

CZU: 378.62+629.783;

<https://doi.org/10.53081/1810-6498.2022.79-80.7>

O PRIVIRE GENERALĂ ASUPRA EXPERIENȚEI UNIVERSITĂȚII TEHNICE DIN MOLDOVA DE CONSTRUIRE ȘI LANSARE A NANOSATELITULUI TUMnanoSAT

AN OVERVIEW OF THE EXPERIENCE OF THE TECHNICAL UNIVERSITY OF
MOLDOVA IN BUILDING AND LAUNCHING THE NANOSATELLITE TUMnanoSAT

Viorel Bostan¹, viorel.bostan@adm.utm.md, Ion Bostan¹,
ion.bostan@cnts.utm.md, Valentin Ilco¹, valentin.ilco@cnts.utm.md, Vladimir Melnic¹,
vladimir.melnic@mate.utm.md, Alexei Martiniuc¹, alexei.martiniuc@sde.utm.md, Vladimir
Vărzaru¹, vladimir.varzaru@srco.utm.md, Nicolae Secrieru¹, nicolae.secrieru@cnts.utm.md,
Marin Guțu¹, marin.gutu@pmai.utm.md, Oleg Lupan¹, oleg.lupan@mib.utm.md, Valeri
Verjbitki¹, valeri.verjbitki@adm.utm.md, Nicolae Magariu¹, nicolae.magariu@mib.utm.md

¹Universitatea Tehnică a Moldovei

Rezumat. *Echipa Centrului Național de Tehnologii Spațiale al Universității Tehnice din Moldova (UTM) a fost selectată de Oficiul Națiunilor Unite pentru Afaceri Spațiale (UNOOSA) și Agenția Aerospațială Japoneză (JAXA) pentru runda a 4-a a Programului KiboCUBE de lansare a unui nanosatelit TUMnanoSAT de la bordul Stației Spațiale Internaționale (ISS). Această lucrare reprezintă o privire de ansamblu asupra misiunii educaționale și științifice a nanosatelitului TUMnanoSAT, impactul acestuia asupra sistemului de proiectare și oportunitățile educaționale deschise de acesta. Scopul principal al proiectului TUMnanoSAT a fost de a oferi studenților o experiență practică în proiectarea, construirea și testarea unui sistem spațial destinat pentru anumite misiuni. În lucrare este prezentat nanosatelitul TUMnanoSAT proiectat la UTM și inclus în Programul KiboCube și este subliniată misiunea educațională a acestui nanosatelit. Sunt descrise sistemele aparatului, inclusiv: structura, sistemul de alimentare cu energie electrică, sistemul de procesare și gestionare a datelor și de comunicații telemetrice.*

Cuvinte-cheie: *nanosatelit, programul KiboCube, Stația Spațială Internațională (ISS), Oficiul Națiunilor Unite pentru Afaceri Spațiale (UNOOSA), Agenția Aerospațială Japoneză (JAXA), Universitatea Tehnică din Moldova (UTM).*

Summary. *The team of the National Center for Space Technologies of the Technical University of Moldova (TUM) was selected by the United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA) and the Japan Aerospace Agency (JAXA) for the 4th round of the KiboCUBE Program for the launch of the TUMnanoSAT nanosatellite from the International Space Station (ISS). In this paper, an overview of the educational and scientific mission of TUMnanoSAT, the impact on the system design and the educational opportunities are presented. The primary mission of the TUMnanoSAT was to provide hands-on experience to students in designing, building, and testing a space system with a specific task/mission. This paper presents an*

overview of the TUMnanoSAT designed at the TUM and included in KiboCube Program. There are described educational missions of the nanosatellite and it is given an overall systems overview, including: structure, electrical power supply, processing and data management and telemetry communications

Keywords: *nanosatellite, educational missions, KiboCube program, International Space Station (ISS), United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA), Japanese Aerospace Agency (JAXA), Technical University of Moldova (TUM).*

1. Introducere

Centrul Național de Tehnologii Spațiale (CNTS) al Universității Tehnice din Moldova (UTM) și-a orientat activitatea către o clasă de nanosateliti, care se elaborează conform standardului internațional CubeSat, ceea ce simplifică mult procedurile de lansare ale acestora [1-8]. CNTS a elaborat două prototipuri de nanosateliti și în 2017 a participat la a 2-a rundă, apoi în 2019 la a 4-a rundă a Programului KiboCUBE cu nanosatelitul „TUMnanoSAT” [9].

