



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Paulius Bočiulis

**NANO PALYDOVO „LITUANICASAT-2“ KONSTRUKCIJOS DINAMINIAI
TYRIMAI**

**DYNAMICAL INVESTIGATIONS OF STRUCTURE NANOSATELLITE
"LITUANICASAT-2"**

Baigiamasis magistro darbas

Pramonės inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H77001

Pramonės technologijos specializacija

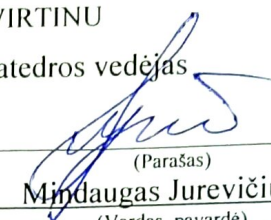
Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2017

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas



(Parašas)
Mindaugas Jurevičius

(Vardas, pavardė)
2017.05.26

(Data)

Paulius Bočiulis

NANO PALYDOVO „LITUANICASAT-2“ KONSTRUKCIJOS DINAMINIAI
TYRIMAI

DYNAMICAL INVESTIGATIONS OF STRUCTURE NANOSATELLITE
"LITUANICASAT-2"

Baigiamasis magistro darbas

Pramonės inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H77001

Pramonės technologijos specializacija

Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

prof. habil. dr. Albinas Kasparaitis
(Pedag. vardas, vardas, pavardė)



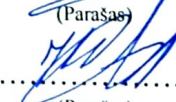
(Parašas)

2017.05.24

(Data)

Konsultantas

doc. dr. Artūras Kilikevičius
(Pedag. vardas, vardas, pavardė)



(Parašas)

2017.05.23

(Data)

Konsultantas

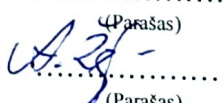
(Pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

dr. Aušra Žemienė
(Pedag. vardas, vardas, pavardė)



(Parašas)

2017-05-24

(Data)

Vilnius, 2017

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Gamybos inžinerijos studijų kryptis

Pramonės inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H77001

Pramonės technologijos specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Mindaugas Jurevičius

(Vardas, pavardė)

2016 12 02

(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO

UŽDUOTIS

2016 12 02 Nr. 01

Vilnius

Studentui (ei) Pauliui Bočiuliui,

Baigiamojo darbo tema: Nano palydovo "Lituanicasat-2" konstrukcijos dinaminiai tyrimai
patvirtinta 2015 m. Gruodžio 9 d. dekanato potvarkiu Nr. 268me.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2017 m. Gegužės 25 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Aiškinamasis raštas:

1. Įvadas. Literatūros apžvalga.
2. Nano palydovo konstrukcijos ir veikimo principo aprašymas.
3. Korpuso dinaminiai tyrimai.
4. Virpesių matavimo rezultatų įvertinimas.
5. Baigiamosios išvados.
6. Literatūros sąrašas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

doc. dr. Artūras Kilikevičius

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

Vadovas

(Parašas)

prof. habil. dr. Albinas Kasparaitis

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

Užduotį gavau

(Parašas)

.....Paulius Bočiulis.....

(Vardas, pavardė)

.....2016 Gruodžio 1d.....

(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Mechanikos fakultetas Mechanikos inžinerijos katedra		ISBN Egz. sk. Data-.....-.....
Antrosios pakopos studijų Pramonės inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas 4		
Pavadinimas	Nano palydovo "LituanicaSAT-2" konstrukcijos dinaminiai tyrimai	
Autorius	Paulius Bočiulis	
Vadovas	Albinas Kasparaitis	
Kalba: lietuvių		
Anotacija Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamas „LituanicaSAT-2“ palydovas, skirtas dalyvauti tarptautiniame termosferos tyrimų projekte „QB50“. Darbe trumpai apžvelgtas CubeSat standartas ir „QB50“ projektas. Išnagrinėta palydovo konstrukcija, pagrindiniai techniniai parametrai, apžvelgtos dinaminių tyrimų charakteristikos ir rekomendacijos CubeSat palydovams iš projekto organizatorių, taip pat sudaryta metodika tyrimams atlikti. Naudojant programinį paketą „Comsol“ atlikta konstrukcijos modalinė analizė - nustatytos pavojingos 3U dydžio korpuso sritys. Eksperimentinio tyrimo metu atlikta konstrukcijos pirmojo savojo dažnio paieška bei ištirti kiti dinaminiai procesai, atsirandantys dinaminiame palydovo darbo režime, kuomet konstrukcija veikiama išorinių žadinimų 20-2000 Hz dažnių ruože. Pagrįsti konstrukciniai ir technologiniai sprendimai, taip pat įrodyta, kad palydovas atitinka misijoje keliamus reikalavimus. Darbo apimtis - 41 p. teksto be priedų, 23 iliustracijos, 11 lentelių, 31 bibliografinių šaltinių. Priede pateikiamas straipsnis šia tema „Nano palydovo „LituanicaSAT-2“ konstrukcijos dinaminiai tyrimai“.		
Prasminiai žodžiai: CubeSat, dinaminiai tyrimai, LituanicaSAT-2, nano palydovas, palydovo konstrukcija, QB50, vibracijos		

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

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų
sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo
organizavimo tvarkos aprašo 2011–2012 m. m.
2 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Paulius Bočiulis, 20113650

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Mechanikos fakultetas

(Fakultetas)

Pramonės inžinerija, PTfm-15

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2017 m. Gegužės 10 d.
(Data)

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas (projektas) tema NANO PALYDOVO
„LITUANICASAT-2“ KONSTRUKCIJOS DINAMINIAI TYRIMAI

patvirtintas 20 15 m. Gruodžio 9 d. dekanu potvarkiu Nr. 268me _____, yra
savarankiškai parašytas. Šiame darbe (projekte) pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar
netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą (projektą), mane konsultavo
mokslininkai ir specialistai: doc. dr. Artūras Kilikevičius, dr. Aušra Žemienė

Mano darbo (projekto) vadovas prof. habil. dr. Albinas Kasparaitis

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

(Parašas)

Paulius Bočiulis

(Vardas ir pavardė)

Turinys

IVADAS.....	11
1. Nano palydovų ir jų dinaminių tyrimų apžvalga.....	13
1.1. Nano palydovas LituanicaSAT-2.....	14
1.2. Dinaminiai tyrimai nano palydovuose	17
1.3. Dinaminių tyrimų charakteristikos.....	20
2. Nano palydovo korpuso modalinė analizė	23
2.1. Konstrukcijos modalinė analizė „Comsol“ programa.....	23
2.2. Modalinės analizės rezultatai	26
3. Eksperimentiniai dinaminiai tyrimai	29
3.1. Tiriamasis objektas.....	29
3.2. Tyrimo priemonių aprašymas.....	29
3.3. Eksperimentinių tyrimų metodika.....	31
3.4. Tyrimų rezultatai	33
3.5. Rezultatų apibendrinimas	38
IŠVADOS.....	39
Literatūros sąrašas	40
Priedai.....	42

Paveikslų sąrašas

1 pav. <i>CubeSat</i> palydovų dydžių variacijos	13
2 pav. „LituanicaSAT-2“ be šoninių saulės panelių.....	14
3 pav. Mokslinis modulis „FIPEX“	15
4 pav. Funkcinis modulis.....	15
5 pav. Eksperimentinis mikrovariklis.....	16
6 pav. „LituanicaSAT-2“ korpusas.....	17
7 pav. Vibracijų tyrimo stendo schema	18
8 pav. Palydovo koordinatų sistema	19
9 pav. Supaprastinto modelio geometrija „Comsol“ aplinkoje	24
10 pav. Medžiagų parametrų įvedimas atskiroms modelių detalėms	25
11 pav. Baigtinių elementų tinklelis.....	26
12 pav. Pavojingiausios modos ir jų formos	27
13 pav. Palydovas (kairėje) ir testavimo konteineris (dešinėje).....	29
14 pav. Virpesių parametrų matavimo priemonės.....	30
15 pav. Palydovo pastatymo kryptys: a – horizontaliai, b – vertikaliai	30
16 pav. Rezonansinis bandymas pagal X ašį.....	33
17 pav. Rezonansinis bandymas pagal Y ašį.....	33
18 pav. Rezonansinis bandymas pagal Z ašį	34
19 pav. Kvazistatinė 10,8 g apkrova pagal laiką	35
20 pav. Pagreičio pagal laiką (a) ir spektrinio tankio pagal dažnį (b) grafikai 20–70 Hz dažnių ruože	36
21 pav. Pagreičio pagal laiką (a) ir spektrinio tankio pagal dažnį (b) grafikai 50–150 Hz dažnių ruože	36
22 pav. Pagreičio priklausomybė nuo laiko (a) ir pagreičio priklausomybė nuo dažnio (b) sinusinių svyravimų metu 5–100 Hz dažnių diapazone. Pastatymas pagal X ašį	37
23 pav. Pagreičio priklausomybė nuo laiko (a) ir pagreičio priklausomybė nuo dažnio (b) sinusinių svyravimų metu 100-125 Hz dažnių diapazone. Pastatymas pagal X ašį.....	37

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Pagrindinės palydovo charakteristikos	14
2 lentelė: reikalingi mechaniniai bandymai	19
3 lentelė. Rezonansinio bandymo charakteristikos	20
4 lentelė. Kvazistatinio bandymo charakteristikos	21
5 lentelė. Sinusinės vibracijos testo charakteristikos	21
6 lentelė. Atsitiktinės vibracijos bandymo charakteristikos	22
7 lentelė. Pagrindiniai korpuso parametrai	23
8 lentelė. Pagrindinės medžiagų charakteristikos	25
9 lentelė. Daviklių informacija	31
10 lentelė. Atsitiktinių vibracijų žadinimo režimai.	35
11 lentelė. Rezonansinių dažnių tyrimo rezultatai	38

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS

ADCS (angl. *Attitude Determination and Control Subsystem*) – pozicijos nustatymo ir kontroliavimo posistemė

BRF (angl. *Body Reference Frame*) – korpuso atskaitos sistema

EPS (angl. *Electrical Power System*) – elektros tiekimo sistema

FIPEX (angl. *Flux- Φ -Probe Experiment*) – molekulinio/atominio deguonies jutiklis

GNSS (angl. *Global Navigation Satellite System*) – palydovo navigacinė sistema

GPS (angl. *Global Positioning System*) – pasaulinė pozicionavimo sistema

INMS (angl. *Ion-Neutral Mass Spectrometer*) – jonų neutralios masės spektrometras

m-NLP (angl. *multi-Needle Langmuir Probe*) – kelių adatų Lengmiūro zondas

OBC (angl. *On Board Computer*) – pagrindinis palydovo valdymo kompiuteris

PCB (angl. *Printed Circuit Board*) – spausdintina mikroschema, gali būti keliasluoksnė

IVADAS

CubeSat yra nano-palydovas, kuris atlieka visas standartines palydovo funkcijas (pozicijos nustatymas ir kontroliavimas, duomenų priėmimas ir išsiuntimas, sistemos palaikymas baterija ir ant korpuso sumontuotais saulės kolektoriais, duomenų valdymas ir saugojimas procesoriuje, taip pat vienas pasirinktas technologinis paketas). Vienas *CubeSat* palydovas yra per mažas, kad jame tilptų įvairūs jutikliai, reikalingi atlikti svarbiems moksliniams tyrimams. Tačiau, „QB50“ projekto metu kartu paleidžiama 50 nano-palydovų, sujungtų į bendrą tinklą. Tai prideda edukacinę reikšmę, nes pradedama rinkti informacija, kuri anksčiau buvo nepasiekiama. Palydovas „LituanicaSAT-2“ atitinka *CubeSat* standarto kriterijus ir yra ruošiamas dalyvauti tarptautiniame projekte „QB50“. Šis palydovas yra eksperimentinis ir savo klasėje pirmasis, kuriame įrengta raketinė manevravimo sistema. Jame sumontuotas mažas raketinis variklis, varomas vienkomenčiu amonio dimitramidu. Tokio tipo palydovuose iki šiol nebuvo naudotas joks variklis, skirtas manevruoti ir orbitos aukščiui palaikyti. Projekto vykdytojai, „Nanoavionics“ komanda siekia eksperimentinį projektą naudoti komerciniais tikslais. „QB50“ projektas yra puiki galimybė atlikti variklio bandymus realiomis sąlygomis (kosmose). Jei šis produktas pasiteisintų, rakiniai mikrovarikliai būtų parduodami visiems *CubeSat* palydovų kūrėjams, norintiems pailginti savo palydovų gyvavimo trukmę orbitoje.

CubeSat tipo palydovų kaina svyruoja apie šimtą tūkstančių eurų, o gamyba trunka apie dvejus metus. Labai svarbu užtikrinti palydovo tinkamumą naudoti kosmose bei taikyti griežtą kokybės kontrolę, prieš palydovui atsiduriant kosmose. Taip pat svarbu atlikti tyrimus, atsižvelgiant į realias kilimo bei atsiskyrimo metu susidarancias apkrovas.

Problema

Nano-palydovai susiduria su įvairiomis išorinėmis apkrovomis pakilimo bet atsiskyrimo nuo raketos-nešėjos metu. Dažniausiai pasitaikantys išorės veiksniai yra įvairios raketos-nešėjos variklių skleidžiamos vibracijos bei kilimo metu susidaranti perkrova. Antrasis lietuvių palydovas ypatingas tuo, kad jame sumontuota eksperimentinė manevravimo sistema, kurioje naudojamas skystas kuras. Tokio palydovo korpusas dar nėra ištirtas.

Tyrimo objektas

Šiame darbe analizuojamas objektas yra „LituanicaSAT-2“ nano-palydovo korpusas, kai palydovas įmontuotas į testavimo konteinerį.

Darbo tikslas

Darbo tikslas yra išanalizuoti specifinius „LituanicaSAT-2“ korpuso elementus, nustatyti pavojingas korpuso sritis, ištirti struktūros reakciją imituojant realias kilimo metu veikiančias išorines vibracijas.

Temos aktualumas

Tema aktuali tuo, kad „LituanicaSAT-2“ palydovas yra naujas produktas kosminėje rinkoje. Šis projektas nėra vien mokslinis. Jei jis bus sėkmingas, bus vykdoma plėtra komerciniais tikslais.

Pagrindiniai šio darbo uždaviniai:

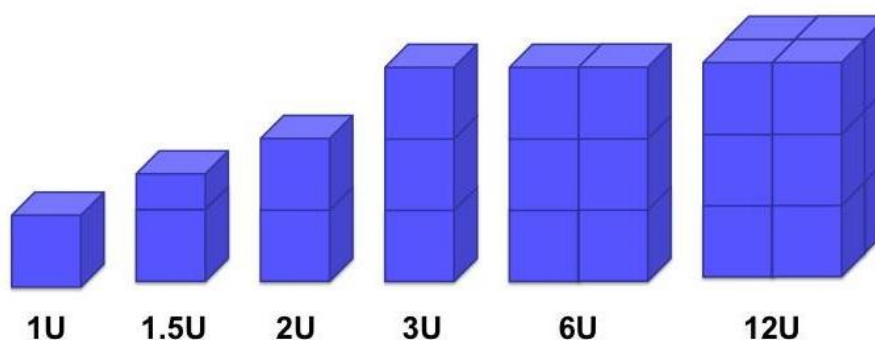
- Apžvelgi ir išanalizuoti literatūros šaltinius šia tema.
- Išanalizuoti specifinius palydovo konstrukcijos elementus.
- Atlikti korpuso struktūros modalinę analizę, naudojant baigtinių elementų metodo simuliaciją ir nustatyti pavojingas konstrukcijos sritis.
- Pagrįsti palydovo konstrukcinius sprendimus, atliekant dinaminių virpesių tyrimus.

Atliekant tyrimą gauti šie mokslui nauji rezultatai:

- Nustatytos 3U dydžio nano-palydovuose atsirandančių išorinių vibracijų pasekmės, susidarančios skrydžio bei paleidimo metu.
- Sukaupti nano palydovo su manevravimo sistema vibracinių tyrimų duomenys.

