimas norint šias miniskraidyklės parduoti kaip pramogos prekę.

Kvadrakopteris turi keturis elektros variklius su ant jų pritaisytais propeleriais. Ši variklio ir propelerio sistema pradėjusi suktis vibruoja ir vibracijos yra perduodamos visiems kvadrakopterio sistemos elementams.

Dėl šių nepageidaujamų vibracijų fotografija naudojant šiuos skraidymo įtaisus tampa tikra kančia. Nuotraukos ir vaizdo įrašai gaunasi "išplaukę" (2 pav.), o tai yra nepriimtina kokybė užsiimant profesionalia fotografija (3 pav.). Norint pagerinti jų kokybę, lieka vienintelė išeitis – vibracijos, kurias sukelia elektros variklio ir propelerio sistema, turi būti sumažintos iki priimtino lygio.



2 pav. Prastos kokybės nuotrauka (Colomina et al. 2014)



3 pav. Geros kokybės nuotrauka (Colomina et al. 2014)

Kvadrakopterių pagrindinis valdymo elementas, be kurio skraidymas dronais būtų neįmanomas, yra mikrovaldiklis, kuris keliasdešimt kartų per sekundę apdoroja iš įvairių jutiklių (giroskopo, akcelerometro, barometro, GPS, ultragarsinio, optinio jutiklių) gaunamus duomenis ir taip atlieka automatines korekcijas ir išlaiko kvadrakopterį stabilų.



4 pav. Arduino uno R3 mikrovaldiklis (Arduino ...)

Jei mikrovaldiklis su visais jame sumontuotais jutikliais yra veikiamas stiprių vibracijų, atsirandančių dėl nesklandaus variklių ir propelerių darbo, visi signalai, siunčiami į mikrovaldiklį, yra iškreipiami (signalo užterštumas) ir drono skrydis tampa labai netolygus, o pats dronas labai sunkiai valdomas. Tokiu bepiločiu lėktuvu tampa labai sunku manevruoti, ir beveik neįmanoma daryti ne tik aukštos kokybės, bet ir žemos kokybės norimas nuotraukas.

1.2. Darbo tikslas ir uždaviniai

Darbo tikslas – ištirti, kaip sukonstruoto kvadrakopterio variklio – propelerio sistemos sukeliamos rėmo pagreičių vibracijos veikia bendros kvadrakopterio sistemos darbą atliekant teorinius ir eksperimentinius tyrimus.

Tikslui pasiekti suformuluoti uždaviniai:

• ištirti kaip ir kokio dydžio pagreičių vibracijos veikia specialiai šiam tyrimui sukonstruoto kvadrakopterio rėmą esant nesubalansuotiems ir subalansuotiems elektros varikliams, bei propeleriams;

- nustatyti triukšmo lygius esant skirtingiems kvadrakopterio variklių sūkiams;
- nustatyti kokią didžiausią keliamąją jėgą gali išvystyti sukonstruotas kvadrakopteris;

 nustatyti kvadrakopterio elektros variklių keliamąją jėgą, sukimo momentą, sukeliamas pagreičių vibracijas ir triukšmo lygius;

• sukurti kvadrakopterio dinaminį modelį;

išvesti kvadrakopterio judėjimo lygtis ir sukurti kvadrakopterio matematinį judėjimo modelį;

 suprogramuoti kvadrakopterio matematinį judėjimo modelį kompiuterine programa, panaudojant realius eksperimentiškai gautus duomenis.

1.3. Bepiločių orlaivių teisinis norminimas JAV

Jungtinėse Amerikos Valstijose bepiločių orlaivių naudojimas jau sukėlė labai daug visuomenės diskusijų. Dėl taip staigiai išaugusio šių skraidyklių naudojimo buvo atkreiptas ir įvairių valstybės institucijų dėmesys.

Dronai buvo pripažinti potencialiai pavojingais įrenginiais ir imtasi kurti taisykles padėsiančias jų naudojimą apriboti.

Ši atsakinga užduotis buvo pavesta organizacijai FAA. Ilgai netrukus buvo priimta keletas ne itin griežtų taisyklių turinčių užkirsti kelią nesaugiam bepiločių orlaivių naudojimui:

negalima skraidyti aukščiau nei 122 metrai ir reikia stengtis visada skraidyti žemiau galimų kliūčių;

 skraidant privaloma visada matyti kur skrenda jūsų valdoma bepilotė skraidyklę, jei tai neįmanoma reikia pasitelkti kitus žmones į pagalbą;

• būtina susisiekti su oro uosto valdyba arba skrydžių valdymo bokštu jei planuojate skraidyti arčiau nei 5 mylių spinduliu nuo oro uosto;

 netrukdyti žmogaus valdomų lėktuvų pilotavimui ir visais įmanomais būdais vengti susidūrimo su šiomis priemonėmis;

• griežtai draudžiama specialiai skraidyti virš žmonių ir kitų žmonių turto neapsaugotų specialiomis priemonėmis;

• niekada neskraidyti arčiau nei 6 m atstumu nuo kitų žmonių arba jų turto;

• neskraidyti arčiau nei 2 jūrmylės iki sraigtasparnio pakilimo platformų arba skraidymo renginių apie kuriuos yra viešai pranešta;

- neskraidyti didelio vėjo bei sumažinto matomumo sąlygomis;
- neskraidyti apsvaigus nuo alkoholio arba narkotinių medžiagų;
- drono valdytojas turi susipažinęs su drono valdymu;

• neskraidyti virš pavojingais pripažintų objektų (elektrinių, stipriai apkrautų kelių, savivaldybės pastatų);

• sužinoti ir laikytis visų vietinių taisyklių ir apribojimų planuojant skraidyti virš privačios teritorijos;

 draudžiama įrašinėti tiek vaizdo tiek garso įrašus kuriuose dalyvauja žmonės kurie nėra informuoti apie daromus įrašus.

Šios taisyklės yra taikomos visoms bepilotėms skraidyklėms kurios sveria iki 25 kilogramų.

Visai nesenai JAV žiniasklaidoje buvo paskelbtas straipsnis kuriame buvo rašoma, jog Prezidentas Barakas Obama susidūrė su netinkamu dronų panaudojimo atveju. Baltųjų Rūmų pievelėje nutūpė dronas. Šios bepilotės skraidyklės nesugebėjo suvaldyti vienos Vyriausybės žvalgybos įstaigos pareigūnas. Šis incidentas sukėlė aršias diskusijas apie dronų keliama pavojų Baltiesiems Rūmams. Kitą dieną Prezidentas Barakas Obama Memorandume pareiškė, kad JAV turi dar griežčiau sureguliuoti dronų naudojimo tvarką, nustatydama didesnius privatumo apsaugos standartus ir juos tikrinti kas trejus metus.

1.4. Dronų naudojimas Europoje ir Lietuvoje

Lietuvoje dronų panaudojimą riboja įsakymas "Dėl bepiločių orlaivių naudojimo taisyklių patvirtinimo (http://www3.lrs.lt/). Apribojimų turinys:

Vykdyti skrydžius bepiločiu orlaiviu Lietuvos Respublikos oro erdvėje galima laikantis šių bendrųjų bepiločių orlaivių naudojimo taisyklių:

• teritorijoje, kurioje tokių skrydžių nedraudžia vietos savivaldybė ir jie vykdomi laikantis nustatytų sąlygų bei reikalavimų (jeigu jos nustatytos);

matant vizualiai, įžiūrint jo skrydžio kryptį ir padėtį, ir bet kokiais atvejais ne toliau kaip
 1000 m nuo fizinės valdytojo buvimo vietos;

 išlaikant minimalų 50 metrų atstumą nuo visų rūšių transporto priemonių, statinių ir pašalinių žmonių;

• už miestų ir miestelių tankiai gyvenamų rajonų arba žmonių sambūrio atvirose vietose ribų.

Bepiločių orlaivių skrydžiai, negavus atskiro oro eismo paslaugų teikėjo leidimo, draudžiami valdomos oro erdvės dalyje, esančioje:

arčiau kaip 1 jūrmylės (apie 1.8 km) spinduliu nuo Lietuvos Respublikos tarptautinių
 Vilniaus, Kauno, Palangos ir Šiaulių oro uostų aerodromų kontrolinių taškų (toliau – kontroliniai taškai)
 neatsižvelgiant į skrydžio aukštį;

1 – 3 jūrmylių spinduliu (apie 5.4 km) nuo kontrolinių taškų virš šalia esančių kliūčių (medžių, statinių, reljefo elementų, elektros laidų, įrenginių ir kt.);

 toliau kaip 3 jūrmylių spinduliu nuo kontrolinių taškų aukščiau 200 pėdų (apie 60 metrų) nuo žemės paviršiaus.

 Šių taisyklių 11 punkte bepiločių orlaivių skrydžiams apribotų valdomos oro erdvės dalių žemėlapiai pateikti šių taisyklių 1 – 4 prieduose.

Bepiločių orlaivių skrydžiai nevaldomoje oro erdvėje draudžiami:

virš 400 pėdų (apie 120 metrų) nuo žemės paviršiaus, išskyrus atvejus, kai gautas išankstinis
 CAA leidimas ir tie skrydžiai vykdomi laikantis leidime nustatytų sąlygų;

• Lietuvos Respublikos aerodromų oro eismo zonose (vertikaliose ir horizontaliose ribose), išskyrus atvejus, jei yra gautas aerodromo naudotojo raštiškas sutikimas ir laikomasi aerodromo naudotojo nustatytų sąlygų.

• Pilotuojamas orlaivis visada turi pirmenybę prieš bepilotį orlaivį. Bepiločiu orlaiviu draudžiama skristi ir kelti pavojų kylantiems ir tūpiantiems orlaiviams.

• Daiktai, įvairios medžiagos arba skysčiai gali būti išmetami arba purškiami iš skrendančio bepiločio orlaivio tik laikantis CAA nustatytų sąlygų.

• Specialios veiklos oro erdvėje vykdyti skrydžius bepiločiais orlaiviais galima tik gavus šios oro erdvės naudotojo atitinkamą leidimą.

• Prieš skrydį bepiločio orlaivio valdytojas privalo susipažinti su visa skrydžių saugos informacija, teisės aktų reikalavimais, vietos savivaldybės reikalavimais, meteorologine situacija (prireikus ir prognoze).

• Jeigu skrydžio metu bepiločio orlaivio valdytojas netenka galimybės valdyti orlaivį (parandama orlaivio valdymo kontrolė) ir pastarasis išskrenda iš orlaivio valdytojo vizualaus apžvalgos lauko ribų, apie tai būtina nedelsiant telefonu informuoti artimiausią skrydžių valdymo centrą, kurio telefonai skelbiami CAA interneto svetainėje. Pranešime būtina pateikti šią informaciją: orlaivio valdytojo vardas ir pavardė, vieta, kurioje prarasta orlaivio valdymo kontrolė, orlaivio skrydžio aukštis bei skrydžio kryptis.

2. MOKSLINIŲ DARBŲ APŽVALGA

2.1. Donald Norris eksperimento metodika ir naudoti prietaisai

Donald Norris savo 2014 metų straipsnyje aprašė drono variklio keliamosios jėgos tyrimą. Tyrėjas panaudojo svarstyklių principą (5 pav.).



5 pav. Donald Norris eksperimento schema (Norris 2014)

Kylant varikliui sukuriama kėlimo jėga (angl. *thrust force*) kuri per svirties sistemą slegia elektronines svarstykles, o jos tiesiogiai rodo kėlimo jėgą. Tikrasis stendo modelis (6 pav.) buvo pagamintas iš klevo, nes jis yra ganėtai stiprus ir labai lengvai formuojamas. Ašis pagaminta iš plieninės vinies, laikikliai pagaminti iš akrilo.



6 pav. Tyrimo stendas (Norris 2014)

Tiriamojo variklio modelis yra A2212/13T, jį valdo 25 amperų "Turnigy" firmos elektroninis greičio valdiklis. Visa projekto elektrinė schema (7 pav.) valdoma programa, kuri vadinama "ESC Motor Control Demo". Projekto įranga semiasi energijos iš LiPo 3S 5000 mAh talpos baterijos. Kaip teigia autorius, ši baterija turi netgi daugiau energijos nei reikia šiam eksperimentui. 7 pav. nepavaizduota nešiojamojo kompiuterio, kuris turi būti jungiamas prie pagrindinės variklių valdymo plokštės per laidą su USB jungtimi.



7 pav. Eksperimentinės schemos vizualizavimas (Norris 2014)

Variklio sūkiai buvo matuojami optiniu tachometru (8 pav.).



8 pav. Optinis tachometras

Eksperimentas pradedamas įkeliant "ESC Motor Control Demo" programos programinį kodą į pagrindinį valdymo bloką. Eksperimento elektrinė schema turi būti sujungta būtent taip, kaip pavaizduota 9 pav. USB kabelis yra jungiamas prie nešiojamojo kompiuterio, kuriame yra atidaryta "Parallax Serial Terminal (PSerT)" programa. Naudojant šią programą, galima valdyti variklio sukimosi greitį. Valdymas yra labai paprastas, tiesiog reikia įrašyti skaičių nuo 1 iki 8 ir greitis automatiškai keičiasi atitinkamai nuo 0 % iki 100 % nuo maksimalaus sukimosi greičio.



9 pav. Eksperimento elektrinė schema (Norris 2014)

Eksperimento tyrimo rezultatai

Autorius (Norris 2014) kėlimo jėgą išmatavo tik esant 5 pajėgumo lygiui, tai atitiktų 62,5 % nuo viso variklio sukimosi greičio. Saugiai matuoti esant didesniems sūkiams buvo neįmanoma, nes variklio – propelerio sistemos sukeliamos vibracijos taip padidėjo, kad buvo nuspręsta, jog eksperimento toliau tęsti nėra gana saugu. Taipogi buvo pastebėta, kad eksperimento metu iš akrilo pagaminta svirtelė išlinksta, tačiau autorius nemano, kad tai galėjo turėti įtakos eksperimento rezultatams. T1– signalo impulso trukmė, T2 – laikas tarp signalo impulsų. Eksperimento rezultatai pateikiami 2 lentelėje.

Pajėgumo lygis	T1 (ms)	T2 (ms)	Sūkiai aps/min	Keliamumas (kg)	Srovė (A)	Įtampa (V, DC)	Galia (W)
0	1,000	21,02	0	0	0.020	12,56	0,25
1	1,125	21,12	1140	0,05	0.23	12,56	3,01
2	1,250	21,22	3450	0,168	1.76	12,53	20,05
3	1,375	21,38	4710	0,343	4.08	12,44	50,76
4	1,500	21,48	6030	0,631	8.35	12,35	103,12
5	1,625	21,58	7020	Х	Х	Х	Х
6	1,750	21,74	Х	Х	Х	Х	Х
7	1,875	21,84	Х	Х	X	Х	X
8	2,000	22,00	Х	Х	Х	X	Х

2 lentelė. Donald Norris eksperimento duomenys (Norris 2014)

Lentelėje "X" ženklais pažymėti langeliai žymi matavimus, kurie nebuvo atlikti dėl per didelių vibracijų ir matavimo prietaisų skalės nepakankamumo.

Iš 3 lentelėje pateiktų duomenų galima matyti, kad dirbdamas maksimaliu pajėgumu kvadrakopteris ore galėtų išsilaikyti vos 5 minutes. Autoriaus teigimu, jo kvadrakopteris su baterija sveria maždaug 1400 gramų, taigi jis net nepakiltų nuo žemės, kol propeleriai nesisuktų bent 4800 aps/min. Tai reikštų, kad šis kvadrakopteris gali skraidyti apie 15 min. Šie skaičiavimai puikiai atitinka realius autoriaus bandymus. Taigi pridėjus dar porą šimtų gramų (kamera, jutikliai ir t. t.) neverta tikėtis daugiau nei 10–12 minučių skrydžio laiko, turint omenyje, kad skraidyti reikėtų labai ramiai.

3 lentelė. Kvadrakopterio 4 variklių darbo parametrai (Norris 2014)

Sūkiai aps/min	Galia (W)	Įtampa (V, DC)	Srovė (A)	Laikas (min)	4 variklių keliamumas (kg)
0	1	12,56	0,08	n/a	n/a
1140	12,04	12,56	0,92	263,8	0,200
3450	80,2	12,53	7,04	39,5	0,672
4710	203,04	12,44	16,32	15,4	1,372
6030	412,48	12,35	33,4	7,6	2,524

2.2. L. Reitsma eksperimento metodika ir naudoti prietaisai

L. Reitsma (2012) tiria mikrokvadrakopterių vibracijas. Autoriaus teigimu dideliuose rotoriniuose prietaisuose gali būti naudojami aukštesnio lygio, daugiau valdymo blokų turintys giroskopai. Mažuose kvadrakopteriuose svoris yra pats svarbiausias aspektas, todėl ten naudojami patys paprasčiausi giroskopai. Šių giroskopų (10 pav.) pagrindiniai privalumai:

- jie yra labai lengvi,
- dėl paprastos konstrukcijos jie yra labai patikimi,
- dėl paprastos konstrukcijos jie yra ganėtinai pigūs.



10 pav. Giroskopas

Pagrindinis trūkumas – jie labai jautrūs vibracijai.

Straipsnyje rašoma, jog šio tyrimo tikslas yra ištirti ar putų polistirenas yra tinkama medžiaga kvadrakopterio vibracijoms slopinti. Putų polistirenas yra gerai žinomas žemo dažnio virpesių slopintuvas, tačiau kvadrakopterio bešepetėlių variklių sukuriamos vibracijos yra aukšto dažnio. Todėl ši medžiaga teoriškai turėtų būti netinkama šioje situacijoje.

Autorius (Reitsma 2012) pamini, kad dronų su keturiais rotoriniais varikliais sistema yra gera tuo, kad varikliai yra įtvirtinti nejudamai ir juos visiškai galima kontroliuoti elektriniais valdymo signalais. Daug sudėtingiau valdyti vieno elektros variklio varomą skraidymo įrenginį – jam kontroliuoti turi būti sukurta sudėtinga hibridinė (pusiau mechaninė, pusiau elektrinė) valdymo sistema.

Eksperimentui naudojamas nežinomos firmos radijo bangomis valdomas kvadrakopteris (11 pav.), "BASIC Stamp2p" modelio mikrovaldiklis ir "MEMSIC 2125" dviejų ašių išorinis akcelerometras. Visi šie elementai tarpusavyje sujungti naudojant specialią prototipavimo lentelę (lentelė su daug kiaurymių – ją naudojant nereikia lituoti laidų, todėl taip labai pagreitinamas prototipavimo procesas).



11 pav. Radijo bangomis valdomas kvadrakopteris (Reitsma 2012)

Vienu atveju kvadrakopterio valdymo blokas buvo montuojamas tiesiai ant tyrimo platformos, kitu – ant 3 cm pločio 4 cm ilgio ir 1 cm aukščio putų polistireno gabalėlio, pritvirtinto prie tyrimo platformos. Mikrovaldikliu buvo valdomi variklių sūkiai ir abiem atvejais buvo saugomi akcelerometro rodmenys. Kompiuterinėje programoje buvo nurodyta saugoti duomenis esant 50–100 % variklių galingumui. Iš viso buvo atlikta 50 iteracijų esant kiekvienai variklio galingumo stadijai. Duomenys esant mažesniam nei 50 % galingumui nebuvo saugojami todėl, kad kvadrakopteris esant tokiems parametrams dar net negali atsiplėšti nuo žemės paviršiaus.

Tyrimo rezultatai

Atlikus eksperimentą buvo nustatyta, jog putų polistirenas 53 % procentais sumažina pagreičio vertes pagal y ašį ir 61 % – pagal x ašį. Apdorojus rezultatus, gautus naudojant ir nenaudojant putų polistireno, buvo nubraižytas grafikas (12 pav.).



12 pav. Grafinis rezultatų pateikimas (Reitsma 2012)

Nors putų polistirenas buvo sukurtas naudoti didesnio mastelio įrenginiuose, jis taip pat puikiai tinka ir mažuose įrenginiuose naudojamiems jutikliams izoliuoti nuo vibracijos. Tai yra labai pigi, efektyvi ir lengva vibracijų neutralizavimo priemonė. Putų polistirenu izoliuojant kvadrakopterio

valdiklį, sumažinamas korekcijų skaičius kurias reikia padaryti mikrovaldikliui ir taip pagerinamas paties kvadrakopterio valdymas – jis daug greičiau reaguoja į komandas (Reitsma 2012)

2.3. G. N. M. Plasencia et al. eksperimento metodika ir naudoti prietaisai

G. N. M. Plasencia *et al.* (2012) straipsnyje "Modelling and Analysis of Vibrations in an UAV Helicopter with a Vision system" tiria, kurie elektrinio sraigtasparnio modelio mazgai sukelia didžiausias vibracijas ir mėgina sukurti sistemą, kuri jas nuslopintų. Autoriai planuoja savo sraigtasparnyje sumontuoti kamerą, kuri atpažins aplinką, ir remiantis šia informacija valdyti kvadrakopterį. Jeigu kamerai bus perduodamos vibracijos, sraigtasparnio valdymas pasitelkiant vaizdinę medžiagą bus neįmanomas.

Kaip teigia autoriai (Plasencia *et al.* 2012), vibracijų modeliavimas rotorinėse skraidymo platformose yra labai sudėtingas dalykas. Labai sunku nustatyti, kas sukelia šias vibracijas. Tai gali būti ir pagrindinis propeleris, elektros variklis ir uodegos propeleris. Taip pat reikia tobulai išmanyti visus dinaminius procesus, vykstančius tarp rėmo ir visų jau anksčiau išvardytų vibracijų elementų.

Eksperimento platformos modelis nėra pažymėtas, tačiau pateikta eksperimentinės platformos nuotrauka (13 pav.)



13 pav. ULL laboratorijos eksperimentinis sraigtasparnio modelis (Plasencia et al. 2012)

Šio modelio išmatuoti parametrai pateikiami 4 lentelėje.

Parametrai	Simbolis	Reikšmė
Fiuzeliažo masė	M_{f}	2,428 (kg)
Pagrindinio propelerio masė	Mb	0,121 (kg)
Elevatoriaus masė	M _{el}	0.041 (kg)
Uodegos propelerio masė	Mt	0,00441 (kg)

4 lentelė. Pagrindiniai sraigtasparnio parametrai (Plasencia et al. 2012)

4 lentelės pabaiga

Vertikalus atstumas nuo fiuzeliažo iki pagrindinio propelerio	h	0,105 (m)
Pagrindinio propelerio sparnų ilgis	Ι	0,55 (m)
Uodegos propelerio sparnų ilgis	It	0,08 (m)
Pagrindinio propelerio kampinis greitis	W	177,93 (rad/s)
Uodegos propelerio kampinis greitis	Wt	889,65 (rad/s)

Modeliavimas buvo atliekamas modeliavimo programa "VehicleSim". Ši programa suteikia galimybę eksportuoti duomenis į:

- *Rich Text Format* tipo failą;
- C programavimo kalba parašytą programą;
- *M-file* tipo failą, kuris gali būti atidaromas su MATLAB programa.

Tyriant buvo priimta, kad elektros variklio sūkiai yra 1700 rpm (apsisukimai per minutę). Fiuzeliažas turi 6 laisvės laipsnius: išilginį, šoninį ir vertikalų palei atitinkamai X, Y, Z ašis ir sukimasis apie tas pačias ašis. Modeliuojant "VehicleSim" programa gravitacinės jėgos buvo išjungtos nes tyrėjus domino tik atskirų sraigtasparnio elementų tarpusavio sąveika, o ne sąveika su išoriniais veiksniais.

