

Aspekti oblikovanja i realizacije malog satelita

Makoter, Matija

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:967142>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Matija Makoter

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

Komentor:

Dr. sc. Bruno Dogančić

Student:

Matija Makoter

Zagreb, 2024.

ZADATAK



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
 Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
 Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
 mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Matija Makoter** JMBAG: 0035219584

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Aspekti oblikovanja i realizacije malog satelita**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Aspects of design and realization of a small satellite**

Opis zadatka:

Svemir oduvijek privlači ljudsku pažnju a suvremena tehnička dostignuća, među kojima su mali sateliti, omogućuju sve većem broju ljudi da ga još svestranije istražuju i eksploatiraju. Namjera razvoja vlastitog malog satelita suočena je s mnogim izazovima u oblikovanju i realizaciji.

U radu je potrebno:

1. opisati funkciju i građu malih satelita
2. istražiti stanje na tržištu malih satelita
3. navesti projektne aktivnosti realizacije malog satelita
4. za odabrane elemente oblikovanja i realizacije malog satelita, predložiti njihova moguća unapređenja, primjerice u vezi: konstrukcije i tehnoločnosti, modeliranja, simulacije i ispitivanja.

Zadatak zadan:

9. svibnja 2024.

Datum predaje rada:

11. srpnja 2024.

Predvideni datumi obrane:

15. – 19. srpnja 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr.sc. Zoran Kunica

Komentor:

Dr.sc. Bruno Dogančić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojem mentoru i komentoru na razumijevanju i vodstvu.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji i djevojci koji su uvijek bili tu za mene.

Želim se dodatno zahvaliti svojim kolegama i prijateljima koji su mi pomogli i stajali uz mene.

Ne bih uspio bez svih vas.

U Zagrebu, 9. srpnja 2024.

M. M.

Matija Makoter

SAŽETAK

Razvoj i lansiranje malih satelita poput CroCubea predstavljaju značajan napredak u svemirskoj tehnologiji i istraživanju. Minijaturizacija i tehnološki napredak omogućuju smanjenje troškova i povećanje funkcionalnosti svemirskih misija. Ovaj rad obuhvaća sve ključne faze od dizajna do lansiranja, uključujući analizu komponenti, sustava i vibracijskih ispitivanja.

CroCube je optimiran za ručno sklapanje korištenjem metode DFA, što je rezultiralo smanjenjem broja dijelova s 81 na 61 te povećanjem efikasnosti montaže s 23,47 % na 44,13 %. To je smanjilo troškove nabavke i izradbe te vrijeme montaže s 472,89 na 414,65 sekundi.

Vibracijska ispitivanja i simulacije dokazale su strukturnu stabilnost konstrukcije. Iako su simulacije ograničene točnosti i pouzdanosti, koriste se jer su izrazito korisne prilikom procesa konstruiranja. Unatoč tome, stvarna ispitivanja su nužna kao dokaz da će satelit izdržati ekstremne uvjete tijekom lansiranja i rada u orbiti, omogućujući mu uspješno izvršavanje predviđene misije.

Ovaj sveobuhvatni pristup izradi CroCubea može poslužiti kao model za buduće projekte malih satelita, doprinoseći daljnjem razvoju i inovacijama u svemirskoj industriji. Rad pruža uvide i praktične primjene korisne za istraživače i inženjere u budućim misijama istraživanja svemira.

Ključne riječi: svemir, mali satelit, CubeSat, CroCube, optimizacija, DFA, vibracije

SUMMARY

The development and launch of small satellites like CroCube represent significant advancements in space technology and research. Miniaturization and technological progress enable cost reduction and increased functionality of space missions. This work encompasses all key phases from design to launch, including component analysis, system evaluations, and vibration testing.

CroCube is optimized for manual assembly using the DFA method, resulting in a reduction of parts from 81 to 61 and an increase in assembly efficiency from 23.47% to 44.13%. This has lowered procurement and production costs and reduced assembly time from 472.89 to 414.65 seconds.

Vibration tests and simulations have proven the structural stability of the construction. Although simulations are of limited accuracy and reliability, they are extremely useful during the design process. Nevertheless, actual tests are necessary to ensure that the satellite will withstand the extreme conditions during launch and operation in orbit, allowing it to successfully complete its intended mission.

This comprehensive approach to the development of CroCube can serve as a model for future small satellite projects, contributing to further development and innovation in the space industry. The work provides insights and practical applications useful for researchers and engineers in future space exploration missions.

Keywords: space, small satellite, CubeSat, CroCube, optimization, DFA, vibrations

SADRŽAJ

ZADATAK.....	I
IZJAVA.....	II
SAŽETAK.....	III
SUMMARY	IV
POPIS KRATICA, OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA	VIII
POPIS SLIKA	XI
POPIS TABLICA.....	XIII
1. UVOD.....	1
2. VRSTE MALIH SATELITA.....	3
2.1. Minisateliti	5
2.2. Mikrosateliti	5
2.3. Nanosateliti	5
2.4. Pikosateliti.....	7
2.5. Femtosateliti	8
3. PRIMJENE MALIH SATELITA	9
4. PREDNOSTI MALIH SATELITA.....	11
5. IZAZOVI ZA INDUSTRIJU MALIH SATELITA.....	13
6. GRAĐA MALIH SATELITA	14
6.1. Kućište i njegovi materijali	15
6.2. Sustav napajanja	16
6.3. Računalo	16
6.4. Sustav komunikacije	16
6.5. Sustav određivanja i kontrole položaja (ADCS)	17

6.6. Sustav potiska.....	17
7. PROJEKT REALIZACIJE PRVOG HRVATSKOG SATELITA	19
8. OPIS SATELITA CROCUBE.....	22
8.1. Koristan teret.....	23
8.1.1. Kamera	23
8.1.2. Znanstvenoistraživački modul Astrotron 1000	24
8.2. Kućište.....	26
8.3. Računalo	27
8.4. Sustav napajanja.....	29
8.5. Sustav komunikacija.....	31
8.6. Sustav orijentacije i stabilizacije	32
9. FAZE MISIJE CROCUBE.....	33
9.1. T-12 mjeseci: <i>Dizajn satelita</i>	33
9.2. T-10 mjeseci: <i>Prikupljanje dijelova</i>	33
9.3. T-4 mjeseca: <i>Faza integracije</i>	34
9.4. T-2 mjeseca: <i>Faza ispitivanja</i>	34
9.5. T-1 mjesec: <i>Druga integracija</i>	35
9.6. T-3 tjedna: <i>Montaža na raketu</i>	35
9.7. T-0: <i>Lansiranje</i>	35
9.8. T+nekoliko sati: <i>Prvi signal</i>	35
9.9. T+1 tjedan do 1 mjesec: <i>Faza stabilizacije</i>	36
9.10. T+2 mjeseca pa nadalje: <i>Normalizacija i orbitalni let</i>	36

10. RAZMATRANJE EKONOMSKIH I PROIZVODNIH ASPEKATA	37
11. ANALIZA SKLOPIVOSTI CROCUBEA	40
11.1. Analiza izvorne konstrukcije za ručno sklapanje	47
11.2. Preoblikovanje proizvoda i ponovna analiza.....	50
11.3. Zaključak nakon primjene metode DFA	63
12. VIBRACIJE CUBESATA	64
12.1. Prihvat i izbacivanje CubeSata iz rakete	64
12.2. Vibracijsko ispitivanje CroCubea	66
12.2.1. Postavke ispitivanja	69
12.2.2. Rezultati ispitivanja	70
12.3. Simulacija vibracijskog ispitivanja CroCubea.....	72
12.3.1. Postavke simulacije.....	72
12.3.2. Rezultati simulacije i usporedba sa stvarnim rezultatima ispitivanja	74
13. ZAKLJUČAK	78
14. LITERATURA.....	79

POPIS KRATICA, OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje/Opis
3D		tri dimenzije
ADCS		eng. <i>Attitude Determination and Control System</i> – sustav određivanja i kontrole položaja
Akc A		akcelerometar A, glavni kanal za vibro stol
Akc B		akcelerometar B, glavni kanal za vibro stol
Al		aluminij
ASD	g^2/Hz	eng. <i>Acceleration Spectral Density</i> – gustoća spektra ubrzanja
CAD		eng. <i>Computer Aided Design</i> – oblikovanje pomoću računala
CAN		eng. <i>Control Area Network</i> – mreža upravljačkog područja
CNC		eng. <i>Computer Numerical Control</i> – računalno numeričko upravljanje
CM	cent	ukupna cijena sklapanja
COPUOS		eng. <i>Committee on the Peaceful Uses of Outer Space</i> – Odbora za mirnu upotrebu svemira
CSP		eng. <i>Communicating Sequential Processes</i> – slijedni priopćajni postupci
DFA		eng. <i>Design For Assembly</i> – oblikovanje za sklapanje
DFM		eng. <i>Design For Manufacture</i> – oblikovanje za izradbu

EM	efikasnost ručne montaže
eng.	engleski
EPS	eng. <i>Electric Power System</i> – elektroenergetski sustav
GEO	eng. <i>Geostationary Earth Orbit</i> – geostacionarna Zemljina orbita
GNSS	eng. <i>Global Navigation Satellite System</i> – globalni navigacijski satelitski sustav
GPS	eng. <i>Global Positioning System</i> – globalni pozicijski sustav
HEO	eng. <i>Highly Elliptical Orbit</i> – visoko eliptična orbita
I2C	eng. <i>Inter-Integrated Circuit</i> – inter-integrirani krug
ICT	informacijska i komunikacijska tehnologija
IO	eng. <i>In/Out</i> – ulaz/izlaz
IoT	eng. <i>Internet of Things</i> – internet stvari
JPEG	eng. <i>Joint Photography Experts Group</i> – udruženje fotografskih eksperata
K1	kontrolni kanal za vibro stol
K2	kontrolni kanal za vibro stol
KISS	eng. <i>Keep It Simple, Stupid</i> – drži to jednostavnim
LED	eng. <i>Light Emitting Diode</i> – svjetleća dioda
LEO	eng. <i>Low Earth Orbit</i> – niska Zemljina orbita
LLS	eng. <i>Low Level Sine</i> – sinusno pretraživanje na niskoj razini
MEO	eng. <i>Medium Earth Orbit</i> – srednja Zemljina orbita
MPPT	eng. <i>Maximum Power Point Tracking</i> – praćenje maksimalne snage

NASA		eng. <i>National Aeronautics and Space Administration</i> - državna civilna uprava SAD-a za zrakoplovna i svemirska istraživanja i razvoj
NM		teoretski minimalan broj ugradbenih elemenata
OBC		eng. <i>On Board Computer</i> – računalo na brodu
PSD	g^2/Hz	eng. <i>Power Spectral Density</i> – gustoća spektra snage
QSPI		eng. <i>Quad Serial Peripheral Interface</i> – četverostruko serijsko periferno sučelje
RTOS		eng. <i>Real Time Operating System</i> – sustav za rad u stvarnom vremenu
SPI		eng. <i>Serial Peripheral Interface</i> – serijsko periferno sučelje
STEM		eng. <i>Science, Technology, Engineering and Mathematics</i> – znanost, tehnologija, inženjerstvo i matematika
TM	s	ukupno vrijeme sklapanja
U		eng. <i>Unit</i> – jedinica
UART		eng. <i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i> – univerzalni asinkroni serijski priključak
UHF		eng. <i>Ultra High Frequency</i> – ultra visoka frekvencija
USB		eng. <i>Universal Serial Bus</i> – univerzalna serijska sabirnica
USD		eng. <i>United States Dollar</i> – američki dolar
VHF		eng. <i>Very High Frequency</i> – vrlo visoka frekvencija

POPIS SLIKA

Slika 1. Usporedba različitih veličina satelita s čovjekom [3]	1
Slika 2. Vrste satelitskih orbita [6].....	4
Slika 3. 1U Cube satelit [9]	6
Slika 4. Standardne veličine Cube satelita	6
Slika 5. CanSat pored limenke	7
Slika 6. Dijelovi malog satelita [12].....	15
Slika 7. Satelit CroCube	19
Slika 8. Korisni teret.....	20
Slika 9. Sustavi CroCube satelita	22
Slika 10. Kamera uCAM-III [21]	24
Slika 11. Eksplozirani prikaz znanstvenoistraživačkog modula Astrotron 1000.....	25
Slika 12. Kućište satelita CroCube.....	26
Slika 13. Računalo Deep Thought [22]	28
Slika 14. Baterijski modul.....	29
Slika 15. Solarni paneli	30
Slika 16. Antenski modul s dva para antena, VHF i UHF	31
Slika 17. Modul za stabilizaciju i orijentaciju s tri zavojnice	32
Slika 18. Ekspandirani prikaz ugradbenih elemenata CroCubea	41
Slika 19. Ugradbeni elementi CroCubea s dodijeljenim identifikacijskim brojevima.....	42

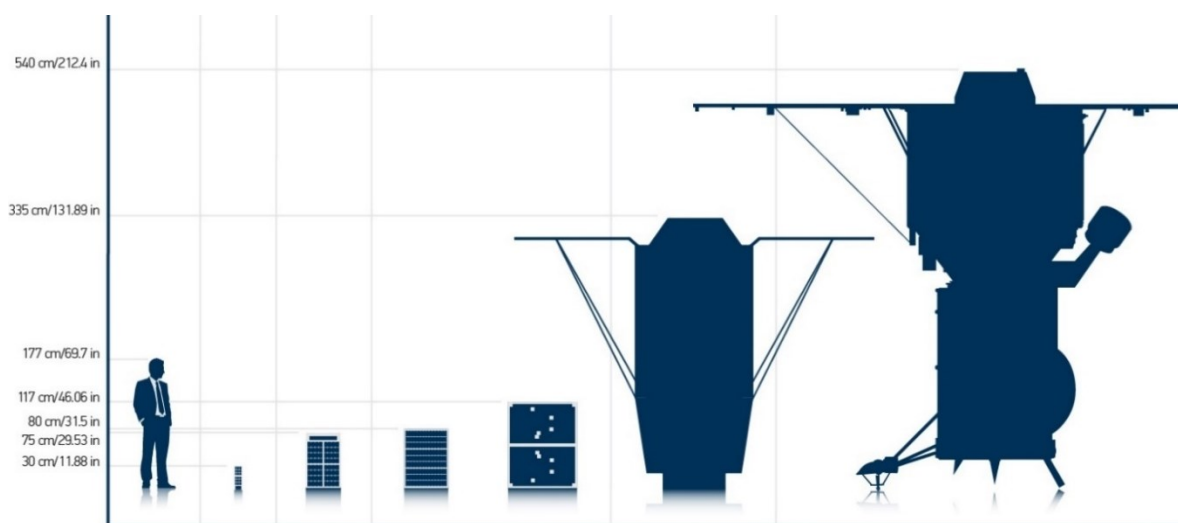
Slika 20. Rebro A i dvije navojne šipke: lijevo izvorno, desno preoblikovano – jedan dio	51
Slika 21. Odstojnik E: lijevo izvorni, desno preoblikovani	51
Slika 22. Duga matica i vijak M2,5×8 mm	52
Slika 23. Vijci M2,5: Gore izvorno – dvije skupine vijaka, dolje preoblikovano – jedna skupina vijaka.....	53
Slika 24. Ekspandirani prikaz ugradbenih elemenata CroCubea nakon preoblikovanja	54
Slika 25. Ugradbeni elementi CroCubea s dodijeljenim identifikacijskim brojevima nakon preoblikovanja	55
Slika 26. CubeSat izbacivač [27]	65
Slika 27. Izbacivači montirani na raketu [28]	66
Slika 28. Dijagram PSD [30].....	68
Slika 29. Pozicioniranje satelita na vibro stolu	69
Slika 30. Pozicioniranje akcelerometara	70
Slika 31. Graf usporedbe LLS prije i poslije, smjer Y	71
Slika 32. Pojednostavnjeni model satelita.....	73
Slika 33. Površine definirane za rubne uvjete – zeleno.....	74
Slika 34. Deformacija u smjeru X osi.....	75
Slika 35. Rezultati simulacije za X os	76
Slika 36. Rezultati vibracijskog ispitivanja za X os	76

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrste malih satelita prema masi i veličini [5]	4
Tablica 2. Strukturna sastavnica CroCubea	42
Tablica 3. Modularna sastavnica Sklopa A	44
Tablica 4. Modularna sastavnica CroCubea	45
Tablica 5. Količinska sastavnica CroCubea	46
Tablica 6. Analiza ručnog sklapanja izvorne konstrukcije CroCubea	47
Tablica 7. Strukturna sastavnica CroCubea nakon preoblikovanja.....	56
Tablica 8. Modularna sastavnica Sklopa A+	57
Tablica 9. Modularna sastavnica CroCubea nakon preoblikovanja	58
Tablica 10. Količinska sastavnica CroCubea nakon preoblikovanja	59
Tablica 11. Analiza ručnog sklapanja CroCubea nakon preoblikovanja	60
Tablica 12. Specifikacije za traženje prirodnih frekvencija	67
Tablica 13. Podaci za dijagram PSD	68
Tablica 14. Usporedba vršnih vrijednosti frekvencije i amplitude	71
Tablica 15. Usporedba rezultata vibracijskog testa i simulacije	77

1. UVOD

S početkom još davne 1957., lansiranjem prvog umjetno stvorenog – napravljenog ljudskom rukom, satelita Sputnika 1, čovječanstvo je započelo eru svemirskih istraživanja izvan Zemlje. [1] Prve svemirske sonde i sateliti bili su velikog volumena i mase, a male funkcionalnosti, što je drastično utjecalo na njihovu cijenu i upotrebljivost. Kako su znanost i industrija napredovale, otkrili su se novi materijali i razvili novi proizvodni postupci te se sve pokušava i uspijeva minijaturizirati, pa tako i sateliti (Slika 1.).



Slika 1. Usporedba različitih veličina satelita s čovjekom [3]

Mali sateliti otvorili su nove mogućnosti za svemirsku industriju. Ove fleksibilne svemirske letjelice mnogo su manje i lakše od tradicionalnih, imajući veličinu u rasponu od kućanskog uređaja kao što je hladnjak, pa do kutija za cipele. Time se cijena lansiranja po kilogramu korisnog tereta drastično smanjila što je dovelo do velikog rasta svemirske industrije. Mali sateliti iskorištavaju prednosti poput nižih troškova razvoja i lansiranja, brze implementacije u

projekte i rada u velikim konstelacijama. [2] Konstelacija je grupa satelita koji međusobno komuniciraju, izmjenjuju podatke i obavljaju zajedničku funkciju.

Brojne misije, uključujući navigaciju, istraživanje svemira te daljinsko upravljanje i očitavanje, oslanjaju se upravo na ove kompaktne uređaje. Smanjenje veličine ovih svemirskih letjelica donijela je brojne privlačne znanstvenoistraživačke i poslovne mogućnosti. Prosječna tržišna cijena lansiranja CubeSata razlikuje se ovisno o težini samog satelita; veća težina znači više goriva, pa stoga lansiranje satelita u nisku Zemljinu orbitu košta oko 30 000 USD po kilogramu. Svemirski tržišni sektor već može ubirati plodove ovog jeftinog pristupa. To govori i podatak da je svemirska industrija danas najbrži rastući sektor u svijetu, i od značaja za državne i nacionalne interese i rangiranje zemalja svijeta. Još jedan zanimljiv podatak je da su u 2023. godini u svemir lansirana 2664 objekta. Vidi se eksponencijalni rast lansiranih objekata u svemir, a navedene brojke svake godine obaraju rekord postavljen prethodnih godine.

Tako i Republika Hrvatska treba biti uključena u svemirsku utrku, lansirajući svoj satelit. Ideja o razvoju i lansiranju prvog hrvatskog satelita imena CroCube začela se 2021. godine i predstavlja aktualan projekt. To nije prvi pokušaj lansiranja satelita u hrvatskoj, pokušaji su bili od strane drugih institucija, ali su zbog manjka financiranja nisu izvedeni.

U ovome radu će se uz ostalo, opisati projekt CroCube i njegovi ciljevi, te dati uvid u svijet malih satelita (kakav je i prvi hrvatski satelit), njihove funkcije i građu, stanje na tržištu i ekonomske aspekte sličnih pothvata.

2. VRSTE MALIH SATELITA

Svemirske letjelice, među koje spadaju i mali sateliti, jesu vozila ili uređaji koji su namijenjeni da rade van Zemljine orbite. [4] Termin "mali" obično se koristi za opisivanje i ukazuje na njihovu masu i veličinu. Ne postoji univerzalno prihvaćena definicija, ali ukratko, svaki satelit s masom manjom od 500 kg smatra se malim satelitom.

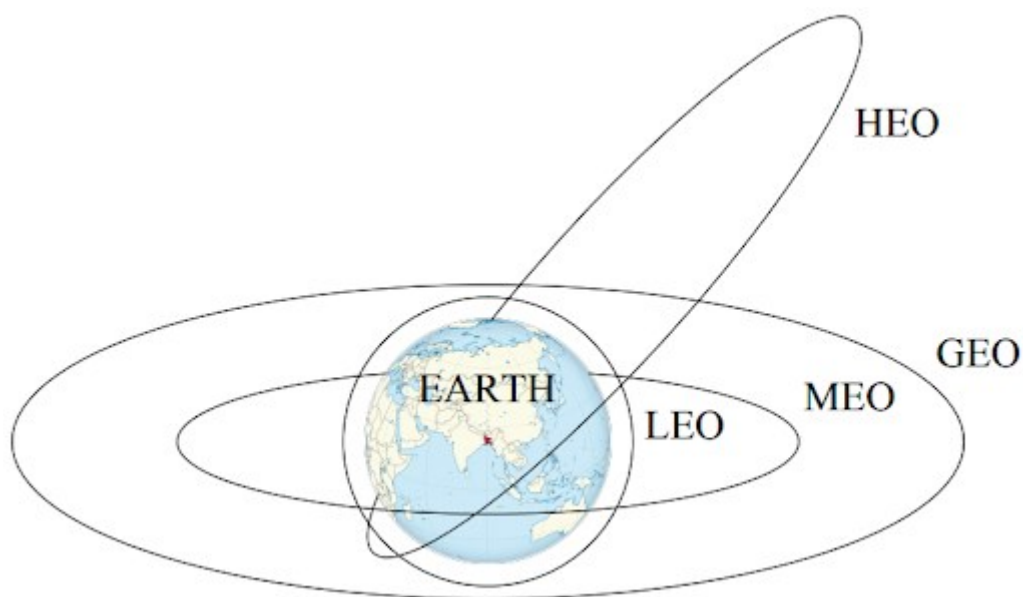
Sateliti malih masa i dimenzija nisu novost. Prvi takvi sateliti počeli su se proizvoditi 1970-ih godina, ali moderni sateliti drastično se razlikuju od svojih prethodnika. Najznačajnija je razlika u upotrebi široko dostupne mikroelektronike u kombinaciji s inovativnim pristupima upravljanja. To omogućuje stvaranje svemirskih letjelica, koja rade samostalno ili u tako zvanim konstelacijama. Tako mogu obavljati složene funkcije s velikom preciznošću i efikasnošću, dok istovremeno koriste mnogo manje prostora, novca i vremena nego prethodne generacije. [5]

Tablica 1. daje sistematizaciju malih satelita prema masi i veličini te orbitama u kojima lete.