1. Nano palydovų ir jų dinaminių tyrimų apžvalga

CubeSat yra palydovų standartas, pradėtas kurti dar 1999 metais. Projekto tikslas buvo sukurti patrauklų dizainą, sumažinti palydovų gamybos kaštus, padidinti prieinamumą tyrimams erdvėje, suvienyti daugiau universitetų, įmonių ir entuziastų iš viso pasaulio. Šiuo metu *CubeSat* projektas vienija daugiau nei 100 universitetų, aukštųjų mokyklų bei privačių įmonių (Toorian *et al.* 2014). *CubeSat* standartas atitinka nano-palydovų klasę nuo 1 kg iki 10 kg, bei apibrėžia palydovo formą ir gabaritus. Šis dizainas leidžia palydovo kūrėjams laisvai keisti palydovo konfigūraciją pagal poreikius. Standartinis palydovo dydis vadinamas vienu vienetu (angl. *one unit* – 1U) ir atitinka 10x10x10 cm kubą. Palydovas gali būti sudarytas iš kelių tokių vienetų, jų variacijos pavaizduotos 1 paveiksle (Mabrouk 2016).



1 pav. *CubeSat* palydovų dydžių variacijos (Mabrouk 2016)

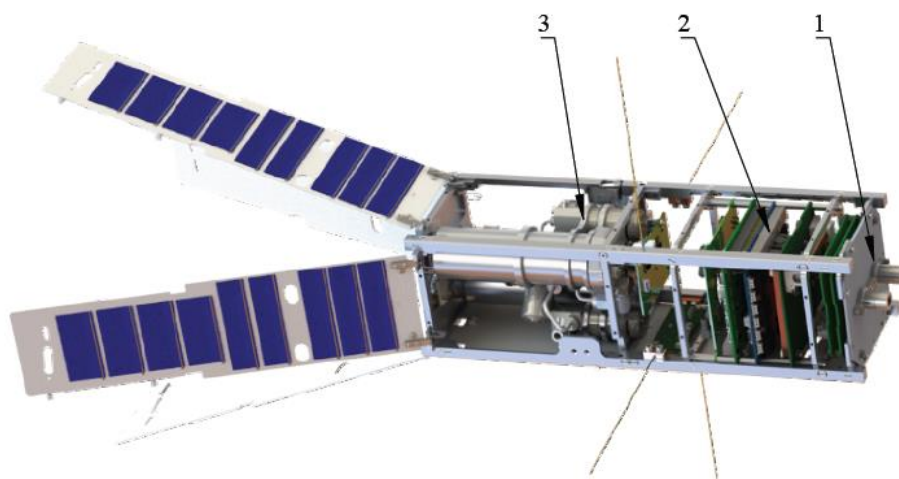
Nors pirmas *CubeSat* palydovas paleistas tik 2006 metais, tačiau faktiniais duomenimis iš viso iki 2017 metų kovo 14 dienos jau buvo paleista 613 palydovų. Tai rodo, kad projektas įgavo pagreitį ir užima vis daugiau kosminės rinkos dalies (*World's largest...* 2017)

Prie nano-palydovų plėtros prisideda ir tarptautinis projektas „QB50“. Projektas iš dalies remiamas Europos Sąjungos struktūrinių fondų lėšomis, todėl dalį paleidimo į kosmosą bei palydovo gamybos lėšų turi padengti patys dalyviai (*Bendros žinios...* 2011). Misiją koordinuoja Von Karmano institutas Briuselyje. Projekto tikslas yra ištirti žemutinės termosferos parametrus 100–400 km aukštyje. Iki šiol šioje srityje tyrimų atlikta labai mažai, nes didesni palydovai turėdavo skrieti dideliu greičiu ištemptomis elipsinėmis orbitomis, atstumas nuo žemės svyruodavo nuo 200 iki 3000 km. Tokiu greičiu skriedamas palydovas termosferoje išbūdavo vos keletą minučių ir matavimus atlikdavo tik tam tikruose taškuose. *CubeSat* palydovai yra pigesni, todėl jų skrydžio trukmei taikomi mažesni apribojimai. Tyrimams atlikti numatomas 3 mėnesių palydovų orbitinis gyvavimo laikas. „QB50“ tyrimo metu į orbitą bus paleista 50 įvairaus dydžio *CubeSat* palydovų, sujungtų į bendrą tinklą. Vienas nuo kito jie bus išsidėstę kelių šimtų kilometrų atstumu. (*Kosmoso naujienų...* 2014).

Pagal projekto reikalavimus, kiekviena komanda į savo palydovus privalo sumontuoti standartinius temperatūros bei aukščio jutiklius, taip pat pasirinkti vieną iš trijų mokslinių modulių (angl. *science unit*): jonų masės spektrometrą (INMS), ozono dalelių jutiklį (FIPEX), elektronų tankio jutiklį (m-NLP) (Kataria *et al.* 2012).

1.1. Nano palydovas LituanicaSAT-2

Kosminėje rinkoje įsitvirtinus *CubeSat* standartui, šioje inovacijų srityje dirba ir lietuvių mokslininkai. „LituanicaSAT-2“ yra antrasis lietuviškas palydovas, kuriamas dalyvauti projekte „QB50“. Palydovas atitinka 3U dydžio *CubeSat* kriterijus ir yra ypatingas tuo, kad jame sumontuota eksperimentinė manevravimo sistema, kurioje naudojamas skystas kuras. Tokio palydovo korpusas dar nėra ištirtas. Palydovas sudarytas iš atskirų modulių, pritaikytų *CubeSat* standartui (2 pav.) (*LituanicaSAT-2 Satellite...* 2017).



2 pav. „LituanicaSAT-2“ be šoninių saulės panelių: 1 – mokslinis modulis, 2 – funkcinis modulis, 3 – eksperimentinis modulis (*LituanicaSAT-2* 2017)

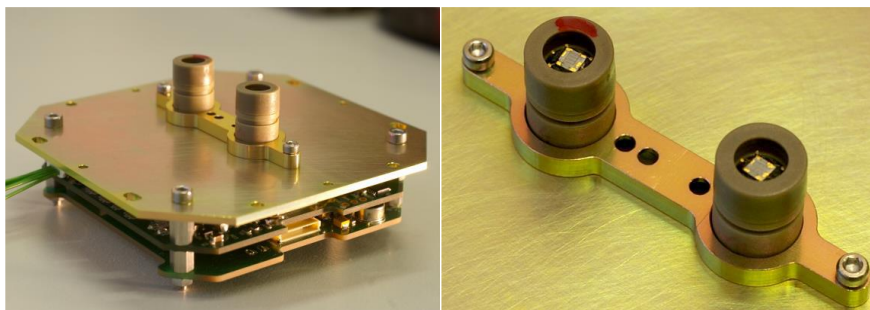
Pagrindinės „LituanicaSAT-2“ palydovo techninės charakteristikos pateikiamos 1 lentelėje.

1 lentelė. Pagrindinės palydovo charakteristikos (Smith 2012; Denis *et al.* 2015; *LituanicaSAT-2 Satellite...* 2017)

Masė	3,4 kg
Gabaritiniai matmenys	Gabenimo:100x100x340 mm. Darbo: 410x410x635 mm
Planuojama tyrimo trukmė	15–18 mėn
Skrydžio aukštis	100–400 km
Darbinė temperatūra	Nuo -10 iki 50 °C*

*Termosferoje oro dalelių temperatūra svyruoja nuo 0 iki 1300 °C, tačiau dėl labai reto oro tankio jos negalima lyginti su temperatūra Žemėje. Įprastai dalelės neįkaitina skriejančių kūnų daugiau nei iki 50 °C, o nakties metu, kuomet Saulė yra už Žemės, temperatūra gali nukristi ir iki -10 °C (Pečiuliauskienė ir kt. 2009).

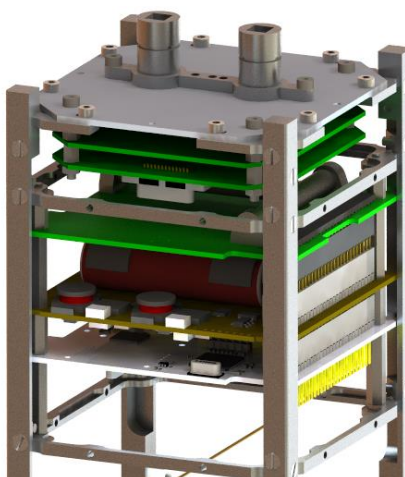
Mokslinis modulis „FIPEX“ (3 pav.) fiksuoja vienatomio deguonies koncentraciją termosferoje. Jis yra privalomas pagal projekto reikalavimus. Duomenys, surinkti iš visų palydovų, bus analizuojami ir padės susidaryti tikslesnį termosferos oro sandaros modelį (Kataria *et al.* 2012; Smith 2012).



3 pav. Mokslinis modulis „FIPEX“ (Rossmann *et al.* 2014)

Palydovo funkcinis modulis pavaizduotas 4 paveiksle. Jis atlieka pagrindines palydovo funkcijas. Jame sumontuotos ADCS, EPS, OBC posistemės. ADCS padeda sustabdyti palydovo sukimąsi erdvėje po paleidimo ir padeda nustatyti norimą palydovo poziciją skriejamos orbitos atžvilgiu. EPS sistemos paskirtis užtikrinti nepertraukiamą elektros energijos tiekimą bei kaupti energiją, kol palydovas skraido saulės šviesoje. OBC yra pagrindinis palydovo kompiuteris, atliekantis šias funkcijas (Denis *et al.* 2015):

- palydovo valdymas;
- elektros energijos paskirstymas;
- duomenų kaupimas, paskirstymas ir apdorojimas;
- ryšio su žeme palaikymas, duomenų išsiuntimas ir priėmimas.



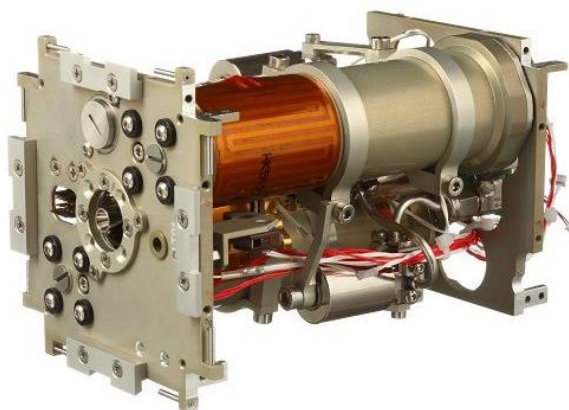
4 pav. Funkcinis modulis

Vienas iš pagrindinių „LituanicaSAT-2“ misijos tikslų yra išbandyti eksperimentinę manevravimo sistemą. Raketinis mikrovariklis (5 pav.), varomas amonio dimitramidu, yra pirmasis

pasaulyje variklis, taikomas tokio tipo palydovuose. Tikimasi, kad šis variklis palydovo skriejimo orbitoje trukmę pailgins nuo 3 iki 15–18 mėnesių, palaikydamas palydovą apie 300 km aukštyje. Jei šis eksperimentas pasiteisins, pasibaigus projektui numatoma komercinė plėtra ir tęsiami mikrovariklių tyrimai (*Lietuviai ruošiasi...* 2017).

Eksperimentinio modulio pagrindinės charakteristikos (*LituanicaSAT-2* 2017):

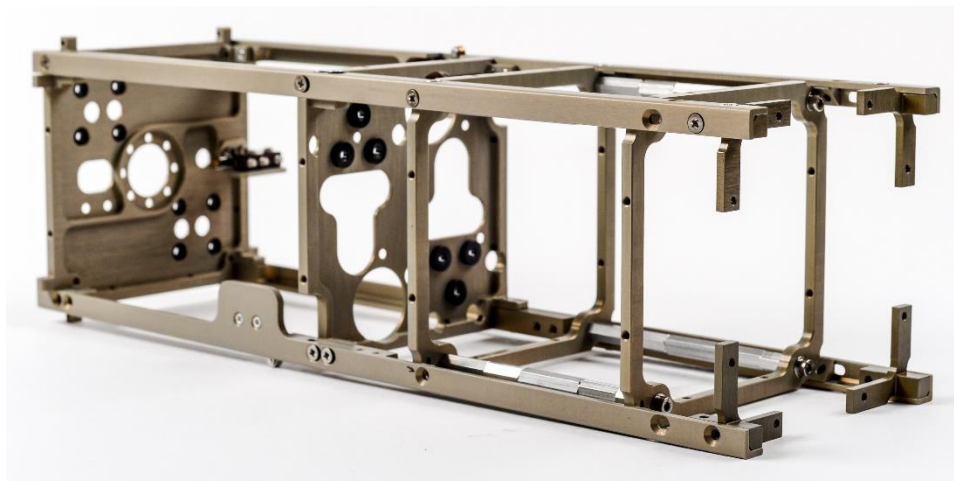
- Variklio trauka, $F = 0,3 \text{ N}$;
- Specifinis impulsas, $I_{sp} = 252 \text{ s}$;
- Kuras: vienkomentis – amonio dimitramidas;
- Suminis raketinės sistemos suteikiamas greičio pokytis, $\Delta V = 200 \text{ m/s}$;
- Masė – apie 1300 g.



5 pav. Eksperimentinis mikrovariklis (*Chemical Propulsion...* 2017)

Labai svarbi palydovo sudedamoji dalis yra korpusas (6 pav.). Konstrukcija turi būti paprasta, pritaikyta įkomponuoti atskirus modulius, taip pat atitikti gabaritinius matmenis pagal *CubeSat* standartą. Pasirenkant medžiagą, svarbūs kriterijai yra svoris, stiprumas, standumas, šiluminis laidumas ir kaina. Projektuojant konstrukciją, svarbu atsižvelgti į apdirbimo galimybes. Taip pat, atsižvelgiant į aplinką, kurioje dirbs palydovas, taikomi šie reikalavimai (Chiranjeeve *et al.* 2014):

- Visos medžiagos turi būti parinktos iš NASA pateikiamų pasirinkčių sąrašo.
- Šiluminio plėtimosi koeficientas turėtų būti artimas kaip medžiagų, kurios bus aplink palydovą kilimo metu.
- Medžiaga turi būti lengvai apdirbama.
- Masės sumažinimui turėtų būti parinkta mažesnio tankio medžiaga.



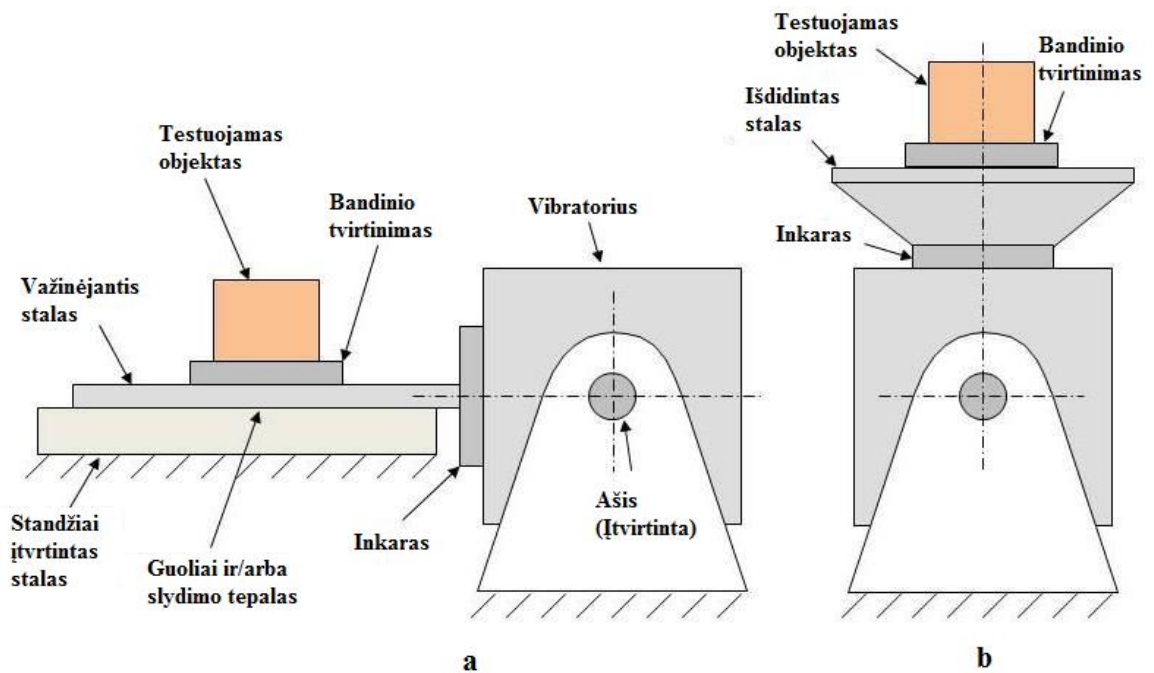
6 pav. „LituanicaSAT-2“ korpusas (*LituanicaSAT-2* 2017)

Pagal „QB50“ projekto reikalavimus korpusui galima pasirinkti vieną iš šių aliuminio lydinių: AA 6061 arba AA 7075. Atsižvelgus į kriterijus bei projekto keliamas sąlygas, pasirinktas aliuminis AA 7075. Jo techniniai parametrai nurodyti 2 skyriuje. Keletas smulkių sudedamųjų dalių yra atspausdintos 3D spausdintuvu (*LituanicaSAT-2* 2017; *LituanicaSAT-2 Satellite...* 2017).