Tyrimo rezultatai

Modeliuodami "VehicleSim" programa autoriai (Plasencia *et al.* 2012) pastebėjo, kad vibracijos susidaro X, Y ir Z ašių kryptimis. Eksperimento etapai truko po 5 sekundes. Eksperimento metu gauti rezultatai (laikas, fiuzeliažo poslinkiai ir akceleracijos) buvo apdoroti Greitosios Furjė transformacijos "Matlab" programos algoritmu. Buvo pastebėta, kad didžiausi poslinkiai X ašies atžvilgiu yra, kai virpesių dažnis f = 28,32 Hz, (177,93 rad/s). Šituo galima įsitikinti iš grafiko (14 pav.)



14 pav. Poslinkių priklausomybė nuo vibracijų dažnio x ašies atžvilgiu (Plasencia et al. 2012)

Straipsnyje pateikiamas grafikas (15 pav.), kuriame matoma, kad didžiausi fiuzeliažo poslinkiai Z ašies kryptimi yra tada, kai vipesių dažniai yra 16,36 Hz (102,79 rad/s) ir 28,32 Hz (177,93 rad/s).



15 pav. Poslinkių priklausomybė nuo vibracijų dažnio z ašies atžvilgiu (Plasencia et al. 2012)

Buvo rasti du amplitudiniai fiuzeliažo poslinkiai. Jie abu yra panašaus dydžio. Nustatyta, kad vibracijos labai priklauso nuo pagrindinio ir pagalbinio propelerių formos. Antras didžiausias vibracijų šaltinis – tai pagrindinis propeleris ir jo masių disbalansas (jis sukelia išilgines vibracijas). Remdamiesi šiomis reikšmėmis, autoriai sukūrė virpesių slopinimo sistemą, kuri neutralizuoja didžiąją dalį visų virpesių. Buvo nustatyta, kad vibracijos labai kenkia ant sraigtasparnio pritvirtintos kameros vaizdui, o tuo pačiu ir aplinkos pažinimo programos darbui.

2.4. Jizhou Lai et al. eksperimento metodika

Ketvirtasis eksperimentas buvo aprašytas autorių Jizhou *et al.* (2012) straipsnyje. Aprašoma pati populiariausia bepiločių skraidymo aparatų, dažnai vadinamų dronais valdymo sistema SINS. Taip pat atliekamas tyrimas, kurio metu nustatoma, kaip vibracijos veikia šios sistemos tikslumą.

SINS – tai labai patikima ir tiksli sistema, kuri naudodama jutiklius (giroskopus, akcelerometrus, barometrus, atstumo jutiklius ir t. t.) nustato drono padėtį erdvėje, judėjimo greitį, aukštį. Visa ši sistema yra sumontuota ant paties drono rėmo. Jos šerdis yra mikrovaldiklis, kuris apdorodamas jutiklių jam siunčiamus signalus sugeneruoja variklių valdymo signalą ir taip koreguoja kvadrakopterio elektros variklių sūkius. Kvadrakopteris yra visiškai nestabili sistema, tačiau panaudojus mikrovaldiklius (kurie sugeba žaibiškai perduoti ir apdoroti informaciją) jos valdymą galima labai stipriai supaprastinti. Be mikrovaldiklių skraidymas kvadrakopteriu būtų praktiškai neįmanomas.

Pagrindinis SINS sistemos elementas yra IMU. Kadangi jis yra montuojamas tiesiai ant kvadrakopterio rėmo, tai pašalinės vibracijos, kurios atsiranda dėl pašalinių išorinės aplinkos veiksnių, labai smarkiai kenkia kvadrakopterio valdymo tikslumui.

Siekiant sumažinti šiuos valdymo algoritmo netikslumus (angl. *errors*), yra naudojami specialūs virpesių slopintuvai. Deja, kai kurie kvadrakopterių modeliai yra per maži, kad galėtume juose panaudoti slopintuvus, todėl tikslumas gali būti tobulinamas tik pasitelkiant programinį šios sistemos valdymą.

Autorių teigimu, pagrindiniai du būdai, kaip SINS sistemą pasiekia vibracijos, tai triukšmas, kuris iškreipia akcelerometrų ir giroskopų parametrus, ir vibracijos, sukeliamos išorinių aplinkos veiksnių.

Savo straipsnyje autoriai aprašo du pagrindinius kvadrakopterių valdymo algoritmus: vieno bandinio algoritmas ir kelių bandinių algoritmas. Abiem atvejais vibracijos pasiskirsto pagal sinusoidės funkciją. Taip pat pateikiamas matematinis kvadrakopterio modelis ir su juo atliekamos simuliacijos. Matematinio modelio šiame magistro darbe neaprašinėsiu, bet pateiksiu autorių gautus grafinius rezultatus (16, 17 pav.).



16 pav. Pasvirimo kampų apie pagrindines X, Y, Z ašis sklaida naudojant vieno bandinio algoritmą (Jizhou *et al.* 2012)



17 pav. Pasvirimo kampų apie pagrindines X, Y, Z ašis sklaida naudojant keturių bandinių algoritmą (Jizhou *et al.* 2012)

Kaip matoma, abu grafikai yra identiški – sklaida abiem atvejais nepasikeitė. Todėl galima drąsiai daryti išvadas, jog 4 bandinių algoritmas, kad ir daug sudėtingesnis, bet neteikia jokios realios naudos. Taigi šis algoritmas neturi jokių netikslumų kompensacinių savybių.

Atlikę teorinę analizę ir simuliaciją autoriai pateikia tris pagrindines išvadas:

 tikruosius duomenis iškreipiantys trikdžiai pasireiškia periodiškai kaip vieno laisvės laipsnio sinusoidinės vibracijos. Aukščio duomenų trikdžiai palyginti su pasvirimo kampų trikdžiais yra labai maži ir į juos galime nekreipti dėmesio;

 aukščio duomenų trikdžiai atsiranda dėl, nenuspėjamo aplinkos veiksnių poveikio ir giroskopo užteršimo pašalinėmis vibracijomis; kelių bandinių valdymo algoritmas nėra tinkamas kvadrakopterio valdymui. Jis yra sudėtingesnis, tačiau neteikia jokios realios naudos.

2.5. Autorių gautų rezultatų lyginamoji analizė

Dronai šiais laikas tebėra naujovė. Žmonija dar tik susipažįsta su šios technologijos pranašumais ir galimu pritaikymu žmonijos reikmių tenkinimui. Pastaraisiais metais straipsnių šia tema parašyta labai daug, tačiau dar likę ir daugybė nepaliestų arba mažai paliestų temų. Kvadrakopterių vibracijų, triukšmo lygio tyrimai viena iš tokių temų. Patikimos informacijos šiomis temomis yra labai mažai nedaug.

Visi mano nagrinėtų straipsnių autoriai tyrė skirtingo modelio, galingumo, masės ir net konfigūracijos dronus. Tiriami parametrai dauguma atvejų taip pat buvo labai skirtingi. Kadangi jų biudžetas pastebimai skyrėsi tai ir jų atlikti eksperimentai yra labai skirtingo lygio bei patikimumo. Be abejonės geriausiai pasirodė ULL universiteto mokslininkų komanda.

Kaip ir tikėtasi visi jie nustatė, kad didžiausias vibracijas sukelia kvadrakopterio varomoji sistema – elektros varikliai ir propeleriai. Šios vibracijos labai stipriai kenkia kvadrakopterio valdymo tikslumui. Didžioji šių vibracijų dalis turėtų atsirasti dėl nenuspėjamų aplinkos veiksnių, tačiau ištirti vibracijas beorėje erdvėje yra neįmanomas dalykas, taigi ir tikslių eksperimento duomenų šia tema gauti neįmanoma. Visų autorių grafiškai pateiktus duomenis labai sunku palyginti, nes jie vibracijas tyrė atsižvelgdami į konkretų, sau išsikeltą tikslą.

Pirmo straipsnio autoriui (Norris 2012) vibracijos buvo net ne tyrimo objektas, o netikėtai iškilusi kliūtis – dėl didelės variklio ir propelerio sistemos vibracijos autorius nebegalėjo tęsti savo eksperimento ir daug duomenų liko neišmatuota.

Antrojo straipsnio autoriaus (Reitsma 2012) tikslas buvo patikrinti ar putų polistirenas yra tinkamas vibracijų izoliatorius. Akcelerometrų išmatuoti rėmo poslinkiai pagal pagrindines X, Y ir Z ašis, prieš ir po izoliacinės medžiagos panaudojimo.

Tiksliausiai vibracijas išmatavo trečiojo straipsnio mokslininkų komanda (Plasencia *et al.* 2012). Jiems reikėjo konkrečių tam tikro dažnio vibracijų sukeliamų poslinkių reikšmių, nes jų tikslas buvo sukurti išmanų prietaisą slopinantį šias vibracijas. Prietaiso veikimo principas tai tokio pačio dažnio, bet priešingos poslinkio krypties vibracijų sukūrimas tam tikru laiko momentu, kuris ir eliminuoja natūralias vibracijas sukeliamas bepiločio lėktuvo propelerių ir elektros variklio.

Paskutiniame straipsnyje (Jizhou *et al.* 2012) sukurtas teorinis kvadrakopterio modelis ir jį naudojant atlikta simuliacija. Nustatyta, jog sudėtingesnis kvadrakopterio valdymo algoritmas neteikia jokios realios naudos, todėl jį naudoti labai neefektyvų.

Labai skyrėsi ir jų matavimų metodikos. Vieni eksperimentus atliko tik modeliavimo aplinkoje. Tokiu atveju absoliučiai visi veiksniai gali būti kontroliuojami, o nepageidaujami veiksniai netgi pašalinami. Kiti viską darė realiomis patalpos ar lauko sąlygomis, kas lėmė visai kitokius rezultatus, jų eksperimentų rezultatams įtaką darė tiek gravitacinė ir aplinkos oro pasipriešinimo jėga, tiek veiksniai apie kuriuos nė nebuvo pagalvota. Jie negalėjo kontroliuoti visų veiksnių taip kaip, kad teorinio modeliavimo metodu.

3. KVADRAKOPTERIO EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

3.1. Sukonstruoto kvadrakopterio elementai

Įvertinus visas būtinas parinkimo taisykles, buvo parinkti kvadrakopterio elementai. Kadangi kvadrakopterio gamyba nėra prioritetinis veiksnys, mano magistro darbe visi elementai bus pirkti ir nė vienas negaminamas. Šis kvadrakopteris man yra pirmas, todėl parenkami elementai yra patys paprasčiausi. Taip kils mažiau papildomų problemų jį surenkant.

Elektros varikliai

Parinkti 4 modelio NTM Prop Series 28-26 1100kV 252W bešepetėliai varikliai (18 pav.).



18 pav. DJI 2212 modelio varikliai (Hobbyking...)

Vieno variklio specifikacijos:

- Kv reitingas (sūkiai per minutę/V): 1100;
- maksimali galia (W): 252;
- masė (g): 54;
- be ašies;
- maksimali srovė (A): 20.

Gamintojų teigimu, su šiuo varikliu naudojant 8 x 4 (coliais) propelerį ir 3 celių (11,1 V) bateriją jis išvysto 0,54 kg keliamąją galią. Naudojant 9 x 6 (coliais) propelerį – 1,05 kg keliamąją jėgą.

Naudojant 8 x 4 (coliais) propelerį ir 4 celių (14,8 V) bateriją, variklis išvysto 0,82 kg keliamąją jėgą. Su 9 x 6 (coliais) propeleriu 1,05 kg keliamąją jėgą.

Propeleriai

Parinkti 2 CCW ir 2 CW 1045 modelio propeleriai (19 pav.).



19 pav. *Hobbyking* 8 x 4,5 modelio propeleriai (*Hobbyking*...)

Vieno propelerio specifikacijos:

- medžiaga: plastmasė;
- matmenys: 8 x 4,5 (coliais);
- svoris: 20 g

Elektroniniai greičio valdikliai

Parinkti 4 modelio DYS SimonK 30 A elektroniniai greičio valdikliai (20 pav.).



20 pav. DYS SimonK 30 A modelio ESC (Hobbyking...)

Visi valdikliai turi BEC jungtį. Vieno valdiklio specifikacijos:

- darbinio veikimo srovė: 30 A;
- išėjimo srovė: pastovi 30 A, impulsinė 40 A ne daugiau nei 10 sekundžių;
- įėjimo įtampa: DC 6 16,8 V (2S 4S ličio polimerų baterija);
- BEC išvadas: 5V 2A;
- dydis 46 mm (ilgis), 26 mm (plotis), 11 mm (ilgis);
- svoris: 23 g;
- suinstaliuotas *SimonK* programine įranga.

Rėmas

Parinktas Q450 modelio rėmas (21 pav.).



41 pav. Q450 modelio rėmas (Hobbyking...)

Rėmo svoris 270 gramų, plotis 450 mm, aukštis 55 mm.

Skrydžio valdiklis

Parinktas KK2.1.5 modelio skrydžio valdiklis (22 pav.).



22 pav. KK2.1.5 modelio mikrovaldiklis (Hobbyking...)

Skrydžio valdiklio KK2.1.5 pagrindiniai parametrai:

- dydis: 50,5 mm (plotis) x 50,5 mm (ilgis) x 12 mm (storis);
- svoris: 21 gramas (su pjezo-šnypštuku);
- mikrovaldiklis, naudojamas plokštėje: Atmega 644 PA;
- giroskopas / akceleratorius: 6050MPU InvenSense Inc;
- automatinis lygio palaikymas: yra;
- įėjimo įtampa: 4,8–6V;
- jungtys: standartinės 6 pin;
- apdorojamas siųstuvo signalas: 1520 us (5 kanalai);
- į ESC siunčiamas signalas: 1520 us.

Baterija

Parinkta Turnigy 5000 mAh 4S 40C modelio baterija.



23 pav. Turnigy 5000 mAh 4S 40C modelio baterija (Hobbyking...)

Baterijos specifikacijos:

- minimali baterijos talpa: 5000 mAh;
- konfigūracija: 4S1P / 14,8 V / 4 Cell;
- pastovaus išsikrovimo reitingas: 40 C;
- maksimalus išsikrovimo reitingas (10 sec): 50 C;
- svoris: 578 g;
- įkrovimo jungtis: JST XH;
- matmenys: 149 mm (ilgis), 37 mm (plotis), 49 mm (storis);
- maksimalus įkrovimo reitingas: 5 C.

Siųstuvas ir imtuvas

Parinktas *Turnigy 9X 9Ch* modelio siųstuvas ir tos pačios firmos 8Ch 9X8C modelio imtuvas (24 pav.).



24 pav. Turnigy 9X 9Ch imtuvas ir 8Ch 9X8C modelio siųstuvas (Hobbyking ...)

Radijo aparatūros charakteristikų nepateikinėsiu, nes jos nėra esminės kvadrakopterio sąveikos su aplinkos oru hidrodinaminių procesų modeliavimo ir tyrimo magistriniame darbe.



3.2. Sukonstruoto tyrimo objekto vaizdas

25 pav. Sukonstruotas bepilotis orlaivis

3.3. Tiriamoms objekto savybėms įtakos turintys veiksniai

Kaip jau anksčiau buvo minėta šio tyrimo pagrindinis tikslas yra ištirti kokio dydžio vibracijos veikia kvadrakopterio kamerą, bei pagrindinę valdymo plokštę. Kaip ir pradžioje buvo manyta, o nagrinėti straipsniai tai tik patvirtino, kvadrakopterio vibracijas sukeliantys elementai yra:

- elektros varikliai;
- propeleriai;
- oro pasipriešinimo jėga;
- netobula rėmo konstrukcija;
- netobula variklių tvirtinimo mazgų konstrukcija.

Natūralu, kad elektros varikliai sukdamiesi sukelia tam tikras vibracijas. Šios vibracijos atsiranda dėl variklių disbalanso. Kuo didesni sūkiai tuo labiau jaučiamos vibracijos. Su ant variklių pritvirtintais propeleriais lygiai ta pati situacija.

Dėl oro pasipriešinimo ir gravitacijos jėgų oras propeleriais stumdomas porcijomis. Taigi kvadrakopteris realiai kyla ir leidžiasi labai netolygiai. Žinoma visi šie procesai vyksta labai greitai, todėl plika žmogaus akimi to pamatyti neįmanoma, tačiau teoriniame lygmenyje galima numatyti, kad tai vyksta.

Jei rėmas ar variklių tvirtinimai yra pagaminti nekokybiškai. Tarp kvadrakopterio komponentų atsiranda nepageidaujamas laisvumas. Nepageidaujamas laisvumas gali sukelti vibracijas.

3.4. Eksperimento įranga

Variklių traukos testavimo stendas

Variklių traukos testavimo stendo prijungimo schema (25 pav.):



25 pav. Variklių testavimo stendo prijungimo schema

Norint sukonstruoti variklių testavimo stendą reikia: baterijos, galios matuoklio, elektroninio greičio reguliatoriaus, bešepetėlinio pastovios srovės variklio, personalinio kompiuterio kuriuo būtų galima programuoti arduino mikrovaldiklį, arduino mikrovaldiklio, fotorezistoriaus, šviesos šaltinio, laidų, bei laidų antgalių. Sukonstruoto stendo vaizdas pateikiamas 26 pav.



26 pav. Variklio traukos bandymų stendas

Kinematinė traukos stendo schema (27 pav.) ir rezultatų apdorojimo formulės:



27 pav. Kinematinė traukos stendo schema

Remdamiesi 27 pav. pateikta kinematine schema galime išvesti variklio traukos jėgos skaičiavimo formulę:

Momentų suma apie tvirtinimo tašką A turi būti lygi 0:

$$\sum M_A = 0; \tag{1}$$

$$0 = -F_{k} \cdot H + RB_{v} \cdot L; \tag{2}$$

Iš to matyti, kad variklio traukos jėga apskaičiuojama pagal formulę:

$$F_{k} = \left(\frac{L}{H}\right) \cdot RB_{y}.$$
(3)

Dydis RBy išmatuojamas naudojant elektronines svarstykles. Jo dimensija yra gramai. Norint šį dydį paversti į jėgą reikia svarstyklių rodmenis padauginti iš $9,81 \cdot 10^{-3} m/s^2$. Išmatuoti dydžiai L = 0,28 m., H = 0,33 m. Todėl:

$$F_{k} = \left(\frac{0,28}{0,33}\right) \cdot RB_{y} \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}.$$
(4)

Variklių sukimo momento testavimo stendas



28 pav. Variklio sukimo momento testavimo stendas

Variklių sukimo momento testavimo stendo prijungimo schema yra tokia pati, kaip ir variklių traukos bandymų stendo schema.

Kinematinė sukimo momento stendo schema (29 pav.) ir rezultatų apdorojimo formulės:



29 pav. Sukimo momento stendo kinematinė schema

Iš 29 pav. pateiktos kinematinės schemos matome jog variklio sukimo momentą (τ) galime gauti dydį kurį rodo elektroninės svarstyklės *RBy* padauginę iš atstumo kuris yra tarp variklio centro ir ašelės kuri remiasi į svarstykles.

Momentų suma apie tvirtinimo tašką A turi būti lygi 0:

$$\sum M_A = 0; \tag{5}$$

$$0 = -\tau + (RB_{y} \cdot L); \tag{6}$$

Iš to matyti, kad variklio sukimo momentas τ apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\tau = RB_{v} \cdot L; \tag{7}$$

Išmatuotas ilgis L = 0,09 m, todėl:

$$\tau = 0,09RB_{\rm w} \cdot 9,81 \cdot 10^{-3};\tag{8}$$

Garso lygio matavimo programa

Garso lygiui matuoti naudojamas mobilusis telefonas *samsung galaxy note 3* su specialia garso lygio matavimo programa – "Sound meter": Šios programos programinės aplinkos langas pateikiamas 30 pav. Programėlės kūrėjai atliko mini eksperimentą, norint įsitikinti šios programėlės tikslumu. Tyrimo rezultatai aiškiai atsispindi 30 pav.



30 pav. "Sound meter" programos aplinka ir eksperimento rezultatai

Greičio reguliavimo ir variklio sūkių matavimo įranga

Variklių greitis reguliuojamas *arduino UNO* mikrovaldikliu pavaizduotu 4 pav. Variklio sūkiai matuojami specialiai sukonstruotu jutikliu (32 pav.) Valdymo programa parašyta naudojant *arduino IDE* programinę įrangą (31 pav.).

MonteringProgram (1) Advantiant	
a fáit Seatch Taois Haip	
MobriTestingProgram_v1_0 Calibudos_Mode. 36% Seculitati,Tancizos Sizo_Tacibio	
//////////////////////////////////////	(HLDES
/ PUTNERY THE TRAINER FORMER AND THE TRAINER OF A Samily manyon imp transfer = 0 solatily manyon imp deterf = 0;	
/ cf statues values: //cf statues values: //statues/statu	www.y.sther_crossing, etc.)
ntiped int FJR = 0: //	COM3 (Arduino Uno)
//////////////////////////////////////	Type Bendline Alternatively fact For alternatively fact BCD MURDER HORE focus * -1* (the listener bases 0 and 100). For alternatively fact BCD MURDE HORE focus * -1* (the listener bases 0 and 100). For alternatively fact BCD MURDE HORE focus * -1* (the listener bases 0 and 100). For alternatively fact BCD MURDE HORE focus * -2* For alternatively fact BCD MURDE HORE focus * -2* For alternatively fact LOOT 0 100 100 LIOT 0 1000 1000 LIOT 0 1000 1000 LIOT 0 1000 1000
<pre>pressuampenci // it before a per apple pre is an acc accessingly // its neuronal accessing accessing</pre>	Z Adacod Ibbine eding + 1100 bad +
This features provide boundary world approximation of seconds the appropriate function boundary of a second seco	
ne upbeling	
obal variables use 1.369 bytes (678) of dynamic memory, leaving 659 bytes for local variables. Maximum is 2.048 bytes.	
42	Addited Units

31 pav. Arduino IDE programavimo aplinka

Variklių greičio reguliatoriaus prijungimo schema pavaizduota 32 pav.



32 pav. Variklių greičio reguliatoriaus ir sūkių matuoklio schema

Propelerių balansavimo stendas

Propeleriai balansuojami specialiai tam pritaikytu propelerių balansavimo stendu pirktu iš internetinės "Hobbyking" parduotuvės (33 pav.)



33 pav. Propelerių balansavimo stendas

Svarstyklės sukimo momento ir traukos jėgos matavimo stendams

Traukos jėgos ir sukimo momento matavimams naudojamos virtuvinės svarstyklės galinčios matuoti 5 kilogramų diapazone (34 pav.). Modelis – *PC-KW 1061*.



34 pav. Svarstyklės

Elektros įtampos, srovės ir galios matuoklis

Elektros įtampos, srovės ir galios matavimai atliekami "Turnigy" firmos matavimo prietaisu (35 pav.).



35 pav. "Turnigy" elektros parametrų matuoklis

Vibracijų matavimas

Vibracijos matuojamos programa "VibSensor" kurį įrašyta į *samsung galaxy note 3* telefoną. Programa vibracijų nustatymui naudoja mobiliajame telefone sumontuota giroskopą. Kvadrakopterio rėmą nuo stalo ant kurio daromas matavimas skiria vibracijas izoliuojanti medžiaga. Telefonas prie kvadrakopterio rėmo tvirtinamas lipnia juosta (36 pav.).