Programul KiboCUBE este o colaborare între UNOOSA și JAXA care își propune să ofere membrilor Organizației Națiunilor Unite oportunitatea de a lansa sateliți de tip CubeSat dezvoltați în scopuri educaționale și de cercetare. Echipa CNTS a fost selectată de către Agenția Aerospațială Japoneză (JAXA) și Oficiul Națiunilor Unite pentru Afaceri Spațiale (UNOOSA) pentru a patra rundă a Programului KiboCUBE pentru lansarea nanosatelitului TUMnanoSAT de la Stația Spațială Internațională (ISS) în 2022, cu modulul experimental japonez KiboCUBE.

Modulul Kibo al Agenției Aerospațiale Japoneze de pe ISS a fost proiectat pentru a fi folosit atât ca laborator de microgravitație, cât și ca rampă de lansare pentru serviciile pe orbită terestră joasă. Acest modul ISS include un sistem de plasare pe orbită a nanosatelitelor numit J-SSOD. Lansarea nanosatelitelor de la ISS are o serie de avantaje. Lansarea vehiculelor la bordul transportatorului logistic al vehiculului de vizită ISS reduce vibrațiile și sarcinile pe care trebuie să le întâmpine în timpul lansării. În plus, pot fi ambalate în materiale de protecție, astfel încât probabilitatea de deteriorare a CubeSat în timpul lansării să fie redusă semnificativ. În plus, orbita joasă tip LEO conduce la o degradare mai rapidă a altitudinii satelitului și permite o dezintegrare naturală a sateliților, reducând astfel acumularea de resturi orbitale [11].

Vom prezenta provocările, precum și experiența acumulată la proiectarea nanosatelitului și sarcinilor utile, dar și modul în care am integrat sarcina utilă în acest CubeSat cu participarea activă a studenților la proiectarea și fabricarea a componentelor critice. Este de menționat că TUMnanoSAT a fost elaborat folosindu-se doar componentele comerciale disponibile la raft (COTS), fiind o provocare reală.

UTM a asigurat CNTS cu o cameră curată cu echipament având proprietăți antistatice pentru a sprijini construirea, testarea și integrarea hardware-ului spațial dedicat. În cadrul acestui proces de proiectare și confecționare, studenții au dobândit experiență în procedurile de integrare și testare la nivel industrial. Echipele de studenți de la ciclul Licență/Masterat angajați în proiectul TUMnanoSAT au realizat proiectarea și fabricarea modulelor cu sarcini utile structurii, precum și integrarea sistemelor satelitului, obținând astfel experiență în ingineria de sisteme, descrierea tehnică și în diverse aplicații interdisciplinare. Peste cincizeci de studenți, membri ai diferitelor facultăți și departamente, au participat la dezvoltarea acestui CubeSat în cadrul programului KiboCube de la UTM, fiind implicați în proiecte reale pentru a le spori înțelegerea fundamentelor ingineriei.

Scopul acestui articol este de a prezenta provocările și experiența acumulată la proiectarea arhitecturii conceptuale a nanosatelitului TUMnanoSAT. Pentru CNTS al UTM, programul KiboCube are un impact major asupra îmbunătățirii calității studiilor de inginerie, bazate pe tehnologii spațiale moderne prin atragerea studenților în cercetarea științifică pentru explorarea spațiului cosmic.

2. Nanosatelitul TUMnanoSAT și subsistemele de bază

2.1 Misiunile TUMnanoSAT

CNTS al UTM, concentrându-se pe standardul internațional CubeSat, a decis să dezvolte o serie de sateliți cu misiuni specifice și eficiente. Pentru prima misiune TUMnanoSAT, obiectivul principal a fost de a verifica, în condiții reale, funcționalitatea diferitelor module și subsisteme ale satelitului pentru misiunile viitoare. Schema internă a TUMnanoSAT realizată în formatul 3D (model SolidWorks) și montarea reală a modulelor satelitului sunt prezentate în figura 1.