1.2. Dinaminiai tyrimai nano palydovuose

Dauguma lengvųjų palydovų, kurių masė yra iki 227 kg, testuojami ant elektrinių plaktuvų visomis trimis kryptimis. Tokių vibracijų tyrimo stendo schema pavaizduota 7 paveiksle. Kai kurie didesni kosminiai palydovai taip pat testuojami analogiškai. Pagrindinis principas, testuojant vibracijas ant plaktuvo, yra patikrinti ar laikomasi tam tikrų konstrukcinių ir mechaninių reikalavimų ir nustatyti ar palydovas patikimas (Sarafin *et al.* 2014):

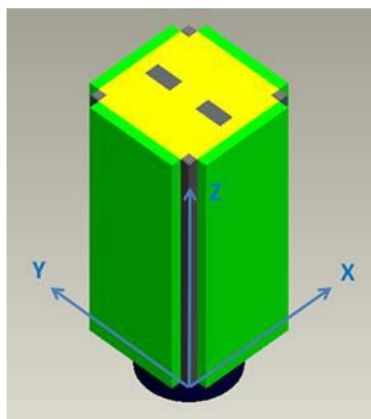
- Kosminio palydovo struktūra ir techninė įranga turi atlaikyti veikiančias apkrovas ir tinkamai funkcionuoti po paleidimo į orbitą visos misijos metu.
- Palydovo techninė įranga turi atlaikyti apkrovas, veikiant įvairioms išorinėms vibracijoms, raketos nešėjos pakilimo metu.
- Elektros jungtys turi likti sujungtos ir neatsipalaiduoti paleidimo ir skrydžio metu.
- Palydovo korpusas turi išlaikyti vientisumą, pvz., dėl vibracijų ir apkrovų negali atsipalaiduoti varžtai ar kitos modulinės sistemos.



7 pav. Vibracijų tyrimo stendo schema: a – horizontalus pastatymas, b – vertikalus pastatymas.
(Sarafin *et al.* 2014)

Kiekvienam tyrimui reikia atlikti du pagrindinius dalykus: aiškiai apibrėžti tiriamąjį objektą ir nusistatyti tyrimo tikslus. Tyrimai turi iš anksto nustatytus kriterijus, leidžiančius spręsti, ar tiriamas objektas išlaikė testą (išlaikymo/neišlaikymo kriterijus), ar bandymas kitaip pasiekė iškeltus tikslus (sėkmės kriterijus). Jei bandymo tikslas yra nustatyti pasitikėjimą tam tikru aspektu, tuomet kriterijai apibrėžiami „išlaikė / neišlaikė“. Jei bandymas atliekamas siekiant įgyti duomenis tam tikru tikslu, rezultatas apibrėžiamas kaip sėkmės kriterijus. Nėra prasmės daryti tyrimą, jei rezultatas neleidžia suprasti ar buvo pasiektas apibrėžtas tikslas (Sarafin *et al.* 2014; Brummit 2010).

Visiems *CubeSat* palydovams, dalyvaujantiems „QB50“ projekte, turi būti taikomi patikrinimai, kurie yra nustatyti pagal paleidimo metu veikiančias apkrovas. Jų charakteristikos yra apibrėžtos projekto autorių pateiktose rekomendacijose, į kurias atsiželgiant reikia atlikti patikrinamuosius skaičiavimus ir eksperimentinius tyrimus (Denis *et al.* 2015). Visi matavimai turi būti atlikti naudojant tą pačią atskaitos sistemą, nustatytą pagal tarpusavyje statmenas palydovo ašis: X, Y, Z. Ši koordinatinių sistema vadinama kūno atskaitos sistema (angl. *Body Reference Frame* – BRF) ir yra pavaizduota 8 paveiksle.



8 pav. Palydovo koordinatinių sistema (Denis *et al.* 2015)

Siekiant užtikrinti tiesingas apkrovas ir vibracijas, palydovas turi būti integruotas į testavimo konteinerį (angl. *TestPOD*). Jie suprojektuoti pagal dinامينius paleidimo bėgius, skirtus palydovo atsiskyrimo nuo raketos-nešėjos etapui. Be testavimo konteinerio atlikti bandymai laikomi netinkamais, bet gali būti atliekami kaip papildoma palydovo konstrukcijos kokybės kontrolė (Denis *et al.* 2015; Smith 2012). 2 lentelėje pateiktos rekomenduojamų bandymų rūšys, etapai bei metodai palydovui patikrinti.

2 lentelė: reikalingi mechaniniai bandymai (Denis *et al.* 2015)

Bandymo rūšis	Parengimas	Priėmimas	Teorinis skrydis	Bandymo metodas
Statinis ir G apkrovų	X	-	X	BEM simuliacija + eksperimentas
Savųjų dažnių/rezonansų tyrimas	X	X	X	BEM simuliacija + eksperimentas
Sinusinės vibracijos	X	X	X	BEM simuliacija + eksperimentas
Atsitiktinės vibracijos	X	X	X	BEM simuliacija + eksperimentas
Smūginės apkrovos	X	-	X	Eksperimentas

Apžvelgus reikalaujamus *CubeSat* palydovų bandymus, komandoms rekomenduojama nustatyti priemones ir tyrimų metodiką, pagal kurią bus atliekami bandymai.

1.3. Dinaminių tyrimų charakteristikos

Rezonansinis bandymas

Atlikus rezonansinius bandymus, galima nustatyti palydovo korpuso vientisumo pokyčius, bei nustatyti galimą žalą kitoms palydovo sistemoms. Simuliacijos būdu gaunamos modos formos, kuriose galima nustatyti silpniausias ir labiausiai išorinių jėgų paveikiamas korpuso sritis. Atliekant bandymą būtina atkreipti dėmesį į šias sritis. Bandymo metu, palydovas turi būti integruotas į testavimo konteinerį, kuris yra pritvirtinamas prie standaus pagrindo. Rezonansinis bandymas atliekamas du kartus, vienas prieš ir kitas po visų kitų pilnai įvykdytų bandymų (sinusinės vibracijos, atsitiktinės vibracijos, statinių apkrovų visomis trimis kryptimis). 3 lentelėje pateikiamos rekomenduojamos savųjų rezonansinių dažnių tyrimo charakteristikos.

3 lentelė. Rezonansinio bandymo charakteristikos (Denis *et al.* 2015)

	Parengimas, Priėmimas arba Teorinis skrydis	
Sinuso vibracijos testas	Reikalingas	
Atskaitos sistema	BRF	
Kryptys	X, Y, Z	
Kontūras	Dažnis [Hz]	Amplitudė [g]
	5	0,15*
	100**	0,15*

* Didesnės vertės gali būti reikalaujamos priklausomai nuo bandymo įrangos, kad būtų tinkamai nustatyti savieji dažniai palydove.

**Rezonanso tyrimas gali būti pratęstas iki didesnių dažnių, leidžiančių tinkamai nustatyti pirmąjį savąjį dažnį palydove.

Palydovas atitinka bandymo kriterijus ir bandymas laikomas sėkmingu, jei įvykdomos šios sąlygos:

- Pirmas savasis rezonansinis dažnis yra didesnis nei 90Hz.
- Pirmo ir antro bandymo metu, gautų rezonansinių dažnių pokytis neviršija 5%.

Kvazistatinė apkrova

Kvazistatinė (pusiau statinė) apkrova yra dinaminis procesas, kurio metu apkrova nepriklauso nuo laiko ir sukelia itin mažas inercijos jėgas. Tokią apkrovą galima laikyti artima statinei apkrovai.

Sukėlus statines apkrovas palydovui imituojamos pakilimo metu veikiančios perkrovos, kuomet raketa nešėja įgauna pagreitį. Nors kilimo metu dažniausiai neviršijamos 8 g perkrovos, tačiau dėl atsargumo rekomenduojama palydovą apkrauti bent 10 g apkrova. 4 lentelėje pateikiamos statinių apkrovų charakteristikos, kurias turi atlaikyti palydovas.

4 lentelė. Kvazistatinio bandymo charakteristikos (Denis *et al.* 2015)

	Parengimas	Priėmimas	Teorinis skrydis
Atskaitos sistema	BRF	-	BRF
Kryptys	X, Y, Z	-	X, Y, Z
Kontūras	13 g	-	10,8 g
Metodas	Bandymas	Nereikalaujamas	Bandymas

Sinusinės vibracijos

5 lentelėje pateikiamos sinusinės vibracijos testo charakteristikos. *CubeSat* palydovas turi išlaikyti sinusinės vibracijos testus pagal užduodamas apkrovas.

5 lentelė. Sinusinės vibracijos testo charakteristikos (Denis *et al.* 2015)

	Parengimas		Priėmimas		Teorinis skrydis	
Atskaitos sistema	BRF		BRF		BRF	
Kryptys	X, Y, Z		X, Y, Z		X, Y, Z	
Kontūras	Dažnis [Hz]	Amplitudė [g]	Dažnis [Hz]	Amplitudė [g]	Dažnis [Hz]	Amplitudė [g]
	5 - 100	2,5	5 – 100	2	5 – 100	2,5
	100 – 125	1,25	100 - 125	1	100 - 125	1,25

Atsitiktinės vibracijos

Atsitiktinės vibracijos testavimas ant elektrinio vibratoriaus imituoja tik atsitiktines vibracijas skrydžio metu, kurios turi tiesioginę sąsają su nano palydovo montavimo vieta. Atsitiktinės vibracijos tyrimas sukuria papildomą pasitikėjimą palydovo konstrukcija – patikrinamos mechaninės bei elektronikos jungtys, kurios yra apkraunamos vibracinių apkrovų. 6 lentelėje pateikiamos rekomenduojamų atsitiktinių vibracijų charakteristikos.

6 lentelė. Atsitiktinės vibracijos bandymo charakteristikos (Denis *et al.* 2015)

	Parengimas		Priėmimas		Teorinis skrydis	
Atsitiktinės vibracijos testas	Reikalaujamas		Reikalaujamas		Reikalaujamas	
Atskaitos sistema	BRF		BRF		BRF	
Kryptys	X, Y, Z		X, Y, Z		X, Y, Z	
RMS pagreitis	8,03 g		6,5 g		8,03 g	
Trukmė	120 s		120 s		120 s	
Kontūras	Dažnis [Hz]	Amplitudė [g ² /Hz]	Dažnis [Hz]	Amplitudė [g ² /Hz]	Dažnis [Hz]	Amplitudė [g ² /Hz]
	20	0,01125	20	0,007	20	0,01125
	130	0,05625	50	0,007	130	0,05625
	800	0,05625	200	0,035	800	0,05625
	2000	0,015	640	0,035	2000	0,015
			2000	0,010		

Apžvelgus rekomenduojamų dinaminių tyrimų charakteristikas matoma, kad svarbiausias yra savųjų dažnių tyrimas, jis turi aiškiai nustatytus išlaikymo/neišlaikymo kriterijus. Kiti bandymai taip pat būtini, tačiau jų išlaikymo kriterijai nėra aiškiai apibrėžti: reikia tik vizualiai nustatyti ar nepakito konstrukcija ir patikrinti korpuso ir kitų palydovo dalių funkcionavimą po visų bandymų.

2. Nano palydovo korpuso modalinė analizė

Palydovo konstrukcijos stiprumo skaičiavimams naudojamas „Comsol Multiphysics“ programinis paketas. Ši programa skirta modeliuoti ir imituoti bet kokią fizikinę sistemą. „Comsol Multiphysics“ paketas leidžia atlikti simuliacijas, sujungiant kelis fizikinius modulius vienu metu, pavyzdžiui: elektros, mechanikos, chemijos, šilumos, radiacijos ar skysčio srauto modulius. Atliekant skaičiavimus, modeliuojamas kūnas ar sistema suskaidoma į baigtinius elementus, todėl atliekami pakankamai tikslūs skaičiavimai, nes įvertinami medžiagų parametrai, konstrukciniai elementai ir tikslios detalių geometrijos (Comsol Multiphysics 2017). Programa patogi naudoti tuo, kad yra vartotojo sąsajos su dauguma inžinerinių ir skaičiuojamųjų programų, pavyzdžiui: „Matlab“, „Excel“, „Solidworks“, „AutoCAD“, „Inventor“, „Solid Edge“ ir t. t.

Nagrinėjamo palydovo modalinės analizės rezultatai parodo pavojingas palydovo korpuso vietas, kurias būtina atidžiau stebėti eksperimento metu. Modalinės analizės tikslas yra nustatyti modų formas. Idealiu atveju randami ir pavojingiausi dažniai, kuriems esant galimai susiformuoja rezonansiniai reiškiniai nagrinėjamoje struktūroje. Vis dėlto šiuo atveju bus nagrinėjamas supaprastintas palydovo korpuso modelis, todėl simuliacijos rezultatai negali būti lyginami su eksperimento būdu gautais rezultatais. Bendrieji korpuso parametrai pateikti 7 lentelėje.

7 lentelė. Pagrindiniai korpuso parametrai

Masė	0,314 kg
Gabaritiniai matmenys	100x100x340 mm
Tūris	0,0034 m ³
Svoris	3,08 N

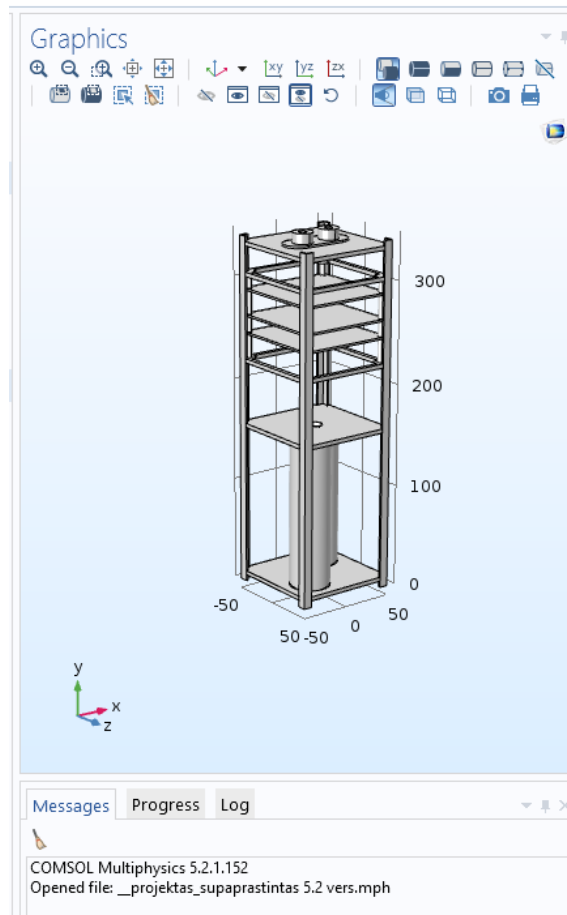
2.1. Konstrukcijos modalinė analizė „Comsol“ programa

Modalinės analizės simuliacija „Comsol“ programoje atliekama etapais. Simuliacijai atlikti reikalingi šie veiksmai:

1. Sumodeliuoti norimą tirti geometrinį kūną.
2. Suvesti pradinius modelio duomenis (nustatyti medžiagas, apkrovas ir t.t.).
3. Nustatyti baigtinių elementų tinklelio parametrus.
4. Suformuoti fizikinius dėsnius taikomus tiriamam objektui.
5. Atlikti skaičiavimą.
6. Apdoroti rezultatus.