Sateliti se mogu naći u četiri tipa orbita (Slika 2.). Visoko eliptična orbita ili orbita HEO (eng. *Highly Elliptical Orbit*), je jedina eliptična satelitska orbita koja se očituje takvom putanjom da joj je perigej vrlo blizu Zemlje dok joj je apogej vrlo daleko. Orbite LEO, MEO i GEO su kružne orbite. Orbita LEO (eng. *Low Earth Orbit*), niska Zemljina orbita je na visini od 500 do 2000 km, MEO (eng. *Medium Earth Orbit*), srednja Zemljina orbita je od 2000 do 32 000 km, a GEO (eng. *Geostationary Earth Orbit*), geostacionarna Zemljina orbita viša od 32 000 km. GEO je specifična po tome što na tim visinama sateliti rotiraju jednakom brzinom kao i Zemlja te su stalno iznad jedne točke na Zemlji, druge dvije orbite su specifične po tome što sateliti u njima kruže oko Zemlje brzinom većom od Zemlje te su u svakom trenutku iznad drugog područja. [5]

Tablica 1. Vrste malih satelita prema masi i veličini [5]

Vrsta	Masa, kg	Maksimalna dimenzija, m	Orbita
Minisatelit	100 do 500	3 do 10	GEO, MEO, LEO, HEO
Mikrosatelit	10 do 100	1 do 5	LEO, HEO
Nanosatelit	1 do 10	0,1 do 1	LEO, HEO
Pikosatelit	0,1 do 1	0,05 do 0,1	LEO, HEO
Femtosatelit	< 0,1	0,01 do 0,05	LEO, HEO



Slika 2. Vrste satelitskih orbita [6]

2.1. Minisateliti

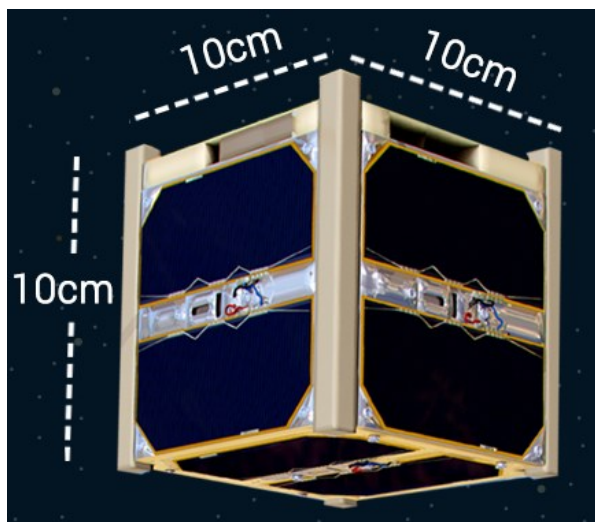
Minisateliti (eng. *minisats*) obično teže između 100 i 500 kg. Lako se proizvode za sustave bazirane na konstelacijama. Ova vrsta malih satelita savršena je za misije kojima je prioritet isplativost. Uobičajene upotrebe za minisatelite uključuju konstelacije komercijalnog daljinskog očitavanja, usluge slanja poruka, konstelacije telekomunikacija i interneta te meteorologiju u niskoj Zemljinoj orbiti (LEO). Jedan od najpoznatijih primjera ovakve konstelacije je Starlink tvrtke SpaceX koji pruža uslugu brzog interneta bilo gdje na svijetu. [5]

2.2. Mikrosateliti

Tipični mikrosatelit (eng. *microsats*) teži manje od 100 i više od 10 kg, uključujući masu pogonskog goriva. Iako podržavaju stvarne poslovne svrhe, mogu imati ograničene sposobnosti u pogledu usmjeravanja i vijeka trajanja. Znanstvena istraživanja i prijenos poruka dva su primjera aplikacija sustava koji koriste njihove visoke stope revizije i dostupnost korisnika. [5]

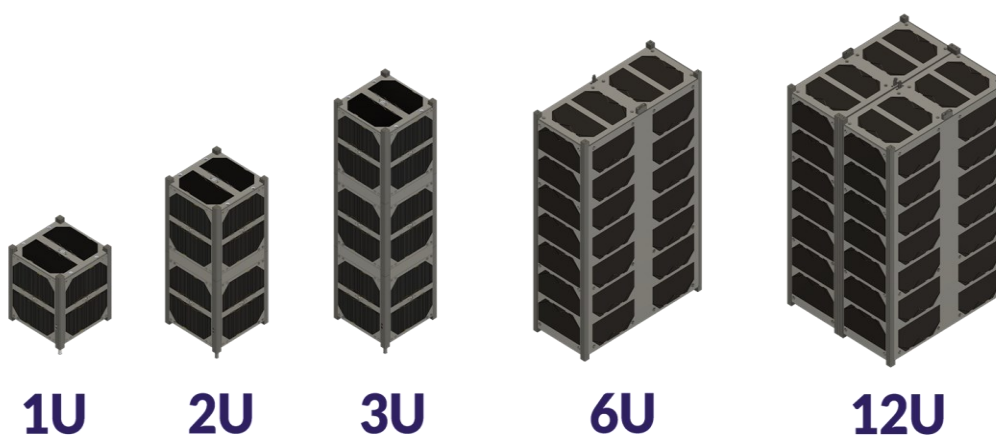
2.3. Nanosateliti

Tipični prag mase za mali satelit a da se smatra nanosatelitom (eng. *nanosats*) je od 1 do 10 kg. Iako se dimenzije mogu razlikovati najpopularnija i svjetski prihvaćena platforma za razvoj nanosatelita danas su tzv. kocka sateliti, CubeSat. Oni su klasa nanosatelita koji koriste standardnu veličinu i oblik. Standardna veličina koristi "jednu jedinicu" ili "1U", koja mjeri 10×10×10 cm (Slika 3.) i maksimalno smije težiti najviše 1,4 kg. [8]



Slika 3. 1U Cube satelit [9]

Spajanjem više 1U jedinica, satelit se lako nadogradi na veće veličine, od kojih su standardne 1U, 2U, 3U, 6U, pa čak i 12U (Slika 4.).



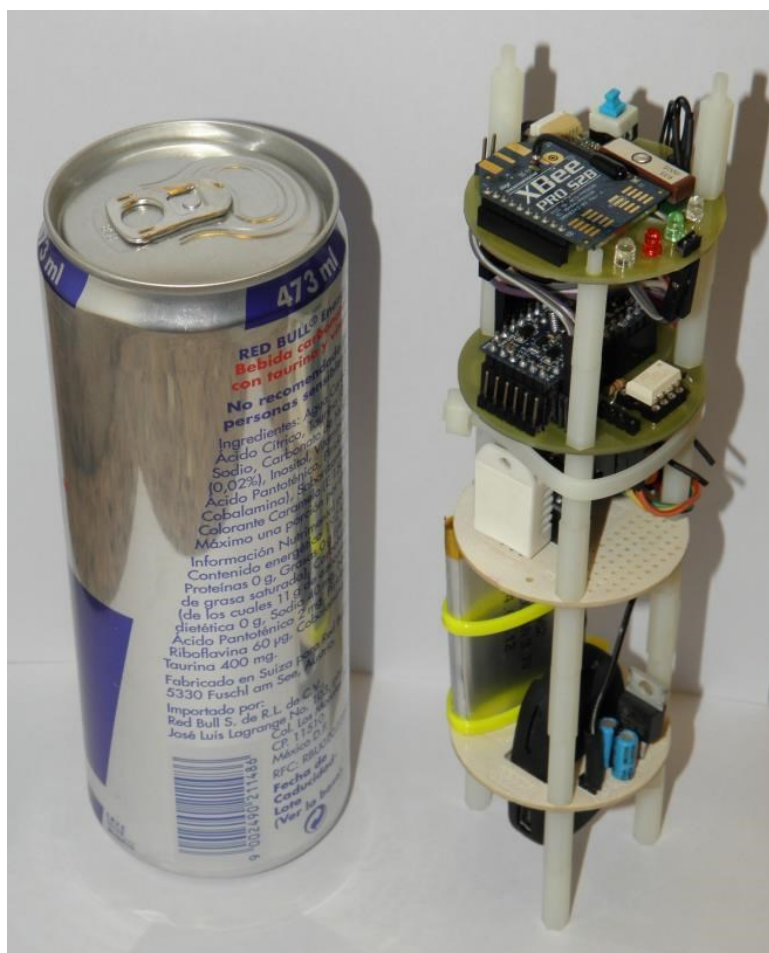
Slika 4. Standardne veličine Cube satelita

Cube sateliti su upravo zbog velike modularnosti danas najkorištenija vrsta satelita. Prvi CubeSat razvijen je 1999. godine od strane Državnog sveučilišta California Polytechnic i Sveučilišta Stanford s ciljem pružanja što jeftinije platformu za obrazovanje i istraživanje svemira. Razvoj im je napredovao u izgradnju vlastite vrste satelita u kojoj industrija i akademija konstantno surađuju kako bi postigli što veće mogućnosti. Izgradnja nanosatelita prema specifikacijama CubeSat otvara mnoge opcije za jeftino lansiranje i jamči kontinuiran i isplativ pristup svemiru. Kocka-sateliti pružaju najekonomičniju i samim time i najkorišteniju

platformu za znanstvena istraživanja, demonstracije novih tehnologija i napredne koncepte misija koristeći konstelacije, rojeve i razdvojene sustave. [10]

2.4. Pikosateliti

Pikosateliti (eng. *picosats*) teže od 0,1 do 1 kg. Imaju vrlo ograničene kapacitete sami po sebi, ali mogu ponuditi izvanredne značajke u formaciji s više kooperativnih pikosatelita, možda u suradnji s većom matičnom svemirskom letjelicom. Najpoznatiji sateliti ove kategorije su limenka sateliti (eng. *cansats*), tako nazvani jer je ideja da cijeli stanu u dimenzije jedne limenke (Slika 5.). Jedna uobičajena upotreba za ove male satelite je razmjena podataka preko internetskih mreža s drugim uređajima. [5]



Slika 5. CanSat pored limenke

2.5. Femtosateliti

Izum posljednjeg desetljeća, femtosatelit (eng. *femtosat*), koristi najsuvremeniju nanotehnologiju za stvaranje izuzetno minijaturnog satelita koji teži manje od 100 grama. Mnogi od ovih satelita prate veće matične satelite kao operativni signalni partneri. Primarne funkcije femtosatelita uključuju snimanje slika, testiranje inovativnih tehnologija, biološke eksperimente i slijetanje na asteroide. [5]

3. PRIMJENE MALIH SATELITA

Kompaktne svemirske letjelica bolje odgovaraju određenim upotrebama pogotovo u vidu cijene, za razliku od drugih većih uređaja. Moguće je smanjiti veličinu određenih komponenata, poput digitalnih procesora i senzora, dok postoje ograničenja u pogledu drugih komponenata. Kao primjer, ograničenja veličine antenskog sklopa ograničava mogućnosti malih satelita u području telekomunikacija. Nasuprot tome, zbog lakoće smanjenja senzora, konstelacije malih satelita u niskoj orbiti obično su praktične za različite vrste daljinskog očitavanja. [10] Mali sateliti uglavnom se koriste u sljedećim područjima:

- Navigacija

Najveći navigacijski sustavi danas su Američki navigacijski sustav GPS, europski GALILEO i ruski GLONASS. Izrađeni su od konstelacija velikih satelita u srednjoj zemljinoj orbiti na visini od otprilike 2000 km. Navigacijske sposobnosti malih satelita u niskoj Zemljinoj orbiti opremljenih prijemnicima globalnog navigacijskog sustava (GNSS) pokazale su se točnima do unutar 10 metara.

- Promatranje Zemlje

Kod snimanja slika i videozapisa visoke prostorne razlučivosti i slanjem istih na Zemlju, mali sateliti pokazali su se kao najekonomičniji. Iz niske Zemljine orbite lako se nose sa zahtjevnim praćenjem okoliša i imovine.

- Komunikacijski sateliti

Izvrstan su izbor za pružanje mobilnih usluga i povezivanje Interneta stvari (IoT), a isto tako koriste se za prijenos televizijskih signala.

- Demonstracija tehnologije

Kako bi brzo i ekonomično testirali isplativost nove tehnologije u orbiti, istraživači koriste masom i dimenzijama najmanje satelite koje mogu zadovoljiti zahtjevima misije. To može biti od ispitivanja samo jednog elektronskog čipa pa do cijelog novog sustava.

- **Znanstvena istraživanja**

Astronomija, astrofizika, astrobiologija i praćenje vremena samo su neka od mnogih područja znanosti olakšana malim satelitima.

- **Izvidnički sateliti**

Iako mali sateliti za izviđanje na drugim planetima i zvijezdama još nisu u primjeni, njegovo korištenje se planira u bliskoj budućnosti.

4. PREDNOSTI MALIH SATELITA

Većina prednosti malih satelita proizlazi iz njihove minijaturne prirode i uključuju sljedeće:

- **Pristupačnost**

Male svemirske letjelice imaju niže troškove izgradnje, lansiranja i operacija. I za razliku od prijašnjih vremena kada su svemirska istraživanja bila isključivo za državne organizacije danas su preko malih satelita dostupna tvrtkama i organizacijama svih veličina.

- **Kraći ciklus razvoja**

Relativno kratko vrijeme razvoja i lansiranja za male satelite omogućuje brže implementiranje u svemirske misije.

- **Različite upotrebe**

Zbog svoje veličine i modularnosti imaju mnoge potencijalne upotrebe i prilagodljive su različitim misijama.

- **Konstelacije**

Pristupačnost i kompaktna veličina omogućavaju lansiranje konstelacija malih satelita za poboljšanu pokrivenost površine Zemlje i samim time širi raspon primjena.

- **Smanjeni rizici**

Za razliku od većih, skupljih satelita koji su izloženi velikom riziku ako dođe do neke greške, mali sateliti mogu lako uključivati nove tehnologije koje još nisu testirane u svemiru zbog smanjenog ukupnog financijskog rizika.

- Jedna svrha.

Za razliku od velikih višefunkcionalnih svemirskih letjelica, mali sateliti mogu biti izgrađeni za jednu određenu svrhu te su time jednostavniji za upravljanje i uključivanje u misiju. [5]

5. IZAZOVI ZA INDUSTRIJU MALIH SATELITA

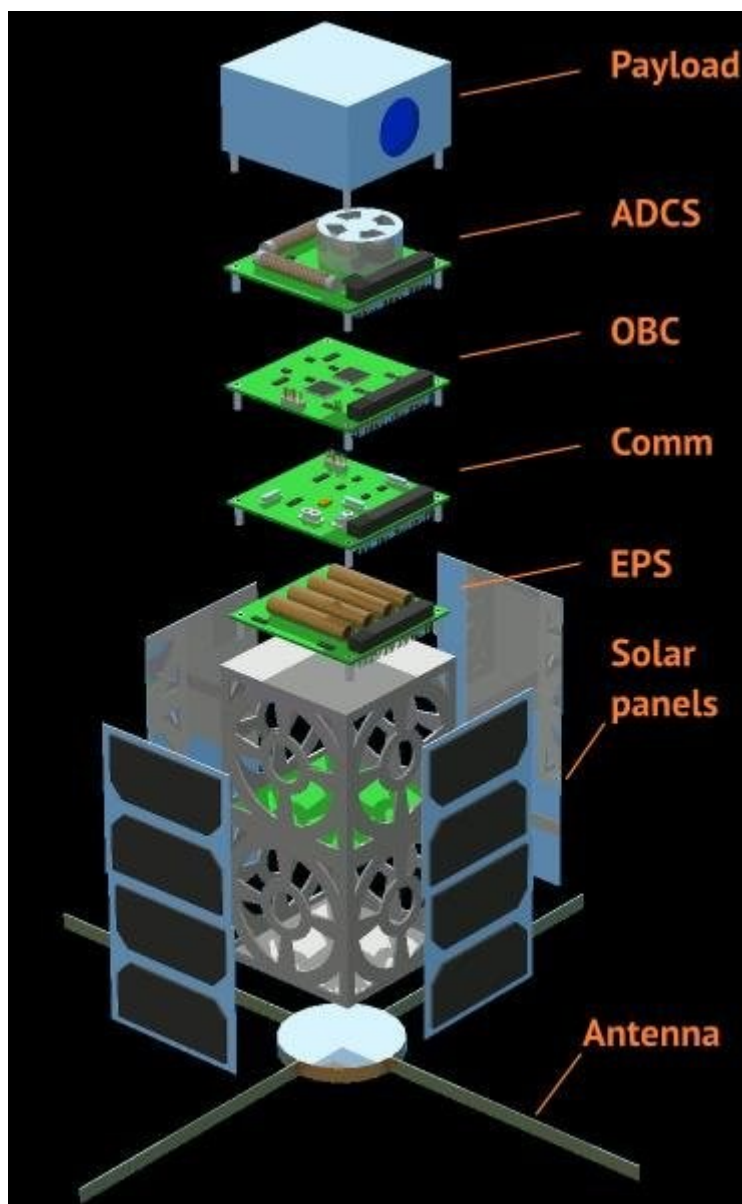
Mali sateliti imaju ograničene proračune snage, kapacitete korisnog tereta i životni vijek zbog svoje minijaturne veličine. No inženjeri i konstruktori malih satelita smišljaju nove načine za povećanje performansi bez povećanja veličine. Osim toga, zbog ograničenja snage, postoji potreba za razvojem novih tehnologija poput inovativnih solarnih panela, efikasnije pohrane energije i pretvarača visoke učinkovitosti.

Kada je u pitanju usklađivanje frekvencija, izbjegavanje sudara i pridržavanje međunarodnih zakona, tvrtke za usluge malih satelita i operateri konstelacija mogu se suočiti s regulatornim preprekama. Svemirske tvrtke i organizacije, poput Opće skupštine Ujedinjenih naroda i njenog Odbora za mirnu upotrebu svemira (COPUOS), slažu se da je važno riješiti ove probleme i iskoristiti prilike koje pružaju mali sateliti. Pobojšani propisi i napredak tehnologije, usmjereni na rješavanje tih problema, otvorit će put za kontinuirani uspjeh minijaturnih svemirskih letjelica u njihovim misijama promatranja Zemlje, istraživanja svemira i mnogih drugih. [5]

6. GRAĐA MALIH SATELITA

Osnovni i neophodni (pod)sustavi svakog satelita su kućište (tzv. struktura), sustav napajanja, računalo, sustav komunikacije i sustav orijentacije (Slika 6.). Svi ti podsustavi su potrebni kako bi s njima mogli poslati, glavni razlog slanja samog satelita u svemir, eksperiment ili glavni teret. Tereti mogu biti razni, od jednostavnih sustava s kamerom za snimanje Zemlje, preko ispitivanja novih komponenata do naprednih znanstvenih eksperimenata.

Osim navedenih osnovnih podsustava, neki od dodatnih podsustava koji mogu biti prisutni na satelitu uključuju termalni kontrolni sustav za održavanje optimalne temperature, sustav za kontrolu položaja antena radi preciznijeg usmjeravanja komunikacijskih signala, sustav za kontrolu potiska radi promjene orbite ili korekcije putanje, sustav za upravljanje znanstvenim instrumentima ili eksperimentalnim uređajima, kao i senzore za nadzor okoline i detekciju potencijalnih opasnosti poput sudara s drugim objektima u orbiti. Sve te dodatne komponente pridonose funkcionalnosti i učinkovitosti satelita u izvršavanju svojih zadaća u svemiru. [11]



Slika 6. Dijelovi malog satelita [12]

6.1. Kućište i njegovi materijali

CubeSati za kućište obično koriste legure aluminija ili kompozitne materijale. To su materijali niske gustoće kako bi se smanjila ukupna masa, a zadržala svojstva koja moraju podnijeti teške uvjete u svemiru i sile koje se doživljavaju tijekom lansiranja. Struktura je dizajnirana kako bi zaštitila unutarnje komponente satelita, a njezin standardizirani oblik olakšava integraciju s nosačem za lansiranje (izbacivač). Uz to, razvijaju se i istražuju novi materijali kako bi se poboljšala čvrstoća i otpornost CubeSata na ekstremne uvjete u svemiru. [11 i 13]

6.2. Sustav napajanja

Većina satelita pa tako i CubeSata je solarno napajana, koristeći male solarne panele postavljene na vanjskim površinama za generiranje električne energije. Energija se generira kada je satelit izložen direktnoj sunčevoj svjetlosti. Ova energija pohranjuje se u baterije na letjelici za korištenje kada je satelit u sjeni Zemlje. Veličina i orijentacija solarnih panela pažljivo su modelirane kako bi se maksimizirala proizvodnja energije unutar ograničenja oblika CubeSata. Međutim, kad se sateliti udalje od Sunca, solarni paneli više nisu opcija i napajanje postaje veći problem. Tada je jedina opcija nuklearna energija tj. u satelit se ugrađuje mali nuklearni generator. Također se istražuju druge tehnologije generiranja energije i unapređuju se trenutne tehnologije za pohranu energije kako bi se povećala njihova učinkovitost i trajnost. [13 i 14]

6.3. Računalo

Računalo je mozak CubeSata, kontrolira njegov rad na autonomnoj razini, obrađuje podatke i izvršava naredbe poslano s tla. Treba biti robusno, pouzdano i sposobno preživjeti radijacijsko okruženje u svemiru. Pored toga, istražuju se tehnologije za razvoj računalnih sustava s većom procesorskom snagom, manjom potrošnjom energije i povećanom otpornošću na kvarove. [11 i 13]

6.4. Sustav komunikacije

CubeSati obično koriste male radio primopredajnike za komunikaciju s tlom koji mogu, kao što im i samo ime kaže, primiti i slati podatke i naredbe. Antene moraju biti pažljivo konstruirane kako bi se uklopile unutar strukture CubeSata, a istovremeno pružile potrebnu širinu pojasa komunikacije. [14] Postoje razni oblici i snage primopredajnika i antena, a dijele se prema mogućoj brzini prijenosa podataka i frekvencijama na kojima rade. Tako postoje od najslabijih radijskih sustava VHF-a (eng. *Very High Frequency*, između 30 i 300 MHz) ili malo jačih UHF-a (eng. *Ultra High Frequency*, između 300 i 2000 MHz), preko mikrovalnih komunikacija kao što je S-BAND (2 do 4 GHz) do najjačih sustava koji se danas koriste na malim satelitima, X-BAND (8 do 12 GHz). [15] Napredak u ovoj domeni uključuje razvoj

efikasnijih komunikacijskih sustava koji omogućavaju brži prijenos podataka između CubeSata i kontrolnih stanica na Zemlji. [13]

6.5. Sustav određivanja i kontrole položaja (ADCS)

Ovaj sustav koristi se za poznavanje orijentacije, stabilizaciju i samu orijentaciju satelita u svemiru, a može uključivati, permanentne magnete, male reakcijske kotače, elektromagnetske zavojnice, žiroskope, sunčeve i zvjezdane senzore i GPS. Precizna kontrola položaja i specifična orijentacija bitna je za mnoge ciljeve, poput usmjeravanja kamere prema Zemlji ili poravnavanja solarnih panela prema Suncu. [13]

U polju nulte gravitacije korištenjem male količine energije može se rotirati velike objekte. Postoje dva sustava koje koriste Cube sateliti za svoju rotaciju. Reagiranjem na Zemljino magnetsko polje, za stabilizaciju se koriste permanentni magneti i elektromagnetske zavojnice, koje reagiraju s magnetskim poljem i na taj se način stabiliziraju. [16] Drugi način stabilizacije je korištenjem reakcijskih kotača ili žiroskopa koji prilagođavaju orijentaciju putem prijenosa momenta s rotirajućih masa unutar satelita na sam satelit. [17]

Kako bi se postigla željena orijentacija gore navedenim sustavima, potrebno poznavanje trenutne orijentacije u realnom vremenu. Za to se koriste senzori kao što su sunčev senzor koji prati poziciju Sunca ili zvjezdani senzor koji prati poziciju specifičnih konstelacija zvijezda i ovisno o njima računa zakret u odnosu na os Zemlje. Isto tako magnetske zavojnice se mogu ujedno koristiti i kao senzori za poznavanje trenutnog položaja. Uz to se koristi i GPS koji daje podatke o nadmorskoj visini i poziciji. [18]

Daljnji razvoj tehnologija ADCS-a usmjeren je na povećanje stabilnosti i preciznosti orijentacije CubeSata u prostoru.