Sarcinile de bază în realizarea acestui satelit au fost [9, 12]:

- testarea senzorilor bazați pe nanostructuri în condițiile de radiație din spațiu;
- comunicarea eficientă „satelit - stație terestră” cu posibilitatea de a modifica periodicitatea, viteza de comunicație și a asigura o fiabilitate sporită;
- verificarea protocolului de comunicație „satelit - stație terestră” cu diferite niveluri de acces;
- testarea sistemului de alimentare cu energie electrică și identificarea modurilor optime de distribuție a energiei acumulate;
- testarea subsistemului de senzori pentru determinarea atitudinii satelitului (eng. satellite attitude) (magnetometre, micro-giroscoape, senzori solari) pentru optimizarea procesului de control al atitudinii satelitului;
- testarea funcționării componentelor electronice COTS în condiții de radiație, inclusiv computerul de bord și memoriile digitale.

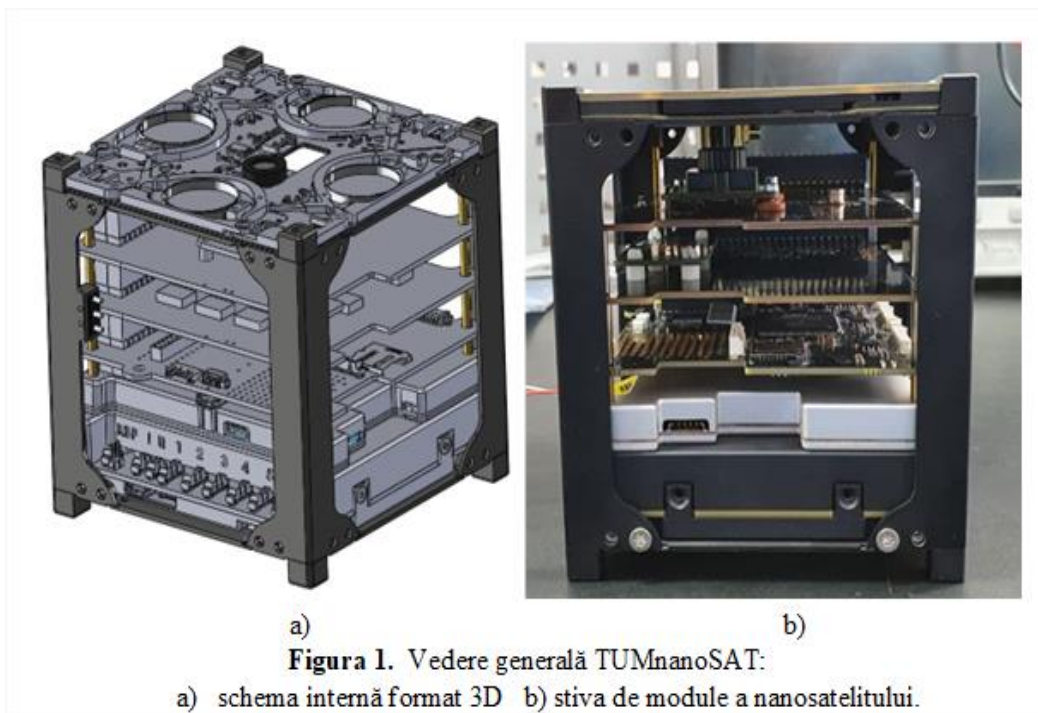
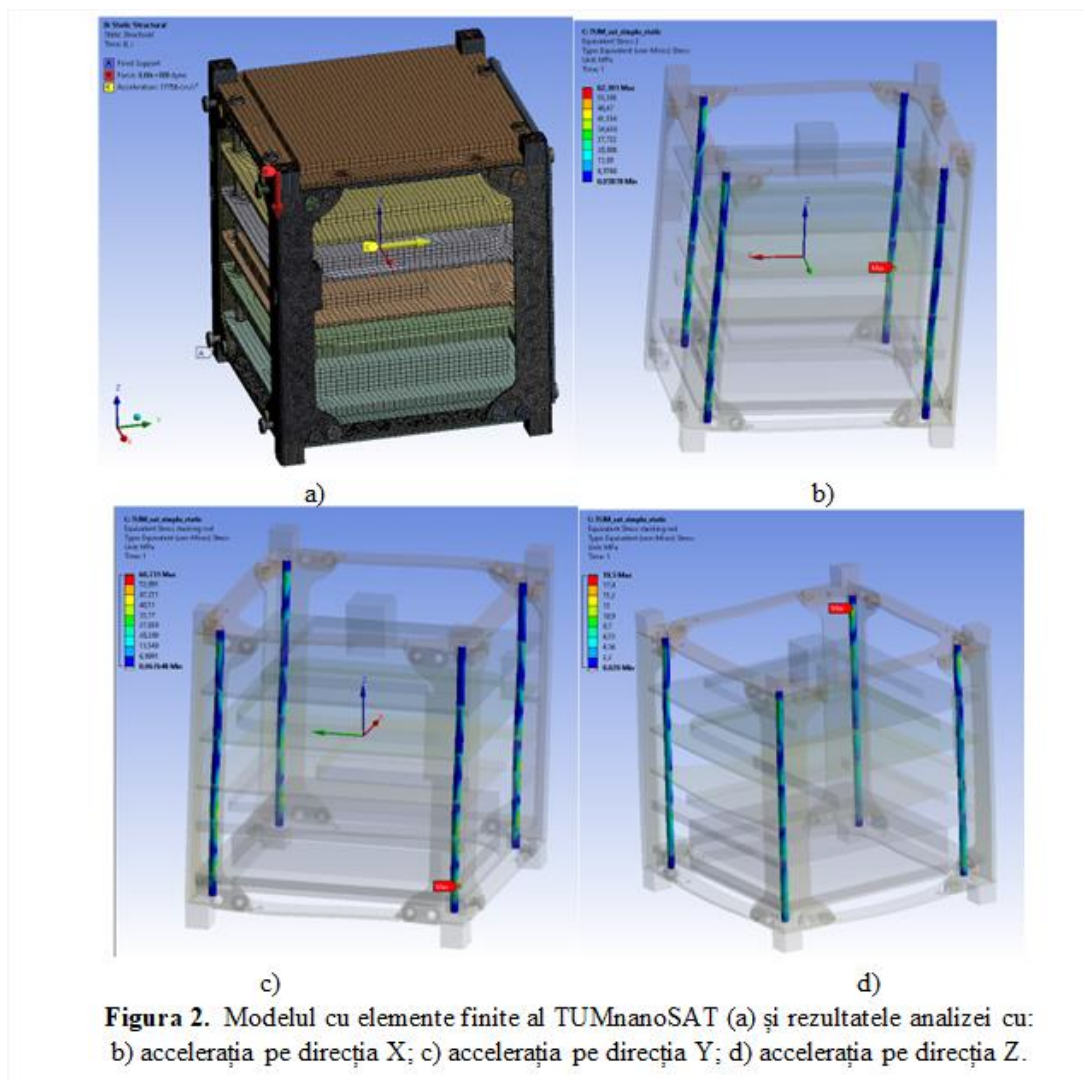


Figura 1. Vedere generală TUMnanoSAT:

a) schema internă format 3D b) stiva de module a nanosatelitului.