Geometrija

„Solidworks“ programa sumodeliuojamas supaprastintas palydovo modelis. Į „Comsol“ aplinką modelis įkeliamas naudojant „LiveLink for Solidworks“ funkciją. Svarbu atkreipti dėmesį į matavimo vientų sistemą, importuojant modelį ji turi sutapti su ta, kurioje buvo projektuojamas palydovas. Taip pat reikia nusistatyti koordinacių sistemos centrą bei ašis, pagal kurias sukuriamas kūno atskaitos sistema. Supaprastintas palydovo korpuso modelis pavaizduotas 9 paveiksle.



9 pav. Supaprastinto modelio geometrija „Comsol“ aplinkoje

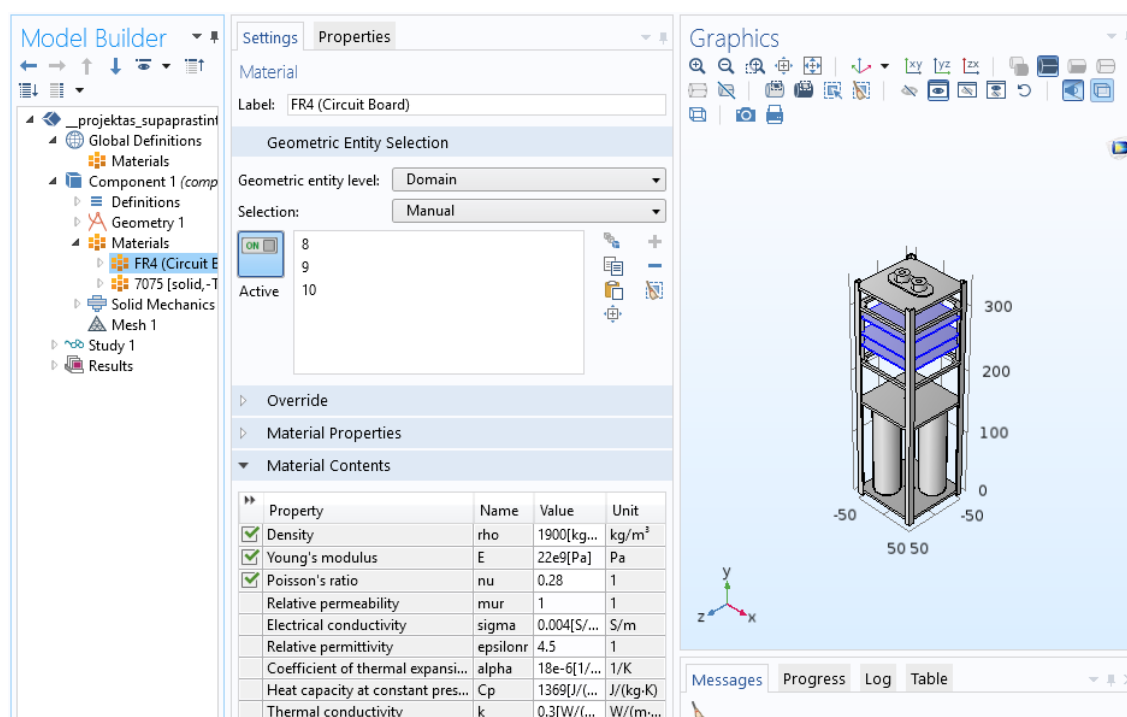
Medžiagos

Skaičiavimams atlikti reikia parinkti naudojamas medžiagas, nustatyti jų parametrus. Korpuso detalėms priskiriamos dvi skirtingos medžiagos: pagrindiniai konstrukciniai rėmai gaminami iš aliuminio AA 7075, bei dėl tikslesnių skaičiavimų į supaprastintą konstrukciją įmontuotos 3 PCB plokštės, gaminamos iš FR-4 kompozitinės medžiagos, naudojamos mikroschemų gamybai. Naudojamų medžiagų charakteristikos pateiktos 8 lentelėje.

8 lentelė. Pagrindinės medžiagų charakteristikos

Medžiagos pavadinimas	AA 7075-T6	FR-4
Tankis	3100 kg/m ³	1900 kg/m ³
Jungo modulis	72 GPa	22 GPa
Puansono koeficientas	0,32	0,28
Šiluminio plėtimosi koeficientas	2,4·10 ⁻⁵ K ⁻¹	1,4·10 ⁻⁵ K ⁻¹

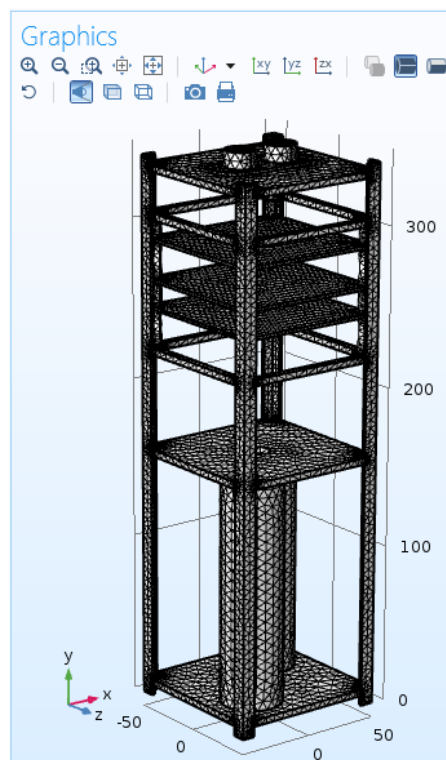
Kaip suvesti medžiagų parametrai pavaizduota 10 paveiksle.



10 pav. Medžiagų parametų įvedimas atskiroms modelių detalėms

Tinklelis

Skaičiavimai atliekami modelį suskaidžius į baigtinius elementus, todėl sudaromas šių elementų tinklelis. Tinklelio kokybė nustatoma vidutinė, „Jacob“ taškų kiekis elemente yra 3. Kompiuterinė programa sukuria tinklelį sudarytą iš 5430 linijinių elementų, 31887 mazgų, o iš viso dominuojančių elementų yra 53029. Sudarytas baigtinių elementų tinklelis pavaizduotas 11 paveiksle.



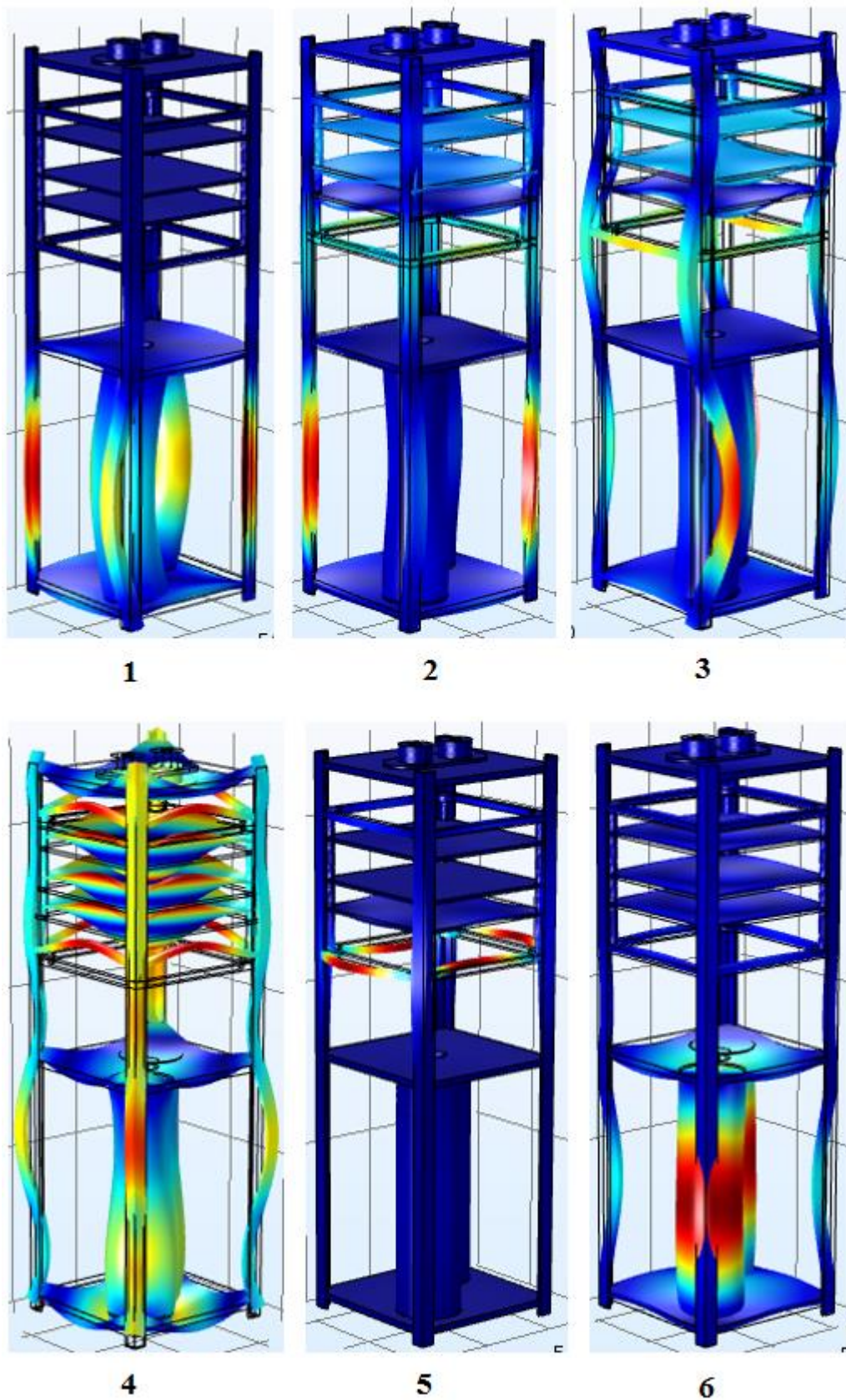
11 pav. Baigtinių elementų tinklelis

Skaičiavimo užduotis

Analizei atlikti reikia pasirinkti taikomų fizikinių sistemų modeliavimo metodą. Pasirenkamas savųjų dažnių (angl. eigenfrequency) metodas. Suvedami analizei reikalingi parametrai: nustatomas rankinis savųjų dažnių paieškos režimas, užduodama surasti 6 pavojingiausias modas, nustatomi SI sistemos matavimo vienetai hercai (Hz), nustatoma dažnių paieška aplink 1500 Hz, visi kiti parametrai paliekami pagal nutylėjimą (angl. default).

2.2. Modalinės analizės rezultatai

Sistemos modaliniai parametrai yra modalinis dažnis, modos forma. Modalinės analizės rezultatai parodo probleminius dažnius ir modų formas. Reikėtų vengti, kad palydovas veiktų tokių dažnių aplinkoje, nes korpuse susidaręs rezonansas gali neigiamai paveikti kitas palydovo sistemas bei patį korpusą. Atlikus simuliaciją rastos 6 pavojingiausios modos formos, kurios pateiktos 12 paveiksle.



12 pav. Pavojingiausios modos ir jų formos: 1 – prie 1470,6 Hz, 2 – prie 1516,3 Hz, 3 – prie 1522,2 Hz, 4 – prie 1613,3 Hz, 5 – prie 1650,2 Hz, 6 – prie 1651,1 Hz dažnių.

Narginėjamu atveju, svarbiausia yra modos forma, nes ji atskleidžia silpniausias ir labiausiai pažeidžiamas palydovo konstrukcijos sritis, į kurias reikia atkreipti dėmesį vykdant eksperimentinį tyrimą. Susidarius įvairių dažnių rezonansiniams svyravimams gali būti deformuotos tam tikros palydovo konstrukcijos sritys. Atlikus modų formų analizę, nustatyta, kad problemų gali kilti žemutinėje vertikalių tvirtinimo bėgelių dalyje (1, 2, 3 formos 12 paveiksle). Šie bėgeliai yra pagrindinė rišančioji konstrukcija, jų deformacija gali pažeisti sieneles, ant kurių sumontuoti saulės elementų moduliai. 4 ir 5 modos parodo, kad stipriau apkraunamas funkcinis modulis bei jo įtvirtinimo apatinis rėmelis. Šiuo atveju gali būti deformuotas ADCS modulis, kuris nustatinėja palydovo poziciją ir siunčia komandas skrydžio kontroliavimui. Gali sutrikti giroskopo darbas. Pakrypus šiam moduliui, gali būti blogai nustatoma palydovo orientacija erdvėje, sutrikti skrydžio orbitos trajektorija. Paskutinė forma (6) 12 paveiksle parodo, kad tyrimo metu reikia atidžiau stebėti ir mikrovariklio tvirtinimo vietas bei kuro talpas. Deformuotos sujungimų vietos, gali pakreipti mikrovariklį ir sutrikdyti tikslų jo darbą. Eksperimentinių vibracinių bandymų metu, turi būti itin atidžiai stebimos šioje dalyje aprašytos palydovo konstrukcijos zonos.

3. Eksperimentiniai dinaminiai tyrimai

3.1. Tiriamasis objektas

Darbe tiriamas palydovas LituanicaSAT-2 kartu su specialiu testavimo konteineriu. Jo dinaminėms savybėms įvertinti sukurtas dinaminių savybių tyrimo stendas, kuris leidžia nustatyti palydovo savybių kitimo dėsnį priklausomai nuo dinaminių poveikių, atsirandančių dėl išorinių virpesių žadinimo. 13 paveiksle pateiktas palydovas LituanicaSAT-2 (kairėje) ir specialus testavimo konteineris (dešinėje).



13 pav. Palydovas (kairėje) ir testavimo konteineris (dešinėje)

Dinaminių palydovo charakteristikų tyrimo uždaviniai:

1. Atlikti dinaminių palydovo savybių tyrimus, siekiant įvertinti virpesių įtaką ir stebėti palydovo konstrukcijos patikimumą/stabilumą dinamiame režime.
2. Palydovo virpesių matavimus atlikti trimis ašimis (X, Y, Z) ir įvertinti išorinių veiksnių įtaką dinaminėms palydovo savybėms.