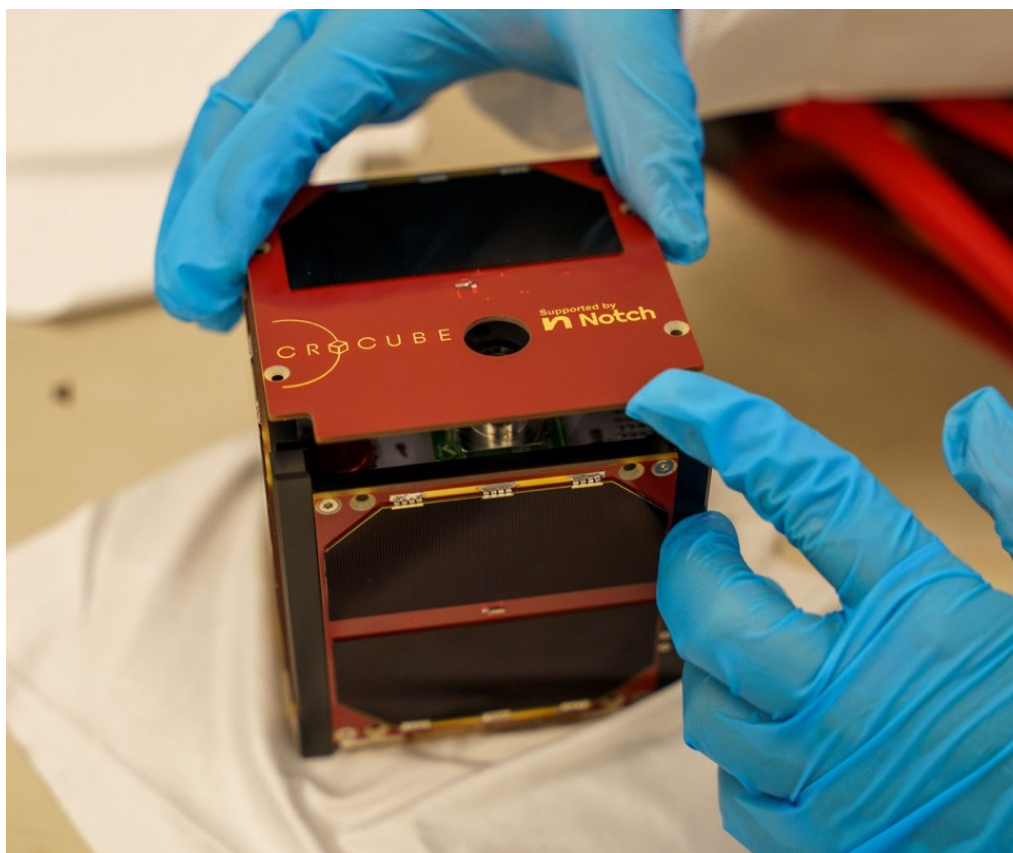
6.6. Sustav potiska

Iako mnogi CubeSati nemaju pogonski sustav, neki uključuju minijaturne sustave potiska za manevre i kontrolu položaja. To mogu biti električni sustavi potiska, hladni plinski potisnici ili inovativnije tehnologije poput solarnih jedara. Ovi sustavi pružaju mogućnost poboljšane

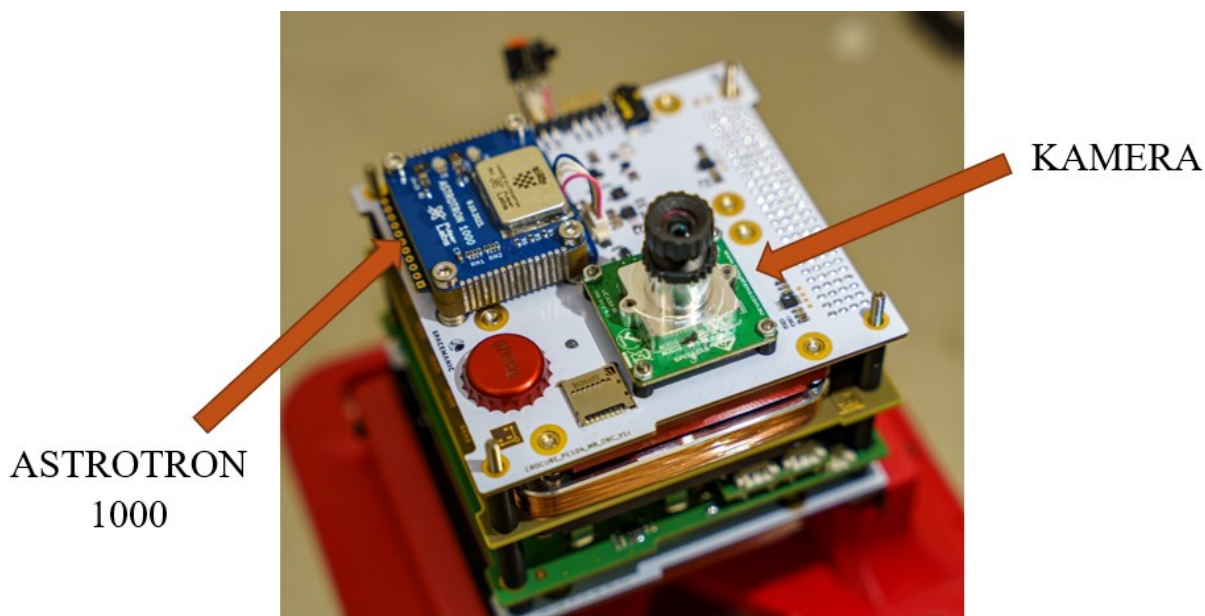
pokretljivosti i preciznosti u izvršavanju misije, a osim toga bitna stavka daljih satelitskih misija koja se i po međunarodnom pravu mora poštivati je postojanje sustava deorbitiranja, tj. sustava kojemu je cilj srušiti satelit na Zemlju kako se ne bi stvarao svemirski otpad. [19]

7. PROJEKT REALIZACIJE PRVOG HRVATSKOG SATELITA

Misija projekta CroCube je izrada, testiranje i lansiranje prvog hrvatskog nanosatelita. Projekt je započeo početkom 2022. godine. Satelit čije se lansiranje želi ostvariti je veličine 1U i ukupne mase oko 1,1 kg (Slika 7.). Opremljen je kamerom i znanstvenoistraživačkim modulom imena Astrotron 1000 kao korisnom teretom (Slika 8.). Na njemu radi 30-ak stručnjaka i volontera iz raznih područja, a planirano trajanje projekta do samog lansiranja je dvije godine. [20]



Slika 7. Satelit CroCube



Slika 8. Korisni teret

Osnovni cilj ovog projekta je obrazovanje mladih stručnjaka na području astronautike i satelitske tehnologije. Uz to uspješna provedba znanstveno tehnološke misije lansiranja satelita od dizajna, preko izrade i montaže, do ispitivanja, lansiranja i komunikacije sa satelitom u orbiti te prikupljanja podataka iz svemira. [20] Dodatni ciljevi ovog projekta jesu:

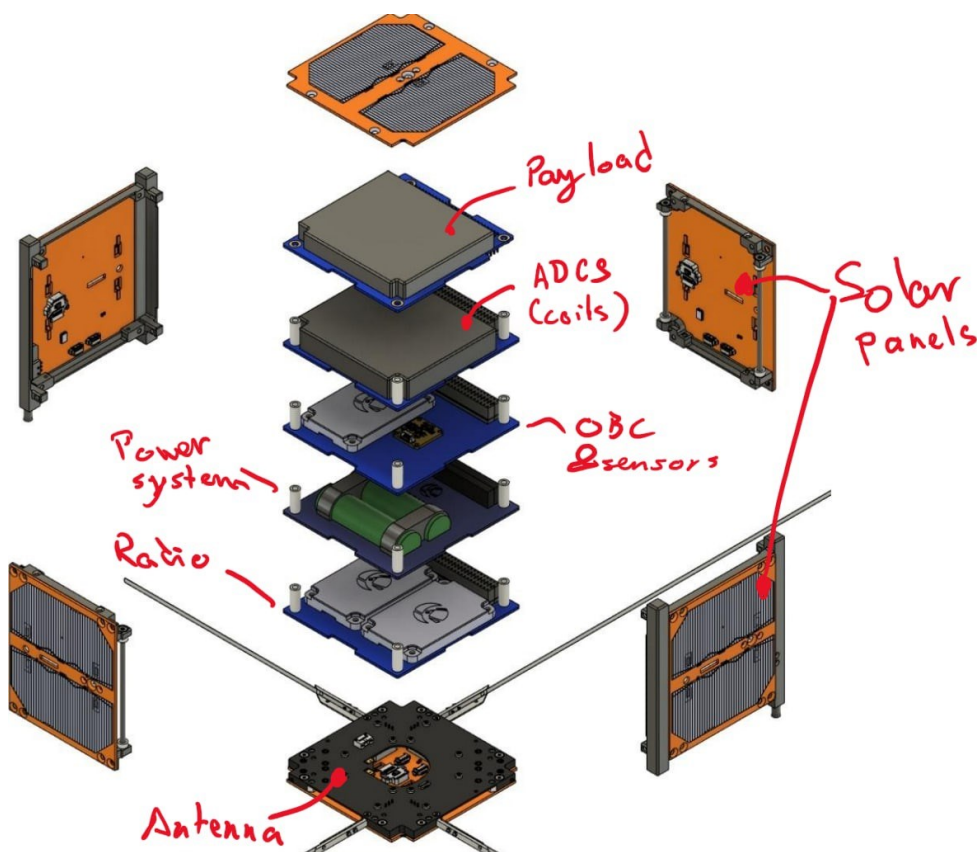
- Potaknuti tehnološki razvoj Hrvatske i društva orijentiranog na prosperitet i inovacije
- Uvesti Hrvatsku u svemirsku eru i povećati interes za astronomiju i svemirske projekte uz razvoj (STEM) znanosti i visokotehnološkog poduzetništva
- Stvoriti platformu za osnivanje svemirskog centra u Hrvatskoj te postaviti temelj za razvoj svemirskog sektora
- Smanjiti nezaposlenost i spriječiti odlazak (mladih) intelektualaca iz zemlje
- Povećati broj investicija i zaposlenih u sferi robotike i ICT industrije te potaknuti otvaranje novih studijskih programa orijentiranih na svemirske tehnologije
- Promocija Hrvatske kao inovativne zemlje, uz povećanje hrvatskog udjela u globalnom svemirskom sektoru
- Postati neovisni o drugim satelitima uz stvaranje vlastitih misija i izvora podataka

- Ostvariti suradnju s europskom svemirskom agencijom i vodećim svemirskim tvrtkama.

8. OPIS SATELITA CROCUBE

CroCube spada u skupinu nanosatelita, specifično podskupinu Cube satelita. Veličine je jedne standardne cube jedinice 1U, koja je dimenzija $100 \times 100 \times 100$ mm i teži oko 1,1 kg.

Sam satelit složen je od šest glavnih sustava (Slika 9.), a to su kućište, sustav napajanja, računalo (OBC), sustav komunikacija i sustav orijentacije, te koristan teret koji uključuje kameru i znanstvenoistraživački modul Astrotron 1000.



Slika 9. Sustavi CroCube satelita

8.1. Koristan teret

Koristan teret odnosi se na komponentu satelita koji je i razlog samog lansiranja satelita u svemir. Najčešće su to znanstvenoistraživački moduli, nove mehaničke komponente, novi sustavi i podsustavi, razni uređaji za snimanje i senzorska oprema i slično.

8.1.1. Kamera

Na satelitu se nalazi kamera naziva UCAM-III tvrtke 4D systems (Slika 10.), koja će fotografirati površinu Zemlje s 500 km visine. uCAM-III (microCAM-III) je integrirani serijski modul kamere koji se može priključiti na bilo koji sustav koji zahtijeva video kameru ili JPEG komprimiranu foto kameru za ugrađene slikovne primjene. Teži oko 6 g, a dimenzije su mu sljedeće: 32 mm×32 mm×21 mm (bez leće, uključujući zaglavlje). Ima mogućnost napajanja s 4,5 i 9 V te vuče struju jakosti približno 75 mA. Pogodna je za uvjete u svemiru jer može raditi u vakuumu i na temperaturama od -30 do +85 °C.

Modul koristi CMOS VGA senzor u boji u paru s čipom za JPEG kompresiju koji pruža sustav kamere niskih troškova i niskog napajanja. Modul ima integrirano serijsko sučelje (TTL) na samom modulu, što ga čini pogodnim za izravnu vezu s bilo kojim glavnim mikrokontrolerom UART-a ili COM priključkom PC sustava. uCAM-III je sposoban za izvođenje slika u RAW i JPEG formatu. Korisničke naredbe šalju se korištenjem jednostavnog serijskog protokola koji može uputiti kameru da šalje slike niske rezolucije (80×60 do 160×120) u RAW formatu za pregled ili slike visoke rezolucije (160×128 do 640×480) u JPEG formatu za pohranu ili pregled.

Dolazi u kompaktnom obliku s ugrađenom lećom i 5-žičnim priključkom koji omogućuje jednostavan pristup i napajanju i serijskim podacima. Za ovu kameru dostupne su 3 leće od tvrtke 4D Systems: 56 stupnjeva (Standard), 76 stupnjeva i 116 stupnjeva. uCAM-III se isporučuje s instaliranom lećom od 56 stupnjeva. Na navojnu nit na leći postoji zaklopna matica koja se koristi za zaključavanje fokusa na mjestu jednom kada je postavljen, kako bi se spriječilo slučajno mijenjanje. [21]



Slika 10. Kamera uCAM-III [21]

8.1.2. Znanstvenoistraživački modul Astrotron 1000

Znanstvenoistraživački modul i ujedno i eksperiment AstroTron 1000 je trostruko redundantan sustav s tri mikrokontrolera i trostrukim skupovima senzora koji testiraju toleranciju i izdržljivost jeftine elektronike u svemiru. Istovremeno nastoji održati rad sustava uoči potencijalnog kvara putem redundantnosti. Tri mikrokontrolera pojavljuju se kao jedinica satelitu, a redundancija, arbitraža i prebacivanje obavljaju se interno bez vanjskog posredovanja. Mikrokontroleri će periodično provoditi testove sustava, bilježeći sve greške i mjeriti podatke sa senzora. Senzori pod testom su svjetlosni senzori, ukupno njih šest, od kojih su dva trajno zatamnjena kako bi se s pomoću njih mjerila razina greške.

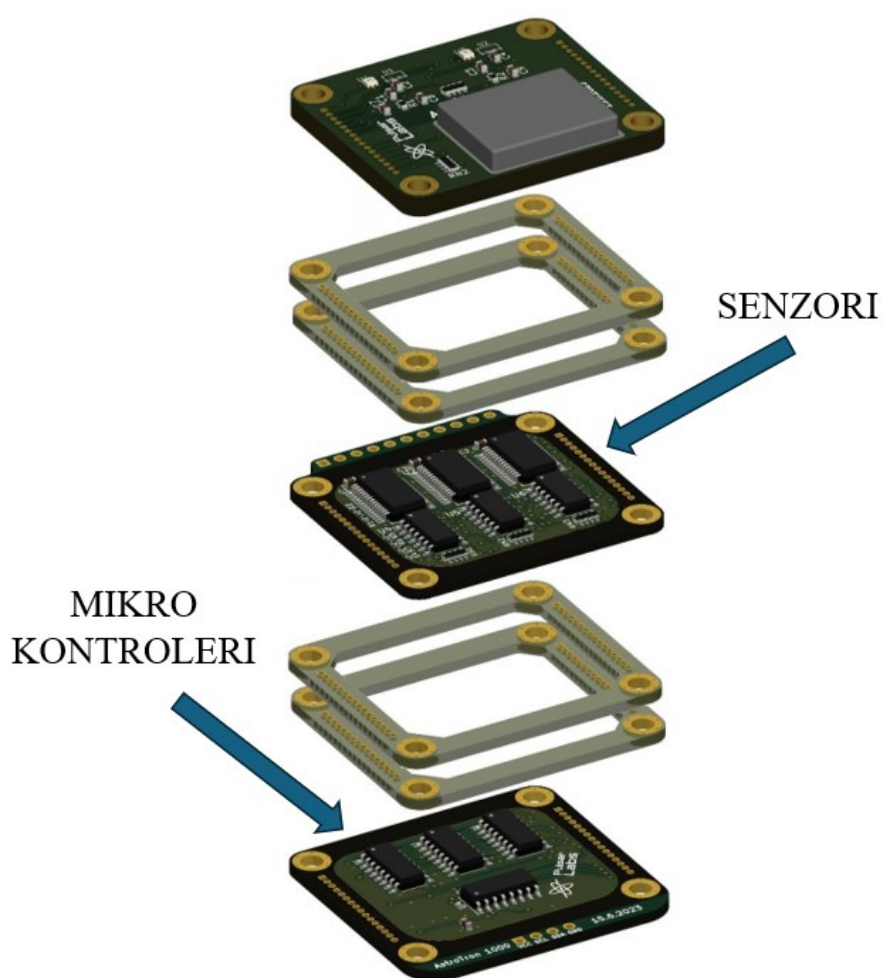
Za komunikaciju će se koristiti CSP protokol preko I2C-a. Eksperiment je tako test 1 za 3 (eng. *3 in 1 test*), a ispituje se trajnost jeftinih mikrokontrolera, svjetlosni senzori i njihovi nedostaci te se testiraju I2C redundantne matrice prebacivanja s diskretnim sklopom arbitraže. Ako eksperiment uspije, dokazat će se izvedivim korištenje pouzdane, jeftine, nisko kompleksne, kompaktne elektronike kao jednostavne periferne platforme za bilo koji broj eksperimenata na malim satelitima.

Modul se sastoji od: tri ploče glavne ploče i četiri pomoćne odstojne ploče (Slika 11.).

Gornja glavna ploča sadrži samo senzore za znanstvene eksperimente.

Srednja glavna ploča sadrži tri mikrokontrolera s arbitražnim sklopom za kontrolu I2C matrice prebacivanja.

Donja glavna ploča sadrži prekidače koji povezuju vanjsku I2C liniju s četiri unutarnje linije. Na taj način moguće je bilo koji od tri mikrokontrolera povezati s bilo koje od četiri linije u svakom trenutku. Vanjska linija se odabire arbitražom većine (dva od tri mikrokontrolera se slažu). U slučaju da jedan mikrokontroler zakaže i blokira svoje I2C izlaze u trajnom stanju, druga dva mikrokontrolera ga mogu potpuno zaobići, bez obzira na to na koju je liniju bio povezan.

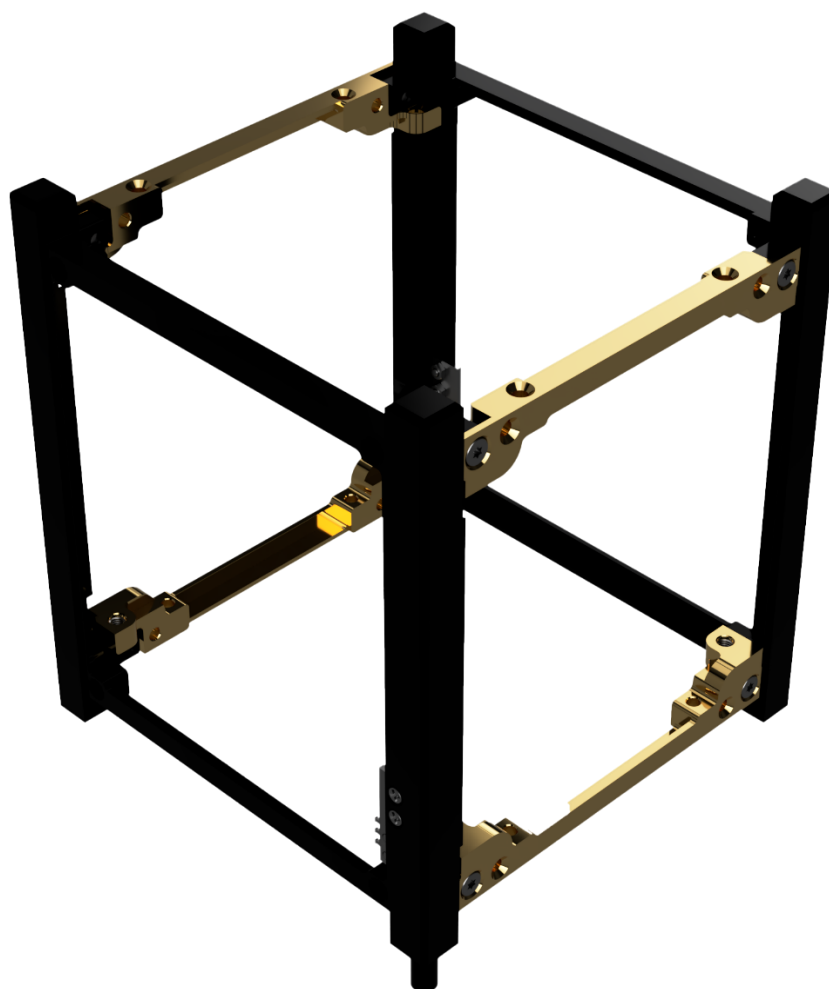


Slika 11. Eksplozirani prikaz znanstvenoistraživačkog modula Astrotron 1000

U slučaju da jedan od mikrokontrolera ima neobičan kvar i počne proizvoditi nasumične signale na svim pinovima, druga dva mogu glasati za resetiranje ili ga čak trajno onesposobiti.

8.2. Kućište

Samo kućište (Slika 12.) je izrađeno od Al7075, legure aluminija, cinka kao primarno legiranog elementa, i u manjim udjelima magnezija i bakra. Ima izvrsna mehanička svojstva te pokazuje dobru duktilnost, visoku čvrstoću, žilavost i dobru otpornost na umor. Jedna je od najčešće korištenih aluminijevih legura za visoko opterećene strukturne primjene i široko se koristi u dijelovima strukture zrakoplova i u astronautici.



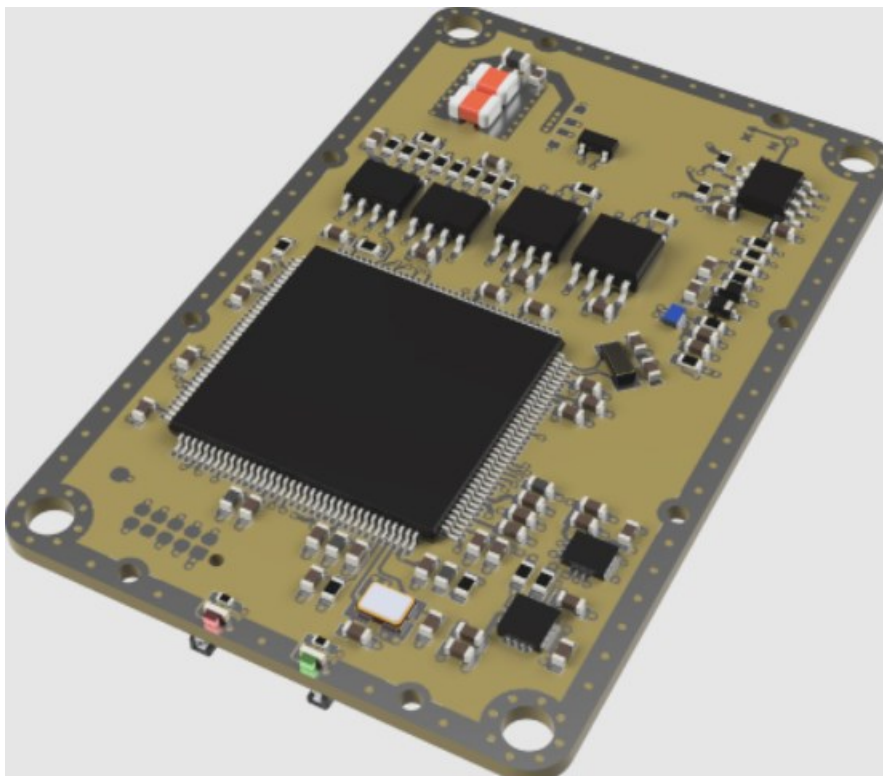
Slika 12. Kućište satelita CroCube

Izrađena je na peto-osnoj glodalici, a nakon toga anodizirana kako bi se stvorio sloj otporan na uvjete u LEO. Anodizacija se prvenstveno radi kako bi se spriječilo ispuštanje plinova iz materijala (eng. *outgasing*) prilikom prijelaza satelita u vakuum, koje može oštetiti elektroniku ili zamutiti leće kamere.

8.3. Računalo

Drugim riječima "mozak" satelita, povezuje sve podsustave, kontrolira ih i daje im upute za rad. Na samom satelitu nalaze se dva ista računala kako bi postojala redundantnost sustava. Jedno računalo je glavno, dok je drugo u modu pripravnosti i preuzima upravljanje ako glavno računalo otkáže. Na taj način sustav je siguran i u trenutku kvara.

Satelitsko računalo tvrtke Spacemanic imena Deep Thought (Slika 13.) koje se nalazi u satelitu nudi jedinstven i jednostavan (eng. *Plug&Play*) dizajn te kompatibilnost s CubeSat standardom i komponentama raznih drugih proizvođača. Njegov dizajn otporan na zračenje osigurava stabilnost u zahtjevnim svemirskim uvjetima, dok 32 bitna Cortex-M7 jezgra pruža visoku pouzdanost. Ugrađeni višenamjenski senzor za žiroskop, magnetsko polje i akcelerometar te senzor temperature omogućuju precizno praćenje okoline, dok robustan dizajn s uključenim zaštitnim kućištem osigurava pouzdan rad u ekstremnim uvjetima.