2.2 Structura nanosatelitului

Scopul principal al elaborării subsistemului structural a fost de a obține o structură rigidă, fiabilă, care să reziste la condițiile dure de lansare. De asemenea, ideea principală în proiectarea subsistemului structural a fost maximizarea spațiului interior utilizabil, cu minimizarea în același timp a complexității subsistemului. Constrângerile de bază impuse structurii TUMnanoSAT sunt determinate de CubeSat Design Specifications [8] și JEM Payload Accommodation Small Satellite Deployment Interface Control Document. Urmând aceste standarde, dimensiunile TUMnanoSAT sunt: 100 mm x 100 mm x 113,5 mm. S-au analizat diverse materiale sub aspect de greutate și rigiditate ale acestora și în consecință a fost propus aliajul de aluminiu 6061 în calitate de material pentru structura TUMnanoSAT [12, 15, 17]. De asemenea, datorită faptului că TUMnanoSAT este proiectat pentru a fi lansat de la Stația Spațială Internațională, s-a intervenit în structură implementând trei comutatoare pe șine. Comutatoarele urmează să întrerupă galvanic toate liniile de alimentare din satelit, astfel încât atunci când satelitul este instalat în lansator, să nu fie alimentat, inclusiv să nu fie activată desfacerea timpurie a antenelor. Proprietățile structurii au fost cercetate pe un model cu elemente finite ale structurii, care a fost creat folosind ANSYS Mechanical. Proprietățile fizice ale materialelor structurii au fost astfel alese ca să se poată construi un model cu masa aproximativ egală cu a componentelor reale ale satelitului. Simulările de frecvență naturală și de sarcină statică efectuate de ANSYS Workbench Modal au arătat că frecvența fundamentală minimă este de 366,57 Hz, care este mai



mare de 60 Hz, iar stresul maxim asupra satelitului a fost de 94,5 MPa, 100,8 MPa și 19,5 MPa, în limitele necesare ale sarcinilor. Exemple de stres pe diferite părți ale satelitului sunt prezentate în fig. 2, în care se arată rezultatele FEM (finite element model) cu sarcina de intrare, accelerație și condiția de constrângere pentru fiecare caz de analiză, iar marja de siguranță pentru diferitele componente a fost calculată folosind un factor de siguranță de 1,5 pentru limita de curgere (F_{ty}) și 2.0 pentru rezistența la rupere (F_{tu}).

2.3 Subsistemul de alimentare al TUMnanoSAT

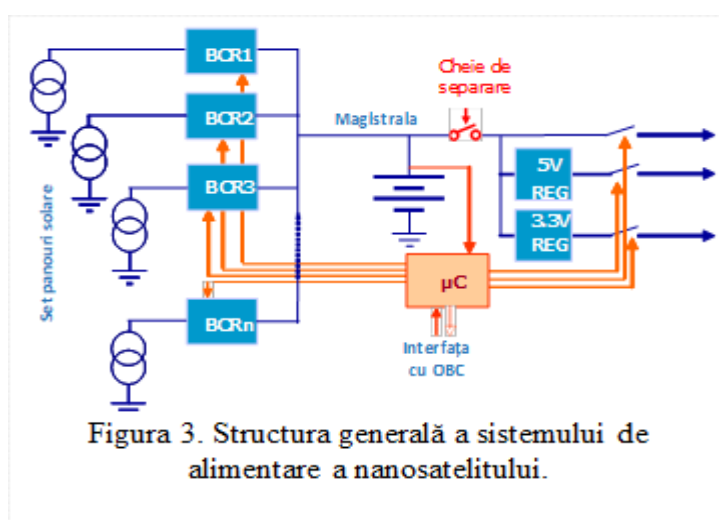
Din perspectiva sistemelor de energie, este relativ sigur să spunem că provocările și cerințele de putere/energie electrică sunt comune în întregul spectru al misiunilor pe sateliți mici. Sateliții mici pot avea o gamă de cerințe de putere de la 1-2 W până la câțiva kilowați.

Orice misiune tipică de nanosatelți, de regulă, este lansată pe o orbită joasă a Pământului (numite LEO – low earth orbit) și majoritatea din ele sunt înzestrate cu panouri fotovoltaice fixe. Prin urmare, panourile fotovoltaice vor avea perioade frecvente de eclipsă de soare, dar cu caracteristici variate de iluminare solară, datorită unghiului de înclinație a orbitei. Deși nanosatelții pot avea gamă extinsă de cerințe de energie, abordarea în proiectarea sistemului de alimentare în general este practic similară.