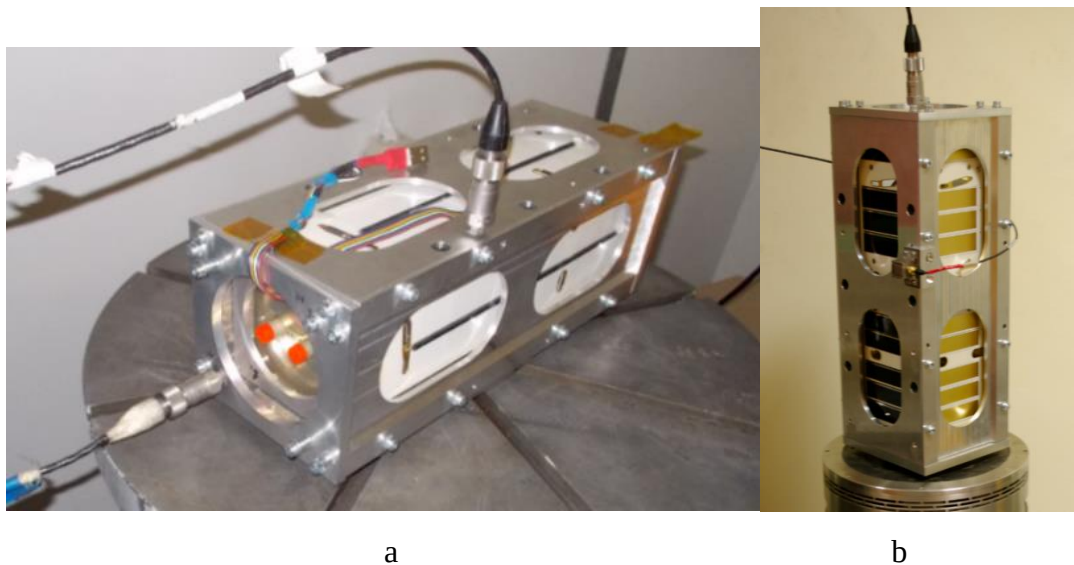
3.2. Tyrimo priemonių aprašymas

Virpesių parametrų matavimui panaudotos Danijos firmos „Brüel & Kjær“ virpesių žadinimo bei matavimo priemonės. 14 paveiksle parodytas palydovo dinaminių savybių tyrimo stendas: parodyti duomenų kaupimo ir apdorojimo įranga su kompiuteriu, virpesių sukėlimui naudojamas vibratorius su stiprintuvu, paveiksle taip pat parodyti palydovo sistema ir akceleratorius 4506.



14 pav. Virpesių parametrų matavimo priemonės

Stendo virpesių matavimai atliekami trimis kryptimis. Šios kryptys pavaizduotos 15 paveiksle – a dalyje palydovas pastatytas pagal X ašį, b dalyje pastatytas pagal Z ašį. Šios kryptys nustatytos atsižvelniant į palydovo koordinatinių sistemą.



15 pav. Palydovo pastatymo kryptys: a – horizontaliai, b – vertikalčiai

Virpesiams fiksuoti naudojami skirtingų rūšių akcelerometrai: vienas – matuojantis virpesius viena ašimi ir kitas – matuojantis trimis, tarpusavyje statmenomis, kryptimis (X, Y, Z). Šių daviklių charakteristikos nurodytos 9 lentelėje.

9 lentelė. Daviklių informacija

Vienašis akcelerometras	8341
Įtampos jautrumas	100 $\pm$ 10 % mV/g
Matavimo ribos	$\pm$ 50 g
Dažnių ribos (– 10 %)	0.5 Hz to 10 kHz
Triašis akcelerometras	4506 B
Įtampos jautrumas	500 $\pm$ 10 % mV/g
Matavimo ribos	$\pm$ 70 g
Dažnių ribos (– 10 %)	X: nuo 0,3 Hz iki 5,5 kHz; Y, Z: nuo 0,6 Hz iki 3,0 kHz

Dinaminių palydovo charakteristikų tyrimo stendas leidžia:

- Nustatyti tiriamojo palydovo padėtį veikiančių virpesių krypties atžvilgiu ir pritvirtinti jį prie virpančios vibrostendo platformos.
- Sužadinti virpančią platformą iki reikiamų reikšmių 20–2000 Hz ruože.
- Matuoti virpančios vibrostendo platformos virpesius, esant įvairiems žadinimo dažniams ir virpesių lygiams.

3.3. Eksperimentinių tyrimų metodika

Apžvelgus „QB50“ projekto rekomenduojamus bandymus ir virpesių charakteristikas sudaryta bandymų programa:

1. Rezonansinis testas nuo 5 Hz iki 100 Hz, 0,15 g amplitudė, 3 bandymai kiekvienai ašiai (X, Y, Z). Bandymo tikslas yra apytiksliai nustatyti pirmąją konstrukcijos savąją dažnį.
2. Kvazistatinis apkrovimas su 10,8 g perkrova, 3 bandymai kiekvienai ašiai (X, Y, Z), apkrauti po 1 minutę.
3. Sinusinių vibracijų testas, 3 bandymai kiekvienai ašiai (XYZ) po 2 profilius:
 - 5-100 Hz, 2,5 g;
 - 100-125 Hz, 1,25 g.
4. Atsitiktinių vibracijų testas, vidutinis pagreitis (RMS) 8,03 g, trukmė 120 s, 3 bandymai kiekvienai ašiai (XYZ) po 4 profilius:
 - 20 Hz, 0,01125 g²/Hz amplitudė.
 - 130 Hz, 0,05625 g²/Hz amplitudė.
 - 800 Hz, 0,05625 g²/Hz amplitudė.
 - 2000 Hz, 0,015 g²/Hz amplitudė.

5. Pakartotinis rezonansinis testas, tomis pačiomis sąlygomis kaip ir pirmas. Bandymo tikslas nustatyti pirmųjų dviejų savųjų dažnių pokytį lyginant su pirmuoju bandymu.

Pagrindiniai dinaminų charakteristikų tyrimo tikslai:

1. Ištirti dinaminį procesą, atsirandantį dinaminame palydovo darbo režime, veikiant išoriniams žadinimams 20–2000 Hz dažnių ruože.
2. Pagrįsti racionalius konstrukcinius ir technologinius sprendimus virpesių poveikio mažinimui.
3. Nustatyti ar palydovas atitinka rekomenduojamus „QB50“ projekto reikalavimus.

Palydovo dinaminų savybių bandymo išlaikymo kriterijai

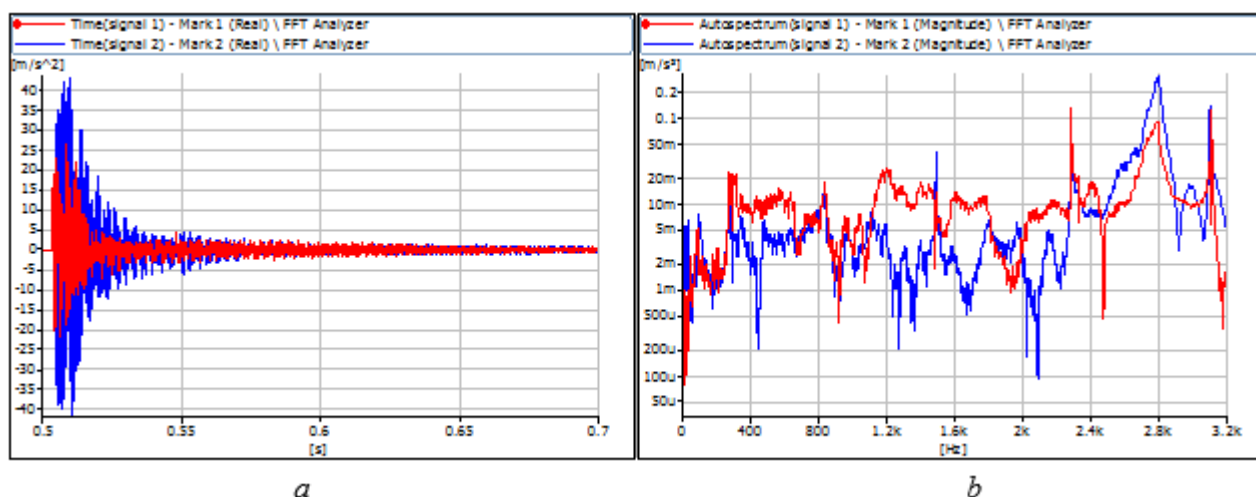
Savųjų dažnių bandymas atliekamas 2 kartus – prieš pradedant vibracinių bandymų ciklą ir po bandymų. Palydovas atitinka bandymo kriterijus ir bandymas laikomas sėkmingu, jei įvykdytos šios sąlygos:

- Pirmas savasis rezonansinis dažnis yra didesnis nei 90 Hz.
- Pirmo ir antro bandymo metu, gautų rezonansinių dažnių pokytis neviršija 5 %.
- Visų vibracinių bandymų metu nenustatyta jokių gedimų, palydovo konstrukcinių defektų ir neprarastas vientisumas.

3.4. Tyrimų rezultatai

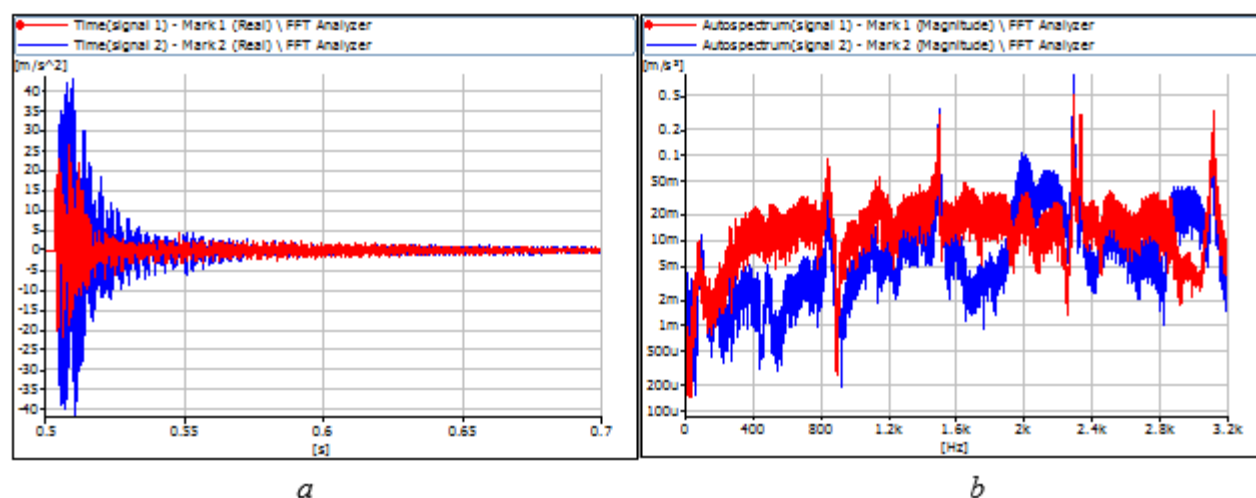
Rezonansinis bandymas

Savųjų dažnių tyrimui naudojamas smūginio žadinimo metodas. Šio bandymo metu užduodama smūginė 8,1 g apkrova – palydovas sujodinamas 40 m/s² pagreičiu. Bandymas atliekamas trimis kryptimis, pagal palydovo koordinatinių sistemą (BRF). 16, 17 ir 18 paveiksluose pavaizduoti pagreičio priklausomybės nuo laiko grafikai (a) ir pagreičio nuo dažnio priklausomybės grafikai (b), atitinkamai pagal X, Y ir Z pastatymo kryptis.



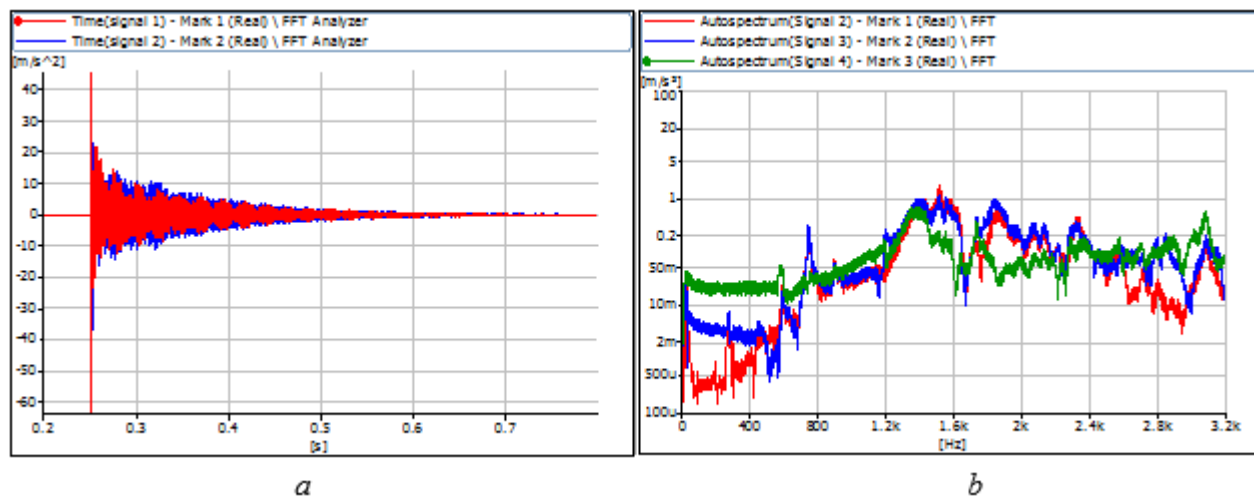
16 pav. Rezonansinis bandymas pagal X ašį. (Raudona – X kryptis, mėlyna – Z kryptis)

16 paveiksle, pagreičio nuo laiko priklausomybės grafike (a) pastebima, kad pasiekiamas 40 m/s² pagreitis į abi svyravimo puses (pagal X+ ir X-). Tai reiškia, kad pasiekta smūginė 8,1 g žadinimo apkrova. Virpersiai nusistovi per apytiksliai 0,1 s. Pagreičio priklausomybės nuo dažnio grafike (b), pastebimos dominuojančios amplitudės ties 840 Hz, 1493 Hz, 2285 Hz, 2329 Hz, 2802 Hz dažniais. Toliau apžvelgiamas bandymas pagal Y ašį (17 pav.).



17 pav. Rezonansinis bandymas pagal Y ašį. (Raudona – Y kryptis, mėlyna – Z kryptis)

Antrojo pastatymo metu, pagal Y ašį, taip pat pasiekta smūginė 8,1 g apkrova, virpesiai taip pat nusistovi per apytiksliai 0,1 s. Pagreičio priklausomybės nuo dažnio grafike (17 pav., b), ryškiau pastebimos dominuojančios amplitudės, pirmieji svyravimai taip pat susidaro ties 840 Hz, 1493 Hz, 2285 Hz, 2329 Hz dažniais.



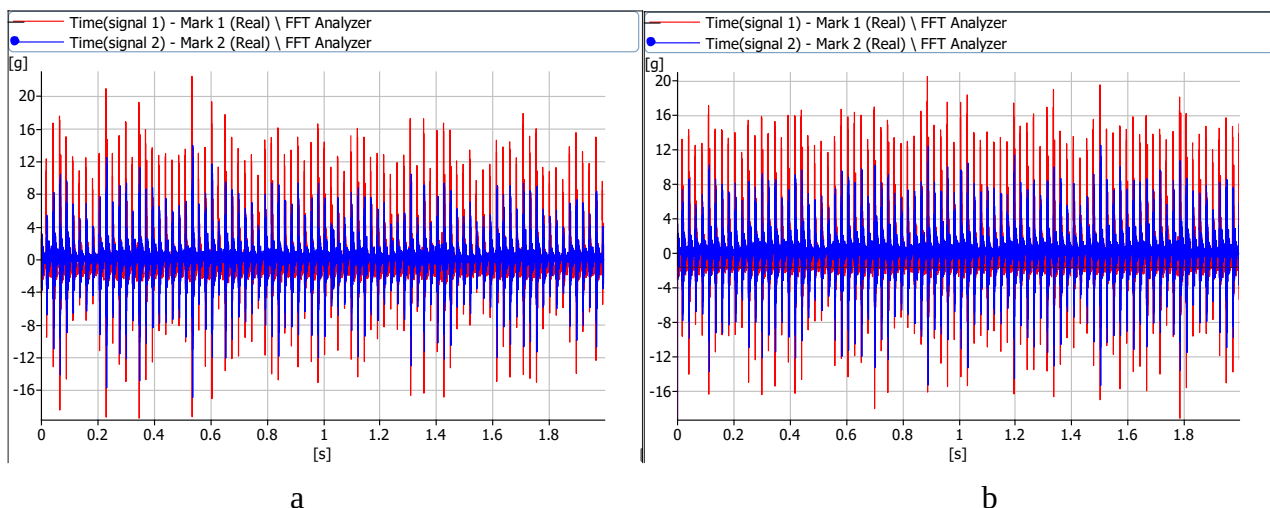
18 pav. Rezonansinis bandymas pagal Z ašį. (Raudona – Y kryptis, mėlyna – X kryptis, žalia – Z kryptis)

Trečiojo, vertikalaus pastatymo (pagal palydovo Z ašį) metu, taip pat pasiekama 8,1 g apkrova, tačiau virpesiai nusistovi per apytiksliai 0,4 s. Iš pagreičio nuo dažnio grafiko (18 pav., b) nustatomos dominuojančios amplitudės, galimai pirmieji savieji svyravimai sistemoje: jie susidaro ties 610 Hz, 740 Hz, 1560 Hz, 1710 Hz dažniais.