Slika 13. Računalo Deep Thought [22]

Radna temperatura modula kreće se od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, a može se napajati s 3,3 V ili 5 V. Modul je dimenzija $65\times 40\text{ mm}$, a masa mu je samo 25 g. Prosječna potrošnja energije iznosi 100 mW.

Uz ultra slabi način rada od 32.768 kHz i standardni način rada do 300 MHz, mikrokontroler modula nudi interni i vanjski nadzorni sklop za dodatnu pouzdanost.

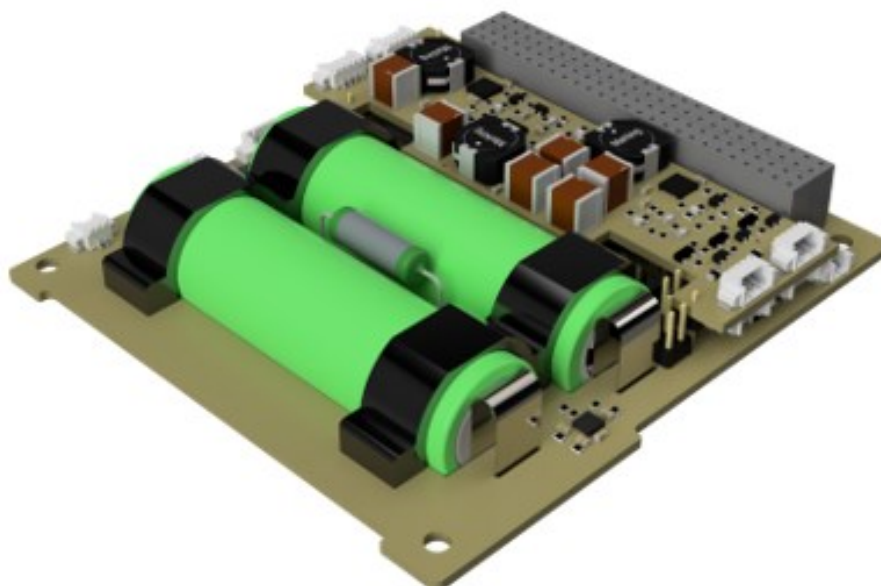
Modul raspolaže s 2048 kilobajta Flash memorije, 384 kilobajta višenamjenske SRAM memorije i 128 megabajta pohrane, pružajući dovoljno resursa za pohranu podataka i izvođenje složenih operacija.

Opremljen mnogim sučeljima, uključujući $2\times\text{I}2\text{C}$ i $1\times\text{izolirani I}2\text{C}$, $1\times\text{RS}485$, $1\times\text{UART}$, $1\times\text{CAN}$, $1\times\text{SPI}$, $1\times\text{Ethernet R}2\text{MII}$, te $22\times\text{IO}$ priključka, modul nudi fleksibilnost u integraciji s drugim uređajima. Također sadrži PPS ulaz, izlazni sistemski sat, ulaz za vanjski reset, USB priključak, QSPI za vanjsku dodatnu memoriju, JTAG na odvojenom konektoru, te LED indikatore za ispitivanje.

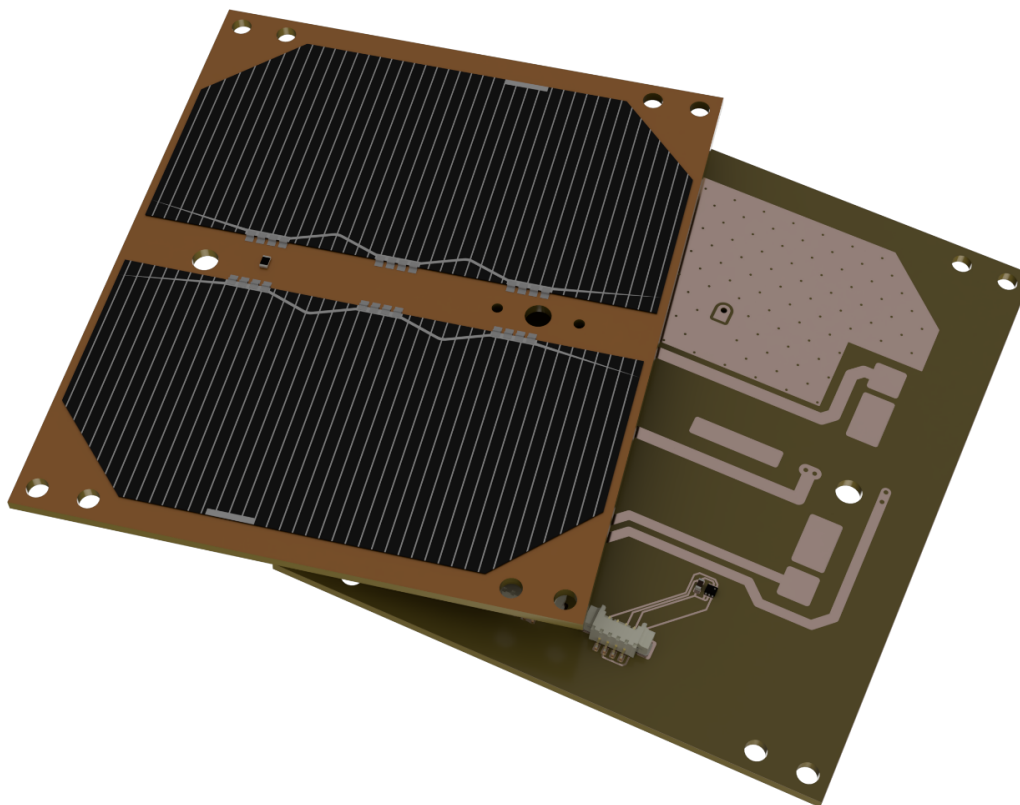
Modul koristi operativni sustav temeljen na FreeRTOSu koji radi u realnom vremenu te podržava CubeSat Space Protocol, AX.25 i KISS protokole. Također, nudi potpunu kompilaciju upravljačkih programa za OBC i kompatibilan je s raznim komercijalnim RTOSima. [22]

8.4. Sustav napajanja

Sustav se sastoji od baterijskog modula (Slika 14.) te šest solarnih panela (Slika 15.), po jedan na svakoj plohi kockastog satelita.



Slika 14. Baterijski modul



Slika 15. Solarni paneli

SM-PSU-AMUN je modul napajanja posebno oblikovan za male satelite u PC/104 formatu. Softverski, podržava CubeSat Space Protocol za učinkovitu komunikaciju putem I2C-a. Temelji se na provjerenom hardveru s uspješnim letovima te je prošao testove vibracija, vakuumskog grijanja i zračenja, osiguravajući stabilan rad u svemirskim uvjetima.

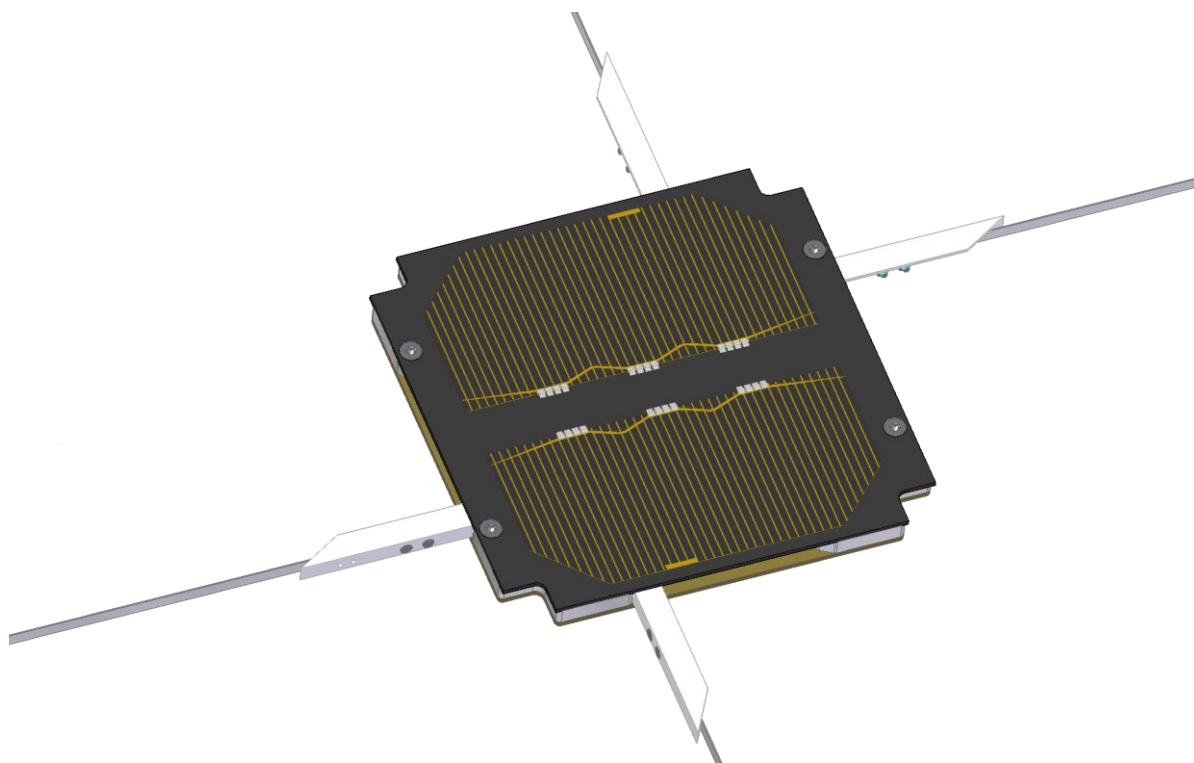
S radnom temperaturom od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ i PC/104 formatom, SM-PSU-AMUN je idealan za razne svemirske misije. Masa od 200 g čini ga lako prilagodljivim raznim konfiguracijama. Što se tiče funkcionalnih karakteristika, sadrži tri MPPT kanala za učinkovito upravljanje solarnim panelima, dva regulirana napajanja (5 V, 3.3 V) i šest izlaza za napajanje (5 V, 3.3 V i 4 odabira). Ugrađeni paket baterija s grijanjem i termalnom kontrolom pruža stabilno napajanje tijekom svemirskih misija. S ukupnim kapacitetom baterije od 20 Wh i solarnim ulaznim napajanjem od 30 W, SM-PSU-AMUN omogućuje pouzdano i učinkovito napajanje satelita. [23]

Na satelitu se nalazi 6 solarnih panela s ukupno 10 solarnih ćelija učinkovitosti 33 %. Napravljene su tako da mogu biti u direktnom dodiru s okolinom, te su otporne na drastične temperaturne promjene i radijaciju.

8.5. Sustav komunikacija

Komunikacijski sustav je baziran na radio valovima i sve se prenosi radio vezom na vrlo visokoj frekvenciji (VHF) od 146 MHz i ultra visokoj frekvenciji (UHF) od 436 MHz. Sustav se sastoji od tri komponente, prva komponenta su dvije radio dipolne antene (svaka za jednu frekvenciju) napravljene od nitinol žica (Slika 16.). Dužine su im 500 mm za UHF i 170 mm za VHF te treba postojati načina da im se smanji duljina kako ne bi izlazile van dozvoljenog volumena satelita te da se otvore nakon što izađu iz rakete. To se postiže tako da se savijaju u spiralnu oprugu te se zatvaraju u vlastiti pretinac na satelitu koji će se otvoriti tek u trenutku kad se satelit izbaciti iz rakete.

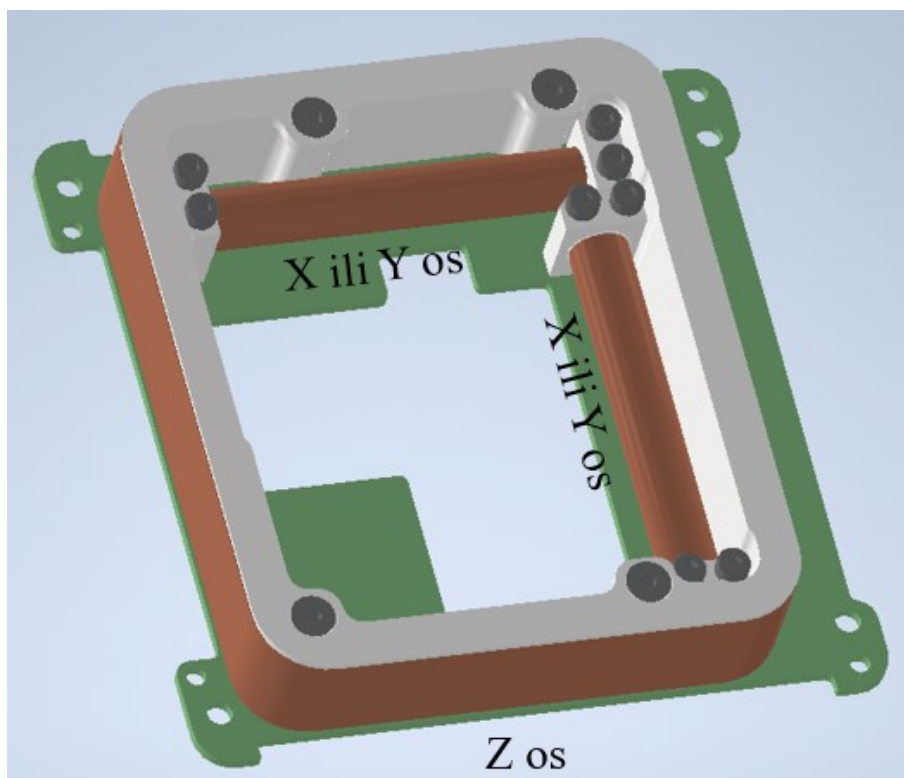
Druge dvije komponente radio prijammnik i predajnik su na CroCubeu spojene u jednu komponentu. Oni se koriste za slanje signala preko antena do Zemlje i primanje signala sa Zemlje te prosljeđivanja do računala.



Slika 16. Antenski modul s dva para antena, VHF i UHF

8.6. Sustav orijentacije i stabilizacije

Kao što je već u prijašnjem poglavlju objašnjeno, postoje razni senzori i uređaji za postizanje željene orijentacije u svemiru. U ovoj misiji zbog praktičnosti, ekonomičnosti i uštede na prostoru izabrane su elektromagnetske zavojnice (Slika 17.). One istovremeno mogu služiti kao sustav za poznavanje orijentacije, a korištenjem tri okomite zavojnice, gdje svaka djeluje oko jedne osi, reagiranjem s magnetskim poljem Zemlje mogu služiti i za stabilizaciju.



Slika 17. Modul za stabilizaciju i orijentaciju s tri zavojnice

9. FAZE MISIJE CROCUBE

Početak same misije započinje samom razradom trajanja i točnih koraka od trenutka lansiranja u nazad da se vidi vrijeme trajanja misije i da se definiraju ključni koraci i vremenski okviri u kojima oni moraju biti ostvareni. Tako se lansiranje definira kao vrijeme T-0, a ostali koraci se definiraju u odnosu na njega. Za misiju malih kalibara kao što je 1U Cube satelit, potrebno vrijeme od početka dizajna satelita do lansiranja je 12 mjeseci.

9.1. T-12 mjeseci: *Dizajn satelita*

Dizajn i konstrukcija satelita ovisi o njegovom glavnom teretu, odnosno korisnom teretu. U slučaju CroCube satelita, sadržaj je orijentiran na optiku, točnije kameru u vidljivom spektru (boje vidljive ljudskom oku) i znanstvenoistraživačkog modula Astrotron 1000. Kad se definira korisni teret, kreće izračun svih parametara – koliko je struje potrebno za napajanje satelita, koliko će podataka obrađivati, koliko će ih i kojom dinamikom slati na Zemlju prema čemu se određuju potrebe radijskog odašiljača, tzv. primopredajnik putem kojeg se šalju naredbe satelitu, ali i prikupljaju podaci iz orbite. CroCube će u sebi nositi UHF/VHF primopredajnik koji će prikupljati i slati podatke o stanju satelita, visini, temperaturi komponenata, ali i fotografije snimljene iz svemira te podatke prikupljene od Astrotorna 1000. Vrlo je važno determinirati i potrebe sustava stabilizacije kako bi fotografije koje satelit prikupi bile dovoljno oštre i fokusirane. [20]

9.2. T-10 mjeseci: *Prikupljanje dijelova*

Slijedi nabava svih potrebnih dijelova satelita, od tisuću sićušnih komponenti do glavnih modula, s konstantnim fokusom na definirani korisni teret satelita.

Paralelno se kreće s izradom koda, odnosno softvera koji će biti zadužen za cjelokupnu komunikaciju. Jedinstveni softver uskladit će rad svih modula na satelitu te razraditi plan na koji će oni međusobno komunicirati, ali i „pričati“ sa Zemaljskom stanicom.

Tako se definira i pozicija, izrada i sklapanje sve dodatne opreme na Zemlji. To su zemaljska stanica, pod koju spada antenski sklop, računalo i baza podataka, koji su zaduženi za komunikaciju sa satelitom u kasnijoj fazi njegovog svemirskog djelovanja.

U ovoj se fazi dogovara i način, točnije pozicija samog lansiranja (eng. *launch opportunity*). Važno je unaprijed definirati svu dinamiku lansiranja kako bi se ostvarili idealni uvjeti za postizanje odgovarajuće visine te usklađivanje sa svim ostalim orbitalnim parametrima koji omogućuju stabilnu putanju satelita dok se bude nalazio u orbiti oko Zemlje.

Istovremeno se odvija i proces licenciranja, prikupljanja raznih potvrda, usklađivanje frekvencija za radiokomunikaciju, registracija satelita kod nadležnih tijela i drugo. [20]

9.3. T-4 mjeseca: Faza integracije

Finalizacija satelita započinje slaganjem svih prikupljenih dijelova. U ovoj se fazi satelitom smije manipulirati isključivo u „čistim sobama“ (eng. *clean rooms*) koje podliježu strogim standardima čistoće kako ne bi došlo do kontaminacije prašinom i drugim nečistoćama te kako bi se spriječilo bilo kakvo oštećenje na satelitu koje bi moglo ugroziti funkcioniranje elektronike. CroCube će se sklapati u čistoj sobi na Prirodoslovno Matematičkom Fakultetu u Zagrebu. [20]

9.4. T-2 mjeseca: Faza ispitivanja

Kad je satelit sastavljen, potrebno je napraviti raznorazna mjerenja te daljnja ispitivanja njegovih komponenti. Ta se faza zove okolišno ispitivanje (eng. *environmental testing*) u kojoj se satelit izlaže ekstremnim uvjetima kojima će biti izložen u niskoj zemljinoj orbiti – vibracijski testovi koji simuliraju gravitacijske sile (vibracije i ubrzanje prilikom lansiranja satelita u raketi).

Nadalje, satelit se stavlja u termo vakuumsku komoru koja ciklusno zagrijava i hladi satelit od -30 do 120 °C te se gleda i utjecaj vakuuma na komponente.

Pri završetku testiranja, svi prikupljeni rezultati i mjerenja šalju se pružatelju usluge lansiranja kako bi se utvrdila spremnost satelita za lansiranje na određenoj raketi. CroCube će u svemir poletjeti na raketi Falcon 9, tvrtke SpaceX. [20]

9.5. T-1 mjesec: *Druga integracija*

Kada satelit dobije zeleno svjetlo za let na odabranoj raketi, slijedi drugi dio njegove integracije, ovog puta u čistoj sobi pružatelja usluga lansiranja, koji ga implementira u izbacivač (eng. *deployer*), s nekoliko drugih satelita. Svrha izbacivača je zaštititi satelit u raketi i kasnije ga, prevozi na finalno mjesto izbacivanja, gdje satelit napušta raketu i dobiva svoj položaj u orbiti. U ovoj misiji točka izbacivanja je 510 km. [20]

9.6. T-3 tjedna: *Montaža na raketu*

Nakon što je satelit smješten u izbacivač i sva se (pre)ostala mjesta u njemu popune s drugim satelitima, izbacivač se zatvara te se smješta na vrh rakete, ispod glavnog tereta i čeka lansiranje. [20]

9.7. T-0: *Lansiranje*

Lansira se preko jedne od lansirnih kompanija, za CroCube ja izabran ScaceX i njihova raketa Falcon 9.

9.8. T+nekoliko sati: *Prvi signal*

U prvim satima nakon lansiranja, čekamo da se satelit prvi put oglasi, tu se dešava jedan od kritičnih trenutaka misije, otvaranje antena. Zatim se uspostavlja radiokomunikaciju i počinje izmjena podataka sa zemaljskom stanicom.

Dok se čeka prvi kontakt, satelit interno prikuplja podatke o stanju baterija, punjenju solarnih panela, temperaturi i drugo. [20]

9.9. T+1 tjedan do 1 mjesec: *Faza stabilizacije*

Satelit prolazi proces stabilizacije (eng. *detumbling*) – zaustavlja se njegovo nekontrolirano rotiranje te ga se namješta u željeni položaj uz pomoć sustava stabilizacije. Aktivno se prati i očitava njegovo stanje, intenzivno se kontroliraju svi protokoli da bi se ustanovile potencijalne nepravilnosti u radu kao i u neometanoj komunikaciji te protoku podataka. [20]

9.10. T+2 mjeseca pa nadalje: *Normalizacija i orbitalni let*

Čim se potvrdi da je satelit stabiliziran na željenoj poziciji, kreće faza normalizacije u kojoj se preuzimaju prvi podatci s tereta (kamere i astrotrona 1000).

Satelitom se upravlja i komunicira sve dok ga ne uništi radijacija, gubitak putanje ili kvar komponenti.

Očekivano trajanje misije CroCube je između jedne i dvije godine.

Podatke koje CroCube prikupi bit će analizirani od strane studenata, radioamatera, ali i javno dostupni svim drugim zainteresiranim stranama koje žele obrađivati informacije iz i o svemiru. Time se žele potaknuti neke nove misije i budućnost svemirskih projekata u Hrvatskoj. [20]

10. RAZMATRANJE EKONOMSKIH I PROIZVODNIH ASPEKATA

Kada se govori o svemirskim misijama, uvriježeno se podrazumijeva da su za njihovo ostvarenje potrebna iznimno velika financijska ulaganja. Međutim, misije nanosatelita kao što su Cube sateliti dovode u pitanje tu predodžbu. Cijena CubeSata može znatno varirati ovisno o njegovoj složenosti, ciljevima misije i tehnologiji ugrađenoj u njega. Jednostavan CubeSat konstruiran u svrhu obrazovanja može biti izgrađen i lansiran za samo 50 000 do 150 000 USD. Nasuprot tome, sofisticiraniji CubeSat, opremljen najsuvremenijom tehnologijom za kompleksna istraživanja ili komercijalne svrhe, može koštati od 500 000 do nekoliko milijuna USD, što je i dalje puno manji izdatak za razliku od tradicionalnih velikih satelita.

U istraživanju svemira, gdje su milijarderski proračuni uobičajeni, CubeSati su financijsko olakšanje. S njihovim gigantskim strukturama, opsežnim instrumentima i jedinstvenim zahtjevima za lansiranje, tradicionalne satelitske misije mogu generirati račune od stotina milijuna do nekoliko milijardi USD.

Važno je uzeti u obzir troškove proizvodnje satelita i troškove lansiranja. CubeSati često značajno uštede na troškovima lansiranja jer se voze u svemir kao sekundarne nosive jedinice ili kao dio vožnje s više satelita. Međutim, cijene mogu varirati ovisno o specifičnim parametrima lansirnog vozila i orbite te naravno veličini i masi satelita.

Uspoređujući ove dvije vrste, CubeSati predstavljaju malen dio troškova tih misija velikog opsega. Na primjer, cjelovita međuplanetarna misija može imati proračun jednak lansiranju stotina ili čak tisuća CubeSata.