36 pav. Kvadrakopterio rėmo pagreičių vibracijų matavimo įranga

3.5. Eksperimentų algoritmai (eiga)

Pagrindinio eksperimento algoritmas

1. Kvadrakopterio elementų parinkimas;

2. Kvadrakopterio surinkimas;

3. Kvadrakopterio keliamumo bandymas. Ant svarstyklių padedamas kvadrakopteris (aukštyn kojomis) ir didinant elektros variklių sūkius stebima kaip keičiasi svarstyklių parodymai (kvadrakopterio atstumas nuo žemės paviršiaus 0,56 m.);

4. Kvadrakopterio nesubalansuotos bendros sistemos triukšmo, variklių elektros parametrų ir vibracijų matavimas. Matuojama mobiliojo telefono triukšmo bei vibracijų matavimo programomis, elektros parametrų matuokliu;

5. Kvadrakopterio kiekvieno iš 4 variklių (nuėmus propelerius) sukeliamų rėmo slenkamojo judesio vibracijų matavimas (žingsnis kas 10 % maksimalių variklio sūkių, matuojama mobiliojo telefono programa);

6. Išmatuotų verčių surašymas į iš anksto paruoštą lentelę;

7. Visų 4 variklių (nuėmus propelerius) balansavimas. Balansuojama stebint specialios vibracijų matavimo programos rodmenis ir klijuojant izoliacinės juostos gabalėlius ant atsitiktinai parinktų elektros variklio vietų;

8. Subalansuotų kiekvieno iš 4 variklių (be propelerių) sukeliamų vibracijų matavimas (žingsnis kas 10 % maksimalių variklio sūkių, matuojama mobiliojo telefono programa);

9. Propelerių sparnuočių ir jų tvirtinimo žiedų balansavimas. Balansuojama specialiame balansavimo stende klijuojant izoliacinės juostos gabalėlius ant specifinių propelerio vietų;

10. Propelerių uždėjimas ant kiekvieno subalansuoto variklio;

11. Kvadrakopterio subalansuotos bendros sistemos triukšmo, variklių elektros parametrų ir vibracijų matavimas. Matuojama mobiliojo telefono triukšmo bei vibracijų matavimo programomis, elektros parametrų matuokliu;

12. Išmatuotų verčių surašymas į iš anksto paruošta lentelę;

13. Rėmo vizualinė patikra;

14. Jei pastebėta trūkumų, jų pašalinimas ir smulkus aprašymas;

15. Jei buvo taisomų trūkumų vibracijų matavimas;

16. Kvadrakopterio keliamumo bandymas. Ant svarstyklių padedamas kvadrakopteris (aukštyn kojomis) ir didinant elektros variklių sūkius stebima kaip keičiasi svarstyklių rodmenys (kvadrakopterio atstumas nuo žemės paviršiaus 0,56 m.);

17. Gautų eksperimento rezultatų apdorojimas kompiuterinėmis programomis;

18. Grafinis rezultatų pateikimas;

19. Išvadų formavimas.

Papildomo eksperimento algoritmas

1. Variklių traukos matavimo stendo surinkimas;

2. Variklių sukimo momento matavimo stendo surinkimas;

3. Nebalansuotos variklio / propelerio sistemos traukos jėgos, vibracijų, triukšmo ir elektros parametrų matavimas traukos jėgos matavimo stende. Žingsnis kas 10 % maksimalių variklio sūkių. Matuojama elektroninėmis svarstyklėmis, mobiliojo telefono programomis ir elektros parametrų matuokliu;

4. Rezultatų pildymas į lentelę;

5. Variklio dinaminis ir propelerio statinis balansavimas;

6. Balansuotos variklio / propelerio sistemos traukos jėgos, vibracijų, triukšmo ir elektros parametrų matavimas traukos jėgos matavimo stende. Žingsnis kas 10 % maksimalių variklio sūkių. Matuojama elektroninėmis svarstyklėmis, mobiliojo telefono programomis ir elektros parametrų matuokliu;

7. Rezultatų pildymas į lentelę;

8. Nebalansuotos variklio / propelerio sistemos sukimo momento, vibracijų, triukšmo ir elektros parametrų matavimas traukos jėgos matavimo stende. Žingsnis kas 10 % maksimalių variklio sūkių. Matuojama elektroninėmis svarstyklėmis, mobiliojo telefono programomis ir elektros parametrų matuokliu;

9. Rezultatų pildymas į lentelę;

10. Variklio dinaminis ir propelerio statinis balansavimas;

11. Balansuotos variklio / propelerio sistemos sukimo momento, vibracijų, triukšmo ir elektros parametrų matavimas traukos jėgos matavimo stende. Žingsnis kas 10 % maksimalių variklio sūkių. Matuojama elektroninėmis svarstyklėmis, mobiliojo telefono programomis ir elektros parametrų matuokliu;

12. Rezultatų pildymas į lentelę;

- 13. Gautų eksperimento rezultatų apdorojimas kompiuterinėmis programomis;
- 14. Grafinis rezultatų pateikimas;

15. Išvadų formavimas.

3.7. Eksperimento matavimų rezultatai

3.7.1. Matavimų rezultatai ant bandymų stendų

Eksperimento metu gautų rezultatų reikšmių lentelės pateikiamos magistro darbo A priede. Eksperimentui buvo naudojami dviejų tipų tyrimo stendai. Kai kurie juose matuojami parametrai visiškai sutampa (įtampa, srovė, sūkiai, triukšmo lygis, apkrova), todėl grafikai su pasikartojančiomis reikšmėmis nukeliami į A priedą.

Visuose toliau pavaizduotuose grafikuose išskiriami trys skirtingi matavimo atvejai: nesubalansuotos sistemos matavimai, subalansuotos sistemos matavimai ir subalansuotos sistemos matavimai esant daugiau įkrautai baterijai (didesnė pradinė elektros įtampa).



37 pav. Elektros variklio išmatuotų sūkių priklausomybė nuo nustatytų sūkių (traukos stende)

Grafike (37 pav.) pavaizduota realiai išmatuotų variklio / propelerio sistemos sūkių priklausomybė nuo mikrovaldikliu nustatytų sūkių. Išmatuoti sūkiai prieš ir po variklio ir propelerio balansavimo praktiškai nesiskiria. Žymus sūkių padidėjimas pastebimas tik esant labiau įkrautai baterijai.



38 pav. Elektros variklio išmatuotos jėgos priklausomybė nuo nustatytų sūkių (traukos stende)

Grafike (38 pav.) pavaizduota išmatuotos elektros variklio traukos jėgos priklausomybė nuo mikrovaldikliu nustatytų sūkių. Traukos padidėjimas pastebimas tiek subalansavus elektros variklio – propelerio sistemą, tiek naudojant labiau įkrautą bateriją.



39 pav. Triukšmo lygio priklausomybė nuo nustatytų sūkių (traukos stende)

Grafike (39 pav.) pavaizduota išmatuoto triukšmo lygio priklausomybė nuo mikrovaldikliu nustatytų sūkių. Triukšmo lygis padidėjo tiek subalansavus visą sistemą, tiek naudojant labiau įkrautą bateriją.



40 pav. Elektros srovės priklausomybė nuo nustatytų sūkių (traukos stende)

Grafike (40 pav.) pavaizduota išmatuotos elektros srovės priklausomybė nuo mikrovaldikliu nustatytų sūkių. Mažiausia srovė esant 100 % sūkių pastebima esant subalansuotai variklio – propelerio sistemai.



41 pav. Elektros įtampos priklausomybė nuo nustatytų sūkių (traukos stende) naudojant 5000 mAh bateriją

Grafike (41 pav.) pavaizduota išmatuotos elektros įtampos priklausomybė nuo mikrovaldikliu nustatytų sūkių naudojant 5000 mAh bateriją. Didžiausia pradinė įtampa pastebima naudojant labiau įkrautą bateriją. Mažiausia įtampa buvo pasiekta esant nesubalansuotai sistemai.



42 pav. Elektros įtampos priklausomybė nuo nustatytų sūkių (sukimo momento stende) naudojant 2500 mAh bateriją

Grafike (42 pav.) pavaizduota išmatuotos elektros įtampos priklausomybė nuo mikrovaldikliu nustatytų sūkių naudojant 2500 mAh bateriją. Didžiausia pradinė įtampa pastebima naudojant labiau įkrautą bateriją. Mažiausia įtampa buvo pasiekta esant nesubalansuotai sistemai.



43 pav. Elektros galios priklausomybė nuo nustatytų sūkių (traukos stende)

Grafike (43 pav.) pavaizduota išmatuotos elektros galios priklausomybė nuo mikrovaldikliu nustatytų sūkių. Mažiausia elektros galia pastebima tiriant subalansuotą variklio / propelerio sistemą.



44 pav. Elektros variklio sukimo momento priklausomybė nuo nustatytų sūkių (sukimo momento stende)

Grafike (44 pav.) pavaizduota išmatuoto elektros variklio sukimo momento priklausomybė nuo mikrovaldikliu nustatytų sūkių. Elektros variklio sukimo momento padidėjimas pastebimas tiek subalansavus elektros variklio – propelerio sistemą, tiek naudojant labiau įkrautą bateriją.

3.7.2. Visos kvadrakopterio sistemos tyrimo rezultatai

Eksperimento metu gautų rezultatų reikšmių lentelės pateikiamos magistrinio darbo A priede. Eksperimentui buvo naudojamas specialiai šiam tyrimui sukonstruotas kvadrakopteris.



45 pav. Visos kvadrakopterio sistemos elektros srovės priklausomybė nuo nustatytų sūkių (radijo siųstuvu)

Grafike (45 pav.) pavaizduota išmatuotos kvadrakopterio sistemos elektros srovės priklausomybė nuo radijo siųstuvu nustatytų sūkių. Didesnė kvadrakopterio sistemos srovė pastebima esant subalansuotiems varikliams ir propeleriams.



46 pav. Visos kvadrakopterio sistemos triukšmo lygio priklausomybė nuo nustatytų sūkių (radijo siųstuvu)

Grafike (46 pav.) pavaizduota išmatuotos kvadrakopterio sistemos triukšmo lygio priklausomybė nuo radijo siųstuvu nustatytų sūkių. Didesnis garsas fiksuojamas esant nesubalansuotiems propeleriams ir varikliams.



47 pav. Visos kvadrakopterio sistemos elektros įtampos priklausomybė nuo nustatytų sūkių (radijo siųstuvu)

Grafike (47 pav.) pavaizduota išmatuotos kvadrakopterio sistemos elektros įtampos priklausomybė nuo radijo siųstuvu nustatytų sūkių. Didesnis įtampos kritimas pastebimas esant nesubalansuotiems propeleriams ir varikliams.



48 pav. Visos kvadrakopterio sistemos keliamosios galios priklausomybė nuo nustatytų sūkių (radijo siųstuvu)

Grafike (48 pav.) pavaizduota išmatuotos kvadrakopterio sistemos maksimali keliamoji jėga priklausomybė nuo radijo siųstuvu nustatytų sūkių. Didesnė keliamoji jėga išvystoma esant subalansuotiems elektros varikliams ir propeleriams.

3.7.3. Vibracijų matavimo rezultatai

Išmatuotos visų 4 elektros variklių vibracijos. Pateikiamas tik pirmojo variklio vibracijų matavimo grafikas. Likusių 3 variklių vibracijų grafikai nukelti į B priedą.



49 pav. Vieno elektros variklio pagreičių vibracijos esant 50 % nuo maksimalių elektros variklio sūkių: a) – prieš balansavimą, b) – po balansavimo.

Grafike (49 pav.) kvadrakopterio 1 elektros variklio vibracijų matavimo rezultatai prieš balansavimą ir po balansavimo. Variklis pritvirtintas prie kvadrakopterio rėmo. Matavimams naudojamas akcelerometras. Matavimo vienetai $\frac{m}{s^2}$. Vieno matavimo trukmė: 10 s. Vibracijų matavimas atliekamas esant 50 % maksimalių variklio sūkių. Atlikus variklio balansavimą pastebimas žymus vidutinių vibracijų Z ašies kryptimi sumažėjimas.

Tiriamos dvi skirtingos sistemos pritvirtintos prie dviejų skirtingų matavimo stendų (traukos jėgos matavimo stendo ir sukimo momento matavimo stendo). Matavimai buvo atliekami kas 10 % maksimalių variklio sūkių. Pateikiami tik vidutinių variklio / propelerio sistemos vibracijų reikšmių matavimo rezultatai. Visų kitų matavimų rezultatai nukeliami į C priedą.



50 pav. Vidutinių vibracijų reikšmių priklausomybė nuo nustatytų sūkių po ir prieš balansavimą (traukos stende)

Grafike (50 pav.) pateikiami variklio – propelerio sistemos vidutinių vibracijų matavimo rezultatai prieš propelerio ir variklio balansavimą ir po balansavimo. Sistema įtvirtinta į el. variklio traukos jėgos matavimo stendą. Didžiausios vibracijos veikia z ašies kryptimi. Subalansuotos sistemos vibracijos ties 30 %, 50 %, 60 %, 70 % ir 80 % nuo maksimalių elektros variklio sūkių viršija nesubalansuotos sistemos vibracijas z ašies kryptimi.



51 pav. Vidutinių pagreičio vibracijų reikšmių priklausomybė nuo nustatytų sūkių po ir prieš balansavimą (sukimo momento stende)

Grafike (51 pav.) pateikiami variklio – propelerio sistemos vidutinių vibracijų matavimo rezultatai prieš propelerio ir variklio balansavimą ir po balansavimo. Sistema įtvirtinta į el. variklio sukimo momento matavimo stendą. Didžiausios vibracijos veikia z ašies kryptimi. Subalansuotos sistemos vibracijos tik ties 70 % nuo maksimalių elektros variklio sūkių viršija nesubalansuotos sistemos vibracijas z ašies kryptimi.

3.8. Eksperimento apibendrinimas ir išvados

Išmatuotos elektros srovės, įtampos, galios, variklio sukimo momento, traukos jėgos, reikšmės esant skirtingiems kvadrakopterio elektros variklio sūkiams. Nustatytos ir grafiškai pavaizduotos elektros variklių ir propelerių disbalanso sukeliamų vibracijų vertės.

Pagrindinės išvados:

 kuo didesnė elektrinės baterijos pradinė įtampa tuo didesni elektros variklio sūkiai yra išvystomi (37 pav.). Esant didesniems sūkiams padidėja elektros variklio keliamoji jėga ir sukimo momentas. Taipogi sumažėja visos sistemos triukšmo lygis (46 pav.)

subalansavus elektros variklį ir propelerį esant tai pačiai pradinei įtampai padidėja ir elektros variklio – propelerio sistemos išvystomos traukos jėgos (38 pav.) ir sukimo momento vertės (44 pav.);

didžiausios elektros variklių vibracijos veikia z ašies kryptimi. Subalansavus juos, vibracijos z ašies kryptimi pastebimai sumažėjo (49 pav. ir B priedas);

 subalansavus elektros variklį ir propelerį esant mažesnei galiai (43 pav.) pasiekiami tokie patys variklio sūkiai (37 pav.) ir netgi didesnė traukos jėga (38 av.) bei variklio sukimo momentas (44 pav.) lyginant su nesubalansuota sistema;

esant subalansuotai sistemai įtampos kritimas mažesnis lyginant su nebalansuota sistema (41 pav.). Minimali galima LiPo baterijos celės įtampa kai dar nekenkiama baterijai yra 3,5V. Naudojant 4 celių bateriją minimali bendra baterijos įtampa gali nukristi iki 14V. Todėl esant mažesniam įtampos kritimui skrydžio laikas šiek tiek prailgėja;

• Naudojant didesnės talpos bateriją (41 pav.) įtampos kritimo pokytis yra mažesnis nei naudojant mažesnės talpos bateriją (42 pav.), todėl galima daryti išvadą jog elektrinės baterijos talpa ir įtampa yra tiesiogiai proporcingi dydžiai;

 tiriant elektros variklio – propelerio sistemos vibracijas pritvirtinus elektros variklį prie traukos jėgos matavimo stendo, net 50 % subalansuotos sistemos vidutinių vibracijų reikšmių viršija nesubalansuotos sistemos vibracijų vidutines reikšmes. Tokie rezultatai gaunami dėl netinkamos stendo konstrukcijos. Matuojant vibracijas sukimo momento matavimo stende, kuris yra daug standesnis, pastebima tendencija, jog subalansavus kvadrakopterio variklį ir propelerį smarkiai sumažėja ir visos sistemos vibracijos.

• Subalansavus kvadrakopterio variklius bei propelerius visos kvadrakopterio sistemai reikalinga srovė (45 pav.), garso lygis (46 pav.) sumažėja. Įtampa išlieka aukštesnė (47 pav.). Traukos jėga padidėja (48 pav.) Taigi subalansavus kvadrakopterio variklius ir propelerius, kvadrakopteris gali kelti didesnio svorio krovinius naudodamas mažiau galios nesumažindamas savo skridimo trukmės.

4. KVADRAKOPTERIO TEORINIAI TYRIMAI

4.1. Kvadrakopterio dinaminis modelis

Norint paaiškinti kvadrakopterį veikiančių jėgų veikimą, sudaromi kvadrakopterio (52 pav.) ir jo i-tojo elektros variklio (53 pav.) dinaminiai modeliai.

Įvedamos OXYZ kvadrakopterio, bei O_iX_iY_iZ_i elektros variklio koordinačių sistemos. Šios koordinatinės sistemos juda kartu su kvadrakopteriu. Taškai O ir O_i yra atitinkamai kvadrakopterio ir kvadrakopterio variklių masių centruose. Papildomai įvedama erdvinė koordinatinė sistema O_eX_eY_eZ_e kuri yra fiksuotoje padėtyje. Jos atžvilgiu bus stebima kvadrakopterio masės centro judėjimo trajektorija.

Kiekvienas kvadrakopterio elektros variklis sukasi apie Z_i ašį kampiniu greičiu ω_i , sukurdamas keliamąją jėgą F_{ki} , kurios kryptis sutampa su teigiama Z_i ašies kryptimi.

Trečias Niutono dėsnis teigia, jog kiekviena kūną veikianti jėga sukelia tokio pačio dydžio, bet priešingos krypties besipriešinančią jėga. Dėl to momentas sukurtas besisukančių kvadrakopterio propelerių iššaukia priešingos krypties (reaktyvinį) momentą kuris stengiasi pasukti visą kvadrakopterio rėmą apie kvadrakopterio Z ašį.

Kad kvadrakopteris pakilęs į orą nesisuktų apie Z ašį propeleriai kurių kampiniai greičiai yra ω_1 ir ω_3 sukasi pagal laikrodžio rodyklę, o likę du – prieš. Dėl to 1 ir 3 elektros variklių sukamų propelerių sukuriami reaktyviniai momentai kompensuojami 2 ir 4 elektros variklių sukuriamais reaktyviniais momentais.

Kvadrakopterio skrydžio aukštis bei kryptis yra valdomi keičiant atitinkamų elektros variklių kampinius greičius ϖ_i ir taip perskirstant jų keliamąsias jėgas F_{ki} . Variklio ir propelerio sistemos kampiniai greičiai yra keičiami tiekiant daugiau srovės į atitinkamus kvadrakopterio variklius.

Sumažinus kampinius greičius ϖ_1 ir ϖ_2 bei padidinus kampinius greičius ϖ_3 ir ϖ_4 kvadrakopteris pasvyra teigiama φ_y kampo kryptimi ir pradeda judėti į priekį teigiama X_e ašies kryptimi. Norint judėti atgal viskas daroma priešingai. Sumažinus kampinius greičius ϖ_2 ir ϖ_3 bei padidinus kampinius greičius ϖ_1 ir ϖ_4 kvadrakopteris pasvyra į šoną teigiama φ_x kryptimi ir pradeda judėti į šoną neigiama Y_e ašies kryptimi. Norint judėti į kitą pusę viskas daroma priešingai. Norint kvadrakopterį pasukti apie Z ašį reikia sumažinti kampinius greičius ϖ_2 ir ϖ_4 bei padidinti kampinius greičius ϖ_1 ir ϖ_3 , tuomet kvadrakopteris suksis prieš laikrodžio rodyklę (teigiama kampo φ_z kryptimi). Norint pajudinti kvadrakopterį teigiama Z ašies kryptimi reikia vienu metu, sklandžiai, padidinti visų variklių kampinius greičius.



52 pav. Kvadrakopterio dinaminis modelis



53 pav. Kvadrakopterio i-tojo variklio dinaminis modelis

4.2. Kvadrakopterio matematinis modelis

Elektros variklių keliamoji jėga yra vienas iš pagrindinių kvadrakopterio parametrų. Valdant šį parametrą galima valdyti kvadrakopterio judėjimą. Ji yra nukreipta teigiama Z_i ašies kryptimi (53 pav.) Keliamoji jėga nustatoma pagal tokia išraišką:

$$F_{ki} = C_{F_{ki}i} \rho A_{ri} r_i^2 \omega_i^2; \tag{9}$$

čia: $C_{F_{ki}i}$ – elektros variklio keliamosios jėgos koeficientas; ρ – oro tankis; A_{ri} – propelerio užimamas plotas ($A_{ri} = \pi r_i^2$); r_i – elektros variklio rotoriaus spindulys; ω_i –elektros variklio rotoriaus kampinis greitis. Paprastesniam modeliavimui ši formulė yra supaprastinama:

$$F_{ki} = c_{F_{ki}i} \omega_i^2; \tag{10}$$

čia: $c_{F_{ki}}$ – elektros variklio ir propelerio sistemos keliamosios jėgos koeficientas nustatomas eksperimentais specifiniam varikliui (proporcingumo koeficientas), N/(rad/s)²; ω_i – elektros variklio rotoriaus kampinis greitis.

Elektros variklio išvystomas sukimosi momentas apie jo sukimosi Z_i ašį yra lygus:

$$M_{vzi} = c_{M_{wzi}} \omega_i^2; \tag{11}$$

čia: $c_{M_{v,i}i}$ – elektros variklio sukimo momento koeficientas nustatomas eksperimentais (proporcingumo koeficientas); ω_i – elektros variklio rotoriaus kampinis greitis.

Masės inercijos momentas yra labai svarbus parametras atliekant sukamąjį judesį.

Masių inercijos momentas priklauso ne tik nuo objekto masės, tačiau ir nuo to kaip ta masė yra išdėstyta sukimosi ašies atžvilgiu.

Norint užrašyti kvadrakopterio masių inercijos momentų (masių inercijos tenzorių) matricą reikia priimti prielaidą, kad kvadrakopteris yra visiškai simetriškas X, Y ir Z ašių atžvilgiu ir jo masių centras sutampa su jo geometriniu centru (taškas O 53 pav.). Skaičiavimams supaprastinti kvadrakopterio elementų blokai yra suskaidomi į paprastąsias figūras:

 Rėmo centrinė plokštė, baterija, skrydžio valdiklis bei radijo bangų imtuvas apjungiami į vieną visumą ir vadinami centrine dalimi. Centrinės dalies masių inercijos momentų skaičiavimai atliekami kaip paprastajam cilindrui;

2. Variklių ir propelerių sistemos vadinamos rotorine kvadrakopterio dalimi. Jų masių inercijos momentų skaičiavimai atliekami kaip paprastiesiems cilindrams;

3. Elektroninių greičio valdiklių (ESC) masių inercijos momentai skaičiuojami kaip paprastiesiems stačiakampiams gretasieniams;

4. Rėmo kojų masių inercijos momentai skaičiuojami kaip paprastiesiems cilindrams.

Priėmus šias prielaidas ir įvedus supaprastinimus, masių inercijos tenzorius yra diagonalinė matrica:

$$\begin{bmatrix} I_{K_{\nu}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{x} & 0 & 0 \\ 0 & I_{y} & 0 \\ 0 & 0 & I_{z} \end{bmatrix}.$$
 (12)

čia: I_x , I_y , I_z – masių inercijos momentai atitinkamai apie X, Y ir Z kvadrakopterio ašis. Masių matrica $[m_{Kv}]$ yra diagonalinė matrica (Bogdevičius 2008):

$$\begin{bmatrix} m_{K_{\nu}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix}.$$
 (13)

čia: m - kvadrakopterio masė

Ryšys tarp kvadrakopterio kampinio greičio vektoriaus $\{\underline{\omega}\}$ (kvadrakopterio koordinačių sistemoje) ir pirmosios Kardano kampų (Spruogis *et al.* 2009) laiko išvestinės vektoriaus $\{\dot{\theta}\}$ yra užrašomas:

$$\{\underline{\omega}\} = \left[G_2(\theta)\right] \{\dot{\theta}\}. \tag{14}$$

Naudojamas Kardano kampų vektorius $\{\theta\}$:

$$\{\theta\} = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]. \tag{15}$$

čia: $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ – Kardano kampai atitinkamai apie X, Y ir Z ašis.