Atlikus visus išorinių virpesių žadinimo bandymus, dar kartą nustatinėjami konstrukcijos savieji dažniai. Bandymas atliekamas analogiškai kaip ir pirmasis rezonansinis bandymas. Rezultatai gauti ideniški pirmiesiems, ir apžvelgiami 3.5 skyriuje.

Kvazistatinės apkrovos

Kvazistatinė (pusiau statinė) apkrova yra dinaminis procesas, kurio metu apkrova nepriklauso nuo laiko ir sukelia itin mažas inercijos jėgas. Tokią apkrovą galima laikyti artima statinei apkrovai. Bandymo metu sukeliami virpesiai, kurių amplitudė nekinta pagal laiką, ir 1 minutę išlaikoma 10,8 g apkrova. Iš grafikų, pateiktų 19 paveiksle, galima nustatyti, kad bandymo metu pasiekta nustatyta apkrova. Atliekant bandymą kitomis kryptimis, gauti analogiškai rezultatai – išlaikyta didesnė nei 10,8 g apkrova. Po kvazistatinės apkrovos bandymų neužfiksuota jokių palydovo korpuso vientisumo pokyčių ar deformacijų, galinčių daryti įtaką sklandžiam palydovo darbo režimui.



19 pav. Kvazistatinė 10,8 g apkrova pagal laiką (a – pastatymas X kryptimi (raudona pagal X, mėlyna pagal Z), b – pastatymas Z kryptimi (raudona pagal Z, mėlyna pagal Y))

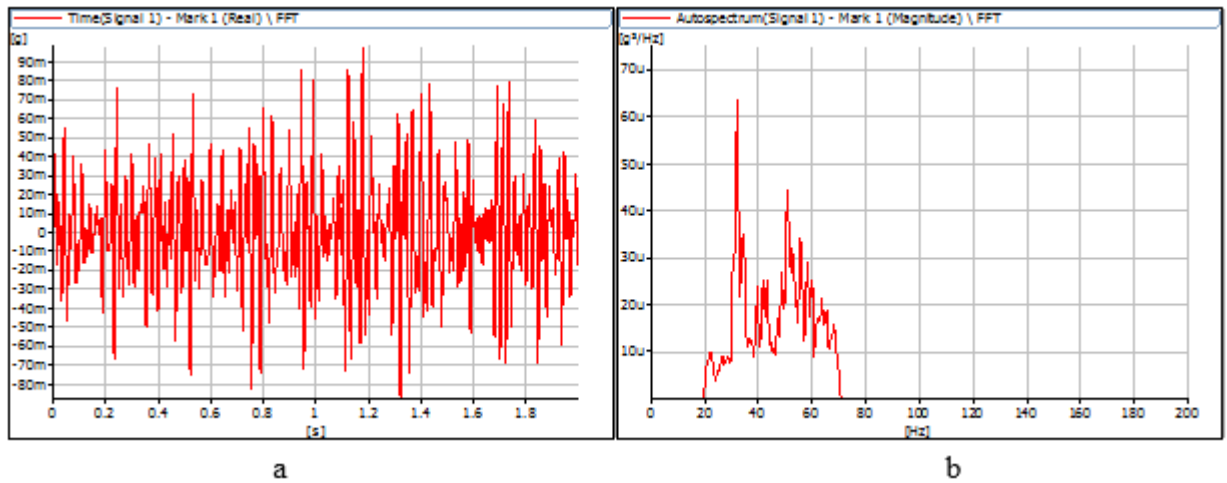
Atsitiktinės vibracijos

Atsitiktinių vibracijų tyrimo metu palydovas veikiamas išoriniais virpesių žadinamais 20–2000 Hz dažnių ruože. Atsižvelgiant į projekto rekomendacijas, dažnių diapazonas suskaidytas į 4 profilius, nurodytus 10 lentelėje. Visomis trimis kryptimis spektrinės galios tankio amplitudės (g^2/Hz) ir veikimo dažnių diapazonai užduoti analogiškai.

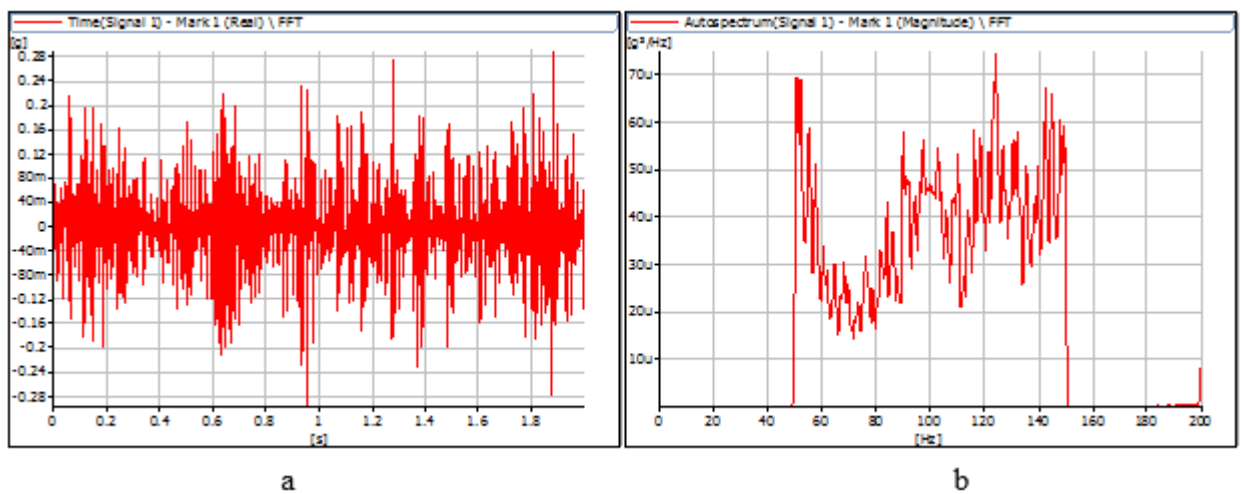
10 lentelė. Atsitiktinių vibracijų žadinimo režimai.

Žadinimo kryptis	Dažnių diapazonas, Hz	Spektrinės galios tankis, g^2/Hz
X, Y, Z	20–70 Hz,	0,01125 g^2/Hz amplitudė
	50–150 Hz,	0,05625 g^2/Hz amplitudė
	700–1500 Hz,	0,05625 g^2/Hz amplitudė
	1900–2000 Hz,	0,015 g^2/Hz amplitudė

Atsitiktinių vibracijų bandymo rezultatai 20–70 Hz ir 50–150 Hz dažnių diapazonuose pateikiami atitinkamai 20 ir 21 paveiksluose. Spektrinio tankio priklausomybės nuo dažnio (20 pav., b) grafike, aiškiai matomos sukeltos amplitudės, kurios išlaikomos didesnės nei 0,01125 g^2/Hz visame 20–70 Hz dažnių diapazone. 50–150 Hz dažnių ruože taip pat išlaikytas apie 0,05 g^2/Hz spektrinis tankis. 700–1500 Hz ir 1900–2000 Hz dažnių diapazonuose taip pat pasiektos numatytos spektrinio tankio reikšmės.



20 pav. Pagreičio pagal laiką (a) ir spektrinio tankio pagal dažnį (b) grafikai 20–70 Hz dažnių ruože

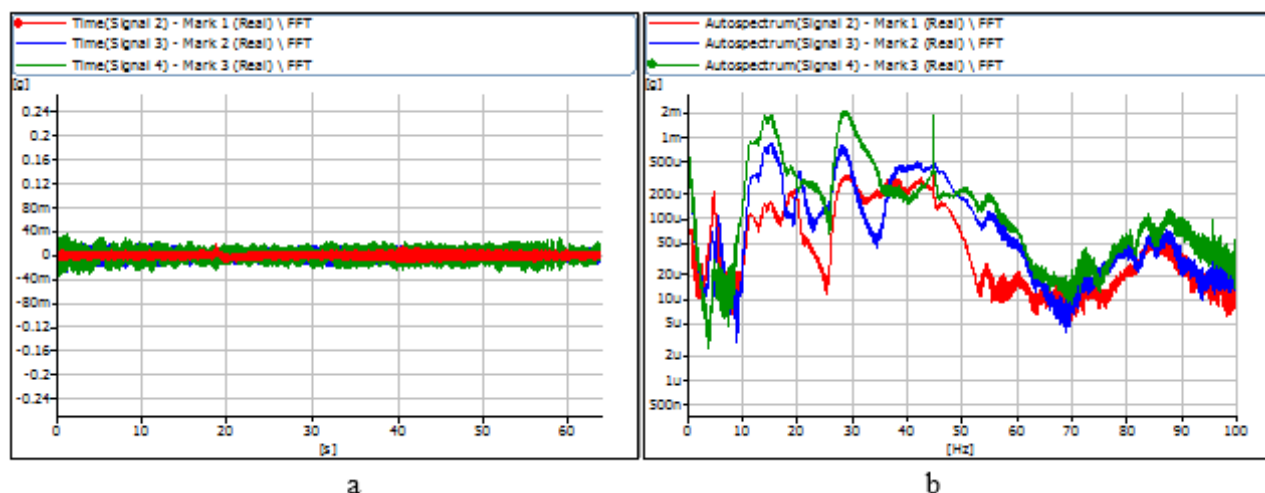


21 pav. Pagreičio pagal laiką (a) ir spektrinio tankio pagal dažnį (b) grafikai 50–150 Hz dažnių ruože

Visomis trimis kryptimis atlikus atsitiktinių vibracijų žadinimo bandymus pagal visus 4 dažnių ruožus, nepastebėta jokių mechaninių palydovo defektų.

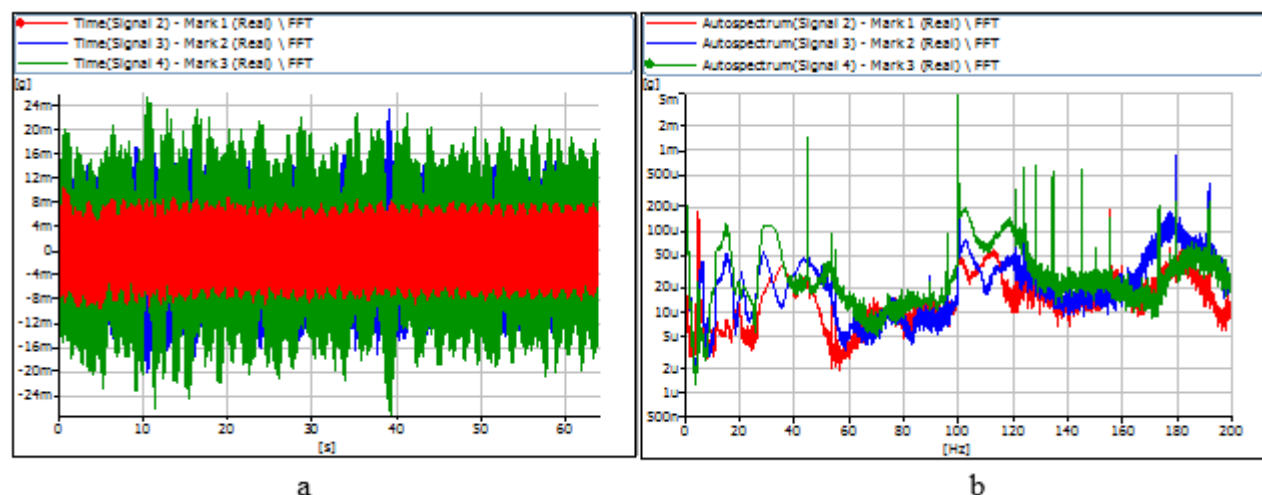
Sinusinės vibracijos

22 paveiksle (a) matoma, kad buvo užduota sinusinio žadinimo vibracijos apkrova sieianti daugiau 0,02 g pagreitį, pagal matuojamą X ašį. Pagreičio priklausomybės nuo dažnio grafike, matoma kokios susidaro pagreičio amplitudės konstrukcijoje nuo 5 Hz iki 100 Hz dažnių ruože. Pastebima, kad aukštesnės amplitudės susidaro prie žemesnių dažnių – pikas pasiekiamas 10–50 Hz ruože.



22 pav. Pagreičio priklausomybė nuo laiko (a) ir pagreičio priklausomybė nuo dažnio (b) sinusinių svyravimų metu 5–100 Hz dažnių diapazone. Pastatymas pagal X ašį (Raudona – Y kryptis, mėlyna – Z kryptis, žalia – X kryptis)

23 paveiksle (a) matomas stabilus apkrovimas siekiantis daugiau nei 0,02 g pagreitį, pagal matuojamą X ašį. Pagreičio priklausomybės nuo dažnio grafike, matomas pagreičio amplitudės svyravimas nuo 100 Hz iki 125 Hz ruože. Didžiausia apkrova veikia korpusą X ašimi.



23 pav. Pagreičio priklausomybė nuo laiko (a) ir pagreičio priklausomybė nuo dažnio (b) sinusinių svyravimų metu 100–125 Hz dažnių diapazone. Pastatymas pagal X ašį (Raudona – Y kryptis, mėlyna – Z kryptis, žalia – X kryptis)

Atlikus sinusinių svyravimų bandymus visomis kryptimis, pagal nusistatytus dažnių ruožus, nepastebėta jokių palydovo korpuso defektų – palydovo korpusas ir kitos sistemos į apkrovas reagavo stabiliai.

3.5. Rezultatų apibendrinimas

Kaip jau minėta anksčiau, „LituanicaSAT-2“ nano palydove pirmą kartą sumontuota eksperimentinė, skystu kuru varoma, raketinė manevravimo sistema. Sinusinių ir atsitiktinių vibracijų bei statinės apkrovos eksperimentai neturi aiškiai apibrėžtų bandymo išlaikymo/neišlaikymo kriterijų, o jų rezultatai neleidžia suprasti ar bandymas pasiekė tikslus. Tačiau aiškūs išlaikymo kriterijai nustatyti savųjų dažnių bandymo rezultatams, pagal kuriuos galima nustatyti ar palydovas išlaikė mechaninių virpesių testus. 11 lentelėje pateikiami dviejų pirmųjų savųjų svyravimų dažniai, išmatuoti pirmojo ir paskutiniojo bandymų metu.

11 lentelė. Rezonansinių dažnių tyrimo rezultatai

Ašis	Modos nr.	Dažnis (Hz) išmatuotas per pirmąjį bandymą	Dažnis (Hz) išmatuotas per paskutinįjį bandymą	Skirtumas tarp dažnių (%)
X	1	840	840	0
	2	1493	1493	0
Y	1	840	840	0
	2	1493	1493	0
Z	1	610	610	0
	2	760	760	0

Iš rezultatų pateiktų 11 lentelėje matoma, kad jokia kryptimi nei vienas rezonansinis dažnis neviršija nustatytos mažiausios 90 Hz ribos. Nustatyta, kad mažiausias konstrukcijos savasis svyravimas susidarė veikiant išorinei apkrovai Z ašimi (išilgai palydovo), ir siekė 610 Hz dažnį. Rezonansinių dažnių pokytis pirmojo ir antrojo bandymo metu nenustatytas, rezultatai gauti identiški. Tai reiškia, kad palydovo konstrukcija nepakito ir vibraciniai bandymai neturėjo įtakos tolimesniam palydovo veikimui. Vizualios patikros metu po visų virpesių tyrimų nenustatyta jokių konstrukcijos vientisumo pokyčių, neatsipalaidavo varžtai, neatsijungė elektros jungtys, nenustatyta jokių kitokių defektų.