Koliko su oni zapravo isplativi govori i to da je ova vrsta danas najučestalija u orbiti. Postoje mnoge tvrtke koje se bave izradom komponenata i cijelih sustava za druge organizacije ili čak cijelih gotovih satelita. Globalna veličina tržišta CubeSata dosegla je 354,6 milijuna USD u

2023. godini. Gledajući unaprijed, IMARC Group očekuje da će tržište doseći 1509,3 milijuna USD do 2032. godine, što predstavlja stopu rasta od 16,9 % tijekom razdoblja od 2024. do 2032. godine. Rastuće komercijalne primjene, povećani investicijski napori vladinih agencija te rastuća tehnološka ekspanzija u elektroničkim komponentama predstavljaju neke od ključnih čimbenika koji potiču tržište. [24]

Međutim, važno je uravnotežiti skale usporedbe. Iako CubeSati nude uštedu troškova, možda neće uvijek odgovarati opsegu mogućnosti, dugovječnosti i rasponu većih misija. Ipak, njihova pristupačnost čini ih neprocjenjivima za česte, ciljane projekte i pruža izvrsnu platformu za testiranje novih svemirskih tehnologija bez narušavanja proračuna.

Proizvodnja CubeSata temelji se na njegovoj modularnoj konstrukciji koja koristi standardne dimenzije, omogućavajući lako prilagođavanje i skaliranje prema specifičnim potrebama misije. Godišnje se tako proizvede više stotina standardnih jedinica.

Većina CubeSata je standardnih dimenzija veličine, ali postoje iznimke. Tada konstruiranje uključuje korištenje CAD alata za kreiranje točnih modela, te slijedi poseban postupak izradbe. Najčešći materijal koji se koristi je aluminij zbog njegove kombinacije niske gustoće i čvrstoće, te sposobnosti anodizacije, kojom se štiti površina od ispuštanja plinova iz materijala. U nekim slučajevima koriste se i kompozitni materijali kako bi se smanjila masa i povećala otpornost na toplinu.

Prototipiranje i ispitivanje su ključni koraci u proizvodnom procesu novih i nestandardnih Cube satelita. Iskorištavanje tehnologije brze izrade prototipa poput 3D tiskanja i CNC obrade omogućavaju brzu promjenu i prilagodbu konstrukcije.

Proizvodni aspekti odnose se prije svega na izradbu i montažu.

Kvaliteta proizvodnje osigurava se slijeđenjem međunarodnih normi poput ISO 9001 te specifičnih zahtjeva lansirnih operatera poput SpaceX-a i NASA-e. Ipak, uvijek je pogodno analizirati izradivost dijelova satelita i njegovu sklopivost, budući da analize mogu voditi prema konstrukcijskim preinakama koje će pak ishoditi ne samo nižim troškovima proizvodnje, već i povećanom pouzdanošću satelita.

Proizvodni kapaciteti CubeSat satelita uključuju male istraživačke laboratorije, *startupe*, ali i velike kompanije, koje omogućuju potencijal masovne proizvodnje. Godišnja proizvodnja

kontinuirano raste, s nekoliko stotina Cube satelita proizvedenih svake godine. Lansiranje satelita provodi se putem različitih lansirnih službi i vozila, a godišnje ih se lansira preko stotinu. Tržišni trendovi pokazuju daljnji rast u broju lansiranja, potaknut povećanjem dostupnosti i smanjenjem troškova.

S obzirom da su proizvedene količine CubeSata nekoliko stotina komada, montaža je ručna. Odvija se u čistim sobama kako bi se minimirala kontaminacija i oštećenja osjetljivih elektroničkih komponenti. Integracija sustava uključuje povezivanje svih ključnih elemenata unutar kućišta satelita, a kako bi se ona olakšala i ubrzala, provode se razne analize montaže. U nastavku rada predstavljena će biti jedna od metoda optimizacije montaže, te će biti provedena za satelit CroCube.

11. ANALIZA SKLOPIVOSTI CROCUBEA

Metodologija DFMA je kombinacija dviju metoda: Oblikovanja za izradbu (DFM, eng. *Design For Manufacture*) i Oblikovanja za montažu (DFA, eng. *Design For Assembly*). Primjena ove metodologije omogućava da se proizvod koji se konstruira, potom učinkovito proizvodi i lako sklapa uz minimalne troškove i u kraćem vremenu. Korištenjem DFMA, tvrtka može spriječiti, otkriti, kvantificirati i eliminirati škart i neučinkovitost u proizvodnom procesu. U DFMA, konstruktori i tehnolozi rade kao tim u razvoju metoda izradbe i montaže proizvoda istovremeno, zajedno imajući u vidu konstrukciju. Konvencionalno, konstruktor konstruira proizvod, a zatim predaje crteže proizvodnji koja tada određuje procese proizvodnje i montaže. Za učinkovitu primjenu DFMA, ove dvije analize moraju raditi u skladu kako bi se postigla najveća korist. [25]

Tehnike DFM usredotočene su na pojedinačne dijelove i komponente s ciljem smanjenja ili eliminacije skupih, složenih ili nepotrebnih značajki koje bi ih učinile teškim za izradbu. Tehnike DFA usredotočuju se na smanjenje broja i standardizaciju ugradbenih elemenata (dijelova i sklopova). Cilj je smanjiti vrijeme i troškove montaže. Konstruktor može nastojati kombinirati dijelove kako bi smanjio broj koraka montaže, količinu dijelova i opreme, ali mora paziti da rezultirajući dijelovi ne postanu suviše složeni ili skupi za izradbu. [25]

Konstrukcija se treba pregledati dio po dio i utvrditi može li se neki dio eliminirati ili kombinirati s drugim dijelom. Konstruktor bi trebao odrediti teoretski minimalnu količinu dijelova potrebnih za sastavljanje. Jedna metoda za određivanje minimalnih količina dijelova je prvo nabrojati sve komponente u vašem sklopu, uključujući opremu.

Pitanja za određivanje teoretski minimalnog broja dijelova jesu:

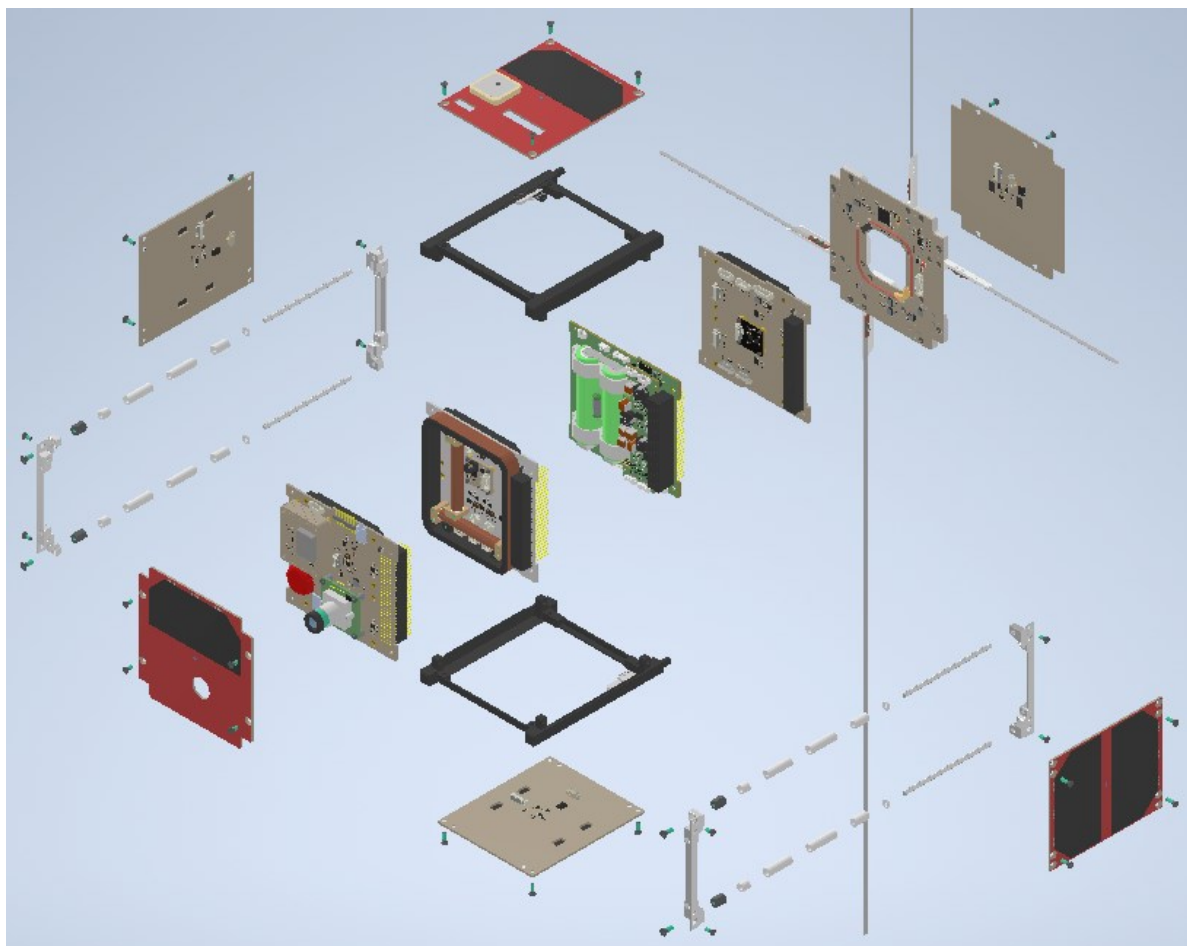
1. Je li dio pomičan u odnosu na već sklopljene dijelove?
2. Treba li dio biti od drugačijega materijala, ili izoliran, od već sklopljenih dijelova?

3. Treba li dio biti odvojen od već sklopljenih dijelova budući da bi u suprotnome sklapanje ili rasklapanje tih drugih dijelova bilo nemoguće?

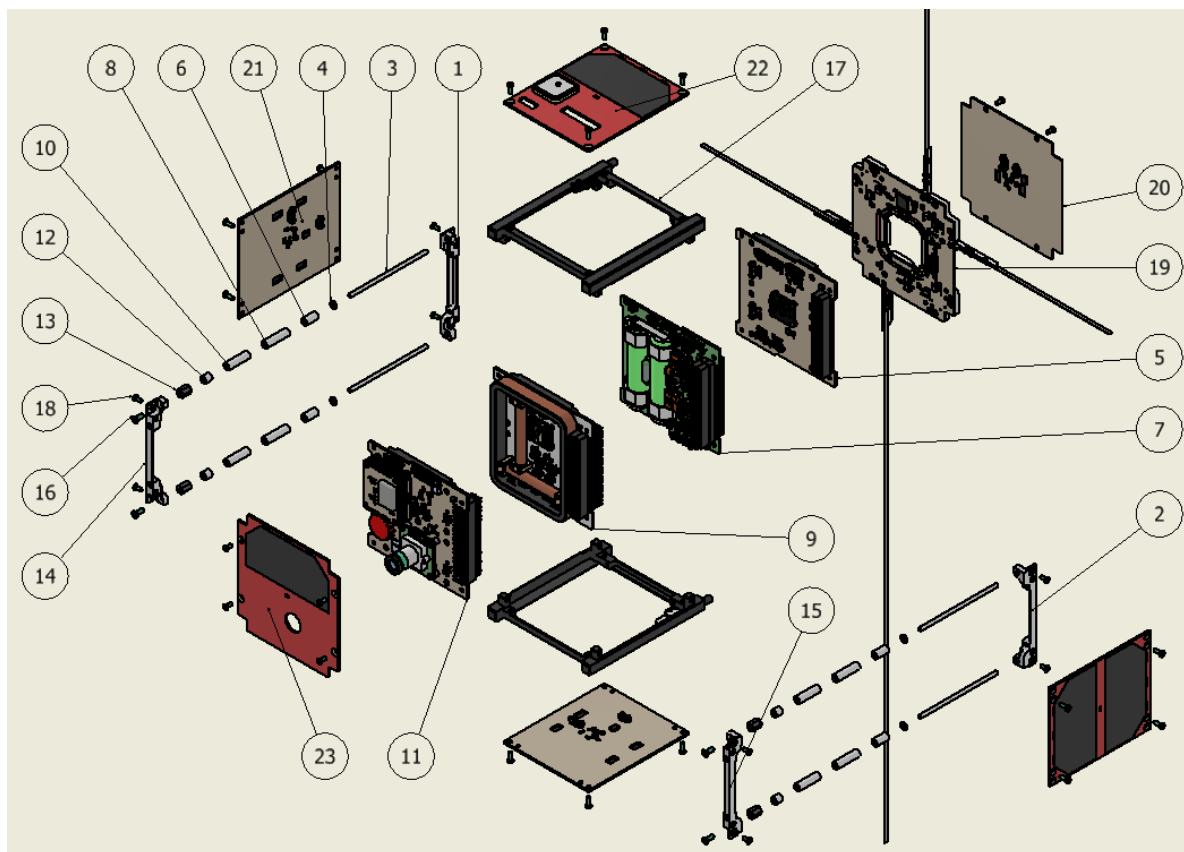
Smanjenjem količine dijelova smanjuju se količina opreme i broj potrebnih radnji montaže te vjerojatnost grešaka u montaži. [26]

Nanosateliti se proizvode u relativno malim količinama i sastavljaju se ručno, jer su izrazito modularni te različitih dimenzija i načina sklapanja. Na CroCubeu će se provesti DFA analiza te utvrditi mogućnost pojednostavnjenja montaže dijelova.

U prvom koraku proizvod se rastavlja, ili zamišlja kako bi to izgledalo (s dodjelom identifikacijskih brojeva). CroCube ima 81 dio, od kojih 23 različita glavna dijela u procesu montaže (slike 18. i 19.).



Slika 18. Ekspandirani prikaz ugradbenih elemenata CroCubea



Slika 19. Ugradbeni elementi CroCubea s dodijeljenim identifikacijskim brojevima

Drugi korak je dobiti informacije o proizvodu, popisati glavne dijelove u montaži, podijeliti ih u sklopove ako je moguće te im odrediti količinu (tablice 2. do 5.).

Tablica 2. Strukturna sastavnica CroCubea

Stupanj ugradnje	Oznaka ugradbenog elementa	Naziv ugradbenog elementa	Količina
.1	S1 (D1 do D18)	sklop A	1
..2	D1	rebro A	1
..2	D2	rebro B	1
..2	D3	navojna šipka M2,5	4
..2	D4	odstojnik A	4
..2	D5	glavno računalo	1
..2	D6	odstojnik B	4

..2	D7	baterijski sklop	1
..2	D8	odstojnik C	4
..2	D9	stabilizacijski sklop	1
..2	D10	odstojnik D	4
..2	D11	glavni teret	1
..2	D12	odstojnik E	4
..2	D13	duga matica M2,5	4
..2	D14	rebro C	1
..2	D15	rebro D	1
..2	D16	vijak M2,5×8 mm	4
..2	D17	bočni okvir	2
..2	D18	vijak M2,5×6 mm	8
.1	D19	antenski sklop	1
.1	D20	donji panel	1
.1	D18	vijak M2,5×6 mm	4
.1	D21	bočni panel	1
.1	D16	vijak M2,5×8 mm	4
.1	D21	bočni panel	1
.1	D16	vijak M2,5×8 mm	4
.1	D21	bočni panel	1
.1	D16	vijak M2,5×8 mm	4
.1	D22	bočni panel s GPS-om	1
.1	D16	vijak M2,5×8 mm	4
.1	D23	gornji panel	1
.1	D18	vijak M2,5×6 mm	4

Tablica 3. Modularna sastavnica Sklopa A

Sklop A, Kućište s glavnim modulima			
Redni broj	Oznaka ugradbenog elementa	Naziv ugradbenog elementa	Količina
1	D1	rebro A	1
2	D2	rebro B	1
3	D3	navojna šipka M2,5	4
4	D4	odstojnik A	4
5	D5	glavno računalo	1
6	D6	odstojnik B	4
7	D7	baterijski sklop	1
8	D8	odstojnik C	4
9	D9	stabilizacijski sklop	1
10	D10	odstojnik D	4
11	D11	glavni teret	1
12	D12	odstojnik E	4
13	D13	duga matica M2,5	4
14	D14	rebro C	1
15	D15	rebro D	1
16	D16	vijak M2,5×8 mm	4
17	D17	bočni okvir	2
18	D18	vijak M2,5×6 mm	8

Tablica 4. Modularna sastavnica CroCubea

CroCube			
Redni broj	Oznaka ugradbenog elementa	Naziv ugradbenog elementa	Količina
1	S1	sklop A (S1)	1
2	D16	vijak M2,5×8 mm	16
3	D18	vijak M2,5×6 mm	8
4	D19	antenski sklop	1
5	D20	donji panel	1
6	D21	bočni panel	3
7	D22	bočni panel s GPS-om	1
8	D23	gornji panel	1

Tablica 5. Količinska sastavnica CroCubea

Redni broj	Oznaka ugradbenog elementa	Naziv ugradbenog elementa	Količina
1	D1	rebro A	1
2	D2	rebro B	1
3	D3	navojna šipka M2,5	4
4	D4	odstojnik A	4
5	D5	glavno računalo	1
6	D6	odstojnik B	4
7	D7	baterijski sklop	1
8	D8	odstojnik C	4
9	D9	stabilizacijski sklop	1
10	D10	odstojnik D	4
11	D11	glavni teret	1
12	D12	odstojnik E	4
13	D13	duga matica M2,5	4
14	D14	rebro C	1
15	D15	rebro D	1
16	D16	vijak M2,5×8 mm	20
17	D17	bočni okvir	2
18	D18	vijak M2,5×6 mm	16
19	D19	antenski sklop	1
20	D20	donji panel	1
21	D21	bočni panel	3
22	D22	bočni panel s GPS-om	1
23	D23	gornji panel	1

11.1. Analiza izvorne konstrukcije za ručno sklapanje

Naredan korak u analizi metodom DFA je sklapanje proizvoda i ispunjavanje obrasca za svaki ugradbeni element (Tablica 6.).

Tablica 6. Analiza ručnog sklapanja izvorne konstrukcije CroCubea

Ime dijela	Identifikacijski broj dijela	$\alpha, ^\circ$	$\beta, ^\circ$	Debljina, mm	Veličina (duljina), mm	Broj uzastopnih izvođenja operacije	Oznaka rukovanja	Vrijeme rukovanja, s/dio	Oznaka umetanja	Vrijeme umetanja, s/dio	Vrijeme operacije, s, $(7) \times (9) + (11)$	Cijena operacije, cent, $0,4 \times (12)$	Potreban broj dijelova
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
odstojniki B	6	180	0	6	20,3	4	00	1,13	00	1,5	10,52	4,21	4
glavno računalo	5	360	360	15,5	95,9	1	30	1,95	00	1,5	3,45	1,38	1
odstojniki A	4	180	0	1	6	4	04	2,18	00	1,5	14,72	5,89	4
navojna šipka M2,5	3	180	0	2,5	75	4	00	1,13	38	6	28,52	11,41	0
rebro B	2	360	360	9,7	82,8	1	30	1,95	00	1,5	3,45	1,38	1
rebro A	1	360	360	9,8	86,8	1	30	1,95	00	1,5	3,45	1,38	1

rebro D	rebro C	duga matica M2,5	odstojnik E	glavni teret	odstojnik D	stabilizacijski sklop	odstojnik C	baterijski sklop
15	14	13	12	11	10	9	8	7
360	360	180	180	360	180	360	180	360
360	360	0	0	360	0	360	0	360
9,7	9,8	6,9	5,9	39,1	6	19,9	6	19,5
82,8	86,8	8	6	95,9	22	95,9	11,4	95,9
1	1	4	4	1	4	1	4	1
30	30	01	01	30	00	30	01	30
1,95	1,95	1,43	1,43	1,95	1,13	1,95	1,43	1,95
00	00	38	00	00	00	00	00	00
1,5	1,5	6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
3,45	3,45	29,72	11,72	3,45	10,52	3,45	11,72	3,45
1,38	1,38	11,89	4,69	1,38	4,21	1,38	4,69	1,38
1	1	0	4	1	4	1	4	1

gornji panel	bočni panel s GPS-om	bočni panel	donji panel	antenski sklop	vijak M2,5×6 mm	bočni okvir	vijak M2,5×8 mm
23	22	21	20	19	18	17	16
360	360	360	360	360	360	360	360
360	360	360	360	360	0	360	0
5,4	9,6	5,4	5,4	9,1	4,7	15,4	4,7
98	98	98	98	98	6	121,5	8
1	1	3	1	1	16	2	20
30	30	30	30	30	11	30	11
1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,8	1,95	1,8
00	06	06	00	00	38	00	38
1,5	5,5	5,5	1,5	1,5	6	1,5	6
TM	472,89	3,45	3,45	3,45	124,8	6,9	156
CM	189,16	1,38	1,38	1,38	49,92	2,76	62,4
NM	37	1	1	1	0	2	0

Posljednji korak je izračun zbirnih vrijednosti za vrijeme, ukupnu cijenu i efikasnost ručne montaže.

Dobivene zbirne vrijednosti za izvornu konstrukciju CroCubea iz obrasca (Tablica 6.) jesu:

$$TM = 472,89 \text{ s} - \text{ukupno vrijeme sklapanja}$$

$$CM = 189,16 \text{ centa} - \text{ukupna cijena sklapanja}$$

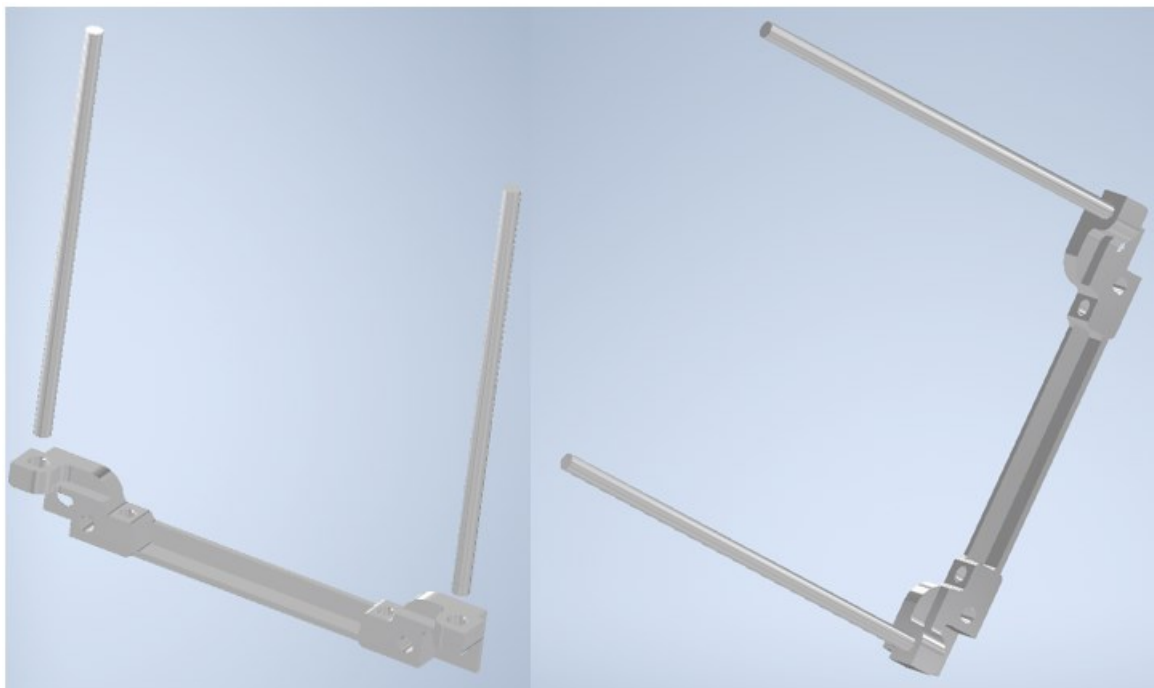
$$NM = 37 - \text{teoretski minimalan broj ugradbenih elemenata}$$

$$EM = 3 \times \frac{NM}{TM} = 0,2347 \text{ ili } 23,47 \% - \text{efikasnost ručne montaže.}$$

11.2. Preoblikovanje proizvoda i ponovna analiza

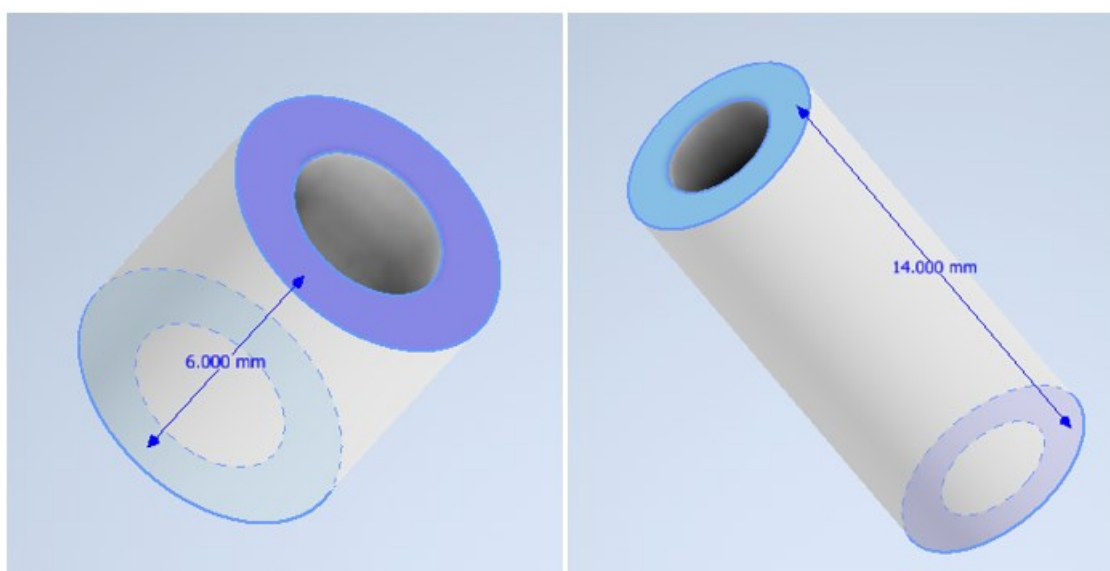
Nakon provedene analize pokušava se preoblikovati proizvod kako bi se omogućila njegova lakša montaža (a eventualno čak i izradba).