Matrica $\left[G_2(\theta)\right]$ yra lygi:

$$\begin{bmatrix} G_2(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_2 c_3 & s_3 & 0 \\ c_2 s_3 & c_3 & 0 \\ s_2 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$
 (16)

čia: $c_i = \cos(\theta_i)$; $s_i = \sin(\theta_i)$.

Asimetrinė kampinių greičių matrica $\left[\underline{\tilde{\omega}} \right]$ lygi:

$$\begin{bmatrix} \widetilde{\boldsymbol{\omega}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\underline{\boldsymbol{\omega}}_{Kv,Z} & \underline{\boldsymbol{\omega}}_{Kv,Y} \\ \underline{\boldsymbol{\omega}}_{Kv,Z} & 0 & -\underline{\boldsymbol{\omega}}_{Kv,X} \\ -\underline{\boldsymbol{\omega}}_{Kv,Y} & \underline{\boldsymbol{\omega}}_{Kv,X} & 0 \end{bmatrix}.$$
(17)

čia: $\underline{\omega}_{Kv,i}$ – kampinių greičių apie kvadrakopterio koordinačių sistemos projekcijos į atitinkamas ašis.

$$\begin{bmatrix} [m_{K_{\mathcal{V}}}] & 0 \\ 0 & [I_{K_{\mathcal{V}}}] \begin{bmatrix} G_{2}(\theta) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{cases} \{\ddot{R}\} \\ \{\ddot{\theta}\} \end{cases} = \begin{cases} \{F(R,\theta,t)\} + \{F_{oropas}\} \\ \{M_{K_{\mathcal{V}}}\} + [\underline{\tilde{\omega}}][I_{K_{\mathcal{V}}}] \{\underline{\omega}\} + \{M_{giro}\} - \\ -[I_{K_{\mathcal{V}}}] [\dot{G}_{2}(\theta)] \{\dot{\theta}\} + \{M_{oropas}\} \end{cases}.$$
(18)

čia: $\{\ddot{R}\}$ – kvadrakopterio masių centro koordinačių antros laiko išvestinės vektorius; $\{\ddot{\Theta}\}$ – Kardano kampų antros laiko išvestinės vektorius; $\{F(R, \theta, t)\}$ – apkrovos vektorius priklausantis nuo kvadrakopterio masės centro koordinačių, kardano kampų ir laiko; $\{F_{oropas}\}$ – oro pasipriešinimo jėgų vektorius; $\{M_{Kv}\}$ – kvadrakopterio traukos momentų vektorius; $\{M_{giro}\}$ – giroskopinių momentų vektorius.

Kvadrakopterio traukos jėga bendroje sistemoje:

$$\{F\} = [A(\theta)]\{F_{TR}\}.$$
(19)

Kvadrakopterio lokalinės sistemos traukos jėgų vektorius:

$$\{F_{TR}\} = F_{TR,x}\{e_1\} + F_{TR,y}\{e_2\} + F_{TR,z}\{e_3\}.$$
(20)

Kvadrakopterio oro pasipriešinimo jėga erdvinėje sistemoje:

$$\{F_{oropas}\} = [A(\theta)](\{e_1\}F_{cx} + \{e_2\}F_{cy} + \{e_3\}F_{cz}).$$
(21)

čia : F_{ci} – kvadrakopterio oro pasipriešinimo jėga veikianti pagal tam tikrą kvadrakopterio ašį.

$$\{e_1\} = \begin{cases} 1\\0\\0 \end{cases}; \{e_2\} = \begin{cases} 0\\1\\0 \end{cases}; \{e_3\} = \begin{cases} 0\\0\\1 \end{cases}.$$
(22)

Kvadrakopterio oro pasipriešinimo jėgos veikiančios pagal pagrindines kvadrakotperio ašis:

$$F_{cx} = -\frac{1}{2}\rho C_x A_x v_{cx}^2 sign(v_{cx});$$
⁽²³⁾

$$F_{cy} = -\frac{1}{2}\rho C_{y}A_{y}v_{cy}^{2}sign(v_{cy});$$
(24)

$$F_{cz} = -\frac{1}{2}\rho C_{z} A_{z} v_{cz}^{2} sign(v_{cz}).$$
⁽²⁵⁾

čia: C_i – oro pasipriešinimo koeficientas; v_{ci} – linijinis kvadrakopterio greitis pagal pagrindines kvadrakopterio ašis.

Linijiniai greičiai pagal X, Y ir Z kvadrakopterio ašis:

$$\begin{cases} v_{cx} = \left\{ e_{1}^{T} \right\} \left(A^{T} \left\{ \dot{R} \right\} \right) \\ v_{cy} = \left\{ e_{2}^{T} \right\} \left(A^{T} \left\{ \dot{R} \right\} \right) \\ v_{cz} = \left\{ e_{3}^{T} \right\} \left(A^{T} \left\{ \dot{R} \right\} \right) \end{cases}$$
(26)

Kvadrakopterio traukos jėgų momentų vektorius apie Z ašį:

$$\{M_{k\nu}\} = \sum_{k=1} \left[\widetilde{r_k}\right] F_{ki} \{e_3\}.$$
(27)

Asimetrinė matrica $\left[\widetilde{r_k}\right]$:

$$\begin{bmatrix} \widetilde{r}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -r_z & r_y \\ r_z & 0 & -r_x \\ -r_y & r_x & 0 \end{bmatrix}$$
(28)

Kvadrakopterio reaktyvinis momentas apie kvadrakopterio Z ašį:

$$M_{vz} = \left(M_{vz1} - M_{vz2} + M_{vz3} - M_{vz4}\right)$$
⁽²⁹⁾

čia: M_{vzi} – i-tojo variklio reaktyvinis momentas, i = 1, 2, 3, 4.

Kadangi visos pasipriešinimo jėgos yra sukoncentruotos kvadrakopterio geometriniame centre oro pasipriešinimo momentai prilyginami nuliui.

4.3. Teorinio tyrimo duomenys ir rezultatai

Nagrinėjamas kvadrakopteris surinktas iš atskirai parinktų mazgų. 5 lentelėje pateikiami pagrindiniai kvadrakopterio parametrai.

5 lentelė. Kvadrakopterio pagrindiniai parametrai

Rėmas (<i>Q450</i>)		
Plotis	450 mm	
Aukštis	55 mm	
Masė	270 g	
Variklis (<i>NTM prop drive series</i> 2826)		
Skersmuo	28 mm	
Aukštis	25 mm	
Kv reitingas	1100 aps/V	
Polių skaičius	12	
Vijų skaičius	17	
Maksimalus srovės poreikis	20 A	
Maksimali galia prie 11,1 V (3S)	189 W	
Maksimali gali prie 14,8 V (4S)	252 W	
Masė	54 g	

5 lentelės pabaiga

Propeleris (8045 SF)		
Skersmuo	203,2 mm	
Žingsnis	114,3 mm	
Masė	5 g	
Elektroninis greičio valdiklis (Afro 30 Amp)		
Ilgis	50 mm	
Storis	11 mm	
Plotis	25 mm	
Masė	26,5 g	
Palaikoma įtampa	7,4 V – 14,8 V	
Įeinančio signalo dažnis	1 kHz	
Palaikoma srovė	30 A	
Skrydžio valdiklis (<i>KK2.1.5</i>)		
Palaikoma įtampa	7,4 V – 14,8 V	
Įeinančio signalo dažnis	1 kHz	
Palaikoma srovė	30 A	
Palaikoma įtampa	7,4 V – 14,8 V	
Valdymo signalo įtampa	4,8 V – 6 V	
Baterija (<i>Turnigy 4S 40–50C</i>)		
Ilgis	149 mm	
Plotis	49 mm	
Storis	37 mm	
Masė	578 g	
Celių skaičius	4	
Įtampa	14,8 V	
Talpa	5Ah	
Išsikrovimo reitingas (pastovus)	40C	
Ribinis išsikrovimo reitingas (10 sek.)	50C	

6 lentelėje pateikiami kvadrakopterio masių inercijos momentų skaičiavimo rezultatai.

Elementų blokas	Masių inercijos momentai, kgm ²		
	$I_x = I_y$	Iz	
Centrinė dalis	0,005482375	0,00176155	
Rotorinė dalis	0,005538636	0,010956168	
ESC	0,000406671	0,000813341	
Rėmo kojos	0001274433	0,002536627	
Viso kvadrakopterio	0,03436134	0,05899	

6 lentelė. Masių inercijos momentų skaičiavimo rezultatai

Eksperimento metu buvo išmatuoti kvadrakopterio variklio ir propelerio sistemos sūkiai ir kiekvieno variklio keliamoji jėga. Panaudojus šiuos duomenis galima nustatyti tikslią kėlimo jėgos proporcingumo koeficiento c_{F_k} ir c_{M_v} reikšmes. Skaičiavimų rezultatų lentelė pateikiama A priede. Pagal lentelių duomenis braižomi grafikai (54 ir 55 pav.).

Vėliau pateikiamuose grafikuose pavaizduotos koeficientų c_{F_k} ir c_{M_r} priklausomybės nuo mikrovaldikliu nustatytų sūkių procentais. 54 pav. tyrimas buvo atliktas pritvirtinus elektros variklį prie traukos matavimo stendo, 55 pav. – pritvirtinus elektros variklį prie sukimo momento matavimo stendo. Koeficiento reikšmės priklauso nuo sūkių. Reikšmių pasiskirstymas labai nevienodas, tačiau pastebima bendra tendnecija, jog didėjant sūkiams didėja ir koeficientai.



54 pav. C_{F_k} traukos jėgos koeficiento reikšmių priklausomybė nuo nustatytų sūkių po ir prieš balansavimą



55 pav. c_{M_u} sukimo momento koeficiento reikšmių priklausomybė nuo nustatytų sūkių po ir prieš balansavimą

Naudojantis matematinio modeliavimo programa "Maple" nustatytos funkcijos pagal kurias kinta kvadrakopterio traukos jėgos (c_{F_k}) ir sukimo momento (c_{M_v}) proporcingumo koeficientai. "Matlab" programa sukurtos proporcingumo koeficientų optimizavimo programos programinis kodas pateikiamas D priede.

56 pav. raudoni taškai žymi konkrečias koeficiento reikšmes esant tam tikriems sūkiams. Kreivė nubrėžta per šiuos taškus – optimizavimo kreivė. Šios kreivės funkcija ir bus kvadrakopterio traukos jėgos koeficiento kitimo funkcija:

$$c_{F_k} = -608, 3 - 0,571 \cdot 10^{-4} \omega^2 + 4,12 \cdot 10^{-8} \omega^3 - 6,9 \cdot 10^{-15} \omega^5 + 58,03 \ln(\omega) + \frac{1643}{\ln(\omega)}$$
(30)

Apskaičiuotas determinacijos koeficientas $R^2_{c_{tr}} = 0,91$.



56 pav. Kvadrakopterio traukos jėgos proporcingumo koeficiento optimizavimo grafikas

57 pav. raudoni taškai žymi konkrečias koeficiento reikšmes esant tam tikriems sūkiams. Kreivė nubrėžta per šiuos taškus – optimizavimo kreivė. Šios kreivės funkcija ir bus kvadrakopterio variklio sukimo momento koeficiento kitimo funkcija priklausomai nuo kvadrakopterio variklio sūkių:

$$c_{M_{\nu}} = 1,34 \cdot 10^{-14} \,\omega^5 + 5,5 - 5,87 \cdot 10^{-8} \,\omega^3 + 0,735 \cdot 10^{-4} \,\omega^2 - 0,032\omega \tag{31}$$

Apskaičiuotas determinacijos koeficientas $R^2_{c_{Mv}} = 0,92$.



57 pav. Kvadrakopterio sukimo momento proporcingumo koeficiento optimizavimo grafikas

Sukurtame matematiniame modelyje vertinamas tik slenkamojo judesio pasipriešinimas. Oro pasipriešinimo jėgos atsirandančios sukantis propeleriams nevertinamos, nes tai yra labai sudėtingi procesai. Eksperimente imituojamas kvadrakopterio metimas į bedugnę erdvę. Kvadrakopterio

valdymas atliekamas keičiant atitinkamų variklių sukimo momentą. Elektros variklio sukimo momento kitimo funkcija:

$$M_{VK} = M_{V0} + A\sin(\Omega t) \tag{32}$$

čia: t – laikas, M_{V0} – pastovioji sukimo momento dalis, A – amplitudinė reikšmė, pasirinkta $A = 4 \cdot 10^{-3} Nm$.

$$\Omega = 2\pi f \tag{33}$$

čia: f – dažnis, pasirinktas f = 0,2 Hz.



58 pav. Elektros variklio sukimo momento $M_{\nu 2}$ kitimas laike

58 pav. pavaizduotas antrojo elektros variklio sukimo momento $M_{\nu 2}$ kitimo grafikas priklausomai nuo laiko. 2-tro ir 3-čio elektros variklių sukimo momentai yra visiškai vienodi $M_{\nu 2} = M_{\nu 3}$. Iki 0,4 sekundės sukimo momento reikšmės labai svyruoja, tai yra pereinamasis elektros variklio procesas, visada pasireiškiantis elektros variklio paleidimo metu. Po 0,4 sekundės momentas nusistovi ties 0,1 Nm riba ir toliau išlieka pastovus.



59 pav. Elektros variklio sukimo momento $M_{\nu I}$ kitimas laike

59 pav. pavaizduotas pirmojo elektros variklio sukimo momento M_{vI} kitimo grafikas priklausomai 1-mo ir 4-to elektros variklių nuo laiko. sukimo momentai yra visiškai vienodi $M_{vI} = M_{v4}$. Iki 5 sekundės šių momentų kitimo grafikas atrodo visiškai taip pat kaip 58 pav., tačiau ties 5 sekunde šie varikliai pradedami valdyti – jų momentai pradedami keisti pagal 32 funkciją. Kvadrakopterio elektros variklių sukimo momentų reikšmės svyruoja nuo 0,0996 Nm iki 0,1004 Nm.



60 pav. Pirmo ir antro elektros variklių sūkių kitimas laike

Keičiant elektros variklių sukimo momentą keičiami ir elektros variklių sūkiai. 60 pav. pavaizduota 1-mo ir 2-tro elektros variklių sūkių priklausomybių nuo laiko grafikai. Iki 0,4 sekundės, variklio pereinamojo proceso metu, variklių sūkiai pulsuoja, o po 0,4 sekundės nusistovi ties 1337 rad/s ir – 1337 rad/s ribomis. Kaip matome sūkių reikšmės vienodos, skiriasi tik ženklai. Taip yra todėl, kad kiekvienas kvadrakopterio elektros variklis sukuria reaktyvinį momentą kuris stengiasi kvadrakopterį pasukti apie Z ašį ir norint to išvengti du kvadrakopterio varikliai sukasi į vieną pusę, du į kitą.

Kaip ir su elektros variklių sukimo momentais taip ir su kvadrakopterio elektros variklių sūkiais pradėjus valdyti pirmą ir ketvirtą variklius ties 5 sekunde šių variklių sūkių reikšmės pradeda periodiškai svyruoti nuo 1343 rad/s iki 1340 rad/s. Sūkių kitimas pavaizduotas 61 pav. Rodomas tik 1 variklio sūkių kitimas, nes 4 variklio sūkių kitimo grafikas atrodo lygiai taip pat.



61 pav. Kvadrakopterio pirmojo elektros variklio sūkių kitimas laike



62 pav. Kvadrakopterio sistemos bendrojo reaktyvinio momento kitimas laike
Du kvadrakopterio varikliai sukasi į vieną pusę, likę du – į priešingą. Kiekviena priešingai besisukančių variklių pora kompensuoja momentą sukantį visą kvadrakopterio sistemą apie jo pagrindinę Z ašį. Šis reiškinys aiškiai matomas 62 pav. Kol vyksta el. variklių pereinamasis procesas kvadrakopterio sistemos reaktyvinis momentas svyruoja nuo 0,0622 Nm iki -0,045 Nm, tačiau jam pasibaigus jis nusistovi ties 0 Nm ir taip išsilaiko visą eksperimento laiką. Pereinamasis procesas trunka 0,4 *s*.



63 pav. Kvadrakopterio vieno elektros variklio traukos jėgų kitimas laike

Kintant elektros variklio sūkiams kinta ir kvadrakopterio elektros variklių traukos jėgos. Iki 5 sekundės visų elektros variklių traukos jėgų kitimas yra lygiai toks pats. Traukos jėgų kitimo grafikas pateikiamas 63 pav. Iki 0,4 sekundės tęsiasi kvadrakopterio elektros variklių pereinamasis procesas, kurio metu variklio traukos jėgos labai stipriai svyruoja ir po 0,4 sekundės nusistovi ties 7 N.



64 pav. Pirmo kvadrakopterio elektros variklio traukos jėgos kitimas laike

Kaip ir visi prieš tai stebėti parametrai 1 ir 4 elektros variklių traukos jėgos pradeda kisti po 5 sekundės. Jų reikšmės svyruoja nuo 7,033 N iki 7,004 N. Šis kitimas aiškiai matomas 64 pav.



65 pav. Kvadrakopterio posūkio kampo kitimas laike

65 pav. pavaizduotas kvadrakopterio pasvyrimas apie jo X ašį bėgant laikui. Iki 5 sekundės kvadrakopterio pasvyrimo kampas yra 0 rad – kvadrakopteris nesisuka apie X ašį. Po 5 sekundžių, kai prasideda 2 variklių valdymas, kvadrakopteris pradeda svyruoti apie X ašį nuo 0 rad iki 0,3117 rad.



66 pav. Kampinio kvadrakopterio sukimosi greičio apie X ašį kitimas laike

66 pav pavaizduotas kvadrakopterio sukimosi greitis apie X ašį kiekvienu laiko momentu. Kvadrakopteris pradeda svyruoti tik nuo 5 sekundės. Po 5 sekundžių kampinis kvadrakopterio greitis apie kvadrakopterio X ašį pradeda kisti nuo 0,1881 rad/s iki -0,1881 rad/s. Taip yra todėl, kad pakilus pirmo ir ketvirto elektros variklio sūkiams kvadrakopteris pradeda svirti apie X ašį.

Eksperimentas truko 50 sekundžių. Per šį laiką kvadrakopteris pakilo 74,29 m į viršų (R_z), nuskrido 18,11 m (R_x) Y ašies kryptimi, į šoną (65 pav.).



65 pav. Kvadrakopterio masės centro Y ir Z koordinačių kitimas laike

Šios linijos yra visiškai tiesios tik iki 5 sekundės. Praėjus 5 sekundėms du kvadrakopterio varikliai yra pradedami valdyti. Kvadrakopteriui pasvirus apie X ašį jis šiek tiek pajuda Y ašies kryptimi, jam vėl atsistačius judėjimas Y ašies kryptimi sustoja.

Kvadrakopterio variklių kėlimo jėga yra nukreipta tiesiai, Z ašies kryptimi, į viršų, kvadrakopteriui pasvirus apie X ašį ši jėga išsiskirsto į dvi dedamąsias Z_y ir Z_x , todėl bendra Z ašies jėga sumažėja ir kvadrakopterio judėjimas į viršų šiek tiek sulėtėja.

4.4. Teorinio tyrimo apibendrinimas ir išvados

Atlikus teorinį tyrimą, kurio metu kvadrakopterio pirmo ir ketvirto elektros variklių buvo keičiami pagal 32 funkciją nustatyta:

• kvadrakopterio elektros variklių pereinamojo proceso trukmė yra 0,4 sekundės;

2-tro ir 3-čio elektros variklių sukimo momentas pakyla iki 0,1 Nm ir išlieka pastovus visą eksperimento laiką – 50 s;

1-mo ir 4-to elektros variklių sukimo momentai nuo 5 sekundės pradeda svyruoti nuo 0,0996
 Nm iki 0,1004 Nm;

2-tro ir 3-čio elektros variklių sūkiai pasiekia 1337 rad/s ribą ir toliau nebekinta, o 1-mo ir
4-to elektros variklių sūkiai po 5 sekundžių pradeda svyruoti nuo 1343 rad/s iki 1340 rad/s;

• kvadrakopterio reaktyvinis momentas po el. variklių pereinamojo proceso yra lygus 0;

• 2-tro ir 3-čio elektros variklių kėlimo jėgos pakyla iki 7 N ir nusistovi, o 1-mo ir 4-to elektros variklių jėgos po 5 sekundžių pradeda svyruoti nuo 7,033 N iki 7,004 N;

- maksimalus kvadrakopterio pasvyrimo kampas apie kvadrakopterio X ašį 0,3117 rad;
- maksimalus kvadrakopterio kampinis greitis apie kvadrakopterio X ašį 0,1881 rad/s;
- kvadrakopteris per 50 sekundžių pakylą į 74,29 metrų aukštį ir nuskrenda 18,11 metrų į šoną.

Kvadrakopterio matematinis modelis veikia taip kaip tikėtasi. Visi rezultatai logiški ir atitinkantys realybę. Todėl šis modelis laikomas verifikuotu.

IŠVADOS, REKOMENDACIJOS

Nagrinėjamas specialiai šiam tyrimui sukonstruotas kvadrakopteris, kurio masė 1,5 kg. Maksimali išvystoma kvadrakopterio keliamoji jėga 29,5 N. Atstumas tarp kvadrakopterio priešingų variklių centrų 0,45 m.

Pagrindinės išvados:

1. Atlikus aktualių mokslinių darbų apžvalgą nustatyti pagrindiniai rėmo vibracijų šaltiniai.

2. Sukonstruotas, baigiamojo darbo užduoties reikalavimus atitinkantis, kvadrakopteris iš atskirai parinktų elementų:

- 4 bešepetėlių variklių (modelis NTM Prop Series 28-26 1100kV/252w);
- 2 prieš laikrodžio rodyklę ir 2 pagal laikrodžio rodyklę besisukančių propelerių (modelis *Hobbyking* 8 x 4,5);
- 4 elektroninių greičio valdiklių (modelis DYS SimonK 30 A);
- skrydžio valdiklio (modelis *KK2.1.5*);
- kvadrakopterio rėmo (modelis Q450);
- 4 celių 5Ah talpos ličio polimerų baterijos (modelis Turnigy 5000 mAh 4S 40C);
- 9 kanalų radijo bangų siųstuvas (modelis *Turnigy 9X 9Ch*) ir 8 kanalų radijo bangų imtuvo (modelis *8Ch 9X8C*).