IŠVADOS

1. Apžvelgtoje literatūroje išanalizuoti dinaminių tyrimų metodai ir bandymų reikalavimai, taikomi nano palydovams, taip pat pateiktos tyrimų charakteristikos.

2. Modalinės analizės metu, atliekant simuliaciją baigtinių elementų metodu, nustatytos pavojingiausios korpuso sritys: išilginių bėgelių žemutinė dalis bei funkcinio modulio tvirtinimo konstrukcija. Šių sričių deformacijos gali neigiamai paveikti palydovo pozicijos nustatymo ir manevravimo sistemas. Šių sistemų defektai gali tiesiogiai paveikti palydovo skrydžio orbitos trajektoriją, todėl jas reikia itin atidžiai stebėti eksperimentiškai tiriant tokio tipo palydovus.

3. Eksperimentinio tyrimo metu nustatyti pirmieji palydovo „LituanicaSAT-2“ konstrukcijos rezonansiniai dažniai: X ir Y kryptimis - 840 Hz ir 1493 Hz, Z kryptimi – 610 Hz ir 760 Hz. Atlikus sinusinių ir atsitiktinių vibracijų bei statinės apkrovos bandymus nenustatyta jokių palydovo konstrukcinių defektų. Pakartojus rezonansinį bandymą, rezultatai gauti identiški. Eksperimentiškai įrodyta, kad palydovas atitinka „QB50“ projekto keliamus reikalavimus: rezonansinių dažnių pokytis mažesnis nei 5 %, o mažiausias rezonansinis dažnis ne didesnis nei 90 Hz. Po visų vibracinių bandymų nenustatyta jokių konstrukcijos vientisumo pakitimų: nesideformavo korpusas, neatsipalaidavo varžtiniai sujungimai, neatsikabino elektronikos jungtys.

Tęsiant tyrimus šia tema toliau, siūloma nustatyti aiškiai apibrėžtus „išlaikymo / neišlaikymo“ kriterijus sinusinių ir atsitiktinių vibracijų bei statinės apkrovos dinaminiams bandymams, atsižvelgiant į praktikoje atsirandančias apkrovas.

Literatūros sąrašas

1. Brummitt, M.L. 2010. *Development of CubeSat vibration testing capabilities*
2. Chiranjeeve, H. R.; Kalaichelvan, K.; Rajadurai, A. 2014. *Design and vibration analysis of a 2U-CubeSat structure using AA-6061 for AUNSAT-II*
3. Denis, C.; Asma, C.; Bernal, R.; Chaudery, Z.; De Groot, J.; Guo, D.; Kataria, D.; Masutti, R.; Reinhard, J.; Thoemel. 2015. *QB50 System Requirements and Recommendations*
4. Eidukas, D. 2002. *Eksperimento planavimo teorija*. Kaunas: Technologija, 138 p.
5. Gerdžiūnas, P.; Plakys, V. 2005. *Bendrieji akademinių darbų įforminimo reikalavimai*. Vilnius: Technika. 75 p.
6. Kataria, D. O.; Smith, A. 2012. *QB50 Science Units*
7. *Kosmoso naujienų apžvalga*. 2014. Lietuvos kosmoso asociacija. Nr. 12 4-5p.
8. Lingaitis, L. P. 2012. *Bakalauro baigiamojo darbo metodikos nurodymai*. Vilnius: Technika, 44p.
9. Mabrouk, E. 2016. *What are SmallSats and CubeSats?*
10. Ostaševičius, V. 1998. *Mechaninių konstrukcijų dinamika ir modeliavimas*
11. Pečiuliauskienė, P.; Rimeika, A. 2009. *Fizika: išplėstinis kursas*. Vilnius: Logotipas, 242p.
12. Rossmann, P.; Heisig, J.; Schmiel, T. 2014. *QB50 Fipex Science Unit Interface Control Document*
13. Sarafin, T.; Doukas, P.; Demchak, L.; Browning, M. 2014. *Vibration Testing of Small Satellites*
14. Smith, A. 2012. Sensor Selection Working Group. Final Report
15. Vekteris, V.; Kasparaitis, A.; Kaušinis, S.; Kanapėnas, R. 2000. *Matavimų teorija ir praktika*. Vilnius: Biuro leidykla, 384 p.
16. Toorian, A.; Lee, S.; Hutputanasin, A.; Lan, W.; Munakata, R.; Carnahan, J.; Pignatelli, D.; Mehrparvar, A. 2014. *CubeSat Design Specification*
17. *An Introduction An Introduction to Vibration Analysis Vibration Analysis Theory and Theory and Practice Practice* [interaktyvus] [žiūrėta 2015-12-07] Prieiga per internetą: <<http://www.proviso-systems.co.uk/images/stories/pdf/Intro%20to%20VA%20Theory%20&%20Practice.pdf>>

18. *Attitude control system design and on-orbit performance analysis of nano-satellite* [interaktyvus] [žiūrėta 2015-12-07] Prieiga per internetą: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936113002112>>
19. *Bendros žinios apie projektą* [interaktyvus] [žiūrėta 2017-02-11] Prieiga per internetą: <<http://iep.lt/projektas-kosmis/bendros-zinios>>
20. *Comsol Multiphysics* [interaktyvus] [žiūrėta 2017-01-15] Prieiga per internetą: <<https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>>
21. *CubeSat struktūra* [interaktyvus] [žiūrėta 2015-12-07] Prieiga per internetą: <http://www.isispace.nl/brochures/ISIS_CubeSat%20Structures_Brochure_v.7.11.pdf>
22. *CubeSat palydovų dalys* [interaktyvus] [žiūrėta 2015-12-10] Prieiga per internetą: <http://CubeSatshop.com/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=4&category_id=1&option=com_virtuemart&Itemid=66>
23. *Lietuviai ruošiasi unikaliai kosmoso misijai* [interaktyvus] [žiūrėta 2017-02-11] Prieiga per internetą: <<http://naujienos.vu.lt/lietuviai-ruosiasi-unikaliai-kosmoso-misijai/>>
24. *LituanicaSAT-2 Satellite mission* [interaktyvus] [žiūrėta 2017-04-20] Prieiga per internetą: <<http://n-avionics.com/projects/lituanicasat2-satellite-mission/>>
25. *Chemical Propulsion System for Small Satellites* [interaktyvus] [žiūrėta 2017-04-20] Prieiga per internetą: <<http://n-avionics.com/projects/chemical-propulsion-system-for-small-satellites-epss/>>
26. *LituanicaSAT-2* [interaktyvus] [žiūrėta 2017-03-18] Prieiga per internetą: <<http://unisec-europe.eu/missions/lituanicasat-2/>>
27. *LituanicaSAT-2* [interaktyvus] [žiūrėta 2017-05-12] <https://en.wikipedia.org/wiki/Lituanica_SAT-2>
28. *Sinusoidal and Random Vibration Testing Primer* [interaktyvus] [žiūrėta 2015-12-07] Prieiga per internetą: <<http://www.desolutions.com/blog/2013/04/sinusoidal-and-random-vibration-testing-primer/>>
29. *Pradadančiųjų gidas* [interaktyvus] [žiūrėta 2015-12-07] Prieiga per internetą: <http://www.proviso-systems.co.uk/images/stories/pdf/beginners_guide.pdf>
30. *Vibracijos analizės metodai* [interaktyvus] [žiūrėta 2015-12-07] Prieiga per internetą: <<http://www.colorado.edu/engineering/CAS/courses.d/IADYN.d/ASEN5022.Lecture.17.pdf>>
31. *World's largest database of nanosatellites, more than 1600 nanosats and CubeSats* [interaktyvus] [žiūrėta 2017-05-02] Prieiga per internetą: <<http://nanosats.eu/>>

NANO PALYDOVO "LITUANICASAT-2" KONSTRUKCIJOS DINAMINIAI TYRIMAI

Paulius Bočiulis¹, Artūras Kilikevičius²

VGTU, Mechanikos inžinerijos katedra, Vilnius, Lietuva

El. Paštas: ¹paulius.bociulis@stud.vgtu.lt, ²arturas.kilikevicius@vgtu.lt

Anotacija. Straipsnyje trumpai pristatomas tarptautinis projektas „QB50“, kurio tikslas yra ištirti Žemės atmosferą 200-400km aukštyje. Šiam tikslui ruošiamas nano palydovas LituanicaSAT-2. Darbe nagrinėjama konstrukcija ir atlikti eksperimentiniai dinaminiai korpuso tyrimai. Projektuojant palydovą, korpusui buvo atliktos simuliacijos naudojant programinį paketą „Comsol“, kuris atlieka skaičiavimus taikant baigtinių elementų metodą. Rezonansinio testo metu buvo gauti dažniai, kurių aplinkoje palydovo korpusė susidaro rezonansai reiškianiai. Nustatyti pavojingiausi dažniai: 840 Hz; 1493 Hz; 2285 Hz; 2329 Hz; 2802 Hz. Atlikus rekomenduojamus eksperimentus įrodyta, kad palydovo korpusas yra tinkamai paruoštas ir atitinka projekto „QB50“ keliamus reikalavimus.

Reikšminiai žodžiai: CubeSat, LituanicaSAT-2, nano-palydovas, vibracijos tyrimas, palydovo konstrukcija

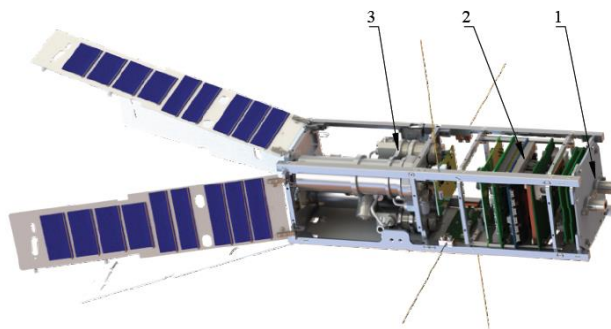
Įvadas

CubeSat yra nano palydovas, kuris atlieka visas standartines palydovo funkcijas (pozicijos nustatymas ir kontroliavimas, duomenų priėmimas ir išsiuntimas, sistemos palaikymas baterija ir ant korpuso sumontuotais saulės kolektoriais, duomenų valdymas ir saugojimas procesoriuje, taip pat vienas pasirinktas technologinis paketas). Vienas CubeSat palydovas yra per mažas, kad sutalpintų įvairius jutiklius, reikalingus atlikti svarbius mokslinius tyrimus. Tačiau, „QB50“ projekto metu, kartu paleidžiama 50 nanopalydovų sujungtų į bendrą tinklą. Tai prideda edukacinę reikšmę, kadangi pradedama rinkti informacija, kuri anksčiau buvo nepasiekiamą. „LituanicaSAT-2“ atitinka CubeSat kriterijus ir yra ruošiamas dalyvauti tarptautiniame projekte „QB50“.

„QB50“ tikslas – atlikti apatinės termosferos dalies tyrimus. Palydovai skraja mažiausiu ištirtame atmosferos sluoksnyje, maždaug 200-400 km aukštyje. Anksčiau tirti šį regioną, palydovai skriedavo labai ištempta elipse (apie 200km perigėjus, 3000km apogėjus), tai reiškia, jog aukštyje, kuriame reikėdavo atlikti matavimus palydovas būdavo tik keletą minučių, kita laiką beprasmiškai skriedamas aplink orbitą. Palyginimui, „QB50“ bus matuojama ne iš vieno taško, o 50, taip pat visą savo tarnavimo periodą skries ten kur ir priklauso.

Darbo tikslas yra išanalizuoti specifinius „LituanicaSAT-2“ korpuso elementus, ištirti jų reakciją į kilimo metu sukeliamas vibracijas, patikrinti korpuso stiprumą esant realioms ekstremalioms sąlygoms.

1 paveiksle pavaizduotos pagrindinės palydovo „LituanicaSAT-2“ sudedamosios dalys.



Pav. 1 Palydovo sudedamosios dalys: 1 – mokslinis modulis, 2 – funkcinis modulis, 3 – eksperimentinis mikrovariklis

Fig. 1 Satellite components: 1 – science unit, 2 – functional unit, 3 – experimental microengine

Mokslinis modulis „FIPEX“ fiksuoja vienatomio deguonies koncentraciją termosferoje. Jis yra privalomas pagal projekto reikalavimus. Duomenys, surinkti iš visų palydovų, bus analizuojami ir padės susidaryti tikslesnį termosferos oro sandaros modelį (Kataria *et al.* 2012; Smith 2012).

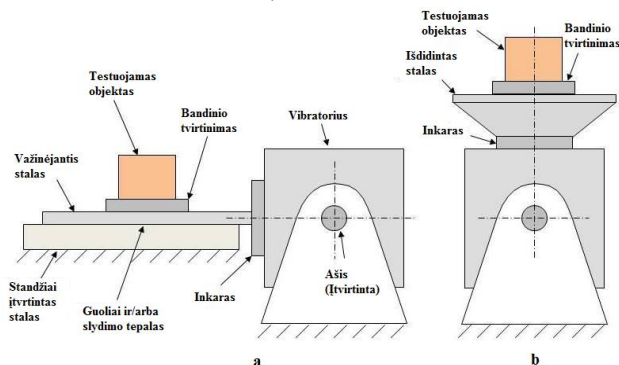
Palydovo funkcinis modulis atlieka pagrindines palydovo funkcijas. Jame sumontuotos ADCS, EPS, OBC posistemės. ADCS padeda sustabdyti palydovo sukimąsi erdvėje po paleidimo ir padeda nustatyti norimą palydovo poziciją skriejamos orbitos atžvilgiu. EPS sistemos paskirtis užtikrinti nepertraukiamą elektros energijos tiekimą bei kaupti energiją, kol palydovas skraido saulės šviesoje. OBC yra pagrindinis palydovo kompiuteris, atliekantis valdymo, energijos paskirstymo ir duomenų apdorojimo funkcijas (Denis *et al.* 2015).

Vienas iš pagrindinių „LituanicaSAT-2“ misijos tikslų yra išbandyti eksperimentinę manevravimo sistemą. Raketinis mikrovariklis, varomas amonio dimitramidu, yra pirmasis pasaulyje variklis, taikomas tokio tipo palydovuose. Tikimasi, kad šis variklis palydovo skriejimo orbitoje trukmę pailgins nuo 3 iki 15–18 mėnesių, palaikydamas palydovą apie 300 km aukštyje. Jei šis eksperimentas pasiteisins, pasibaigus projektui numatoma komercinė plėtra ir tęsiami mikrovariklių tyrimai (*Lietuviai ruošiasi...* 2017).

Dinaminiai tyrimai mažose palydovuose

Dauguma lengvųjų palydovų, kurių masė yra iki 227 kg, testuojami ant elektrinių plaktuvų visomis trimis kryptimis. Tokių vibracijų tyrimo stendo schema pavaizduota 2 paveiksle. Pagrindinis principas, testuojant vibracijas ant plaktuvo, yra patikrinti ar laikomasi tam tikrų konstrukcinių ir mechaninių reikalavimų ir nustatyti ar palydovas patikimas (Sarafin *et al.* 2014):

- Kosminio palydovo struktūra ir techninė įranga turi atlaikyti veikiančias apkrovas ir tinkamai funkcionuoti po paleidimo į orbitą visos misijos metu.
- Palydovo techninė įranga turi atlaikyti apkrovas, veikiant įvairioms išorinėms vibracijoms, raketos nešėjos pakilimo metu.
- Elektros jungtys turi likti sujungtos ir neatsipalaiduoti paleidimo ir skrydžio metu.
- Palydovo korpusas turi išlaikyti vientisumą, pvz., dėl vibracijų ir apkrovų negali atsipalaiduoti varžtai ar kitos modulinės sistemos.