Dijelovi koji se mijenjaju su rebra A i B, spajaju se rebra s dvije navojne šipke, te se šipke produljuju (Slika 20.). Tako se od tri dijela dobiva jedan dio, a zadržava funkcionalnost.

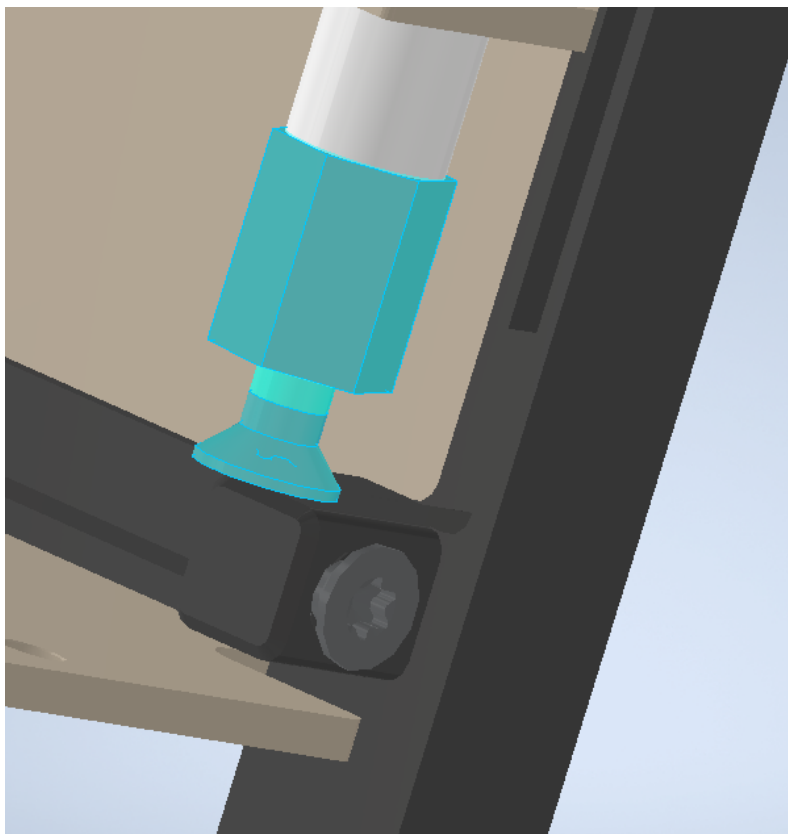


Slika 20. Rebro A i dvije navojne šipke: lijevo izvorno, desno preoblikovano – jedan dio

Dodatna promjena je produživanje odstojnika E sa 6 mm na 14 mm kojim nepotrebne postaju četiri duge matice M2,5 i četiri vijka M2,5×8 mm (slike 21. i 22.).

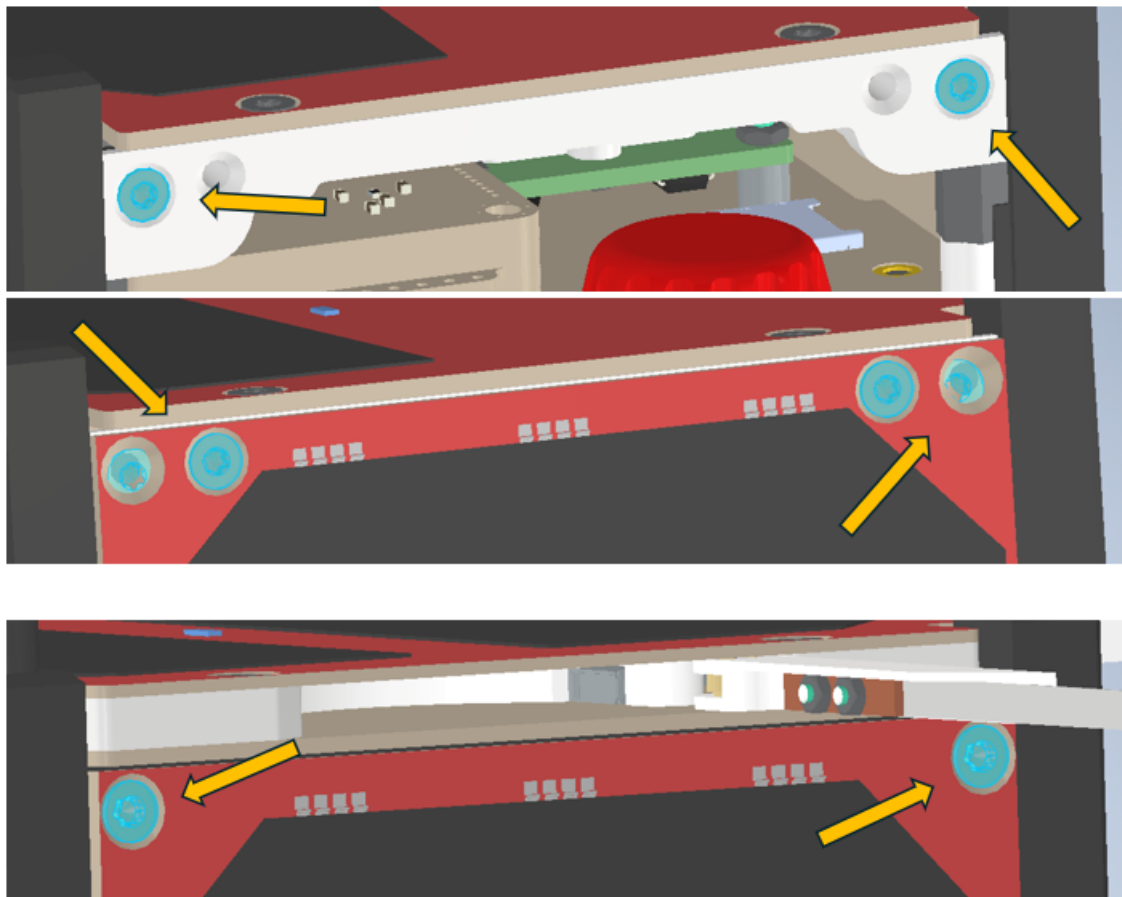


Slika 21. Odstojnik E: lijevo izvorni, desno preoblikovani



Slika 22. Duga matica i vijak M2,5×8 mm

Bočni okviri će se osiguravati vijcima M2,5×8 mm, istim kojima se osiguravaju i bočni paneli, na temelju toga nepotrebno postaje osam vijaka M2,5×6 mm (Slika 22.).

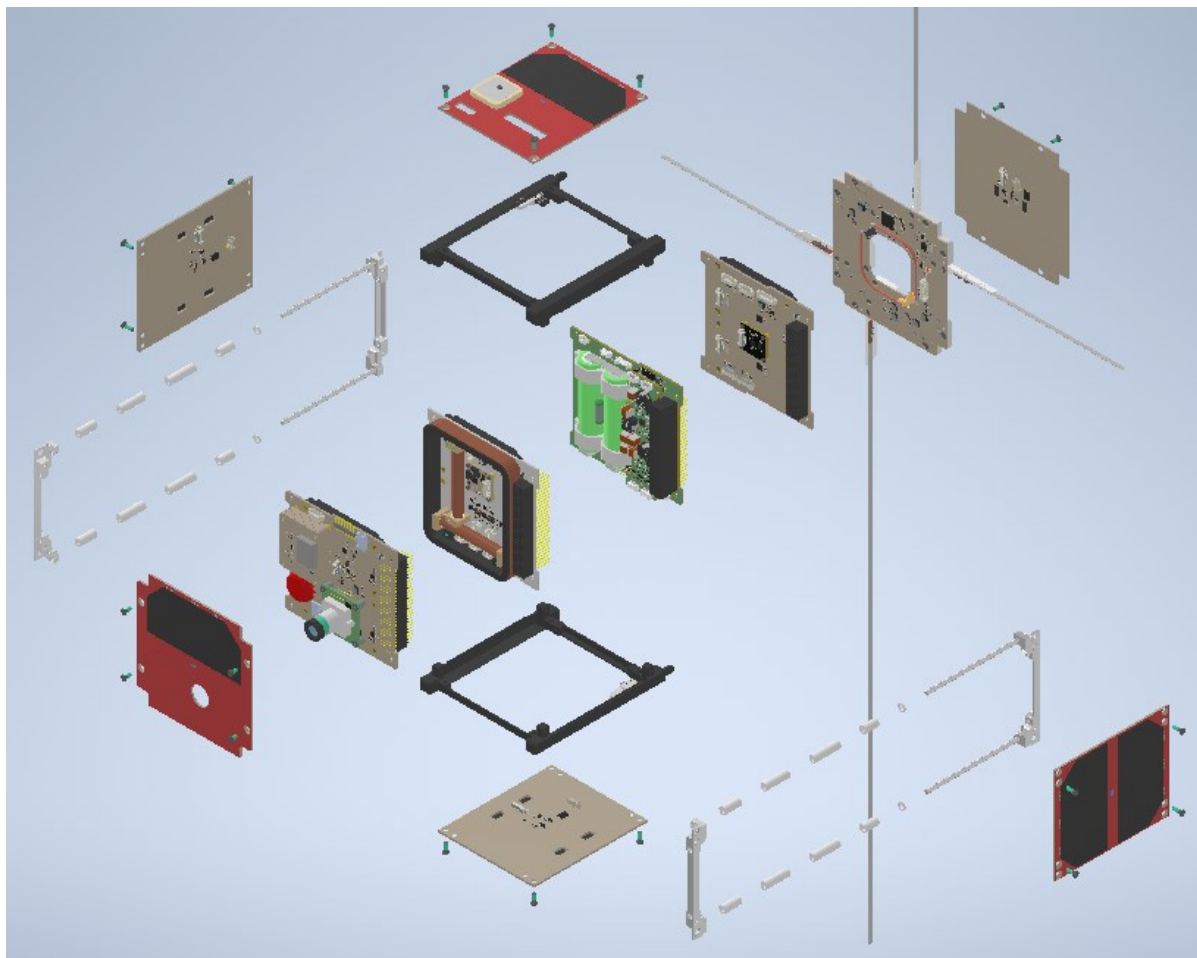


Slika 23. Vijci M2,5: Gore izvorno – dvije skupine vijaka, dolje preoblikovano – jedna skupina vijaka

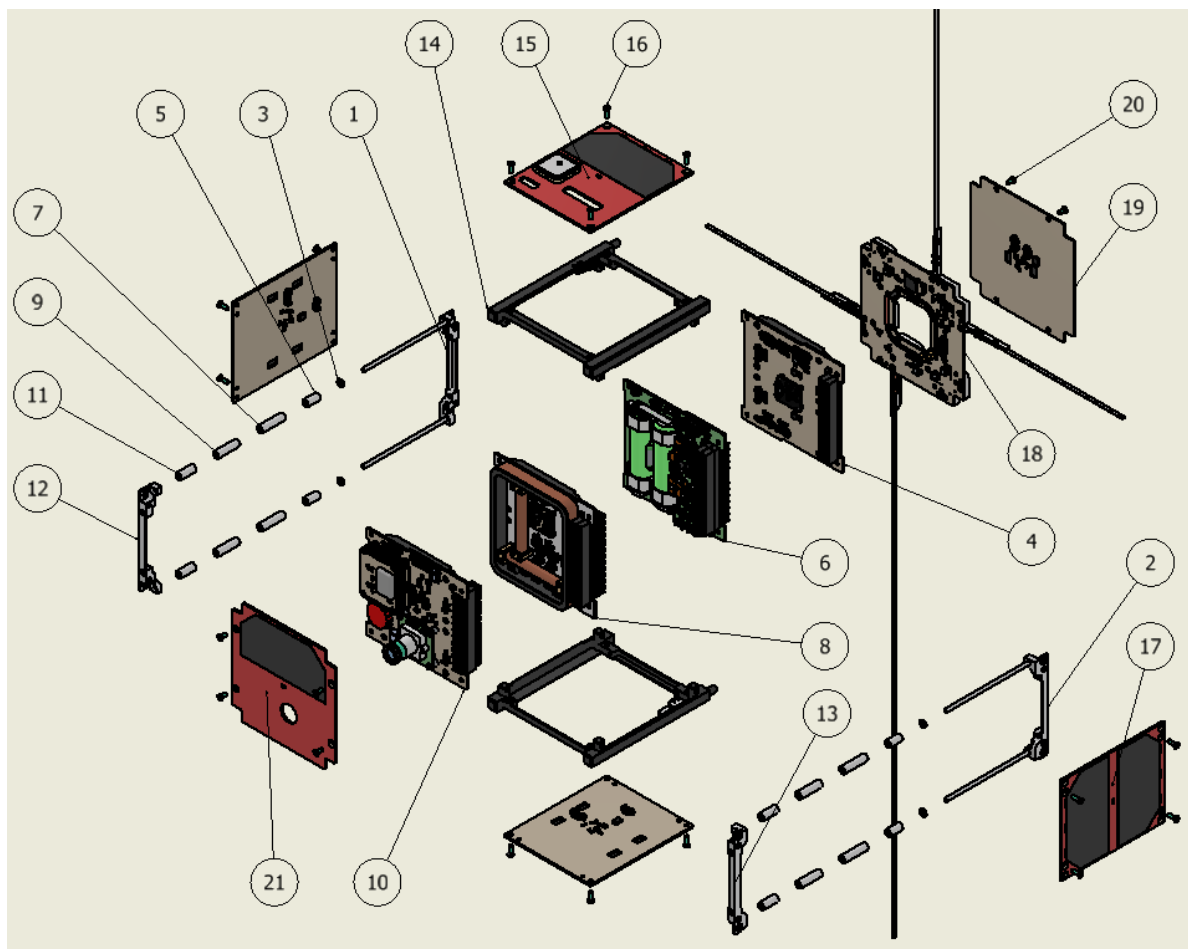
Preoblikovanjem je konačno smanjen ukupan broj dijelova s 81 na 61. Nije se uspjelo smanjiti broj dijelova na teoretski minimum (37) budući da bi se narušio strukturni integritet CroCubea.

Sastavnice su za preoblikovani CroCube dane tablicama 7. do 10. Valja napomenuti da preoblikovanje ishodi promjenom redoslijeda sklapanja (na primjer: bočni paneli se moraju ugraditi ranije kako bi se mogli staviti vijci M2,5×8 mm, koji ukrućuju sklop).

Nakon preinaka izvorne konstrukcije CroCubea (slike 24. i 25.), ponovno će se provesti analiza metodom DFA.



Slika 24. Ekspandirani prikaz ugradbenih elemenata CroCubea nakon preoblikovanja



Slika 25. Ugradbeni elementi CroCubea s dodijeljenim identifikacijskim brojevima nakon preoblikovanja

Tablica 7. Strukturna sastavnica CroCubea nakon preoblikovanja

Stupanj ugradnje	Oznaka ugradbenog elementa	Naziv ugradbenog elementa	Količina
.1	S1 (D1 do D17)	sklop A+	1
..2	D1	rebro A+	1
..2	D2	rebro B+	1
..2	D3	odstojnik A	4
..2	D4	glavno računalo	1
..2	D5	odstojnik B	4
..2	D6	baterijski sklop	1
..2	D7	odstojnik C	4
..2	D8	stabilizacijski sklop	1
..2	D9	odstojnik D	4
..2	D10	glavni teret	1
..2	D11	odstojnik E+	4
..2	D12	rebro C	1
..2	D13	rebro D	1
..2	D14	bočni okvir	1
..2	D15	bočni panel s GPS-om	1
..2	D16	vijak M2,5×8 mm	4
..2	D14	bočni okvir	1
..2	D17	bočni panel	1
..2	D16	vijak M2,5×8 mm	4
.1	D17	bočni panel	1
.1	D16	vijak M2,5×8 mm	4
.1	D17	bočni panel	1
.1	D16	vijak M2,5×8 mm	4
.1	D18	antenski sklop	1
.1	D19	donji panel	1
.1	D20	vijak M2,5×6 mm	4
.1	D21	gornji panel	1
.1	D20	vijak M2,5×6 mm	4

Tablica 8. Modularna sastavnica Sklopa A+

Sklop A+, Kućište s glavnim modulima nakon preoblikovanja			
Redni broj	Oznaka ugradbenog elementa	Naziv ugradbenog elementa	Količina
1	D1	rebro A+	1
2	D2	rebro B+	1
3	D3	odstojnik A	4
4	D4	glavno računalo	1
5	D5	odstojnik B	4
6	D6	baterijski sklop	1
7	D7	odstojnik C	4
8	D8	stabilizacijski sklop	1
9	D9	odstojnik D	4
10	D10	glavni teret	1
11	D11	odstojnik E+	4
12	D12	rebro C	1
13	D13	rebro D	1
14	D14	bočni okvir	2
15	D15	bočni panel s GPS-om	1
16	D16	vijak M2,5×8 mm	8
17	D17	bočni panel	1

Tablica 9. Modularna sastavnica CroCubea nakon preoblikovanja

CroCube			
Redni broj	Oznaka ugradbenog elementa	Naziv ugradbenog elementa	Količina
1	S1	sklop A+	1
2	D16	vijak M2,5×8 mm	8
3	D17	bočni panel	2
4	D18	antenski sklop	1
5	D19	donji panel	1
6	D20	vijak M2,5×6 mm	8
7	D21	gornji panel	1

Tablica 10. Količinska sastavnica CroCubea nakon preoblikovanja

Redni broj	Oznaka ugradbenog elementa	Naziv ugradbenog elementa	Količina
1	D1	rebro A+	1
2	D2	rebro B+	1
3	D3	odstojnik A	4
4	D4	glavno računalo	1
5	D5	odstojnik B	4
6	D6	baterijski sklop	1
7	D7	odstojnik C	4
8	D8	stabilizacijski sklop	1
9	D9	odstojnik D	4
10	D10	glavni teret	1
11	D11	odstojnik E+	4
12	D12	rebro C	1
13	D13	rebro D	1
14	D14	bočni okvir	2
15	D15	bočni panel s GPS-om	1
16	D16	vijak M2,5×8 mm	16
17	D17	bočni panel	3
18	D18	antenski sklop	1
19	D19	donji panel	1
20	D20	vijak M2,5×6 mm	8
21	D21	gornji panel	1

Ponovno se provodi analiza ručnog sklapanja (Tablica 11.) i računa se ukupno vrijeme i cijena montaže te njena efikasnost.

Tablica 11. Analiza ručnog sklapanja CroCubea nakon preoblikovanja

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Ime dijela	Identifikacijski broj dijela	$\alpha, ^\circ$	$\beta, ^\circ$	Debljina, mm	Veličina (duljina), mm	Broj uzastopnih izvođenja operacije	Oznaka rukovanja	Vrijeme rukovanja, s/dio	Oznaka umetanja	Vrijeme umetanja, s/dio	Vrijeme operacije, s, $(7) \times [(9) + (11)]$	Cijena operacije, cent, $0,4 \times (12)$	Potreban broj dijelova
odstojnik C	baterijski sklop	odstojnik B	glavno računalo	odstojnik A	rebro B+	rebro A+							
7	6	5	4	3	2	1							
180	360	180	360	180	360	360							
0	360	0	360	0	360	360							
6	19,5	6	15,5	1	9,7	9,8							
11,4	95,9	20,3	95,9	6	82,8	86,8							
4	1	4	1	4	1	1							
01	30	00	30	04	30	30							
1,43	1,95	1,13	1,95	2,18	1,95	1,95							
00	00	00	00	00	00	00							
1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5							
11,72	3,45	10,52	3,45	14,72	3,45	3,45							
4,69	1,38	4,21	1,38	5,89	1,38	1,38							
4	1	4	1	4	1	1							

bočni panel	vijak M2,5×8 mm	bočni panel s GPS-om	bočni okvir	rebro D	rebro C	odstožnik E+	glavni teret	odstožnik D	stabilizacijski sklop
17	16	15	14	13	12	11	10	9	8
360	360	360	360	360	360	180	360	180	360
360	0	360	360	360	360	0	360	0	360
5,4	4,7	9,6	15,4	9,7	9,8	6	39,1	6	19,9
98	8	98	121,5	82,8	86,8	13,9	95,9	22	95,9
3	16	1	2	1	1	4	1	4	1
30	11	30	30	30	30	01	30	00	30
1,95	1,8	1,95	1,95	1,95	1,95	1,43	1,95	1,13	1,95
06	38	06	00	00	00	00	00	00	00
5,5	6	5,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
22,35	156	7,45	6,9	3,45	3,45	11,72	3,45	10,52	3,45
8,94	62,4	2,98	2,76	1,38	1,38	4,69	1,38	4,21	1,38
3	0	1	2	1	1	4	1	4	1

rebro B+	rebro A+	gornji panel	vijak M2,5×6 mm	donji panel	antenski sklop
2	1	21	20	19	18
360	360	360	360	360	360
360	360	360	0	360	360
9,7	9,8	5,4	4,7	5,4	9,1
82,8	86,8	98	6	98	98
1	1	1	8	1	1
30	30	30	11	30	30
1,95	1,95	1,95	1,8	1,95	1,95
00	00	00	38	00	00
1,5	1,5	1,5	6	1,5	1,5
TM	3,45	3,45	124,8	3,45	3,45
CM	1,38	1,38	49,92	1,38	1,38
NM	1	1	0	1	1
	414,65				
	165,87				
	37				

Dobivene zbirne vrijednosti iz obrasca (Tablica 11.) jesu:

$TM = 414,65$ s – vrijeme sklapanja

$CM = 165,87$ centa – cijena sklapanja

$NM = 37$ – teoretski minimalan broj ugradbenih elemenata

$EM = 0,2677$ ili 26,77 % – efikasnost ručne montaže.

Valja zamijetiti da je teoretski minimalan broj dijelova i nadalje 37, no ne može ga se ostvariti a da se ne naruši strukturna cjelovitost CroCubea iskazana vrijednostima vibracija tijekom ispitivanja (ako se prekorače, nema lansiranja). Stoga broj dijelova CroCubea ostaje 61, pa konačno dobivene zbirne vrijednosti iznose:

$MM^* = 61$ – minimalan broj ugradbenih elemenata

$EM^* = 0,4413$ ili 44,13 % – efikasnost ručne montaže.

11.3. Zaključak nakon primjene metode DFA

Preoblikovanjem ugradbenih elemenata satelita CroCube povećala se efikasnost ručne montaže s 23,47 % na 44,13 % te se skratilo vrijeme sklapanja s 472,89 na 414,65 sekundi i broj potrebnih dijelova s 81 na 61. Time se snizilo cijenu nabavke i izradbe dijelova s obzirom na manji ukupni broj dijelova, i cijenu montaže s obzirom na kraće vrijeme potrebno za montažu.