2. Suprojektuotas ir sukonstruotas vienos kvadrakopterio elektros variklio – propelerio sistemos traukos jėgos matavimo stendas galintis fiksuoti ir propelerio sūkius – aps/min. Maksimali stendu matuojama traukos jėga 41,6 N, žingsnis 0,00834 N. Suprojektuotas ir sukonstruotas vienos kvadrakopterio elektros variklio – propelerio sistemos sukimo momento matavimo stendas galintis fiksuoti ir propelerio sūkius – aps/min. Maksimalus stendu matuojamas sukimo momentas 4,4 N, žingsnis 0,000883 N. Sukonstruotas ir suprogramuotas kvadrakopterio elektros variklių sūkių keitimo valdiklis leisiantis labai tiksliai keisti variklio sūkius nuo 0% iki 100 % maksimalių variklio sūkių, kas 1 %.

3. Atliktas eksperimentinis tyrimas, kurio metu išmatuoti charakteringi elektros variklio – propelerio sistemos parametrai prieš ir po balansavimo kas 10 % nuo maksimalių variklio sūkių. Paleidus variklį 100 % pajėgumu nustatyta:

- 1 elektros variklio sūkiai prieš balansavimą yra 9702 aps/min, po 9703 aps/min;
- 1 elektros variklio keliamoji jėga prieš balansavimą yra 7,49 N, po 7,75 N;
- 1 elektros variklio triukšmo lygis prieš balansavimą yra 83 dB, po 86 dB;
- 1 elektros variklio srovė prieš balansavimą yra 14,55 A, po 14,09 A;
- 1 elektros variklio įtampa prieš balansavimą yra 14,84 V, po 14,9 V;

- 1 elektros variklio galia prieš balansavimą yra 213,2 W, po 208,7 W;
- 1 elektros variklio sukimo momentas prieš balansavimą yra 0,159 Nm, po 0,181 Nm.

4. Atliktas eksperimentas, kurio metu išmatuoti visos kvadrakopterio sistemos charakteringi parametrai prieš ir po balansavimo. Paleidus kvadrakopterio elektros variklius 92% procentų pajėgumu nustatyta:

kvadrakopterio 4 variklių sistemos suvartojama elektros srovė prieš balansavimą yra 45,7
 A, po – 43,2 A;

kvadrakopterio 4 variklių sistemos triukšmo lygis prieš balansavimą yra 94 dB, po – 92 dB;

- kvadrakopterio 4 variklių sistemos įtampa prieš balansavimą yra 14,19 V, po 14,8 V;
- kvadrakopterio 4 variklių sistemos maksimali traukos jėga prieš balansavimą 28,449 N, po – 29,53 N.

5. Atliktas eksperimentas, kurio metu išmatuoti kvadrakopterio kiekvieno variklio slenkamojo judesio pagreičiai kvadrakopterio X, Y ir Z ašimis. Subalansavus elektros variklius, slenkamojo judesio pagreičių vidurkis Z ašies kryptimi sumažėjo nuo 2,4 m/s² iki 0,72 m/s².

6. Sukurti kvadrakopterio dinaminis ir matematinis judėjimo modeliai ir naudojantis jais paaiškintos kvadrakopterio judėjimo ypatybės. Nustatyta, kad kvadrakopterio proporcingumo koeficientai kinta priklausomai nuo sūkių. Rastos kvadrakopterio traukos jėgos ir sukimo momento proporcingumo koeficientų kitimo funkcijos kurios gali būti panaudotos kvadrakopterio matematinio modelio tobuilinimui. Nustatyta, kad suprojektuoto kvadrakopterio elektros variklio pereinamojo proceso trukmė yra 0,4 sekundės.

Remiantis atliktais tyrimais nustatyta, jog subalansavus kvadrakopterio variklius bei propelerius, pagerėja praktiškai visos kvadrakopterio charakteristikos. Tuo pačiu panaikinamos ir nepageidaujamos rėmo vibracijos, kurios stipriai sumažina kvadrakopterio valdymo tikslumą bei kvadrakopterio kamera daromų nuotraukų ir vaizdo įrašų kokybę.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Arduino [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 gegužės 16]. Prieiga per internetą: http://www.arduino.cc/>.

Bogdevičius, M. 2008. *Mechatroninių sistemų ir elementų modeliavimas*: mokomoji knyga. Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla. 206 p.

Chovancova, A.; Fico T.; Chovanec, L.; Hubinskym, P. 2014. *Mathematical Modelling and Parameter Identification of Quadrotor* [interaktyvus]. Procedia engineering [žiūrėta 2015 sausio 1]. Prieiga per internetą:

< http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814031981>.

Colomina, I.; Molina, P. 2014. *Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review* [interaktyvus]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing [žiūrėta 2015 kovo 26]. Prieiga per internetą:

< http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271614000501>.

Hobbyking internetinė parduotuvė [interaktyvus]. [žiūrėta 2016 kovo 23]. Prieiga per internetą: < http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/index.asp>.

Houlding, D. 2014. *High Sensivity Vibration Sensor Using Arduino* [interaktyvus]. Internet of things. [žiūrėta 2015 gegužės 3]. Prieiga per internetą: < http://davidhoulding.blogspot.com/2014/02/high-sensitivity-vibration-sensor-using.html>.

Jizhou, L.; Lv, P.; Liu, J.; Jiang, B. 2012. *Noncommutativity Error Analysis of StrapDown Inertial Navigation System under the vibration in UAVs* [interaktyvus]. International Journal of Advanced Robotic Systems. [žiūrėta 2016 birželio 16 d.]. Prieiga per internetą: < http://search.proquest.com/openview/42c590987a220ab30a9a4d48da145691/1?pq-origsite=gscholar>.

Keinys, S.; Bilkis, L.; Paulauskas, J.; Vitkauskas, V. 2011. *Dabartinės lietuvių kalbos žodynas* [interaktyvus]. Vilnius: Lietuvių kalbos institutas. [žiūrėta 2016 m. gegužės 18 d.]. Preiga per internetą: < http://dz.lki.lt/>.

Matuliauskas, A. 2012. Transporto technologinių įrenginių katedros bakalauro baigiamojo darbo rengimo metodikos nurodymai. Vilnius: Technika. 80 p.

Norris, D. 2014. *Build Your Own Quadcopter: Power Up Your Designs with the Parallax Elev-8 Quadcopter Propulsors* [interaktyvus]. AccessEngineering [žiūrėta 2015 kovo 26]. Prieiga per internetą:

<http://accessengineeringlibrary.com/browse/build-your-own-quadcopter-power-up-your-designswith-the-parallax-elev-

 $\label{eq:score} 8/c9780071822282ch05?q=quadcopter+vibrations\&book=Build+Your+Own+Quadcopter%3A+Power+Up+Your+Designs+with+the+Parallax+Elev-8#c9780071822282ch05lev1sec09>.$

Plasencia, G. N. M.; Rodriguez, M. T.; Rivera, S. C.; Lopez, A. H. 2012. *Modelling and Analysis of Vibrations in an UAV Helicopter with a Vision System* [interaktyvus]. International Journal of Advanced Robotic Systems. [žiūrėta kovo 28]. Prieiga per internetą:

<http://www.intechopen.com/journals/international_journal_of_advanced_robotic_systems/modellingand-analysis-of-vibrations-in-a-uav-helicopter-with-a-vision-system>.

Reitsma, L. 2012. A Novel Approach to Vibration Isolation in Small, Unmanned Aerial Vehicles [interaktyvus]. USMA [žiūrėta 2015 balandžio 27]. Prieiga per internetą: < http://www.ballos.com/tepraconnect_interface/TePRA09/312.pdf>.

Spruogis, B.; Turla, V.; Jakštas, A.; Bogdevičius M.; Hantel, P. 2009. *Sukamojo judesio perdavimo ir stabilizavimo priemonių teorija ir taikymas*. Vilnius: Technika. 478 p.

PRIEDAI

A priedas

TRAUKOS MATAVIMŲ STENDO DUOMENŲ LENTELĖS

Eil. Nr.	Sūkiai, %	Sūkiai, aps/min	Variklio– propelerio sistemos traukos jėga, N	Triukšmo lygis, dB	Srovė, A	Įtampa, V	Galia, W
1	10	2129	0,27	61	0,27	15,4	4,1
2	20	3237	0,77	66	0,62	15,39	9,5
3	30	4386	1,47	68	1,28	15,37	19,5
4	40	5486	2,40	74	2,38	15,33	36,3
5	50	6466	3,38	73	3,75	15,28	57,2
6	60	7455	4,16	74	5,7	15,22	85,7
7	70	8140	5,24	78	7,8	15,11	117,2
8	80	8800	6,50	80	10,4	15,01	154,6
9	90	9422	7,16	82	13,26	14,91	197,1
10	100	9702	7,49	83	14,55	14,84	213,2

A 1 1 4 . 1 !	X7			1		:
A.I lentele.	variklio-propelerio	sistemos trauko	s matavimo stenc	io rodmenvs i	pries bai	ansavima
	r manager properties				p	

A.2 lentelė. Variklio-propelerio sistemos traukos matavimo stendo rodmenys po balansavimo

Eil. Nr.	Sūkiai, %	Sūkiai, aps/min	Variklio– propelerio sistemos traukos jėga,	Triukšmo lygis, dB	Srovė, A	Įtampa, V	Galia, W
1	10	2148	0,35	61	0,27	15,41	4,1
2	20	3226	0,77	67	0,63	15,4	9,7
3	30	4360	1,49	70	1,3	15,38	20,1
4	40	5427	2,44	74	2,4	15,34	36,9
5	50	6372	3,39	75	3,77	15,29	56,9
6	60	7346	4,44	78	5,63	15,23	85,6
7	70	8143	5,56	81	7,9	15,15	118,9
8	80	8762	6,58	84	10,3	15,08	154,9
9	90	9422	7,44	84	12,96	14,96	194,6
10	100	9703	7,75	86	14,09	14,9	208,7

Eil. Nr.	Sūkiai, %	Sūkiai, aps/min	Variklio– propelerio sistemos traukos iėga,	Triukšmo lygis, dB	Srovė, A	Įtampa, V	Galia, W
1	10	2180	0,32	60	0,28	15,92	4,4
2	20	3310	0,82	66	0,65	15,91	10,3
3	30	4478	1,59	70	1,35	15,88	21,5
4	40	5560	2,49	74	2,47	15,83	39,8
5	50	6527	3,53	75	3,9	15,76	61,4
6	60	7455	4,64	79	5,88	15,67	91,6
7	70	8343	5,73	80	8,15	15,57	126,5
8	80	9102	7,14	84	10,83	15,5	167,3
9	90	9665	8,14	84	13,86	15,35	209,3
10	100	10067	8,78	87	15,12	15,24	228,3

A.3 lentelė. Variklio-propelerio sistemos traukos matavimo stendo rodmenys po balansavimo esant pakrautai baterijai

SUKIMO MOMENTO MATAVIMŲ STENDO DUOMENŲ LENTELĖS

A.4 lentelė. Variklio / propelerio sistemos sukimo momento st	stendo rodmenys prieš balansavimą
---	-----------------------------------

Eil. Nr.	Sūkiai, %	Sūkiai, aps/min	Variklio– propelerio sistemos sukimo momentas , N	Triukšmo lygis, dB	Srovė, A	Įtampa, V	Galia, W
1	10	2236	0,005	67	0,3	16,25	4,8
2	20	3360	0,011	73	0,69	16,22	11,1
3	30	4548	0,020	81	1,45	16,14	23,3
4	40	5650	0,037	85	2,65	15,98	42,4
5	50	6545	0,044	88	4,15	15,85	65
6	60	7300	0,073	89	5,88	15,63	96,1
7	70	8260	0,083	91	8,28	15,42	126,4
8	80	8800	0,102	92	10,84	15,2	164,7
9	90	9300	0,129	92	14,06	15,0	209
10	100	9500	0,159	92	14,9	14,78	219,1

Eil. Nr.	Sūkiai, %	Sūkiai, aps/min	Variklio– propelerio Triukšmo sistemos sukimo lygis, dB momentas , N		Srovė, A	Įtampa, V	Galia, W
1	10	2236	0,007	72	0,3	16,27	4,8
2	20	3380	0,011	76	0,68	16,25	11,00
3	30	4587	0,021	83	1,45	16,2	23,4
4	40	5612	0,041	87	2,65	16,13	42,7
5	50	6608	0,057	90	4,16	16,00	66,3
6	60	7408	0,072	92	6,19	15,78	96,6
7	70	8280	0,109	92	8,45	15,57	131,0
8	80	8908	0,118	92	11,00	15,39	168,9
9	90	9322	0,143	92	13,64	15,2	206,4
10	100	9570	0,181	92	14,8	15,08	222,5

A.5 lentelė. Variklio / propelerio sistemos sukimo momento stendo rodmenys po balansavimo

A.6 lentelė.	Variklio /	propelerio	sistemos	sukimo	momento	stendo	rodmenys	po	balansavimo	esant	pakrautai
baterijai											

Eil. Nr.	Sūkiai, %	Sūkiai, aps/min	Variklio– propelerio sistemos sukimo momentas , N	Triukšmo lygis, dB	Srovė, A	Įtampa, V	Galia, W
1	10	2273	0,009	71	0,31	16,62	5,1
2	20	3450	0,012	77	0,7	16,59	11,6
3	30	4670	0,030	84	1,5	16,54	24,6
4	40	5816	0,054	88	2,72	16,45	44,7
5	50	6781	0,071	90	4,3	16,35	70,0
6	60	7756	0,082	91	6,33	16,19	102,8
7	70	8418	0,117	92	8,73	16,0	138,9
8	80	9102	0,138	92	11,13	15,83	174,3
9	90	9632	0,162	92	13,78	15,75	212,2
10	100	10032	0,207	92	15,13	15,6	240,5

BENDROS KVADRAKOPTERIO SISTEMOS MATAVIMO DUOMENŲ LENTELĖS

VI	SOS SISTEN	MOS MATA	AVIMŲ REZULTATA	I PRIEŠ BALANS	SAVIMĄ
Eil. Nr.	Sūkiai, %	Srovė, A	Maksimali keliamoji jėga, N	Triukšmo lygis, dB	Įtampa, V
1	5	1,9	2,4525	74	16,5
2	22	6,6	7,2594	84	16,35
3	39	18	12,753	89	15,8
4	56	22	17,658	92	15,6
5	75	36	23,544	92	15,18
6	92	45	28,449	94	14,19

A.7 lentelė.	Visos kvadrakopteric	sistemos keliamosios	galios matavimo	rezultatai (pr	ieš balansavimą)
	1		0		

A.8 lentelė. Visos kvadrakopterio sistemos keliamosios galios matavimo rezultatai (po balansavimo)

V	VISOS SISTEMOS MATAVIMŲ REZULTATAI PO BALANSAVIMO										
Eil. Nr.	Sūkiai, %	Srovė, A	Maksimali keliamoji jėga, g	Triukšmo lygis, dB	Įtampa, V						
1	5	1,9	2,8449	72	16,5						
2	22	6,6	7,9461	83	16,37						
3	39	13,5	13,734	90	16,1						
4	56	21,4	18,7371	92	15,9						
5	75	35,1	25,1136	92	15,2						
6	92	43,2	29,5281	92	14,8						

A.9 lentelė. Koeficiento c_{F_k} reikšmės

Mikrovaldikliu nustatyti sūkiai, %	c_{F_k} prieš balansavimą, 10 ⁻⁶	c_{F_k} po balansavimo, 10^{-6}	C_{F_k} po balansavimo esant padidintai įtampai, 10 ⁻⁶
2148	5,4	6,9	6,23
3226	6,74	6,71	6,79
4360	6,98	7,15	7,23
5427	7,26	7,6	7,34
6372	7,37	7,6	7,55
7346	6,83	7,5	7,62
8143	7,22	7,6	7,51
8762	7,65	7,8	7,86
9422	7,35	7,6	7,95
9703	7,26	7,5	7,9

Mikrovaldikliu nustatyti sūkiai, %	$c_{M_{\nu}}$ prieš balansavimą, 10 ⁻⁷	$c_{M_{\nu}}$ po balansavimo, 10^{-7}	$c_{M_{\gamma}}$ po balansavimo esant padidintai įtampai, 10 ⁻⁷
2236	0,97	1,3	1,6
3380	0,86	0,85	0,95
4587	0,9	0,92	1,3
5612	1,1	1,2	1,5
6608	0,94	1,2	1,4
7408	1,3	1,2	1,2
8280	1,1	1,5	1,5
8908	1,2	1,4	1,5
9322	1,4	1,5	1,6
9570	1,6	1,8	1,9

A.10 lentelė. Koeficiento c_{M_v} reikšmės



A.1 pav. Elektros variklio išmatuotų sūkių priklausomybė nuo nustatytų sūkių (sukimo momento stende)



A.2 pav. Triukšmo lygio priklausomybė nuo nustatytų sūkių (sukimo momento stende)



A.3 pav. Elektros srovės priklausomybė nuo nustatytų sūkių (sukimo momento stende)



A.4 pav. Elektros galios priklausomybė nuo nustatytų sūkių (sukimo momento stende)

B priedas



ELEKTROS VARIKLIŲ VIBRACIJŲ MATAVIMO GRAFIKAI





B.2 pav. 3 elektros variklio vibracijos: a) – prieš balansavimą, b) – po balansavimo.



B.3 pav. 4 elektros variklio vibracijos: a) – prieš balansavimą, b) – po balansavimo.

C priedas

Vibracijų reikšmės prieš ir po variklio – propelerio sistemos balansavimo:



įtvirtintos į sukimo momento matavimo stendą:

C.1 pav. Vibracijų reikšmės esant 10 % nuo maksimalių elektros variklio sūkių: a) – prieš balansavimą,
b) – po balansavimo.



C.2 pav. Vibracijų reikšmės esant 20 % nuo maksimalių elektros variklio sūkių: a) – prieš balansavimą,
b) – po balansavimo.



C.3 pav. Vibracijų reikšmės esant 30 % nuo maksimalių elektros variklio sūkių: a) – prieš balansavimą,
b) – po balansavimo.



C.4 pav. Vibracijų reikšmės esant 40 % nuo maksimalių elektros variklio sūkių: a) – prieš balansavimą,
b) – po balansavimo.



C.5 pav. Vibracijų reikšmės esant 50 % nuo maksimalių elektros variklio sūkių: a) – prieš balansavimą,
b) – po balansavimo.

- %	(let	54% 15:42	- V		ŝ 🖊 55% = 15:37
Kuns	Data	Edit	< Runs	Data	Edit
Acq: 22 bal. 2016 (01: Points: 513 Gaps: r Data rate: 100.7 Hz Peak raw: X (0.50) Y (ISD: X (0.2) Y (0.59) Z Resonances: X: 23 Hz (0.10) X: 23 Hz (0.15) Z: 23 Hz (0.25) rms vibration: X (0.21)	54 popiet) Length: 0 min 5 s none Units: m/s°2 1.06) Z (14.21) (2.4)) Y (0.6) Z (2.4)	ec	Acq: 22 bal. 2016 (f Points: 497 Gaps Data rate: 100.4 Hz Peak raw: X (0.58) ISD: X (0.23) Y (0.27 Resonances: X: 24 Hz (0.013), Y: 24 Hz (0.013), Z: 24 Hz (0.013) Z: 24 Hz (0.013),	11:45 popiet) Length: 0 m :: none Units: m/s*2 ((0.62) Z (12.71))/ Z (1.5) 17 HZ (0.0073) 23) Y (0.29) Z (1.6)	n 4 sec
PSD log F	PSD vibration t	lt raw	PSD log	9 PSD vibration	tilt raw
time (s)	20 25 30	accel (m/s*2) 2.0 2.0 2.0 2.0	((), (), (), (), (), (), (), (), (), (),		accel (m/e?2)- 2.0 1.0
X	Y Z	scale: 1 X	×	Y	Z scale: 1 X
Û		Ŵ	Û		Ŵ
	a)		b)		

C.6 pav. Vibracijų reikšmės esant 60 % nuo maksimalių elektros variklio sūkių: a) – prieš balansavimą,
b) – po balansavimo.



C.7 pav. Vibracijų reikšmės esant 70 % nuo maksimalių elektros variklio sūkių: a) – prieš balansavimą,
b) – po balansavimo.

u 🗳		54% 🖬 15:42	-	((:**	55% 🖥 15:37
Kuns	Data	Edit	< Runs	Data	Edit
Acq: 22 bal. 2016 (Points: 485 Gap Data rate: 101.3 H; Peak raw: X (0.89) ISD: X (0.33) Y (0.5 Resonances: X: 46 Hz (0.09) Z: 46 Hz (0.91) Z: 46 Hz (0.4) rms vibration: X (0	01:54 popiet) Length: 0 min 4 s: none z Units: m/s*2 Y (1.04) Z (15.70) (5) Z (3.2) 32) Y (0.53) Z (3.2)	4 sec	Acq: 22 bal. 2016 (C Points: 493 Gaps Data rate: 100.6 Hz Peak raw: X (0.54) ISD: X (0.19) Y (0.14 Resonances: X: 4.7 Hz (0.0024) Y: Z: rms vibration: X (0.1	11:46 popiet) Length: 0 min 4 :: none Units: m/s*2 ((0.53) Z (11.42) 1) Z (0.78) 17) Y (0.12) Z (0.76)	sec
PSD Ic	PSD vibration 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	tilt raw accer(m/3*2) 4.0 4.0 2.0 4.0 2.0 4.0 4.0 4.0 2.0 4.0 4.0 4.0 4.0 4.0 4.0 4.0 4	PSD log	PSD vibration	Lilt raw accel (m/s*2) 0 0,5 0 0,5 0000000000
	a)		b)		

C.8 pav. Vibracijų reikšmės esant 80 % nuo maksimalių elektros variklio sūkių: a) – prieš balansavimą,
b) – po balansavimo.



C.9 pav. Vibracijų reikšmės esant 90 % nuo maksimalių elektros variklio sūkių: a) – prieš balansavimą,
b) – po balansavimo.

u 🖉		Jan 54% 15:42	u 🗳		🛜 📕 55% 🖬 15:38
< Runs	Data	Edit	< Runs	Data	Edit
Title: nebalansuota Acq: 22 bal. 2016 (i Points: 489 Gap. Data rate: 100.7 Hz Peak raw: X (0.73) ISD: X (0.26) Y (0.5 Resonances: X: 43 Hz (0.017) Y: 43 Hz (0.5) Trms vibration: X (0.	s momento 31:54 popiet) Length: 0 min 4 s: none Units: m/s*2 (0.90) Z (15.42) 2) Z (2.9) 24) Y (0.53) Z (2.9)	sec	Title: subalansuot Acq: 22 bal. 2016 Points: 480 Ga Data rate: 100.8 H Peak raw: X (0.54 ISD: X (0.24) Y (0. Resonances: X: 41 Hz (0.014) Y: 41 Hz (0.16) rms vibration: X (f	(01:46 popiet) Length: 0 m ps: none tz Units: m/s*2 y (0.84) Z (13.51) 46) Z (2.2)	iin 4 sec
PSD lo	g PSD vibration	tilt raw	PSD I	og PSD vibration	tilt raw
time (s)	20 25 Y Z	accel (m/s*2) 4.0 2.0 2.0 2.0 2.0 2.0 2.0 2.0 2.0 2.0 2	interest and a state of the sta	20 25	acce (m/s ²) 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20
Û		Ŵ	ſ	Ì	Ŵ
	a)		b)		

C.10 pav. Vibracijų reikšmės esant 100 % nuo maksimalių elektros variklio sūkių: a) – prieš balansavimą, b) – po balansavimo.

įtvirtintos į traukos jėgos matavimo stendą:



C.11 pav. Vibracijų reikšmės esant 10 % nuo maksimalių elektros variklio sūkių: a) – prieš balansavimą, b) – po balansavimo.



C.12 pav. Vibracijų reikšmės esant 20 % nuo maksimalių elektros variklio sūkių: a) – prieš balansavimą, b) – po balansavimo.