Pav. 2 Vibracinio stendo schema (Sarafin *et al.* 2014)

Fig. 2 Scheme of vibrational stand (Sarafin *et al.* 2014)

Modalinė analizė.

Palydovo korpuso stipruminiams skaičiavimams naudojamas „Comsol“ programinis paketas. Ši programa skirta modeliuoti ir imituoti bet kokią fizikinę sistemą. „Comsol Multiphysics“ paketas leidžia atlikti simuliacijas sujungiant kelis fizikinius modulius vienu metu, pavyzdžiui: elektros, mechanikos, chemijos, šilumos, radiacijos ar skysčio srauto modulius. Atliekant skaičiavimus modeliuojamas kūnas ar sistema suskaidoma į baigtinius elementus ir atliekami

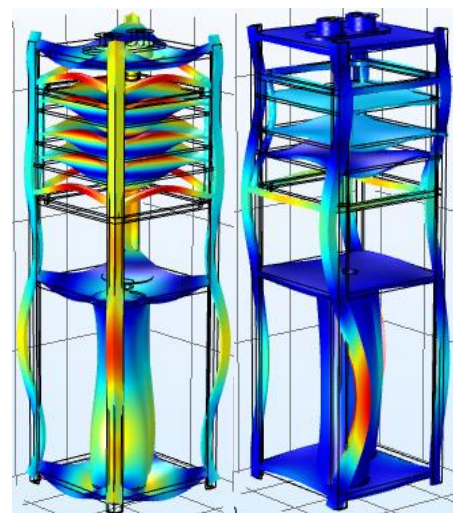
pakankamai tikslūs skaičiavimai, nes įvertinami visi medžiagų parametrai, konstrukciniai elementai ir tikslios detalių geometrijos. Programa patogi naudoti tuo, kad yra vartotojo sąsajos su dauguma inžinerinių ir skaičiuojamųjų programų, pavyzdžiui: „Matlab“, „Excel“, „Solidworks“, „AutoCAD“, „Inventor“ ir t.t.

Nagrinėjamo palydovo modalinės analizės rezultatai parodo pavojingas palydovo korpuso vietas, kurias būtina atidžiau stebėti eksperimento metu. Modalinės analizės tikslas yra nustatyti modų formas. Idealiu atveju randami ir pavojingiausi dažniai, kuriems esant galimai susiformuoja rezonansiniai reiškiniai nagrinėjamoje struktūroje. Vis dėlto šiuo atveju bus nagrinėjamas supaprastintas palydovo korpuso modelis, todėl simuliacijos rezultatai negali būti lyginami su eksperimento būdu gautais rezultatais. 1 lentelėje pateikti naudojamo aliuminio lydinio 7075-T6 medžiagos parametrai.

1 lentelė. Medžiagos 7075-T6 parametrai

Medžiagos pavadinimas	AA 7075-T6
Jungo modulis	72 GPa
Puansono koeficientas	0,32
Tankis	3100 kg/m ³
Šiluminio plėtimosi koeficientas	1,4·10 ⁻⁵ K ⁻¹

Atlikus vibracijos ir savųjų dažnių simuliaciją, gauti šie pavojingiausi dažniai: 1470 Hz; 1516 Hz; 1522 Hz; 1613 Hz; 1650 Hz; 1651 Hz. Reikėtų vengti naudoti palydovą šių dažnių aplinkoje. 3 paveiksle pavaizduotos dvi pavojingiausios modos formos, esant 1613 Hz (kairėje) ir 1522 Hz (dešinėje) dažniams.



Pav. 3 Modos formos esant 1613 Hz (kairėje) ir 1522 Hz (dešinėje) dažniams

Fig. 2 Mode forms in 1613 Hz (left) and 1522 Hz (Right)

Užsienio autoriai (Chiranjeeve et al. 2014) pateikia mažesnio, 2U dydžio (100x100x200 mm) nano-palydovo AUNSAT-II savųjų dažnių simuliacijos rezultatus. Jų ištirtas palydovo korpusas pagamintas iš aliuminio lydinio 6061, svoris 400 g. Šiame palydove pavojingi dažniai pasklidę didesniame diapazone, nuo 718,0 Hz iki 1522,7 Hz.

Eksperimentinė dalis.

Pagrindinis dinaminio palydovo charakteristikų tyrimo tikslas yra nustatyti projektavimo ar gamybos klaidas, korpuso bei kitų funkcinių dalių atitikimą projekto reikalavimams. Šis eksperimentas yra lyg kokybės kontrolė prieš atiduodant palydovą į paleidimo stotį. Palydovai skraidinami į kosmosą ir paleidžiami į erdvę vieną kartą, todėl labai svarbu užtikrinti tinkamą palydovų veikimą visos misijos metu. Šiam tikslui įgyvendinti, projekto „QB50“ organizatoriai išleido sistemos reikalavimų ir rekomendacijų aprašą, kuriuo remiantis atliekamas eksperimentas.

Tyrimo priemonės ir metodika.

Palydovo dinaminėms savybėms įvertinti buvo sukurtas dinaminio savybių tyrimo stendas, kuris leido nustatyti palydovo savybių kitimo dėsningumus priklausomai nuo dinaminio poveikio, atsirandančių dėl išorinių žadinių kitimo. Eksperimentiniai tyrimai atlikti VGTU Vibroakustinių tyrimų ir diagnostikos mokslo laboratorijoje.

Virpesių parametrų matavimui buvo panaudotos Danijos firmos "Brüel & Kjær" virpesių matavimo priemonės. 4 paveiksle parodytas palydovo dinaminio savybių tyrimo stendas: parodyta duomenų kaupimo ir apdorojimo įranga su kompiuteriu, virpesių sukelimui naudojamas vibratorius su stiprintuvu, paveiksle taip pat parodyti palydovo sistema ir akcelerometras 4506. Buvo atliekami stendo virpesių matavimai trimis kryptimis.



Pav. 4 Palydovo dinaminio savybių tyrimo stendas

Fig. 4 Dynamical characteristics testing stand for satellite

Sudaryta bandymų programa:

1. Kvazistatinis apkrovimas su 10,8 g perkrova, 3 bandymai kiekvienai ašiai (XYZ), apkrauti po 1 minutę. Paveiksle 4 pavaizduotas X ašies bandymas.

2. Rezonansinis testas nuo 5 Hz iki 3200 Hz, 0,15 g amplitudė, 3 bandymai kiekvienai ašiai (XYZ). Bandymo tikslas yra apytiksliai nustatyti rezonansinį dažnį. Testą atlikti 2 kartus - prieš pradedant vibrobandytų ciklą ir po bandymų. Rezonansinio dažnio pokytis neturėtų viršyti 5 %.

3. Sinusinių vibracijų testas, 3 bandymai kiekvienai ašiai (XYZ) po 2 profilius:

5-100 Hz, 2.5 g;

100-125 Hz, 1.25 g.

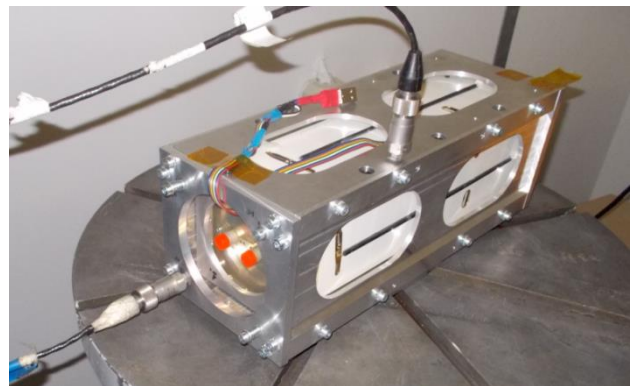
4. Atsitiktinių vibracijų testas, vidutinis pagreitis (RMS) 8,03 g, trukmė 120 s, 3 bandymai kiekvienai ašiai (XYZ) po 4 profilius:

20 Hz, 0,01125 g²/Hz amplitudė;

130 Hz, 0,05625 g²/Hz amplitudė;

800 Hz, 0,05625 g²/Hz amplitudė;

2000 Hz, 0,015 g²/Hz amplitudė.



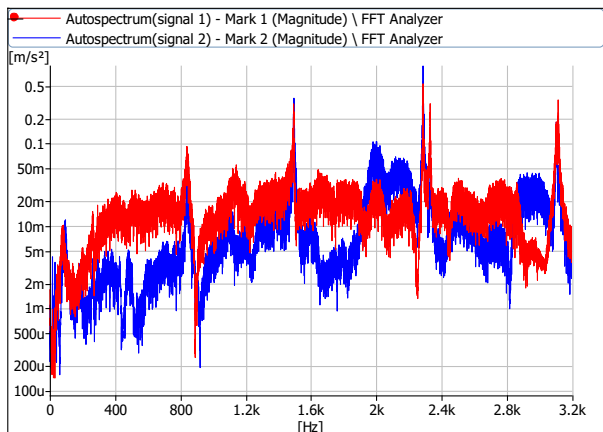
Pav. 5 Palydovas horizontaliai, X ašies bandymas

Fig. 4 Satellite in horizontal position, test for X axis

Rezonansinis testas

Atlikus rezonansinį bandymą, nustatyti pavojingiausi dažniai, kurių veikimo aplinkoje susidaro savieji svyravimai ir rezonansinis reiškiny. 6 paveiksle esančiame grafike matoma, kad rezonansas susidaro esant šiems dažniams: 840 Hz; 1493 Hz; 2285 Hz; 2329 Hz; 2802 Hz. Antrojo rezonansinio bandymo metu nenustatyti jokie konstrukciniai vientisumo pakitimai. Kompiuterinės simuliacijos būdu gauti šie pavojingi dažniai: 1470,6 Hz; 1516,3 Hz; 1522,2 Hz; 1613,3 Hz; 1650,2 Hz. Eksperimento ir simuliacijos rezultatai stipriai skiriasi, patikimais laikomi eksperimento būdu gauti rezultatai,

kadangi simuliacija atlikta su supaprastintu modeliu, o bandymo metu tiriamas visas palydovas su visais priedais.



Pav. 6 Rezonansinis testas

Fig. 6 Resonance test

Iš rezultatų nustatyta, kad jokia kryptimi nei vienas rezonansinis dažnis neviršija nustatytos mažiausios 90 Hz ribos. Nustatyta, kad mažiausias konstrukcijos savasis svyravimas susidarė veikiant išorinei apkrovai Z ašimi (išilgai palydovo), ir siekė 610 Hz dažnį. Rezonansinių dažnių pokytis pirmojo ir antrojo bandymo metu nenustatytas, rezultatai gauti identiški. Tai reiškia, kad palydovo konstrukcija nepakito ir vibraciniai bandymai neturėjo įtakos tolimesniam palydovo veikimui. Vizualios patikros metu po visų virpesių tyrimų nenustatyta jokių konstrukcijos vientisumo pokyčių, neatsipalaidavo varžtai, neatsijungė elektros jungtys, nenustatyta jokių kitokių defektų.

Išvados

1. Modalinės analizės metu, atliekant simuliaciją baigtinių elementų metodu, nustatytos pavojausios korpuso sritys: išilginių bėgelių žemutinė dalis bei funkcinio modulio tvirtinimo konstrukcija. Šių sričių deformacijos gali neigiamai paveikti palydovo pozicijos nustatymo ir manevravimo sistemas. Šių sistemų defektai gali tiesiogiai paveikti palydovo skrydžio orbitos trajektoriją, todėl jas reikia itin atidžiai stebėti eksperimentiškai tiriant tokio tipo palydovus.

2. Eksperimentinio tyrimo metu nustatyti pirmieji palydovo „LituanicaSAT-2“ konstrukcijos rezonansiniai dažniai: X ir Y kryptimis – 840 Hz ir 1493 Hz, Z kryptimi – 610 Hz ir 760 Hz. Atlikus sinusinių ir atsitiktinių vibracijų bei statinės apkrovos bandymus nenustatyta jokių palydovo konstrukcinių defektų. Pakartojus rezonansinį bandymą, rezultatai gauti identiški. Eksperimentiškai įrodyta, kad palydovas atitinka „QB50“ projekto keliamus reikalavimus: rezonansinių dažnių pokytis mažesnis nei 5 %, o mažiausias

rezonansinis dažnis ne didesnis nei 90 Hz. Po visų vibracinių bandymų nenustatyta jokių konstrukcijos vientisumo pakitimų: nesideformavo korpusas, neatsipalaidavo varžtiniai sujungimai, neatsikabino elektronikos jungtys.

Literatūra

Brummitt, M.L. 2010. *Development of CubeSat vibration testing capabilities*

Chiranjeeve, H. R.; Kalaichelvan, K.; Rajadurai, A. 2014. *Design and vibration analysis of a 2U-CubeSat structure using AA-6061 for AUNSAT-II*

Denis, C.; Asma, C.; Bernal, R.; Chaudery, Z.; De Groot, J.; Guo, D.; Kataria, D.; Masutti, R.; Reinhard, J.; Thoemel. 2015. QB50 System Requirements and Recommendations

Eidukas, D. 2002. *Eksperimento planavimo teorija*. Kaunas: Technologija, 138 p.

Gerdžiūnas, P.; Plakys, V. 2005. *Bendrieji akademinių darbų įforminimo reikalavimai*. Vilnius: Technika. 75 p.

Kataria, D. O.; Smith, A. 2012. QB50 Science Units *Kosmoso naujienų apžvalga*. 2014. Lietuvos kosmoso asociacija. Nr. 12 4-5p.

Lingaitis, L. P. 2012. *Bakalauro baigiamojo darbo metodikos nurodymai*. Vilnius: Technika, 44p.

Mabrouk, E. 2016. *What are SmallSats and CubeSats?*

Ostaševičius, V. 1998. *Mechaninių konstrukcijų dinamika ir modeliavimas*

Rossmann, P.; Heisig, J.; Schmiel, T. 2014. QB50 *Fipex Science Unit Interface Control Document*

Sarafin, T.; Doukas, P.; Demchak, L.; Browning, M. 2014. *Vibration Testing of Small Satellites*

Smith, A. 2012. Sensor Selection Working Group. Final Report

Vekteris, V.; Kasparaitis, A.; Kaušinis, S.; Kanapėnas, R. 2000. *Matavimų teorija ir praktika*. Vilnius: Biuro leidykla, 384 p.

Toorian, A.; Lee, S.; Hutputanasin, A.; Lan, W.; Munakata, R.; Carnahan, J.; Pignatelli, D.; Mehrparvar, A. 2014. *CubeSat Design Specification*

Lietuviai ruošiasi unikaliai kosmoso misijai [interaktyvus] [žiūrėta 2017-02-11] Prieiga per internetą: <<http://naujienos.vu.lt/lietuviai-ruosiasi-unikaliam-kosmoso-misijai/>>

DYNAMICAL INVESTIGATIONS OF STRUCTURE NANOSATELLITE „LituanicaSAT-2“

Paulius Bočiulis, Artūras Kilikevičius

Abstract

In this article is briefly presented an international project "QB50". The aim of this project is to investigate the Earth's atmosphere 200-380 km above the ground. For this purpose nano-satellite LituanicaSAT-2 is builded. In this paper design of satellite was examined, also experimental dynamic researches for the housing were maded. The design of the satellite housing simulations were performed using the software package "Comsol", which performs calculations using the finite element method. Frequency test was maded in regard to find resonance frequencies of the satellite housing. Resonance frequencies 840 Hz; 1493 Hz; 2285 Hz; 2329 Hz; 2802 Hz. After all recommended experiments maded, were demonstrated that the satellite body is properly prepared and meets the project "QB50" requirements

Key words: *CubeSat*, LituanicaSAT-2, nanosatellite, vibration test, construction of satellite