Ustanovljen je teoretski minimalan broj dijelova 37, no smatra se da nije ostvariv a da se ne naruši strukturni integritet CroCubea.

U pogledu izradivosti, rebro A+ i rebro B+ su postali zahtjevniji za izradbu jer se mora iz jednog komada proizvesti rebro sa šipkama. Za razliku od rebara, bočni paneli su se izradbeno pojednostavnili jer nije više potrebno imati dva seta provrta za vijke već samo jedan.

12. VIBRACIJE CUBESATA

Sateliti prolaze kroz rigorozna testiranja uključujući vibracijska, termalna i vakuumska ispitivanja kako bi se osigurala njihova otpornost na uvjete lansiranja i svemirskog okruženja. Zahtjevi za ispitivanjem dolaze od lansirnih kompanija kako bi se osiguralo od eventualnog kvara, a ujedno se ispituje kako bi se osigurali svi parametri misije. Cube sateliti se moraju testirati na iste uvjete i jednake parametre te način prihvata kao što je i kod polijetanja rakete.

12.1. Prihvat i izbacivanje CubeSata iz rakete

Izbacivači satelita iz rakete predstavljaju značajnu komponentu za realizaciju svih misija CubeSata, specifično za točno izbacivanje satelita na određenu visinu i orbitu. Sustavi za izbacivanje CubeSat satelita, poznati kao CubeSat izbacivači (eng. *CubeSat deployers*), ključni su za sigurno i kontrolirano oslobađanje CubeSat satelita u svemiru. Omogućuju pravilno postavljanje satelita na njihove određene orbite i sprječavaju oštećenja tijekom lansiranja. CubeSat izbacivač drži satelit na mjestu tijekom lansiranja i sigurno ga oslobađa u svemiru, osiguravajući stabilnost i sigurnost.

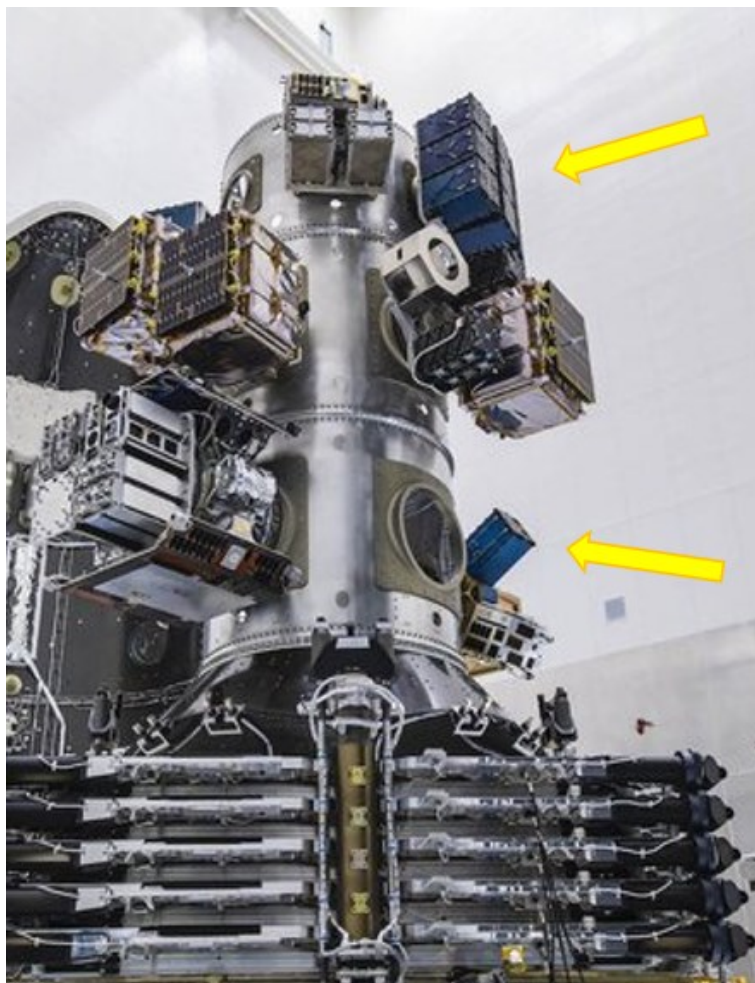
Građeni su od aluminijskih ili kompozitnih kućišta s oprugom koja služi kao spremište energije koje izbacuje satelit iz rakete (Slika 26.). Sustav koristi niz odjeljaka u kojima se više CubeSat satelita može sigurno smjestiti tijekom lansiranja. Kada se raketa postavi na odgovarajuću orbitu, vrata svakog odjeljka se otvaraju i sateliti se oslobađaju. [13]



Slika 26. CubeSat izbacivač [27]

Ovi sustavi moraju izdržati ekstremne uvjete lansiranja, uključujući vibracije pri visokim frekvencijama i velika ubrzanja. [29] Mehanizam za oslobađanje aktivira se kada raketa postigne odgovarajuću orbitu, precizno otvarajući vrata izbacivača i oslobađajući CubeSat u svemir. Preciznost je ključna jer čak i mala pogreška može rezultirati pogrešnom orbitom ili oštećenjem satelita.

Bez ovih sustava, CubeSati bi mogli biti oštećeni tijekom lansiranja ili ne bi bili pravilno oslobođeni u svemiru. Stoga je ključno da se izbacivači sa satelitima pravilno integriraju na raketu (Slika 27.). Uz to se ti sustavi, kao i sam satelit, temeljito ispituju prije lansiranja, uključujući simulaciju uvjeta lansiranja i provjeru ispravnog rada mehanizma za oslobađanje. [13] Stoga je od presudne važnosti, radi složenosti satelitskog sustava, provoditi vibracijska ispitivanja na gotovom satelitu. Uz to dodatno se rade simulacije vibracija u procesu konstruiranja satelita kako bi se poboljšala konstrukcija i dobile okvirne vrijednosti za kasnije ispitivanje. To se radi kao provjera i može dati približna preliminarna rješenja, ali i dalje ne potpuno pouzdana.



Slika 27. Izbacivači montirani na raketu [28]

12.2. Vibracijsko ispitivanje CroCubea

U strojarstvu, nasumična vibracija je gibanje koje je nedeterminističko, što znači da se buduće ponašanje ne može precizno predvidjeti. U općem testu nasumične vibracije, vibracijski stol istovremeno generira vibracije na više frekvencija, s nasumično promjenjivim ubrzanjem na više različitih frekvencija. Takvi testovi pokušavaju simulirati razne uvjete, poput vibracija tijekom transporta na zemlji, utjecaja oceanskih valova i vibracija uzrokovanih akustičnim ili aerodinamičkim fluktuacijama tlaka tijekom lansiranja svemirske opreme.

Određena količina nasumičnih vibracija prisutna je u cijelom lansirnom vozilu tijekom cijelog vremena rada motora. Međutim, razine koje tereti doživljavaju obično su značajne samo tijekom lansiranja, kada se akustični valovi odbijaju od okolnih struktura i tijekom

nadzvučne faze uspona. Ukupno trajanje visokih razina nasumičnih vibracija obično je manje od 15 sekundi. U svemirskoj industriji, test nasumičnih vibracija obično obuhvaća frekvencijsko područje od 20 do 2000 Hz i provodi se jednu minutu. [29]

Svaki satelit mora proći ovakve testove, a CroCube je radio vibracijsko ispitivanje prema parametrima zadanim od SpaceXa kao lansirne kompanije. Svrha testiranja je osigurati strukturni integritet tereta tijekom dinamičkih opterećenja tijekom leta. Izlaganje okolini nasumičnih vibracija osigurava da primarne strukture, sekundarne strukture, sastavni dijelovi tereta i manji dijelovi budu izloženi opterećenjima tijekom leta s dodatnom sigurnosnom marginom. Ovo izlaganje je potrebno za sigurnost misije i sigurnost ostalih tereta. [30]

Izvođenje ispitivanja je u dva koraka. Prvo se traže vlastite ili prirodne frekvencije svih dijelova prema definiranim parametrima (Tablica 12).

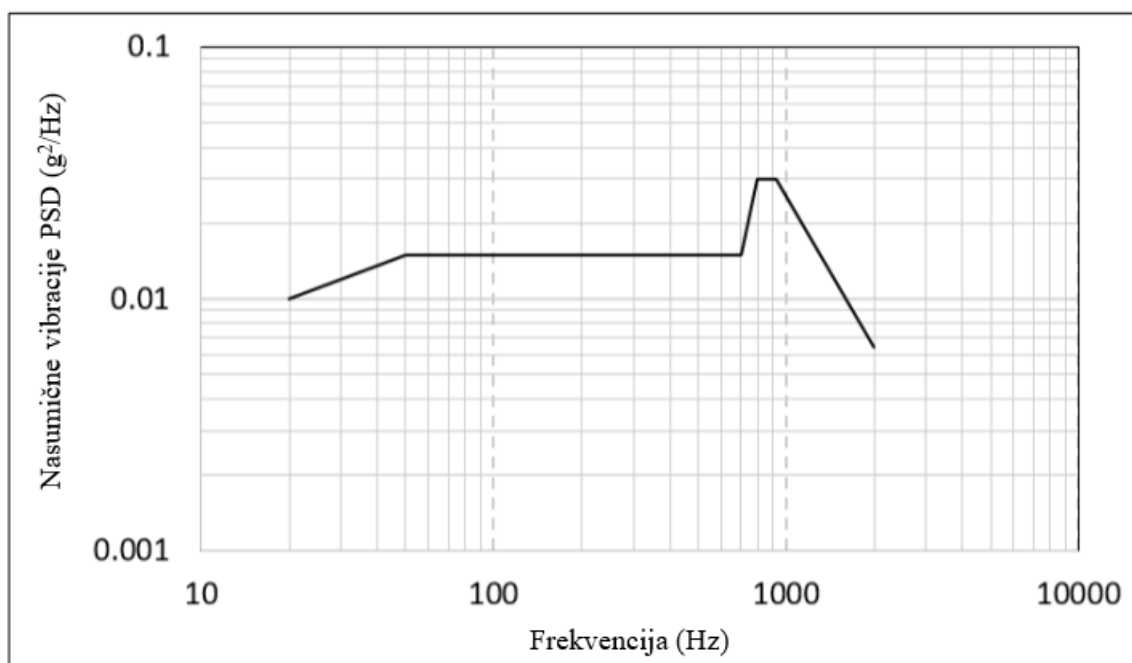
Tablica 12. Specifikacije za traženje prirodnih frekvencija

Os	Frekvencija, Hz	Akceleracija, g	Brzina pretraživanja, oct/min
<i>X, Y, Z</i>	5 do 2000	0,2	2

Nakon toga se izvodi vibriranje uzorka u određenoj okolini oko sve tri osi, a nju definiramo prema njenom frekvencijskom sadržaju. To činimo uz pomoć gustoće spektra ubrzanja (ASD, eng. *Acceleration Spectral Density*) u odnosu na frekvenciju unutar određenog frekvencijskog raspona (Tablica 12. i Slika 28.). Općenitije, ovaj se pojam naziva gustoća spektra snage (PSD, eng. *Power Spectral Density*), a koristi se za obradu bilo kojeg nasumičnog signala. [29] Slika 28. predstavlja graf koji govori o načinu vibriranja rakete prilikom polijetanja. Kako se vibracije prenose s rakete na satelit, po istoj se krivulji prilikom testiranja vibrira i satelit.

Tablica 13. Podaci za dijagram PSD

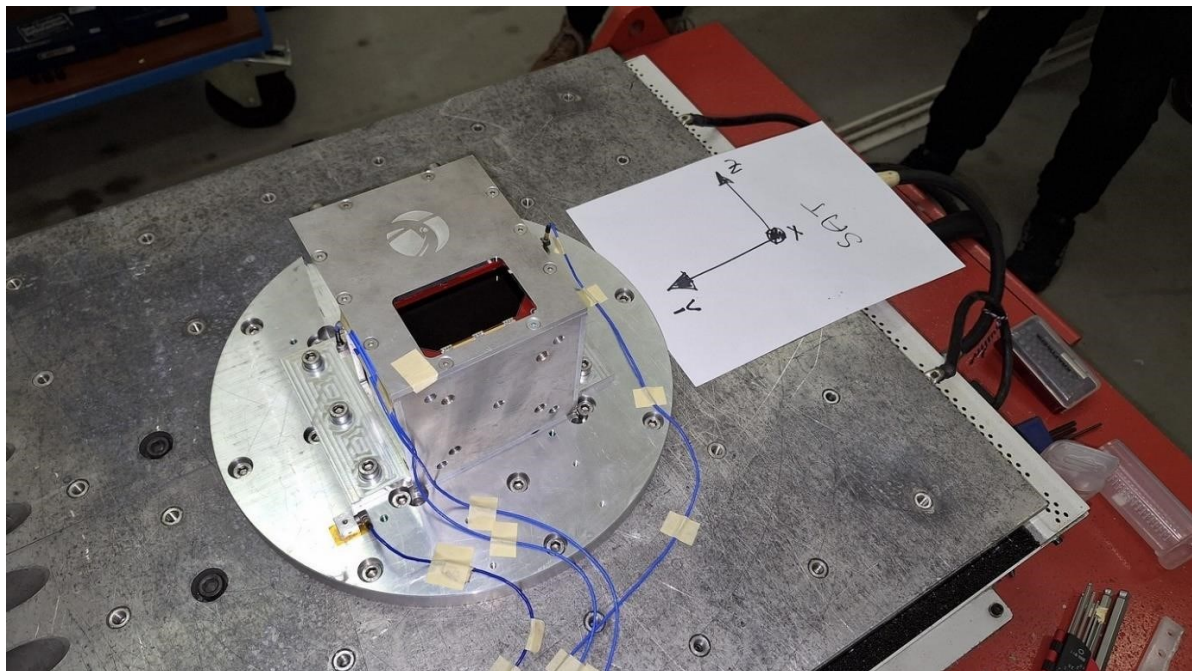
Frekvencija, Hz	Nasumične vibracije PSD, g ² /Hz
20	0,01
50	0,015
700	0,015
800	0,03
925	0,03
2000	0,00644



Slika 28. Dijagram PSD [30]

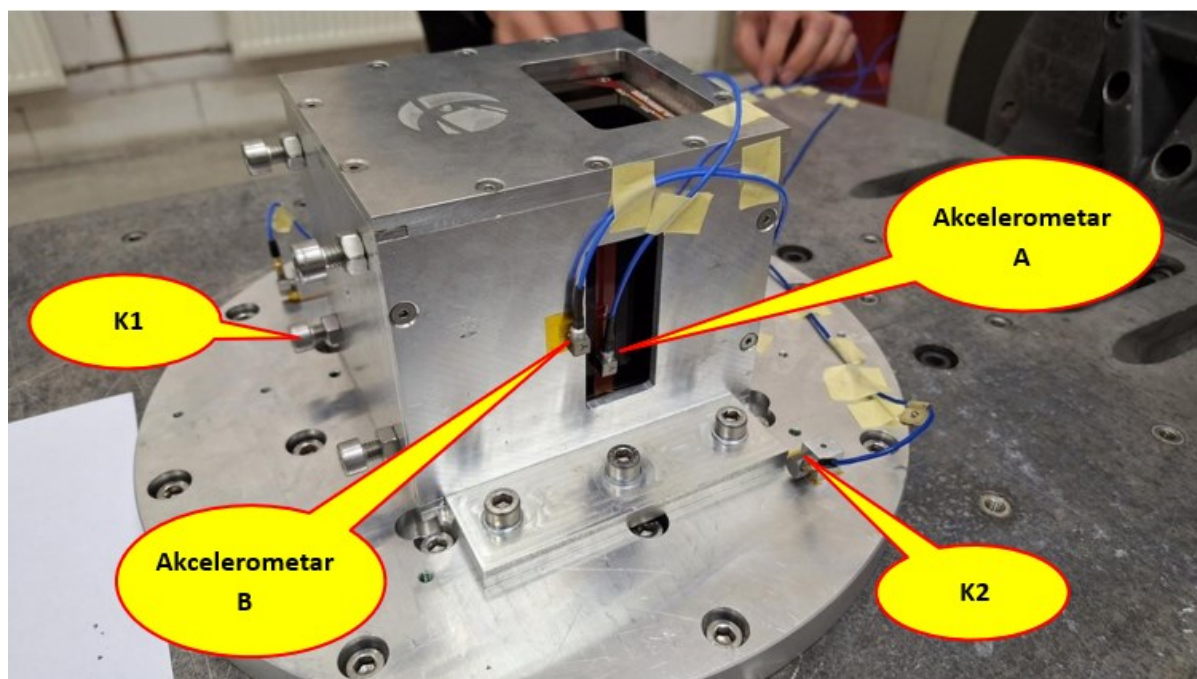
12.2.1. Postavke ispitivanja

CroCube se testirao na vibracijskom stolu u tri različite orijentacije za pobudu u svakoj od tri ortogonalne osi X , Y i Z . Primjer konfiguracije za os Y prikazan je na slici 29.



Slika 29. Pozicioniranje satelita na vibro stolu

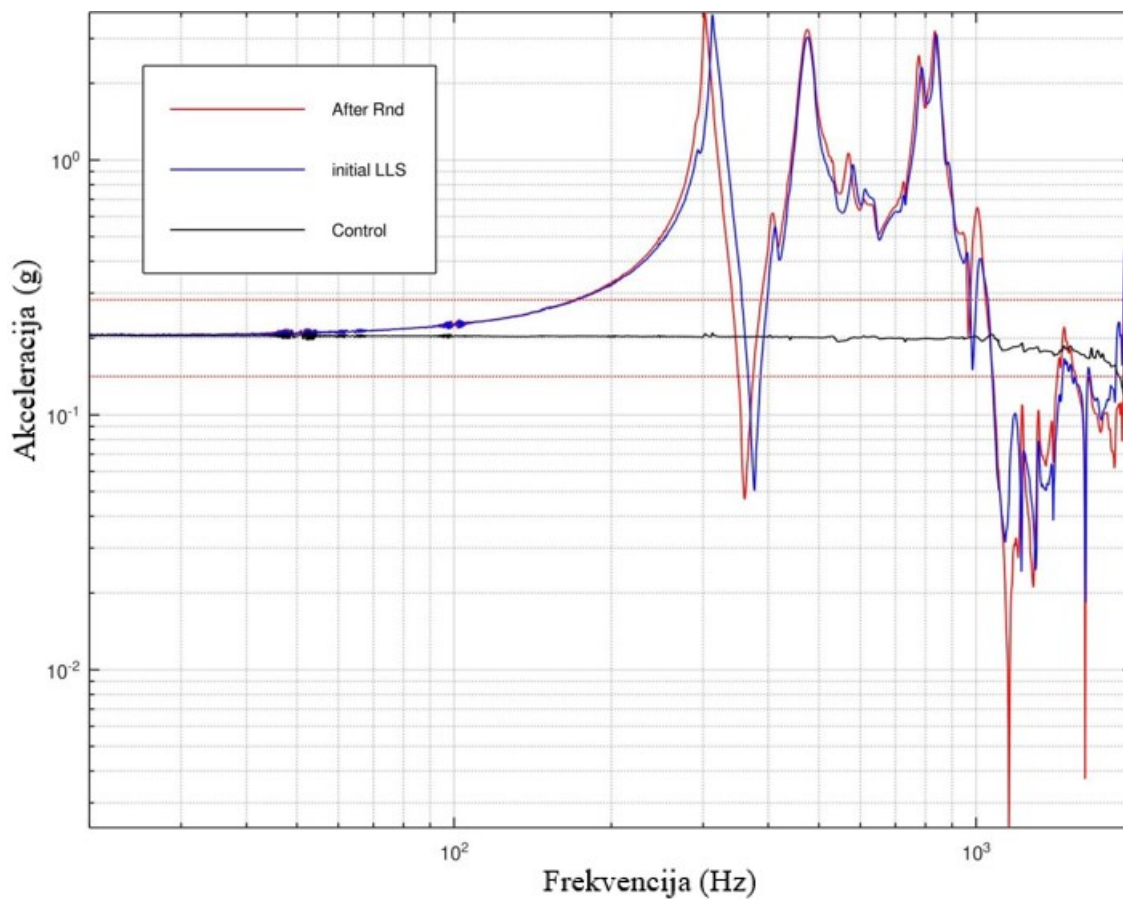
Nakon pozicioniranja provodi se vibriranje po specifikacijama iz prošlog poglavlja, koje definira lansirna kompanija. Mjerenje se ostvaruje pomoću akcelerometara koji mjere akceleraciju u sve tri osi. Na testu se koriste četiri akcelerometra (Slika 30.), akcelerometar A i B su glavni kanali koji mjere ponašanje satelita, dok su K1 i K2 kontrolni kanali za vibro stol.



Slika 30. Pozicioniranje akcelerometara

12.2.2. Rezultati ispitivanja

Podatci dobiveni nasumičnim vibriranjem se trebaju interpretirati, to jest trebaju se prikazati najbitniji podatci za lansirnu kompaniju, a to su je li došlo do pucanja ili odvajanja određenih elemenata u sustavu. Kako bi se to postiglo, radi se test sinusnog pretraživanja na niskoj razini (LLS, eng. *Low Level Sine*) prije i poslije nasumičnog vibriranja te se onda ti podaci uspoređuju i na temelju njih se donose zaključci (Slika 31. i Tablica 14.).



Slika 31. Graf usporedbe LLS prije i poslije, smjer Y

Tablica 14. Usporedba vršnih vrijednosti frekvencije i amplitude

Os/ Kanal	Vršna vrijednost	Frekvencija prije, Hz	Frekvencija poslije, Hz	Odstupanje, %	Amplituda prije, g	Amplituda Poslije, g	Odstupanje, %
Y/Akc A	Y1	313,3	301,8	-3,67	3,717	3,792	2,02
Y/Akc A	Y2	476	474,8	-0,25	3,032	3,243	6,9
Y/Akc A	Y3	839,1	833	-0,73	3,106	3,21	3,3

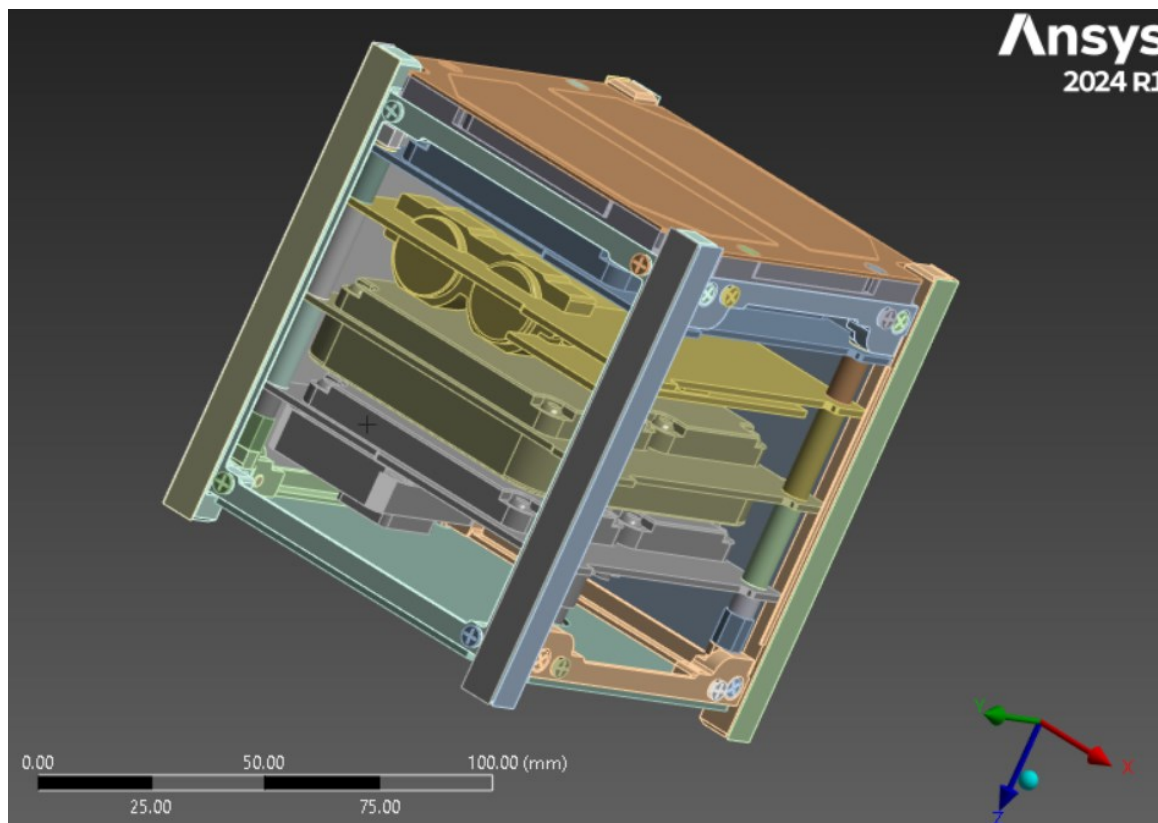
Kod interpretacije rezultata gledaju se samo najveće amplitude, najveći g ($1 g \sim 9,81 \text{ m/s}^2$, akceleracija svedena na gravitacijsko ubrzanje) na grafu i kod kojih frekvencija se javljaju. Odstupanje, to jest razlika prije i poslije između frekvencije i prije i poslije između amplitude ne smije biti veća od 10 % jer bi u tom slučaju došlo do prevelikog otezanja određenih spojeva ili pucanja određenih dijelova. Osim usporedbe rezultata akcelerometra, radi se i dodatna vizualna provjera.