C.13 pav. Vibracijų reikšmės esant 30 % nuo maksimalių elektros variklio sūkių: a) – prieš balansavimą,
b) – po balansavimo.

I		🤶 51	% 📕 15:59	I			7 51%	15:58
Kuns	D	ata	Edit	Kuns		Data		Edit
Acq: 22 bal. 2016 Points: 498 Gap Data rate: 100.7 H Peak raw: X (0.32) ISD: X (0.095) Y (0 Resonances: X: 9.4 Hz (72e-0 Z: 9.4 Hz (72e-0 Z: 9.4 Hz (72e-0 Z: 9.4 Hz (72e-0 Z: 9.4 Hz (72e-0) Z: 9.4 Hz (72e-0)	(02:07 popiet) L s: none z Units: m/s*2 Y (0.26) Z (10.9; .02) Z (0.86) I) 5) .063) Y (0.016) Z	ength: 0 min 4 sec : 2) : (0.57)		Acq: 22 bal. Points: 491 Data rate: 11 Peak raw: X ISD: X (0.32) Resonances X: 9.4 Hz (Z: 9.4 Hz (rms vibratio	2016 (02:03 pc Gaps: none 00.5 Hz Unit (0.65) Y (0.29)) Y (0.034) Z (0 5: 0.035) 0.00025), 9.4 H; 0.05) n: X (0.21) Y (0	opiet) Length: 0 i s: m/s*2 Z (10.80) .69) z (0.00011) .033) Z (0.45)	min 4 sec	
PSD lo	og PSD vib	ration tilt	raw	PSD	log PSD	vibration	tilt	raw
			accel (m/s*2) 1.0 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0				H A A A	accei (m/s²2) 1.0 0.5 0.5 0.5 0.5
time (s)		0.5	-1.5	time (s)	15			
1.5	1 2.0	2.5 3.0	3.5 scale: 1 X	X	1.5 2.	U 2.5	3.0 7	3.5 ecole: 1 X
■ ^]	• - Û	ocale. TA	•	Û		12	source 1 A
		a)		b)				

C.14 pav. Vibracijų reikšmės esant 40 % nuo maksimalių elektros variklio sūkių: a) – prieš balansavimą,
b) – po balansavimo.



C.15 pav. Vibracijų reikšmės esant 50 % nuo maksimalių elektros variklio sūkių: a) – prieš balansavimą,
b) – po balansavimo.

-		51% 15:59	_		🗊 🔎 51% 🖬 15:58
Kuns	Data	Edit	< Runs	Data	Edit
Acq: 22 bal. 2016 Points: 504 Ga Data rate: 100.5 F Peak raw: X (0.45 ISD: X (0.11) Y (0. Resonances: X: 22 Hz (0.0015 Z: 22 Hz (0.019) rms vibration: X (((02:07 popiet) Length: 0 mi ps: none Iz Units: m/s*2 Y (0.40) Z (10.90) 078) Z (0.76) 9) 0.12) Y (0.081) Z (0.8)	n 5 sec	Acq: 22 bal. 2011 Points: 492 Gr Data rate: 101.0 Peak raw: X (0.7 Resonances: X: 21 Hz (0.04) Y (0. Resonances: X: 21 Hz (0.09 Z: 21 Hz (0.47) rms vibration: X (5 (02:04 popiet) Length: 0 aps: none Hz Units: m/s*2 7) Y (0.49) Z (11.44) 19) Z (1.3) (2) (0.42) Y (0.19) Z (1.4)	I min 4 sec
PSD I	og PSD vibration	tilt raw	PSD	log PSD vibration	tilt raw
4) 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	20 25	0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5	1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,	20 25	Lacel (m/s*2)
	_ _	Ŵ	Ĺ		- Ŵ
	a)		b)		

C.16 pav. Vibracijų reikšmės esant 60 % nuo maksimalių elektros variklio sūkių: a) – prieš balansavimą,
b) – po balansavimo.



C.17 pav. Vibracijų reikšmės esant 70 % nuo maksimalių elektros variklio sūkių: a) – prieš balansavimą,
b) – po balansavimo.

_		🗿 🔏 51% 🖥 15°5	9 🖬 🗳		🛜 🖌 51% 🖬 15:58
Runs	Data	Ed	it < Runs	Data	Edit
Acq: 22 bal. 2016 Points: 486 Ga Data rate: 100.6 H Peak raw: X (0.32 ISD: X (0.046) Y (f Resonances: X: 6.3 Hz (0.000 Y: Z: rms vibration: X (f	(02:07 popiet) Length: 0 ps: none tz Units: m/s*2 Y (0.44) Z (10.24) J.13 Z (0.24) 35), 47 Hz (0.00025)	nin 4 sec	Acq: 22 bal Points: 479 Data rate: 1 ISD: X (0.14 Resonance X: Y: Z: rms vibratie	1. 2016 (02:04 popiet) Length Gaps: none 100.7 Hz Units: m/s*2 ((0.43) Y (0.56) Z (10.46) 5) Y (0.2 Z (0.28) s: on: X (0.15) Y (0.2) Z (0.28)	: 0 min 4 sec
PSD	og PSD vibration	tilt raw	PSD	log PSD vibration	tilt raw
time (s)	20 25	accil (m/s ² 2)	time (e)	1.5 2.0 Y	acet (m/s ²)
Ĺ	Ì	Ŵ		Û	Ŵ
	a)		b)		

C.18 pav. Vibracijų reikšmės esant 80 % nuo maksimalių elektros variklio sūkių: a) – prieš balansavimą,
b) – po balansavimo.



C.19 pav. Vibracijų reikšmės esant 90 % nuo maksimalių elektros variklio sūkių: a) – prieš balansavimą,
b) – po balansavimo.

ы С		51% 16:00	u		51% 15:59
< Runs	Data	Edit	Kuns	Data	Edit
Acq: 22 bal. 2016 (0 Points: 486 Gaps Data rate: 100.8 Hz Peak raw: X (0.30) ISD: X (0.097) Y (0.1 Resonances: X: 41 Hz (0.0033) Y: 41 Hz (0.012) Z: 41 Hz (0.53) rms vibration: X (0.0	12:07 popiet) Length: 0 min 4 ser : none Units: m/s*2 ((0.48) Z (11.68) 8) Z (1.2) 1999) Y (0.18) Z (1.2)	3	Title: balansuo Acq: 22 bal. 20 Points: 492 i Data rate: 100. Peak raw: X (0. ISD: X (0.17) Y Resonances: X: 39 Hz (0.07 Y: 39 Hz (0.17 Z: 39 Hz (0.17 rms vibration:)	as 16 (02:04 popiet) Length: 0 3aps: none 14 Units: m/s*2 42) Y (0.54) Z (10.90) (0.22) Z (0.65) 2) (0.18) Y (0.22) Z (0.65)	min 4 sec
PS log	y PSD vibration tilt	raw accel (m/s*2) 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	PSD	log PSD vibration	tit raw adoet (m/s*2) adoet (m
Û		Û		Û	Ŵ
	a)		b)		

C.20 pav. Vibracijų reikšmės esant 100 % nuo maksimalių elektros variklio sūkių: a) – prieš balansavimą, b) – po balansavimo.

D priedas

Proporcingumo koeficientų optimizavimo funkcijos programinis kodas, parašytas "Maple" programa:

> restart;

- > regression;
- > with(Statistics):

> TN := Vector([2148, 3226, 4360, 5427, 6372, 7346, 8143, 8762, 9422, 9703], datatype=float):

- > TW := Vector(10):
- > for i to 10 do TW[i]:=evalf(Pi*TN[i]/30); end do;
- > TC := Vector([6.9, 6.71, 7.15, 7.6, 7.6, 7.5, 7.6, 7.8, 7.6, 7.5], datatype=float):
- > lygtisT:= $a+b*v^2+c*v^3+d*v^5+h*ln(v)+r/ln(v)$:
- > rez:=NonlinearFit(lygtisT, TW, TC, v);
- > plot(rez,v=200...1000);

> RT_SI := ScatterPlot(TW, TC, fit = [lygtisT, v], thickness = 3, color=red):

plots[display](RT_SI,axes=BOXED,titlefont=[TIMES,ROMAN,18],title=``,thickness=5,labelfont=[TIMES,ROMAN,18],labeldirections=[HORIZONTAL,VERTICAL],axesfont=[TIMES,ROMAN,18],labeldirections=[W, rad/s`, `CFk`]);

> RT:=evalf(1-sqrt(add((TC[i]-subs(v=TW[i],rez))^2,i=1..10)/9));

- > MN := Vector([2236, 3380, 4587, 5612, 6608, 7408, 8280, 8908, 9322, 9570], datatype=float):
- > MW := Vector(10):
- > for i to 10 do MW[i]:=evalf(Pi*MN[i]/30); end do;
- > MC := Vector([1.3, 0.85, 0.92, 1.2, 1.2, 1.2, 1.5, 1.4, 1.5, 1.8], datatype=float):
- > lygtisM:=b*v^5+a+c*v^3+d*v^2+h*v:
- > rez:=NonlinearFit(lygtisM, MW, MC, v);
- > plot(rez,v=0...1000);

> RM_SI := ScatterPlot(MW, MC, fit = [lygtisT, v], thickness = 3, color=red):

```
>plots[display](RM_SI,axes=BOXED,titlefont=[TIMES,ROMAN,18],title=``,thickness=5,labelfont=[
TIMES,ROMAN,18],labeldirections=[HORIZONTAL,VERTICAL],axesfont=[TIMES,ROMAN,18],l
abels=[`w, rad/s`, `CMv`]);
```

> RM:=evalf(1-sqrt(add((MC[i]-subs(v=MW[i],rez))^2,i=1..10)/9));

E priedas

Kvadrakopterio matematinio modeliavimo programinis kodas, parašytas FORTRAN kalba:

```
SUBROUTINE F_A_MATRIX(Angel,A)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION Angel(3),A(3,3)
c1=DCOS(Angel(1)); s1=DSIN(Angel(1))
c2=DCOS(Angel(2)); s2=DSIN(Angel(2))
c3=DCOS(Angel(3)); s3=DSIN(Angel(3))
                A(1,2)=-c2*s3;
A(1,1)=c2*c3;
                                A(1,3)=s2
A(2,1)=c1*s3+s1*s2*c3; A(2,2)=c1*c3-s1*s2*s3; A(2,3)=-s1*c2
A(3,1)=s1*s3-c1*s2*c3; A(3,2)=s1*c3+c1*s2*s3; A(3,3)=c1*c2
RETURN
END
c====
                 _____
                                                   _____
SUBROUTINE F_CARDANS_ANGLES_G4_MATRIX(ANGLE,G4)
IMPLICIT REAL*8 (a-h,o-z)
DIMENSION ANGLE(3), G4(3,3)
teta1=ANGLE(1); teta2=ANGLE(2); teta3=ANGLE(3)
DO i=1,3; DO j=1,3; G4(i,j)=0.0D0; END DO; END DO
c1=DCOS(teta1); s1=DSIN(teta1)
c2=DCOS(teta2); s2=DSIN(teta2)
c3=DCOS(teta3); s3=DSIN(teta3)
k=1; G4(k,1)=c3/c2; G4(k,2)=-s3/c2;
k=2; G4(k,1)=s3; G4(k,2)=c3;
k=3; G4(k,1)=-s2/c2*c3; G4(k,2)=s2/c2*s3; G4(k,3)=
                                                 1.0D0
RETURN
END
c =
SUBROUTINE F_DATA_INITIAL(Y,nvarb)
IMPLICIT REAL*8(a-h,o-z)
COMMON /PARAM_QUADROCOPTER/ PAR_QUADRO_COPTER(100)
DIMENSION Y(nvarb)
Pi=4.0D0*DATAN(1.0D0)
amomv1=Y(1); afi1=Y(2); wv1=Y(3)
amomv2=Y(4); afi2=Y(5); wv2=Y(6)
amomv3=Y(7); afi3=Y(8); wv3=Y(9)
amomv4=Y(10); afi4=Y(11); wv4=Y(12)
k = 28
cv1=PAR_QUADRO_COPTER(k+1)
dv1=PAR_QUADRO_COPTER(k+2)
w01=PAR_QUADRO_COPTER(k+3)
ainv1=PAR_QUADRO_COPTER(k+4)
U red1=PAR QUADRO COPTER(k+5)
k=33 !!!!38
cv2=PAR_QUADRO_COPTER(k+1)
dv2=PAR QUADRO COPTER(k+2)
w02=PAR OUADRO COPTER(k+3)
ainv2=PAR OUADRO COPTER(k+4)
U_red2=PAR_QUADRO_COPTER(k+5)
k=38
cv3=PAR_QUADRO_COPTER(k+1)
dv3=PAR_QUADRO_COPTER(k+2)
w03=PAR_QUADRO_COPTER(k+3)
ainv3=PAR_QUADRO_COPTER(k+4)
U red3=PAR QUADRO COPTER(k+5)
k = 43
cv4=PAR OUADRO COPTER(k+1)
dv4=PAR QUADRO COPTER(k+2)
w04=PAR_QUADRO_COPTER(k+3)
ainv4=PAR_QUADRO_COPTER(k+4)
```

U_red4=PAR_QUADRO_COPTER(k+5) wv10=w01 wv20=w02 wv30=w03 wv40=w04 Y(1)=U_red1*cv1*(w01-U_red1* wv10)/dv1 Y(2)=0.0D0Y(3)=wv10 Y(4)=U_red2*cv2*(w02-U_red2* wv20)/dv2 Y(5)=0.0D0 Y(6)=wv20 Y(7)=U_red3*cv3*(w03-U_red3* wv30)/dv3 Y(8)=0.0D0 Y(9)=wv30 Y(10)=U_red4*cv4*(w04-U_red4* wv40)/dv4 Y(11)=0.0D0 Y(12)=wv40 k=12 DO i=1.3 Y(i+k)=0.0D0Y(i+k+3)=0.0D0Y(i+k+6)=0.0D0 END DO WRITE(6,*)" WRITE(6,*) '*** F DATA INITIAL''' WRITE(6,*)" DO i=1,nvarb WRITE(6,1000) i, Y(i) END DO PAUSE 'F DATA INITIAL' 1000 FORMAT(1X,I3,2X,5(E12.5,1x)) RETURN **END** C SUBROUTINE F_DATA_QUADROCOPTER() IMPLICIT REAL*8(a-h,o-z) COMMON /PARAM QUADROCOPTER/ PAR QUADRO COPTER(100) Pi=4.0D0*DATAN(1.0D0) PAR OUADRO COPTER(1)=0.054 vieno variklio ir vieno propelerio mases suma kg PAR OUADRO COPTER(2)=0.023 lelektroninio greicio valdiklio (ESC) mase kg PAR_QUADRO_COPTER(3)=0.719 !centrines dalies mase (su baterija ir t.t.) kg PAR QUADRO COPTER(4)=0.0425 lvienos kojos mase kg !!!!!!!Atstumai iki bendro mases centro nuo centru!!!!!!!! PAR QUADRO COPTER(5)=0.225 !nuo variklio centrines asies m !nuo ESC centrines asies m PAR_QUADRO_COPTER(6)=0.092 PAR_QUADRO_COPTER(7)=0.06 !nuo koju galinio pavirsiaus m PAR QUADRO COPTER(8)=0.014 !variklio spindulys m PAR OUADRO COPTER(9)=0.1 !propelerio spindulys m PAR QUADRO COPTER(10)=0.07 !centrines dalies spindulys m PAR_QUADRO_COPTER(11)=0.012 !kojos spindulys m PAR_QUADRO_COPTER(12)=0.029 !variklio aukstis m PAR_QUADRO_COPTER(13)=0.062 !ESC aukstis m PAR_QUADRO_COPTER(14)=0.08 !centrines dalies aukstis m PAR OUADRO COPTER(15)=0.026 !ESC ilgis m PAR OUADRO COPTER(16)=0.184 !kojos ilgis m !!!!!!!Masiu inercijos momentai apie x, y asis!!!!!!!!!! PAR_QUADRO_COPTER(17)=0.00553836 !bendras visu varikliu kg*m^2 PAR_QUADRO_COPTER(18)=0.000406671 !bendras visu ESC kg*m^2 PAR QUADRO COPTER(19)=0.005482375 !centrines dalies kg*m^2

```
PAR OUADRO COPTER(20)=0.001274433
                                            !bendras visu koju kg*m^2
!!!!!!!!Masiu inercijos momentai apie z asi!!!!!!!!!!!
PAR_QUADRO_COPTER(21)=0.010956168
                                           !bendras visu varikliu kg*m^2
PAR_QUADRO_COPTER(22)=0.000813341
                                           !bendras visu ESC kg*m^2
PAR QUADRO COPTER(23)=0.00176155
                                          !centrines dalies kg*m^2
PAR_QUADRO_COPTER(24)=0.002536627
                                           !bendras visu koju kg*m^2
PAR QUADRO COPTER(25)=0.000616
                                          variklio pavirsiaus plotas is virsaus m^2
PAR QUADRO COPTER(26)=0.001612
                                         !esc plotas is virsaus m^2
PAR_QUADRO_COPTER(27)=0.015
                                     !centrines dalies pavirsiaus plotas is virsaus m^2
PAR QUADRO COPTER(28)=0.0045
                                       vienos kojos pavirsiaus plotas is virsaus m^2
U_red=1.0D0/5.40D0 !U_red=245.76D0
ainv0=1.0956168D-5; !!!ainv0=1.0956168D-2;
ainv_red=1.0D0*ainv0
ainv=ainv0*U_red**2
aM_max=0.1290445484D0
Skr=0.10D0; ft=50.0D0; p=1.0D0; !!! TESTUI
aniu=(Skr/(2.0D0*aM max)):
w0=(2.0D0*Pi*ft/p);
wt=(2.0D0*Pi*ft); betav=(1.0D0/(aniu*w0))
Tv = (1.0D0/(wt*Skr));
C========
DOUBLE PRECISION FUNCTION F_DOT_PRODUCT(A,B,n)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION A(n),B(n)
suma=0.0D0
DO i=1,n
suma = suma + A(i) * B(i)
END DO
F DOT PRODUCT=suma
RETURN
END
DOUBLE PRECISION FUNCTION F_dsign(x)
IMPLICIT REAL*8(a-h,o-z)
IF(x.GT.0.0D0) F dsign=1.0D0
IF(x.LT.0.0D0) F dsign=-1.0D0
IF(x.EQ.0.0D0) F_dsign=0.0D0
RETURN
END
C=
SUBROUTINE F_FORCE_ORO_PASIPRIESINIMAS(akdx,akdy,
               akdz,VC,FC)
&
IMPLICIT real*8 (a-h,o-z)
DIMENSION VC(3), FC(3)
Pi=4.0D0*DATAN(1.0D0)
WRITE(6,*)"
WRITE(6,*)"
WRITE(6,*)' FZ,FN,FT_tangential:'
WRITE(6,1000) FZ,FN,FT_tangential
WRITE(6,*)"
FC(1)=-akdx*VC(1)
FC(2)=-akdy*VC(2)
FC(3)=-akdz*VC(3)
1000 FORMAT(1X,6(E12.5,1X))
RETURN
END
c = c
DOUBLE PRECISION FUNCTION F FRICTION FORCE(FZ, Vel vagonas,
```

- Omega,RW,alfa,h galvute,ZR, & dqbg1dt,dwRdt,dwRdx,afiR,dafiRdt, &
- &
- friction_coefficient_rail)

IMPLICIT real*8 (a-h.o-z) Pi=4.0D0*DATAN(1.0D0) DV_TAU_RELATIVE=F_VELOCITY_RELATIVE_CONTACT(Vel_vagonas,Omega,RW,alfa,h_galvute,ZR, & & dqbg1dt,dwRdt,dwRdx,afiR,dafiRdt) FN=F_FORCE_CONTACT_NORMAL(FZ,alfa) F_frictionk=-friction_coefficient_rail* DABS(force qbg1)*F DSIGN(DV TAU RELATIVE) & DV=F_VELOCITY_RELATIVE_CONTACT(h_galvute, Vel_vagonas,Omega,RW,teta,ZR, & & DAFIDT) FT_tangential=FN*friction_coefficient_rail *F_DSIGN(DV_TAU_RELATIVE) & WRITE(6,*)" WRITE(6,*)'#### F_FRICTION_FORCE' WRITE(6,*)" WRITE(6,*)' Vel_vagonas, Omega, RW, alfa, ZR, h_galvute:' WRITE(6,1000) Vel_vagonas,Omega,RW,alfa,ZR,h_galvute WRITE(6.*)" WRITE(6,*)" WRITE(6,*)' dqbg1dt,dwRdt,afiR,dafiRdt:' WRITE(6,1000) dqbg1dt,dwRdt,afiR,dafiRdt WRITE(6,*)" WRITE(6,*)" WRITE(6,*)'friction coefficient rail,DV TAU RELATIVE:' WRITE(6,1000) friction coefficient rail, DV TAU RELATIVE WRITE(6,*)" WRITE(6,*)" WRITE(6,*)' FZ,FN,FT_tangential:' WRITE(6,1000) FZ,FN,FT_tangential WRITE(6,*)" F_FRICTION_FORCE=FT_tangential 1000 FORMAT(1X,6(E12.5,1X)) RETURN END c =DOUBLE PRECISION FUNCTION F FRICTION FORCE OLD 02(FZ, Vel vagonas, Omega, RW, alfa, ZR, & DWDT.DAFIDT. & friction coefficient rail) IMPLICIT real*8 (a-h.o-z) Pi=4.0D0*DATAN(1.0D0) F frictionk=-friction coefficient rail* DABS(force_qbg1)*F_DSIGN(DV) & DV=F_VELOCITY_RELATIVE_CONTACT(h_galvute, Vel vagonas, Omega, RW, teta, ZR, & & DAFIDT) DV_RELATIVE=DV+RW*Omega

FN=-FZ*DSIN(teta

FN=DABS(FZ)*DCOS(alfa)

 $FT_tangential = -FN*friction_coefficient_rail*F_DSIGN(DV_RELATIVE)$

F_FRICTION_FORCE_OLD_02=FT_tangential

RETURN END

c====

DOUBLE PRECISION FUNCTION F_FRICTION_FORCE_OLD(FZ, Vel_vagonas,

& Omega,RW,teta,ZR,

& DWDT,DAFIDT,

& friction_coefficient_rail)

IMPLICIT real*8 (a-h,o-z)

Pi=4.0D0*DATAN(1.0D0)

 $F_frictionk=-friction_coefficient_rail*$

& DABS(force_qbg1)*F_DSIGN(DV)

```
DV{=}F\_VELOCITY\_RELATIVE\_CONTACT(h\_galvute,
```

Vel_vagonas,Omega,RW,teta,ZR, & & DAFIDT) DV RELATIVE=DV+RW*Omega FN=-FZ*DSIN(teta) FT tangential=-FN*friction coefficient rail*F DSIGN(DV RELATIVE F_FRICTION_FORCE_OLD=FT_tangential RETURN **END** c =DOUBLE PRECISION FUNCTION F_FRICTION_TORQUE(FZ, Vel_vagonas,Omega,RW,alfa,h_galvute,ZR, & dqbg1dt,dwRdt,dwRdx,afiR,dafiRdt, & & friction_coefficient_rail) IMPLICIT real*8 (a-h,o-z) Pi=4.0D0*DATAN(1.0D0) FT=F_FRICTION_FORCE(FZ,Vel_vagonas, Omega,RW,alfa,h_galvute,ZR, & dqbg1dt,dwRdt,dwRdx,afiR,dafiRdt, & & friction coefficient rail) torgue Y=RW*FT-FZ*RW*DSIN(alfa) WRITE(6.*)" WRITE(6,*)'#### F FRICTION TORQUE:' WRITE(6,*)" WRITE(6,*)" WRITE(6,*)' Vel_vagonas, Omega, RW, alfa, ZR, h_galvute:' WRITE(6,1000) Vel vagonas, Omega, RW, alfa, ZR, h galvute WRITE(6,*)" WRITE(6,*)" WRITE(6,*)' dqbg1dt,dwRdt,afiR,dafiRdt:' WRITE(6,1000) dqbg1dt,dwRdt,afiR,dafiRdt WRITE(6,*)" WRITE(6,*)" WRITE(6,*)'friction_coefficient_rail:' WRITE(6,1000) friction_coefficient_rail WRITE(6,*)" WRITE(6,*)" WRITE(6,*)' FZ,FT,torgue Y:' WRITE(6,1000) FZ,FT, torgue Y WRITE(6,*)" F FRICTION TORQUE= torgue Y 1000 FORMAT(1X,6(E12.5,1X)) RETURN **END** c = =DOUBLE PRECISION FUNCTION F_FRICTION_TORQUE_OLD(FZ,h_galvute, & Vel_vagonas,Omega,RW,teta,ZR, & DWDT,DAFIDT,friction_coefficient_rail) IMPLICIT real*8 (a-h,o-z) Pi=4.0D0*DATAN(1.0D0) FN=-FZ*DSIN(teta) DV_RELATIVE=F_VELOCITY_RELATIVE_CONTACT(h_galvute, Vel_vagonas,Omega,RW,teta,ZR, & & DAFIDT) torgue_Y=-RW*FN*friction_coefficient_rail*F_DSIGN(DV) F_FRICTION_TORQUE_OLD=torgue_Y RETURN END c =DOUBLE PRECISION FUNCTION F HEAVISIDE FUNCTION(x,xp) IMPLICIT REAL*8 (a-h,o-z) IF(x.GE.xp) THEN rez=1.0D0

ELSE

104

rez=0.0D0END IF F_HEAVISIDE_FUNCTION=rez RETURN **END** DOUBLE PRECISION FUNCTION F_HEAVISIDE_FUNCTION_INTERVAL(x,xp1,xp2) IMPLICIT REAL*8 (a-h,o-z) rez=F HEAVISIDE FUNCTION(x,xp1)-F HEAVISIDE FUNCTION(x,xp2) F HEAVISIDE FUNCTION INTERVAL=rez RETURN **END** c =SUBROUTINE F_QUADRO_COPTER_PAVARA(atime, Y, YR, nvarb) IMPLICIT REAL*8 (a-h,o-z) COMMON /PARAM_QUADROCOPTER/ PAR_QUADRO_COPTER(100) DIMENSION Y(nvarb), YR(nvarb) DIMENSION RC(3), VC(3), TETAC(3), WC(3), G4(3,3), DTETADT(3) DIMENSION WSRAIGTAS(4), FC(3), TORQUE(3), TORQUE2(3), A(3,3), VV(3) **DIMENSION WORK(3)** Pi=4.0D0*DATAN(1.0D0) k=28cv1=PAR OUADRO COPTER(k+1) dv1=PAR_QUADRO_COPTER(k+2) w01=PAR_QUADRO_COPTER(k+3) ainv1=PAR QUADRO COPTER(k+4) U_red1=PAR_QUADRO_COPTER(k+5) k=33 cv2=PAR QUADRO COPTER(k+1) dv2=PAR OUADRO COPTER(k+2) w02=PAR_QUADRO_COPTER(k+3) ainv2=PAR QUADRO COPTER(k+4) U_red2=PAR_QUADRO_COPTER(k+5) k=38 cv3=PAR_QUADRO_COPTER(k+1) dv3=PAR_QUADRO_COPTER(k+2) w03=PAR_QUADRO_COPTER(k+3) ainv3=PAR QUADRO COPTER(k+4) U red3=PAR OUADRO COPTER(k+5) k = 43cv4=PAR OUADRO COPTER(k+1) dv4=PAR OUADRO COPTER(k+2) w04=PAR_QUADRO_COPTER(k+3) ainv4=PAR QUADRO COPTER(k+4) U_red4=PAR_QUADRO_COPTER(k+5) k=49 C thrust1=PAR QUADRO COPTER(k+1) C_thrust2=PAR_QUADRO_COPTER(k+2) C_thrust3=PAR_QUADRO_COPTER(k+3) C_thrust4=PAR_QUADRO_COPTER(k+4) k=53 aL=PAR QUADRO COPTER(k+1) ak=PAR QUADRO COPTER(k+2) b=PAR_QUADRO_COPTER(k+3) k = 56akdx=PAR_QUADRO_COPTER(k+1) akdy=PAR_QUADRO_COPTER(k+2) akdz=PAR QUADRO COPTER(k+3) awx=0.10D0; awy=0.10D0; awz=0.10D0 amomv1=Y(1); afi1=Y(2); wv1=Y(3)amomv2=Y(4); afi2=Y(5); wv2=Y(6)amomv3=Y(7); afi3=Y(8); wv3=Y(9) amomv4=Y(10); afi4=Y(11); wv4=Y(12)DO i=1,3; RC(i)=Y(12+i); VC(i)=Y(15+i); END DO

DO i=1,3; TETAC(i)=Y(18+i); WC(i)=Y(21+i); END DO WSRAIGTAS(1)=wv1; WSRAIGTAS(2)=wv2; WSRAIGTAS(3)=wv3; WSRAIGTAS(4)=wv4; CALL F_A_MATRIX(TETAC,A) atime_start=5.0D0 frequency=0.20D0 omega=2.0D0*Pi*frequency amp=4.00D-3 !!! amp=5.00D-9 rez14=amp*DSIN(omega*atime) rez23=amp*DSIN(omega*atime-Pi) IF(atime.GT.atime_start)THEN daug1=1.0D0+rez14*F_HEAVISIDE_FUNCTION(atime,atime_start) daug2=1.0D0 daug3=1.0D0 daug4=1.0D0+rez14*F_HEAVISIDE_FUNCTION(atime,atime_start) ELSE daug1=1.0D0; daug2=1.0D0; daug3=1.0D0; daug4=1.0D0 END IF daug1=1.0D0+rez14*F HEAVISIDE FUNCTION(atime,atime start) daug2=(1.0D0+rez23)*F HEAVISIDE FUNCTION(atime, atime start) cdaug3=(1.0D0+rez23)*F_HEAVISIDE_FUNCTION(atime,atime_start) daug4=1.0D0+rez14*F_HEAVISIDE_FUNCTION(atime,atime_start) daug1=1.0D0 daug2=1.0D0+1.0D0*F HEAVISIDE FUNCTION(atime, atime start) daug3=1.0D0+1.0D0*F_HEAVISIDE_FUNCTION(atime,atime_start) daug4=1.0D0 daug1=1.0D0 caug2=1.00D0+5.0D-5 daug3=1.0D0+5.0D-5 daug4=1.0D0 c======= 1 EL.VARIKLIS: с c =amom_pas1=0.10D0 k=1YR(k)=U red1*cv1*(w01-U red1*wv1) - dv1*amomv1 YR(k+1)=Y(k+2)YR(k+2)=(amomv1*daug1-amom pas1)/ainv1 c = =2 EL.VARIKLIS: с C_____ amom_pas2=0.10D0 k=4 $YR(k) = (U_red2*cv2*(w02 + U_red2*wv2) - dv2*amomv2)$ C----c CARDANS ANGLES: {DTETADT}=[G4(TETA)]*{W} C-----SUBROUTINE F_QUADROCOPTER_GYROSCOPIC_TORQUES(W,aL,ak,b,TORQUE) IMPLICIT REAL*8 (a-h,o-z) ______ C====== DIMENSION W(4), TORQUE(3) DO i=1,3; TORQUE(i)=0.0D0; END DO TORQUE(1)=aL*ak*(W(1)**2-W(3)**2) TORQUE(2)=aL*ak*(W(2)**2-W(4)**2) TORQUE(3)=b*(W(1)**2+W(2)**2-W(3)**2-W(4)**2) TORQUE(3)=b*(W(1)**2-W(2)**2+W(3)**2-W(4)**2) RETURN **END** C----c CARDANS ANGLES: {DTETADT}=[G4(TETA)]*{W}

C-----

106

SUBROUTINE F_QUADROCOPTER_INERTIA_TORQUES(W,aIcxx,aIcyy,aIczz, & TORQUE) IMPLICIT REAL*8 (a-h,o-z)

c===== DIMENSION W(3), TORQUE(3) DO i=1,3; TORQUE(i)=0.0D0; END DO TORQUE(1) = -W(3)*aIcyy*W(2)+W(2)*aIczz*W(3)TORQUE(2)=W(3)*aIcxx*W(1)-W(1)*aIczz*W(3)TOROUE(3)=-W(2)*aIcxx*W(1)+W(1)*aIcyv*W(2)RETURN **END** c =_____ DOUBLE PRECISION FUNCTION F_THRUST_FORCE(Omega,C_thrust) IMPLICIT real*8 (a-h,o-z) Pi=4.0D0*DATAN(1.0D0) с WRITE(6,*)" с WRITE(6,*)" с с WRITE(6,*)' FZ,FN,FT_tangential:' с WRITE(6.1000) FZ.FN.FT tangential с WRITE(6,*)" rez=C_thrust*Omega**2 F THRUST FORCE=rez 1000 FORMAT(1X,6(E12.5,1X)) RETURN **END** c = =DOUBLE PRECISION FUNCTION F_VECTOR_NORMA(U,nvarb) IMPLICIT REAL*8(a-h,o-z) DIMENSION U(nvarb) rez=0.0D0 DO i=1,nvarb; rez=rez+U(i)**2; END DO rez=DSQRT(rez) F_VECTOR_NORMA=rez RETURN END SUBROUTINE IPRIN(L,nrow,ncol,nf) DIMENSION L(nrow,ncol) DO i=1,nrow WRITE(nf,1000) (L(i,j),j=1,ncol) END DO 1000 FORMAT(1x,12(I4,1x)) RETURN END _____ c =IMPLICIT REAL*8(a-h,o-z) PARAMETER (nstep=100) PARAMETER (dtime=1.0D-4, ntime=3000000) _____ c = =COMMON /PARAM_QUADROCOPTER/ PAR_QUADRO_COPTER(100) c =DIMENSION Y(100), YR(100) EXTERNAL F_QUADRO_COPTER_PAVARA OPEN(1,FILE='rez1.dat') Pi=4.0D0*DATAN(1.0D0); aps=30.0D0/Pi

nvarb=24

c-----CALL F_DATA_QUADROCOPTER()

CALL F_DATA_QUADROCOFTER()

U=5.0D0; akn=2133.50D0; a=6.401D-4; b=54.2D-6/16.0D0 kprint=0 k=49 C_thrust1=PAR_QUADRO_COPTER(k+1)
DO i=1,nvarb Y(i) = 0.0D0END DO CALL F_DATA_INITIAL(Y,nvarb) isk=0 DO itime=1,ntime; atime=itime*dtime isk=isk+1 CALL RUNKUT(nvarb,dtime,atime,Y,F QUADRO COPTER PAVARA) IF(isk.GE.nstep) THEN C=atime start=5.0D0 frequency=0.20D0 omega=2.0D0*Pi*frequency amp=4.00D-3 !!! amp=5.00D-9 rez14=amp*DSIN(omega*atime) rez23=amp*DSIN(omega*atime-Pi) IF(atime.GT.atime_start)THEN daug1=1.0D0+rez14*F_HEAVISIDE_FUNCTION(atime,atime_start) daug2=1.0D0 daug3=1.0D0 daug4=1.0D0+rez14*F HEAVISIDE FUNCTION(atime,atime start) ELSE daug1=1.0D0; daug2=1.0D0; daug3=1.0D0; daug4=1.0D0 END IF amomv1=Y(1); afi1=Y(2); wv1=Y(3)amomv2=Y(4); afi2=Y(5); wv2=Y(6) amomv3=Y(7); afi3=Y(8); wv3=Y(9) amomv4=Y(10); afi4=Y(11); wv4=Y(12)wv1=Y(3); FTR1=F THRUST FORCE(wv1.C thrust1) wv2=Y(6); FTR2=F_THRUST_FORCE(wv2,C_thrust1) wv3=Y(9); FTR3=F THRUST FORCE(wv3,C thrust1) wv4=Y(12); FTR4=F_THRUST_FORCE(wv4,C_thrust1) U=5.0D0*DSIN(2.0D0*Pi*20.0D0*atime) F=b*Y(3)**2 aMom_reaktyvinisZ=-amomv1+amomv2-amomv3+amomv4 FTR_total=FTR1+FTR2+FTR3+FTR4 DO i=1,nvarb WRITE(6,1010) i,Y(i) END DO WRITE(6.*)" WRITE(6,*)'= ======================== atime=',atime WRITE(6,*)" WRITE(6,1000) daug1,daug2,daug3,daug4 WRITE(6,*)" WRITE(6,*)" WRITE(6,1000) FTR1,FTR2,FTR3,FTR4,FTR_total WRITE(6,*)" WRITE(6,1000) (Y(3*i),i=1,4) WRITE(6,*)" WRITE(6,1000) aMom_reaktyvinisZ WRITE(6,*)" WRITE(1,1000) atime,(Y(i),i=1,nvarb), & FTR1,FTR2,FTR3,FTR4,aMom_reaktyvinisZ,F WRITE(6,*)" isk=0 END IF PAUSE 'MAIN' с END DO 1000 FORMAT(1x,100(E12.5,1x)) 1010 FORMAT(1x,I3,2X,20(E12.5,1x)) STOP END C-----

SUBROUTINE F PAVARA3(atime, Y, YR, nvarb) IMPLICIT REAL*8 (a-h,o-z) DIMENSION Y(nvarb), YR(nvarb) Pi=4.0D0*DATAN(1.0D0) U=5.0D0; akn=2133.50D0; a=6.401D-4; b=30.0D0/Pi ainv0=1.0D-8; U_red=245.76D0 ainv_red=5.0D0*ainv0 ainv=ainv0*U red**2+ainv red ainv=1.0D-5 amom_pas=0.0D0 U=5.0D0*DSIN(2.0D0*Pi*20.0D0*atime) amomv=Y(1); afi=Y(2); wv=Y(3)YR(1)=U_red*a*(akn*U-b*U_red*wv) - akn*amomv YR(2) = Y(3)YR(3)=(amomv-amom_pas)/ainv DO i=1,nvarb с с WRITE(6,1000) i,Y(i),YR(i) с END DO PAUSE '**** F PAVARA3' с 1000 FORMAT(1x,i4,2x,20(E12.5,1x)) RETURN END C-----SUBROUTINE F_PAVARA4(atime, Y, YR, nvarb) IMPLICIT REAL*8 (a-h,o-z) DIMENSION Y(nvarb), YR(nvarb) Pi=4.0D0*DATAN(1.0D0) U=1.0D0; akn=2133.50D0; a=6.401D-4; b=30.0D0/Pi с ainv0=1.0956168D-2; с U red=1.0D0/5.40D0 !U red=245.76D0 ainv0=1.0956168D-5; !!!ainv0=1.0956168D-2; с ainv_red=1.0D0*ainv0 ainv=ainv0*U_red**2 aM_max=0.1290445484D0 Skr=0.10D0; ft=50.0D0; p=1.0D0; !!! TESTUI aniu=(Skr/(2.0D0*aM_max)); w0=(2.0D0*Pi*ft/p); wt=(2.0D0*Pi*ft); betav=(1.0D0/(aniu*w0)) Tv=(1.0D0/(wt*Skr)); cv=(1.0D0/(aniu*w0*Tv)); dv=(cv/(betav)); ainv=ainv0*U_red**2+ainv_red с ainv=ainv0 ainv=1.0D-7 с amom_pas=0.0D0 U=5.0D0*DSIN(2.0D0*Pi*20.0D0*atime) с cv= 0.2580890968D0 dv=31.41592654D0 с amomv=Y(1); afi=Y(2); wv=Y(3)YR(1)=U_red*cv*(w0-U_red*wv) - dv*amomv YR(2) = Y(3)YR(3)=(amomv-amom_pas)/ainv DO i=1,nvarb с WRITE(6,1000) i,Y(i),YR(i) с END DO с PAUSE '**** F PAVARA3' с 1000 FORMAT(1x,i4,2x,20(E12.5,1x)) RETURN **END** c =SUBROUTINE MATMU8(A,B,C,L,M,N) IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z) DIMENSION A(L,M),B(M,N),C(L,N) DO I=1.L DO J=1.N

C(I,J)=0.0D0 DO K=1,M C(I,J)=C(I,J)+A(I,K)*B(K,J)END DO END DO END DO RETURN END c ==SUBROUTINE MATMUL8(A,B,C,L,M,N) IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z) DIMENSION A(L,M),B(M,N),C(L,N) DO I=1,L DO J=1,N C(I,J)=0.0D0 DO K=1,M C(I,J)=C(I,J)+A(I,K)*B(K,J)END DO END DO END DO RETURN END c==== SUBROUTINE PRIN8(a,k,l,nf) implicit real*8 (a-h,o-z) dimension a(k,l) DO i=1,k WRITE(nf,1000) (a(i,j),j=1,l) END DO 1000 FORMAT(1x,6(E12.5,1x)) RETURN **END** c = =_____ SUBROUTINE PRIN8_NOTZERO(A,nrow,ncol,nf) IMPLICIT REAL*8(a-h,o-z) dimension A(nrow,ncol) WRITE(nf,*)'**** "PRINT NONZERO: ' DO i=1,nrow; DO j=1,ncol IF(A(i,j).NE.0D0) THEN WRITE(nf,1000) i,j,A(i,j) END IF END DO; END DO 1000 FORMAT(1x,'Matrix(',I4,',',I4,')=',E12.5) RETURN END c=== _____ SUBROUTINE RUNKUT(N,H,T,X,LSK) IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z) DIMENSION X(*), Y(1000), YR(1000), YF(1000), A(5) IF(N.GT.1000) THEN WRITE(6,*)'*** ERROR. "RUNKUT" : N>1000' END IF A(1)=0.5*H A(2) = A(1)A(3)=HA(4)=HA(5) = A(1)TE=T DO J=1.N Y(J)=X(J)YF(J)=X(J)END DO DO I=1,4

```
CALL LSK(TE,Y,YR,N)
TE=T+A(I)
DO K=1,N
Y(K)=X(K)+A(I)*YR(K)
YF(K)=YF(K)+A(I+1)*YR(K)/3.0D0
END DO
END DO
DO J=1,N
X(J)=YF(J)
END DO
RETURN
END
```





19-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos "Mokslas – Lietuvos ateitis" teminės konferencijos **TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA**, vykusios 2016 m. gegužės 6 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 19th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania' TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT, 6 May 2016, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 19-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы» ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, 6 мая 2016 г., Вильнюс, Литва

KVADRAKOPTERIO ELEKTROS VARIKLIO PEREINAMOJO PROCESO MODELIAVIMAS

Karolis Kirna¹, Marijonas Bogdevičius²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Transporto inžinerijos fakultetas, Plytinės g. 27, LT-10105 Vilnius El. paštas: ¹kirna.karolis@gmail.com; ²marijonas.bogdevicius@vgtu.lt

Santrauka. Atlikta mokslinių darbų, nagrinėjančių bepiločių skraidyklių dinaminius procesus, apžvalga. Įvardinti sukonstruoto kvadrakopterio elementai ir jų parametrai. Sukurtas kvadrakopterio matematinis modelis, kurį sudaro elektros variklis ir kvadrakopterio judėjimo lygtys. Gauti kvadrakopterio elektros variklio sukimo momento, kampinio greičio ir traukos jėgos charakteringi parametrai pereinamojo proceso metu. Pateikti tyrimų rezultatai ir išvados.

Reikšminiai žodžiai: kvadrakopteris, bepilotė skraidyklė, matematinis modelis, elektros variklis, pereinamasis procesas, keliamoji jėga.

Įvadas

Bepilotės skraidyklės dažnai vadinamos dronais, naudojamas ir trumpinys UAV.

2013 metų rugsėjį į "google" paiešką įvedus žodžius "Unmanned aerial vehicles" buvo galima rasti 6 milijonus įrašų šia tema. Dar beveik 12 milijonų įrašų buvo galima rasti įvedus trumpinį UAV. Remiantis "Google Trends" tinklapyje pateikiama informacija galime pastebėti ženklų trumpinio UAV naudojimo sumažėjimą nuo 2005 iki 2013 metų (1 lentelė). Tai nereiškia, kad šiais laikais bepiločių skraidymo įrenginių populiarumas mažėja. Visa ši statistika yra labai paprastai paaiškinama – bepiločiai skraidymo įrenginiai gavo naują pavadinimą – dronai. Žodžio dronas panaudojimas internete nuo 2005 iki 2013 išaugo net 10 kartų (maksimali riba buvo pasiekta 2011 gruodį, kai JAV valdžia paprašė Irano valstybės grąžinti prarastą droną (Colomina *et al.* 2014).

Tyrimo objektas yra būtent šiam tyrimui sukonstruotas kvadrakopteris kuriame sumontuoti 4 elektros varikliai. Tai 6 laisvės laipsnių dinaminė sistema galinti judėti ir suktis apie pagrindines X, Y ir Z ašis (2 pav.).

Didžiausia problema kvadrakopteriuose yra jų valdymas. Specialiai neapmokytas žmogus niekaip nesugebėtų įvertinti ir atsižvelgti į visas (skrydžio metu) droną veikiančias jėgas bei momentus. Todėl kvadrakopterio valdymas be pagalbinių sistemų yra praktiškai neįmanomas.

Visą anksčiau minėtą darbą atlieka skrydžio valdiklis. Jis, apdorodamas mikroelektromechaninių sensorių (MEMS) bei radijo bangų imtuvo siunčiamus duomenis, sugeneruoja valdymo signalą. Valdymo signalas yra siunčiamas į elektroninius greičio valdiklius (ESC), kurie valdydami elektros variklių sūkius stabilizuoja ir nukreipia kvadrakopterį piloto pasirinkta judėjimo kryptimi.

1 lentelė. Nuorodų į žodį UAV santykiniai kiekiai 2005-
2013 m. (Colomina et al. 2014)

	,							
Metai	2005	2010	2011	2012	2013			
Nuorodos į UAV	544	1244	1424	1581	1708			
Gamintojai / tobulintojai	207	500	511	478	540			
Mokslininkų straipsniai	20	36	54	32	48			
Gaminančios šalys	43	51	51	51	53			
Tobulinimo tikslai								
Civiliniai / komerciniai	55	171	175	217	247			
Kariniai	397	631	674	548	564			
UAV tobulinimas	219	301	310	187	172			

Radijo bangų signalai yra gaunami iš radijo bangų siųstuvo, kuris yra suderintas su radijo bangų imtuvu įmontuotu kvadrakopterio rėme. Pilotas naudodamas siųstuvą gali priversti kvadrakopterį judėti pirmyn, atgal, aukštyn, žemyn, į kairę, į dešinę, ir suktis aplink savo centrinę Z ašį į kairę arba į dešinę.

Kvadrakopteriuose dažniausiai naudojami mikroelektromechaniniai sensoriai – vibracinis giroskopas ir akselerometras. Bendras šio bloko pavadinimas – inercijos matavimo elementas (*IMU – Inertial Measurement Unit*).

Mikrometrinių prietaisų veikimas paremtas mikrometriniais poslinkiais. Tai yra labai maži dydžiai, kurie gali būti iškreipiami netgi ir esant labai mažoms pašalinėms vibracijoms.