12.3. Simulacija vibracijskog ispitivanja CroCubea

Simulacija se radi kako bi se vidjelo može li se olakšati proces konstruiranja satelita u početnim fazama izrade te uštedjeti vrijeme i novac u kasnijim procesima. Kako bi se vidjelo hoće li budući satelit, kad se napravi samo 3D model, moći izdržati naprezanja prilikom lansiranja, radi se simulacija vibracijskog testiranja koje simulira uvjete vibracijskog testa na vibro stolu. Očekivano je da kod ovakvih simulacija dođe do velikog odstupanja od eksperimenata i stvarnih vrijednosti. Unatoč tome, dolazak do rezultata prije stvarnog ispitivanja i mogućnost kasnije usporedbe s eksperimentalnim podacima, predstavlja značajne vrijednosti pri konstruiranju i u procesu razrade satelita.

12.3.1. Postavke simulacije

Za izradu simulacije koristio se programski paket Ansys 2024. Tijek simulacijskog procesa započinje izradom 3D modela satelita, u ovom slučaju CroCubea te pojednostavljenja modela (Slika 32.) tako da se izbace sve nepotrebne i zahtjevne značajke koje bi otežale i produljile simulaciju. Izbačene su sve nepotrebne značajke kao što su mali provrti, skošenja i zaobljenja te svi dijelovi manji od 5 mm kao što su čipovi.



Slika 32. Pojednostavnjeni model satelita

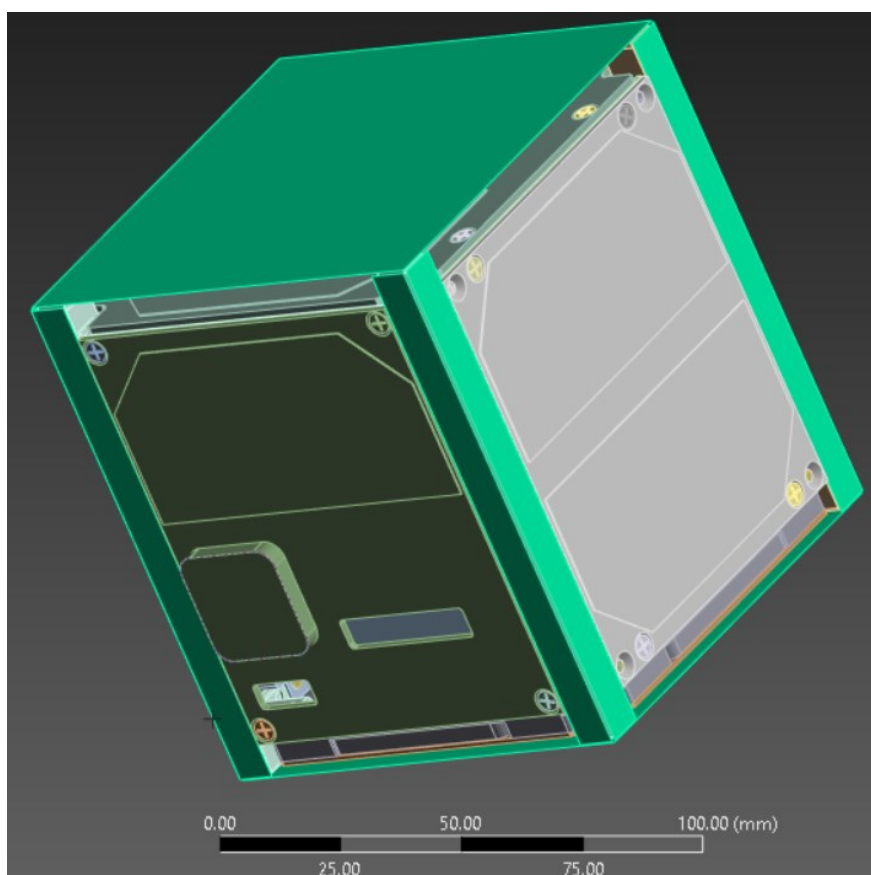
Zatim se definiraju materijali svih dijelova u sustavu, a preko njih se dolazi do masa dijelova. Sve veze između dijelova moraju biti definirane. U ovoj simulaciji korištena su dva tipa veza:

1. Bez odvajanja (eng. *no separation*), gdje je klizanje moguće, ali su dijelovi u kontaktu vezani za ciljnu površinu u normalnom smjeru.
2. S trenjem (eng. *frictional*), gdje može doći do klizanja, ali postoji koeficijent trenja kojeg definira korisnik, uz to slobodno se može gibati u normalnom smjeru.

Sljedeći korak je izrada mreže konačnih elemenata svih dijelova, za koji se definira specifična veličina i tip elementa, te se prema njima dijeli svaki dio u manje elemente koji služe za daljnji proračun. U ovoj simulaciji korišteni su tetraedarski i heksaedarski oblici te površinski i trodimenzionalni elementi. Sad su definirani svi potrebni parametri za početak simulacije.

U simulaciju se ulazi s traženjem vlastitih frekvencija svih dijelova od 5 do 2000 Hz. Za to je potrebno označiti rubne uvjete. Rubni uvjeti su definirani kao da se satelit nalazi u izbacivaču

na raketi i napravljeno je deset krutih površina (Slika 33.) koje predstavljaju površine dodira između satelita i izbacivača te su definirane kao veze bez odvajanja.



Slika 33. Površine definirane za rubne uvjete – zeleno

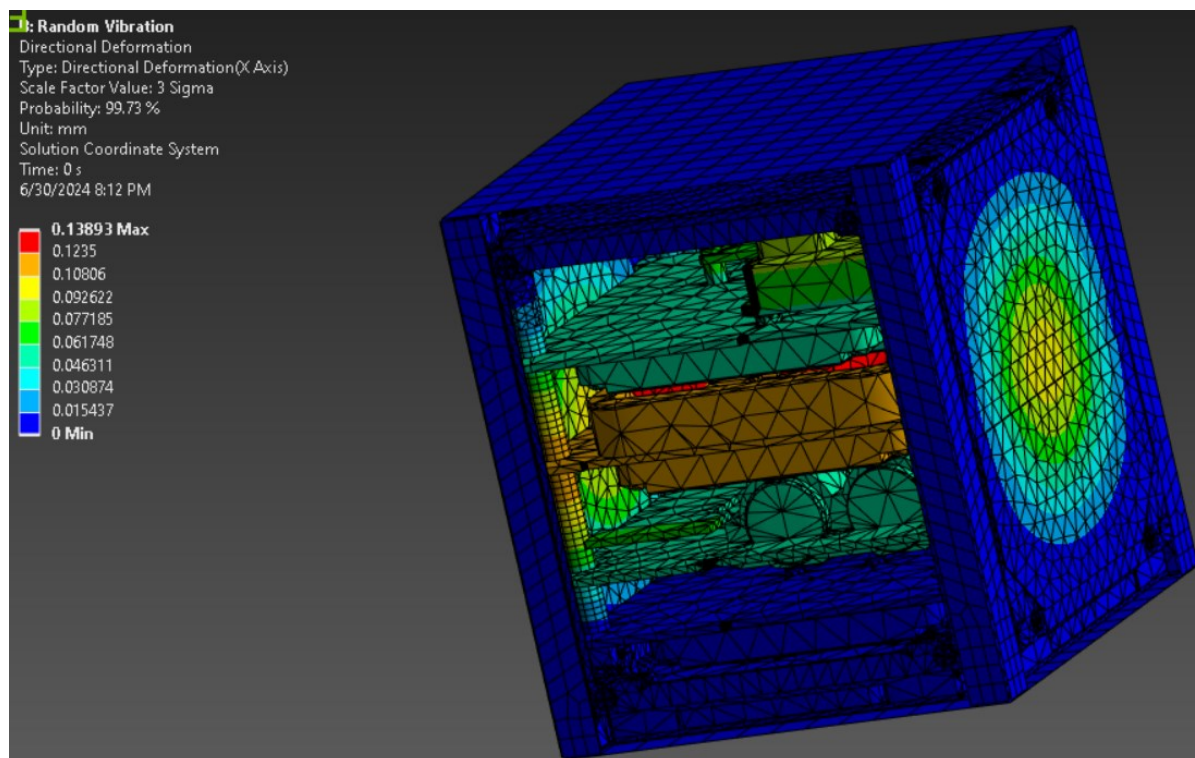
Izvodi se simulacija vibracijskog testiranja tako da se vibrira po istom PSD dijagramu po kojem se vibriralo i na vibro stolu, oko svake od tri ortogonalne osi.

12.3.2. Rezultati simulacije i usporedba sa stvarnim rezultatima ispitivanja

Ovakve simulacije su izuzetno zahtjevne za dobivanje točnih rezultata jer postoji mnogo parametara koji ulaze u proračun, neki od njih su koeficijent trenja, izbor materijala, dobra i dovoljno gusta mreža konačnih elemenata, rubni uvjeti i drugo. Iz tih razloga i dalje je potrebno raditi vibracijska i druga ispitivanja na stvarnom satelitu.

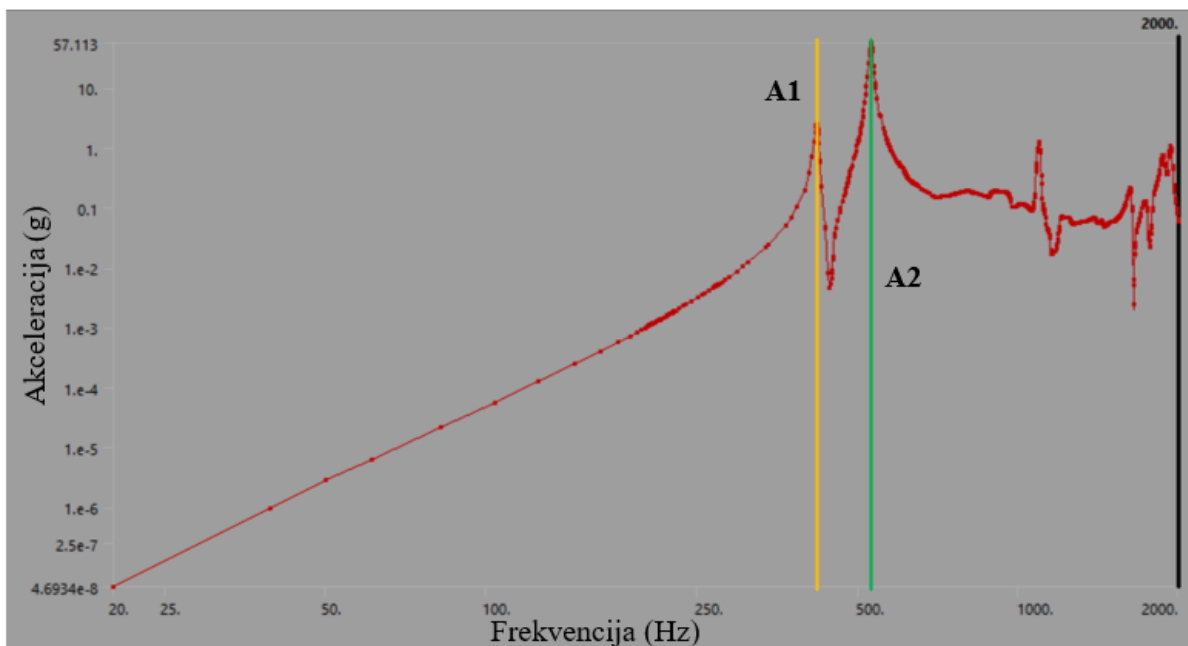
Kao rezultat simulacije mogu se gledati razne vrijednosti. Deformacija u smjeru osi u kojoj se vibrira prikazuje najveće pomake od početne pozicije (Slika 34.). Najveći pomak u smjeru osi

X je na centru bočnog panela i iznosi 0,1071 mm te u unutrašnjosti satelita, na sredini navojne šipke i iznosi 0,1389 mm. Najveći pomaci se ostvaruje na mjestima najveće udaljenosti od krutog spoja, to jest na mjestima najmanje krutosti dijelova u odnosu na ostatak konstrukcije.

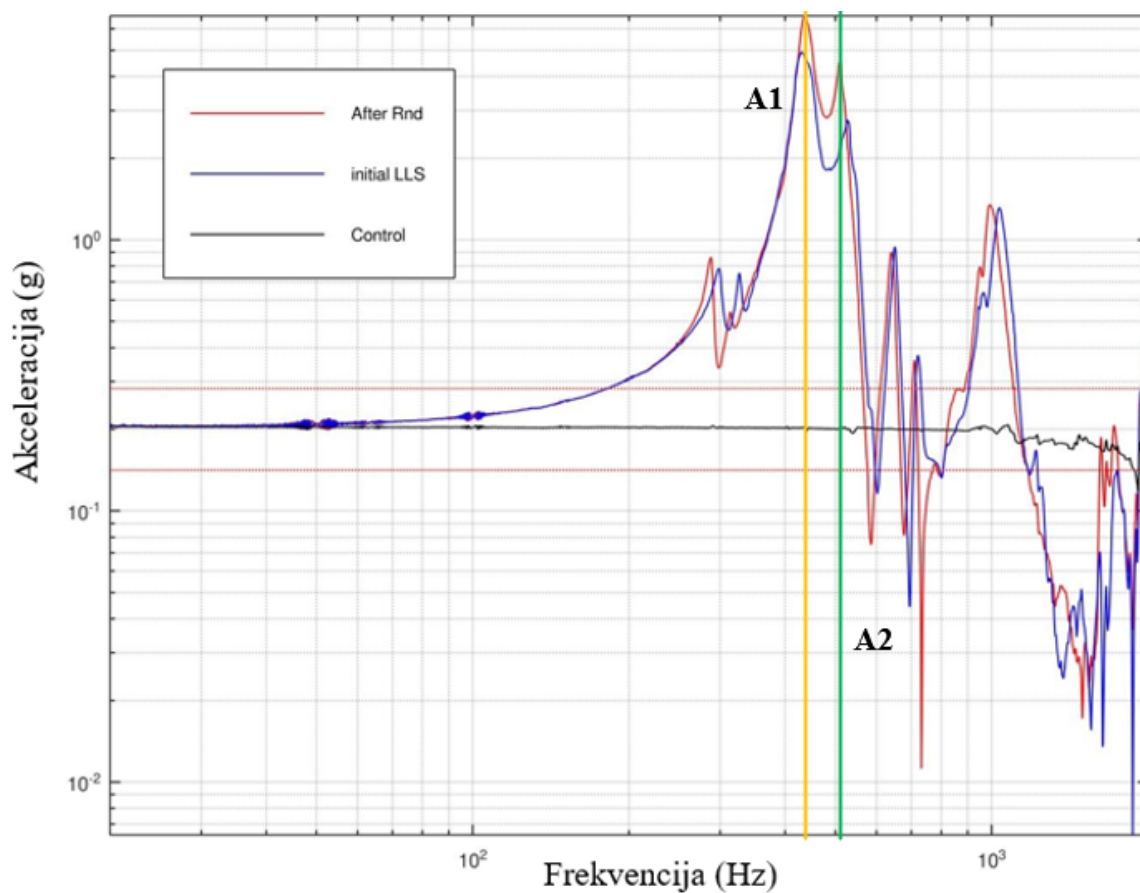


Slika 34. Deformacija u smjeru X osi

Simulirani podaci daju graf ubrzanja (Slika 35.) koji prikazuje odziv u odnosu na frekvenciju od 5 do 2000 Hz za os X . Rezultati vibracijskog testiranja prikazani u grafu za os X (Slika 36.) uspoređuju se s rezultatima iz simulacije. Prve vršne vrijednosti i njihove frekvencije su najbitniji pokazatelji za usporedbu (narančasta i zelena linija prikazuju ključne vršne vrijednosti), te se može vidjeti sličnost grafova i podudaranje prve i druge vršne vrijednosti, to jest vlastite kružne frekvencije. Uspoređena prva vršna vrijednost $A1$ amplitude i frekvencije (Tablica 15.) pokazuje frekvenciju od 418,8 Hz i 432,6 Hz, te amplitudu od 2,491 g i 5,819 g. Uspoređena druga vršna vrijednost $A2$ pokazuje frekvenciju od 529,1 Hz i 517,5 Hz, te amplitudu od 54,875 g i 3,656 g. Dok se amplitude (ubrzanja) ne poklapaju najbolje, odlično poklapanje frekvencija se ostvaruje jer se mjerenje provodi na bočnim stranicama satelita za što simulacijski model može dati pouzdana rješenja. Međutim, mjerenja na bočnim stranicama u smjeru Z osi (smjer najveće krutosti), kao što je bilo i za očekivati je numerički jako zahtjevno i daje rezultate s velikim odstupanjima.



Slika 35. Rezultati simulacije za X os



Slika 36. Rezultati vibracijskog ispitivanja za X os

Tablica 15. Usporedba rezultata vibracijskog testa i simulacije

Vršna vrijednost	Frekvencija prije	Frekvencija poslije	Amplituda prije	Amplituda poslije
	Frekvencija, Hz		Amplituda, g	
A1 (simulacija)	418,8		2,491	
A2 (simulacija)	529,1		54,875	
A1 (vibro test)	429,5	435,6	4,933	6,705
Srednja vrijednost	432,6		5,819	
A2 (vibro test)	525,3	509,6	2,807	4,504
Srednja vrijednost	517,5		3,656	

13. ZAKLJUČAK

Razvoj i lansiranje malih satelita, kao što je CroCube, predstavljaju značajan napredak u svemirskoj tehnologiji i istraživanju. Kroz ovaj rad obuhvaćene su sve ključne faze od konstruiranja do lansiranja satelita, uključujući detaljnu analizu komponenti, sustava i vibracijskih testova.

Satelit CroCube pokazuje kako minijaturizacija i napredak u tehnologiji omogućuju smanjenje troškova i povećanje funkcionalnosti svemirskih misija.

Korištenjem metode DFA CroCube je optimiran za ručno sklapanje. Preoblikovanjem i pojednostavnjenjem ugradbenih elemenata te smanjenjem broja dijelova s 81 na 61 došlo se do povećanja efikasnosti montaže s 23,47 % na 44,13 %. Time se snizila cijena nabavke i proizvodnje dijelova te se smanjilo vrijeme potrebno za montažu s 472,89 na 414,65 sekundi.

Usporedba ispitivanja i simulacija vibracijskih opterećenja dokazali su sličnost između stvarnih i simuliranih rezultata, čime su potvrđene kvaliteta i strukturna stabilnost konstrukcije CroCubea. Dolazak do rezultata prije stvarnog ispitivanja i mogućnost kasnije usporedbe s eksperimentalnim podacima, predstavlja značajne vrijednosti pri konstruiranju i u procesu razrade satelita, ali i dalje nije potpuno točno i pouzdano. Zbog toga, potrebno je raditi vibracijska i druga ispitivanja na stvarnom satelitu. Ova ispitivanja osiguravaju da će satelit izdržati ekstremne uvjete tijekom lansiranja i rada u orbiti, omogućujući mu uspješno izvršavanje predviđene misije.

Sveobuhvatni pristup izradi CroCubea, od dizajna preko ispitivanja do lansiranja, može poslužiti kao model za buduće projekte malih satelita, doprinoseći daljnjem razvoju i inovacijama u svemirskoj industriji. Ovaj rad pruža uvide i praktične primjene koje će koristiti istraživačima i inženjerima u budućim misijama za istraživanje svemira.

14. LITERATURA

- [1] <https://aerospace.org/article/brief-history-space-exploration> pristupljeno 2024-01-15
- [2] <https://chaire-sirius.eu/f/Note-SIRIUS-Satellite-Miniaturization.pdf> pristupljeno 2024-01-15
- [3] <https://blog.maxar.com/earth-intelligence/2016/frequently-asked-questions-about-worldview-4> pristupljeno 2024-01-17
- [4] <https://www.merriam-webster.com/dictionary/spacecraft> pristupljeno 2024-01-18
- [5] <https://eos.com/blog/small-satellites/> pristupljeno 2024-01-18
- [6] https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits pristupljeno 2024-01-21
- [7] <http://article.sapub.org/10.5923.j.ijnc.20180805.01.html> pristupljeno 2024-01-26
- [8] <https://www.nasa.gov/what-are-smallsats-and-cubesats/> pristupljeno 2024-01-27
- [9] <https://gisgeography.com/cubesat/> pristupljeno 2024-02-10
- [10] <https://nanoavionics.com/blog/cubesat-101-the-comprehensive-guide-to-understanding-satellite-technology/> pristupljeno 2024-02-10
- [11] <https://newspaceconomy.ca/2023/05/18/what-are-the-key-technology-components-of-cubesats/> pristupljeno 2024-02-10
- [12] https://www.researchgate.net/figure/Materials-used-in-CubeSat_tbl1_330225008 pristupljeno 2024-02-10

- [13] J. Kandrata, V. Lukić: Izrada i lansiranje malih satelita, Tehnička škola Sisak regionalni centar kompetentnosti u sektoru elektronika i računalstvo, 2023.
- [14] <https://brightascension.com/what-are-the-components-of-a-cubesat/> pristupljeno 2024-02-11
- [15] https://www.unoosa.org/documents/pdf/psa/access2space4all/KiboCUBE/AcademySeason2/On-demand_Pre-recorded_Lectures/KiboCUBE_Academy_2021_OPL09.pdf pristupljeno 2024-02-12
- [16] https://www.ece3sat.com/pdf/Actuators_ADCS.pdf pristupljeno 2024-02-15
- [17] https://cubesats.gsfc.nasa.gov/symposiums/2017/posters/009P-Gerardo_CubeSat_ReactionWheels.pdf pristupljeno 2024-02-25
- [18] https://www.ece3sat.com/pdf/Sensors_ADCS.pdf pristupljeno 2024-03-7
- [19] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0094576516308840> pristupljeno 2024-03-19
- [20] <https://crocube.hr/o-misiji/> pristupljeno 2024-04-01
- [21] <https://4dsystems.com.au/products/ucam-iii/> pristupljeno 2024-04-01
- [22] <https://www.spacemanic.com/deep-thought-onboard-computer/#features> pristupljeno 2024-04-11
- [23] <https://www.spacemanic.com/amun-power-supply-unit/> pristupljeno 2024-04-15
- [24] <https://www.imarcgroup.com/cubesat-market> pristupljeno 2024-04-15
- [25] https://titan.fsb.hr/~zkunica/nastava/VI_PT_M/VI%20Proizvodne%20tehnologije%20Montaza2.pdf pristupljeno 2024-05-20
- [26] <https://quality-one.com/dfm-dfa/> pristupljeno 2024-05-21
- [27] <https://www.isispace.nl/product/quadpack-cubesat-deployer/> pristupljeno 2024-06-20

[28] <https://www.quora.com/How-small-can-satellites-get-so-that-one-rocket-can-launch-143-of-them-at-once> pristupljeno 2024-06-20

[29]

https://www.instarengineering.com/pdf/resources/Instar_Vibration_Testing_of_Small_Satellites_Part_5.pdf pristupljeno 2024-06-21

[30] [SpaceX Rideshare Payload User's Guide](#), 2022.