Straipsnyje pateikiama kvadrakopterio judėjimo matematinio modeliavimo metodika, smulkiai aprašomi dinaminiai kvadrakopterio bei jo elektros variklių modeliai. Pateikiami kvadrakopterio elektros variklio pagrindinių charakteristikų grafikai.

Mokslinių darbų apžvalga

Kvadrakopterių valdymas yra labai sudėtingas procesas. Jo padėčiai erdvėje nustatyti naudojami giroskopai, kurių jautrumas vibracijoms yra labai didelis.

Donald Norris savo 2014 m. straipsnyje aprašė drono variklio keliamosios jėgos tyrimą. Tyrėjas panaudojo svarstyklių principą.

Didėjant variklio sūkiams sukuriama kėlimo jėga, kuri per svirties sistemą slegia elektronines svarstykles, tiesiogiai rodančias kėlimo jėgą.

Autorius kėlimo jėgą išmatavo tik esant 5 pajėgumo lygiui, tai atitiktų 62,5 % maksimalaus variklio sukimosi greičio. Saugiai matuoti prie didesnių apsisukimų buvo neįmanoma, nes variklio sukuriamos vibracijos taip padidėjo, kad buvo nuspręsta, jog eksperimentą toliau tęsti nėra pakankamai saugu. Taip pat buvo pastebėta, kad eksperimento metu iš akrilo pagaminta svirtelė išlinksta, bet autorius nemano, kad tai galėjo itakoti jo eksperimento rezultatus.

Reitsma L. savo straipsnyje aprašo mikrokvadrakopterių vibracijų tyrimą ir jo rezultatus. Jis teigia, kad dėl variklių ir propelerių sukeliamų vibracijų labai stipriai padidėja giroskopo rodmenų paklaidos. Kaip vibracijų slopintuvą jis panaudojo putplastį, kurį sumontavo tiesiai po kvadrakopterio valdikliu. Tokiu būdų giroskopo rodmenų tikslumas padidėjo net 61 %.

Plasencia G. N. M. su kolegomis 2012 m. paskelbė mokslinį straipsnį kuriame aprašė radijo bangomis valdomo sraigtasparnio vibracijų tyrimą. Buvo nustatyta jog didžiausias vibracijas sukelia sraigtasparnio variklis ir propeleriai. Sraigtasparnio valdymui jie naudojo kamerą, o vibracijos stipriai iškreipia kameros vaizdą, todėl buvo sukurtas aktyvaus tipo vibracijų slopintuvas. Modeliavimas buvo atliekamas "VehicleSim" programa. Gravitacinės jėgos nebuvo vertinamos, nes autorius domino tik sraigtasparnio mazgų tarpusavio sąveika.

Išnagrinėjus šiuos 3 straipsnius galima daryti išvadą, kad variklio ir propelerio sistema yra didžiausias vibracijų šaltinis. Dėl didelio vibracijų dažnio ir dydžio atlikti praktinius eksperimentus yra labai sudėtinga, todėl šiam tikslui logiškiau būtų taikyti teorinio tyrimo metodiką.

Kvadrakopterio sandara

Kvadrakopteriai skiriasi savo dydžiu, baterijų skaičiumi ir tipu, propelerių dydžiu bei kitais komponentais. Mažos bepilotės skraidyklės, tokios kaip kvadrakopteriai, paprastai yra varomos viena ar keliomis ličio polimerų (LiPo) baterijomis, dėl jų didelių išsikrovimo reitingų, ilgo tarnavimo laiko ir palyginti nedidelės kainos.

Pagrindiniai 6 tiriamojo kvadrakopterio elementų blokai (1 pav.):

- rėmas;
- variklio ir propelerio sistema;
- elektroniniai greičio valdikliai (ESC);

 skrydžio valdiklis, kuriame sumontuotas vibracinis giroskopas;

- 8 kanalų radijo bangų;
 - 5 000 mAh baterija.



1 pav. Kvadrakopterio elementų blokai: 1 – rėmas, 2 – elektros variklio ir propelerio sistema, 3 – ESC tvirtinimo vieta,
4 – elektroninis greičio valdiklis, 5 – radijo bangų imtuvo vieta,

elektroninis greicio valdikiis, 5 – radijo bangų imtuvo vieta,
 6 – baterijos vieta

Kvadrakopterio judėjimo matematinis modelis

Norint paaiškinti kvadrakopterį veikiančių jėgų veikimą, sudaromi kvadrakopterio (2 pav.) ir jo *i*-tojo elektros variklio (3 pav.) dinaminiai modeliai.



2 pav. Kvadrakopterio dinaminis modelis



3 pav. I-tojo variklio dinaminis modelis

Įvedamos *OXYZ* kvadrakopterio, bei $O_i X_i Y_i Z_i$ elektros variklio koordinačių sistemos. Šios koordinatinės sistemos juda kartu su kvadrakopteriu. Taškai O ir O_i yra atitinkamai kvadrakopterio ir kvadrakopterio variklių masių centruose. Papildomai įvedama erdvinė koordinatinė sistema $O_e X_e Y_e Z_e$ kuri yra fiksuotoje padėtyje. Jos atžvilgiu bus stebima kvadrakopterio masės centro judėjimo trajektorija.

Kiekvienas kvadrakopterio elektros variklis sukasi apie Z_i ašį kampiniu greičiu ω_i , sukurdamas keliamąją jėgą F_{ki} , kurios kryptis sutampa su teigiama Z_i ašies kryptimi.

Trečias Niutono dėsnis teigia, jog kiekviena kūną veikianti jėga sukelia tokio pačio dydžio, bet priešingos krypties besipriešinančią jėga. Dėl to momentas sukurtas besisukančių kvadrakopterio propelerių iššaukia priešingos krypties (reaktyvinį) momentą kuris stengiasi pasukti visą kvadrakopterio rėmą apie kvadrakopterio Z ašį.

Tam, kad kvadrakopteris pakilęs į orą nesisuktų apie Z ašį propeleriai kurių kampiniai greičiai yra ω_1 ir ω_3 sukasi pagal laikrodžio rodyklę, o likę du – prieš. Dėl to 1 ir 3 elektros variklių sukamų propelerių sukuriami reaktyviniai momentai kompensuojami 2 ir 4 elektros variklių sukuriamais reaktyviniais momentais.

Kvadrakopterio skrydžio aukštis bei kryptis yra valdomi keičiant atitinkamų elektros variklių kampinius greičius ω_i ir taip perskirstant jų keliamąsias jėgas F_{ki} . Variklio ir propelerio sistemos kampiniai greičiai yra keičiami tiekiant daugiau srovės į atitinkamus kvadrakopterio variklius.

Sumažinus kampinius greičius ϖ_1 ir ϖ_2 bei padidinus kampinius greičius ϖ_3 ir ϖ_4 kvadrakopteris pasvyra teigiama φ_y kampo kryptimi ir pradeda judėti į priekį teigiama X_e ašies kryptimi. Norint judėti atgal viskas daroma priešingai. Sumažinus kampinius greičius ϖ_2 ir ϖ_3 bei padidinus kampinius greičius ϖ_1 ir ϖ_4 kvadrakopteris pasvyra į šoną teigiama φ_x kryptimi ir pradeda judėti į šoną neigiama Y_e ašies kryptimi. Norint judėti į kitą pusę viskas daroma priešingai. Norint kvadrakopterį pasukti apie Z ašį reikia sumažinti kampinius greičius ϖ_2 ir ϖ_4 bei padidinti kampinius greičius ϖ_1 ir ϖ_3 , tuomet kvadrakopteris suksis prieš laikrodžio rodyklę (teigiama kampo φ_z kryptimi). Norint pajudinti kvadrakopterį teigiama Z ašies kryptimi reikia vienu metu, sklandžiai, padidinti visų variklių kampinius greičius.

Elektros variklio keliamoji jėga

Elektros variklių keliamoji jėga yra vienas iš pagrindinių kvadrakopterio parametrų. Valdant šį parametrą galima valdyti kvadrakopterio judėjimą. Ji yra nukreipta teigiama Z_i ašies kryptimi (3 pav.) Keliamoji jėga nustatoma pagal tokia išraišką:

$$F_{ki} = C_{F_{ki}i} \rho A_{ri} r_i^2 \omega_i^2, \qquad (1)$$

čia: $C_{F_{kl}i}$ – elektros variklio keliamosios jėgos koeficientas; ρ – oro tankis; A_{ri} – propelerio užimamas plotas $(A_{ri} = \pi r_i^2)$; r_i – elektros variklio rotoriaus spindulys; ω_i – kampinis elektros variklio rotoriaus greitis. Paprastesniam modeliavimui ši formulė yra supaprastinama:

$$F_{ki} = c_{F_{ki}i} \omega_i^2 , \qquad (2)$$

čia: $c_{F_{ki}i}$ – elektros variklio ir propelerio sistemos keliamosios jėgos koeficientas nustatomas eksperimentų metų specifiniam varikliui.; ω_i – elektros variklio rotoriaus kampinis greitis.

Elektros variklio sukimo momentas apie Z ašį

Elektros variklio išvystomas sukimosi momentas apie jo sukimosi Z_i ašį yra lygus:

$$M_{vzi} = c_{M_{vzi}i} \omega_i^2 , \qquad (3)$$

čia: $c_{M_{vzi}i}$ – elektros variklio sukimo momento koeficien-

tas nustatomas eksperimentų metu; ω_i – elektros variklio rotoriaus kampinis greitis.

Masių inercijos momentai

Masės inercijos momentas yra labai svarbus parametras atliekant sukamąjį judesį.

Masių inercijos momentas priklauso ne tik nuo objekto masės, tačiau ir nuo to kaip ta masė yra išdėstyta sukimosi ašies atžvilgiu.

Norint užrašyti kvadrakopterio masių inercijos momentų (masių inercijos tenzorių) matricą reikia priimti prielaidą, kad kvadrakopteris yra visiškai simetriškas X, Y ir Z ašių atžvilgiu ir jo masių centras sutampa su jo geometriniu centru (taškas O 2 pav.). Skaičiavimams supaprastinti kvadrakopterio elementų blokai yra suskaidomi į paprastąsias figūras:

1. Rėmo centrinė plokštė, baterija, skrydžio valdiklis bei radijo bangų imtuvas apjungiami į vieną visumą ir vadinami centrine dalimi. Centrinės dalies masių inercijos momentų skaičiavimai atliekami kaip paprastajam cilindrui;

2. Variklių ir propelerių sistemos vadinamos rotorine kvadrakopterio dalimi. Jų masių inercijos momentų skaičiavimai atliekami kaip paprastiesiems cilindrams;

3. Elektroninių greičio valdiklių (ESC) masių inercijos momentai skaičiuojami kaip paprastiesiems stačiakampiams gretasieniams;

4. Rėmo kojų masių inercijos momentai skaičiuojami kaip paprastiesiems cilindrams.

Priėmus šias prielaidas ir įvedus supaprastinimus, masių inercijos tenzorius yra diagonalinė matrica yra lygi:

$$\begin{bmatrix} I_{K_{\mathcal{V}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix}.$$
 (4)

Elementai reikalingi kvadrakopterio judėjimo lygčių sistemai užrašyti

Masių matrica $[m_{Kv}]$ yra diagonalinė matrica ir yra lygi:

$$m_{Kv} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix}.$$
 (5)

Matrica [$G_2(\theta)$]yra lygi:

$$\begin{bmatrix} G_2(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_2 c_3 & s_3 & 0 \\ c_2 s_3 & c_3 & 0 \\ s_2 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$
(6)

čia: θ – Kardano kampai.

Matricos [$G_2(\theta)$] elementas c_i lygus:

$$c_i = \cos(\theta_i), \tag{7}$$

čia: θ_i – Kardano kampas apie *i*-tają ašį.

Matricos [$G_2(\theta)$]elementas s_i lygus:

$$s_i = \sin(\theta_i). \tag{8}$$

Kardano kampų vektorius $\{\theta\}$ lygus:

$$\{\boldsymbol{\theta}\} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}_1, \boldsymbol{\theta}_2, \boldsymbol{\theta}_3 \end{bmatrix}, \tag{9}$$

čia: θ_1 , θ_2 , θ_3 – Kardano kampai atitinkamai apie *X*, *Y* ir *Z* ašis.

Asimetrinė kampinių greičių matrica [<u>m</u>] lygi:

$$\begin{bmatrix} 0 & -\omega_{Kv,Z} & \omega_{Kv,Y} \\ \omega_{Kv,Z} & 0 & -\omega_{Kv,X} \\ -\omega_{Kv,Y} & \omega_{Kv,X} & 0 \end{bmatrix},$$
(10)

čia: $\underline{\omega}_{Kv,i}$ – kampinių greičių apie kvadrakopterio koordinačių sistemos projekcijos į atitinkamas ašis.

Kvadrakopterio judėjimo lygčių sistema

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{Kv} \end{bmatrix} & 0 \\ 0 & \begin{bmatrix} I_{Kv} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} G_2(\theta) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{R} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{cases} \{F(R, \theta, t)\} + \{F_{oropas}\} \\ \{M_{Kv}\} + \begin{bmatrix} \widetilde{\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Kv} \end{bmatrix} \{\underline{\omega}\} + \{M_{giro}\} - \\ -\begin{bmatrix} I_{Kv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{G}_2(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \end{bmatrix} + \{M_{oropas}\} \end{cases},$$
(11)

čia: $\{\vec{R}\}\)$ – kvadrakopterio masių centro koordinačių antros laiko išvestinės vektorius; $\{\vec{\theta}\}\)$ – Kardano kampų antros laiko išvestinės vektorius; $F(R, \theta, t)$ – apkrovos vektorius priklausantis nuo kvadrakopterio masės centro koordinačių, kardano kampų ir laiko; $\{F_{oro,pas.}\}\)$ – oro pasipriešinimo jėgų vektorius; $\{M_{Kv.}\}\)$ – kvadrakopterio traukos momentų vektorius; $\{M_{giro}\}\)$ – giroskopinių momentų vektorius.

Ryšys tarp kvadrakopterio kampinio greičio vektoriaus $\{\underline{\omega}\}$ (kvadrakopterio koordinačių sistemoje) ir pirmosios Kardano kampų laiko išvestinės vektoriaus $\{\dot{\theta}\}$ yra užrašomas:

$$[\underline{\omega}] = [G_2(\theta)] \{ \dot{\theta} \}. \tag{12}$$

Kvadrakopterio teorinių tyrimų rezultatai

Nagrinėjamas kvadrakopteris surinktas iš atskirai parinktų mazgų. 2 lentelėje pateikiami pagrindiniai kvadrakopterio parametrai.

Rėmas (Q450)								
Plotis	450 mm							
Aukštis	55 mm							
Masė	270 g							
Variklis (NTM prop drive series2826)								
Skersmuo	28 mm							
Aukštis	25 mm							
Kv reitingas	1100 aps/V							
Polių skaičius	12							
Vijų skaičius	17							
Maksimalus srovės poreikis	20 A							
Maksimali galia prie 11,1 V (3S)	189 W							
Maksimali gali prie 14,8 V (4S)	252 W							
Masė	54 g							
Propeleris (8045 SF)								
Skersmuo	203,2 mm							
Žingsnis	114,3 mm							
Masė	5 g							
Elektroninis greičio valdiklis (Afro 30A	mp)							
Ilgis	50 mm							
Storis	11 mm							
Plotis	25 mm							
Masė	26,5 g							
Palaikoma įtampa	7,4 V – 14,8 V							
Įeinančio signalo dažnis	1 kHz							
Palaikoma srovė	30 A							
Skrydžio valdiklis (KK2.1.5)								
Ilgis	50,5 mm							
Storis	12 mm							
Plotis	50,5 mm							
Masė	21 g							
Valdymo signalo įtampa	4,8 V – 6 V							
Baterija (Turnigy 4S 40–50C)								
Ilgis	149 mm							
Plotis	49 mm							
Storis	37 mm							
Masė	578 g							
Celių skaičius	4							
Įtampa	14,8 V							
Talpa	5Ah							
Išsikrovimo reitingas (pastovus)	40C							
Ribinis išsikrovimo reitingas (10 sek.)	50C							

3 lentelėje pateikiami kvadrakopterio masių inercijos momentų skaičiavimo rezultatai.

Elemente blales	Masių inercijos momentai, kgm ²			
Elementų biokas	$I_x = I_y$	I_z		
Centrinė dalis	0,005482375	0,00176155		
Rotorinė dalis	0,005538636	0,010956168		
ESC	0,000406671	0,000813341		
Rėmo kojos	0,001274433	0,002536627		
Viso kvadrakopterio	0,012702115	0,016067686		

3 lentelė. Masių inercijos momentų skaičiavimo rezultatai

Nagrinėjamas kvadrakopterio elektros variklio paleidimas be pasipriešinimo momento, t. y. sukimasis tuščia eiga.

Kvadrakopterio elektros variklio sukimo momento kitimas (4 pav.) pulsuoja iki 0,3 sekundės, o ties 4 milisekunde pasiekia savo nominalią reikšmę. Ties 0,3 sekundės riba jis pasiekia nulinę reikšmę ir nusistovi.



4 pav. Kvadrakopterio elektros variklio sukimo momento (apie Z_i ašį) priklausomybės nuo laiko grafikas: $M_{vzi} -$ kvadrakopterio elektros variklio sukimo momentas. t - laikas

Kvadrakopterio elektros variklio kampinio greičio kitimas pereinamojo proceso metu pavaizduotas 5 pav.

Kvadrakopterio elektros variklio kampinis greitis iki 0,23 sekundės pulsuoja, o savo nominalią reikšmę (1 600 rad/s) pasiekia ties 0,13 sekunde ir nusistovi.

Kvadrakopterio elektros variklio išvystomos keliamosios jėgos kitimas laike pavaizduotas 6 pav. Bendroji kvadrakopterio keliamoji jėga lygi keturių elektros variklių keliamosioms jėgoms ir yra lygi apie 40 N, kai $c_{F_{ki}i} = 3,38 \cdot 10^{-6} \text{ Ns}^2.$

Literatūra

Bandymo trukmė t = 0.5 sekundės. Kvadrakopterio elektros variklio paleidimo pereinamasis procesas trunka apie 0.3 sekundės.



5 pav. Kvadrakopterio elektros variklio kampinio greičio priklausomybės nuo laiko grafikas: ω_i – kvadrakopterio elektros variklio kampinis greitis, *t* – laikas



6 pav. Kvadrakopterio elektros variklio keliamosios jėgos priklausomybės nuo laiko grafikas: F_{ki} – kvadrakopterio elektros variklio keliamoji jėga, t – laikas

Išvados

Sudarytas kvadrakopterio judėjimo matematinis modelis. Remiantis sudarytu kvadrakopterio matematiniu modeliu, nustatyta elektros variklio pereinamojo proceso trukmė, kuri yra lygi 0,3 sekundės. Maksimali kvadrakopterio keliamoji jėga lygi apie 40 N. Nustatyti charakteringų elektros variklių parametrų, tokių kaip sukimo momentas, kampinis greitis, keliamoji jėga, kitimai pereinamojo proceso metu.

- Colomina, I.; Molina, P. 2014. Unmaned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review, *ISPRS Journal of Photo*grammetry and Remote sensing. Prieiga per interneta: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271614000501>.
- Norris, D. 2014. *Build Your Own Quadcopter: Power Up Your Designs with the Parallax Elev-8 Quadcopter Propulsors.* AccessEngineering. Prieiga per internetą: .
- Plasencia, G. N. M.; Rodriguez, M. T.; Rivera, S. C.; Lopez, A. H. Lopez. 2012. Modelling and Analysis of Vibrations in an UAV Helicopter with a Vision System. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing. Prieiga per internetą: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271614000501>.
- Reitsma, L. A Novel Approach to Vibration Isolation in Small, Unmanned Aerial Vehicles. USMA. Prieiga per internetą: http://www.ballos.com/tepraconnect_interface/TePRA09/312.pdf>.

		×	
Form.	Poz.	Ζγπυο	
		-	<u>Detalės</u>
A4	1	TS 001.01.001	Vertikali kal
A4	2	TS 001.01.002	Apatinis sve
A4	3	TS 001.01.005	Kaladėlė vy
BB	4	TS .001.01.006	Lentelė vyri
A4	5	TS 001.01.003	Atraminė p
A4	6	TS 001.01.004	Suspaudime
		<u>F</u>	<u>erkami gan</u>
	7	DIN 933 varžtas	Varžtas M6
	8	DIN 933 varžtas	Varžtas M6
	9	DIN 315 veržlė (Sparnuota)	Sparnuota
	10	Veržlė DIN 934	Veržlė M6
	11	Kampine plokstele 75x14x1.5	Kampinė pl







*Informaciniai matmenys; H14; h14; ±IT14/2; Padengimo būdas:

1. 2. 3.

Pak.	Lapas	Dokum. Nr.	Parašas	Data			
Brai	žė	K.Kirna		2/5/2016	Trau		
KSV		A.Baravykas					
T. ko	ntrolė	L.Trijonaitis					





6,3 140 B-B A-A 20 В А 15 15 50 -Ĥ 100 100 55 2 В \oplus 50 50 0 <u>15</u> 55 35 \oplus 15 А 0 0 0 0 *Informaciniai matmenys; H14; h14; ±IT14/2; Padengimo būdas: 1. 2. 3. Gamybai tinka iki TS 001.01.003 Masė: Mastelis: Dokum. Nr. Parašas Data Pak. Lapas Atraminė plokštė 1:2 Braižė K.Kirna 2/5/2016 KSV A.Baravykas L.Trijonaitis T. kontrolė Lapų Lapas 1 Lentelė 100x20x140 AKCINĖ BENDROVĖ

Pušis

PUNTUKAS









Form.	Poz.	. Žymuo	Pavadinimas	Kiekis	Pastabos				
	<u>Detalės</u>								
A4	1	SMS 001.01.001	Stovas]					
A4	2	SMS 001.01.002	Apatinė plokštė	1					
A4	3	SMS 001.01.003	Svertas	1					
A4	4	SMS 001.01.004	Variklio tvirtinimo plokštelė	1					
	1	<u>Perkami ga</u>	iminiai	1	1				
	5	Kampuotis 40x20x2	Kampuotis	1	Nupirkta				
	6	Guolis 608RS	Guolis	2	Nupirkta				
	7	NTM Prop Drive 28 -26s varikliukas	Varikliukas	1	Nupirkta				
	8	Propelerio adapteris	Adapteris	1	Nupirkta				
	9	Propeleris	Propeleris	1	Nupirkta				
	10	Veržlė M5	Propelerio veržlė	1	Nupirkta				
	11	Tvirtinimas (Propelerio)	Propelerio padas	1	Nupirkta				
	12	Medsraigtis įleidžiama galva	Medsraigtis M5x20	4					
	13	Srieginis strypas	Srieginis strypas M4x250	1					
	14	Srieginis strypas	Srieginis strypas M8x90	1					
	15	Veržlė DIN 934	Veržlė M4	2					
	16	Veržlė DIN 934	Veržlė M8	3					
	17	Veržlė DIN 934	Veržlė M5	8					
	18	DIN 933 varztas	Varztas M5x60	4					





				SMS 001.01.000 SB							
				M				: :	Mastelis:		
Pak. Lapa	as Dokum. Nr.	Parašas	Data	Sukimo momento							
Braižė	K.Kirna		2/5/2016						1:4		
KSV	A.Baravykas			stendas							
T. kontrol	ė L.Trijonaitis				Lapo	as	1	Lapų	1		
					AKCINĖ BENDROVĖ PUNTUKAS						



- 1. 2. 3.

Gamybai tinka iki