Pentru nanosatelții din această categorie este necesar de a avea o interfață flexibilă a panourilor solare, care să se poată adapta la caracteristicile în schimbare, oferind, în același timp, capacitatea de a efectua o reîncărcare rapidă a sistemului de baterii secundare ale modulelor spațiale.

Ca urmare, apare necesitatea ca electronica sistemului de alimentare să fie compatibilă cu o multitudine de profiluri de misiuni și să fie redimensionată în capacitatea de manipulare a puterii. În plus, la proiectarea misiunilor se urmărește în mod constant reducerea masei și o mai multă flexibilitate și modularitate în structura sateliților. În cazul acestui proiect, ne-am propus să analizăm în detaliu experiența altor dezvoltatori și să dezvoltăm un sistem eficient de alimentare pentru acest proiect, dar posibil și pentru altele viitoare, care să fie capabil să satisfacă aceste cerințe solicitate, dar cu accent pe eficiența de costuri, precum și pe performanță.

Ne-am propus să dezvoltăm un sistem de alimentare, cu abordarea problemelor legate de cost, performanță și flexibilitate în proiectare, și pentru viitoarele misiuni cu nanosateliti.



Acesta este un sistem bazat pe Maximum Power Point Tracker (MPPT) modular, cu baterie integrată pentru o magistrală de baterii. MPPT este implementat în regulatorul de încărcare a bateriei (BCR - Battery Charge Regulator). Topologia ideală pentru MPPT CubeSat și alte nave spațiale miniaturale este cu un sistem de magistrală de baterie. Cea mai reușită implementare a acestui sistem este utilizarea unui MPPT dedicat pentru fiecare panou solar. S-a propus structura generală a unui sistem de alimentare (fig. 3, fig. 4), care are următoarele avantaje [15,17]:

- permite utilizarea diferitelor tehnologii de celule solare și conectate în serie pe fiecare panou.
- punctul de putere maximă (MPP) al unui panou individual poate fi urmărit în condițiile termice în schimbare, în timp cât se află în lumina Soarelui. Este posibil ca panourile să fie supuse la temperaturi diferite și, prin urmare, să aibă caracteristici diferite și acest lucru este important.
- oferă o degradare lentă a sistemului cu pierderea unui panou sau a unui MPPT.
- bateria trebuie, de obicei, încărcată în cea mai mare parte a perioadei de timp cu lumină solară, astfel încât pierderile suplimentare, generate de faptul că are o sursă de alimentare cu comutare (SMPS) în serie cu matricea de celule, să aibă un impact redus asupra eficienței generale a luminii solare a sistemului de alimentare.
- Conexiunea directă dintre baterie și magistrală asigură o eficiență maximă în timpul eclipsei.

Ținând cont de misiunile concrete ale nanosatelitului, structura reală a sistemului de alimentare (fig. 5), a fost proiectată în baza următoarelor date. Analizând tehnologiile celulelor solare, am constatat că dintre celulele solare bazate pe tehnologiile disponibile celula multi-joncțiune GaInP2/GaAs/Ge este singura alternativă reală pentru CubeSats. În afară de o eficiență semnificativ mai mare decât în alte tehnologii, cea mai avantajoasă caracteristică a acestei tehnologii este că tensiunea la borne a celulei este de peste 2 V (cel puțin dublu față de celulele bazate pe alte tehnologii). Având în vedere suprafața relativ mică a panoului, disponibilă pe un satelit miniatural, tensiunea terminală mai mare ne permite să obținem o tensiune de celulă mai acceptabilă: celulele pe GaAs cu o singură joncțiune au o tensiune terminală de 0,89 V față de cele pe siliciu cu 0,5 V (fig. 4). Totodată, neglijând problemele legate de eficiența inferioară a celor pe siliciu, va fi necesară utilizarea unui număr mare de celule în serie pentru a atinge o tensiune utilizabilă. Prin urmare, pentru nanosatelitul TUMnanoSAT tip CubeSats 1U, un singur panou de 100 mm x 83 mm poate cuprinde două celule solare de 4 x 7 cm, care echivalează cu o putere mai mare de 2 W și o tensiune la borne de peste 4 V.

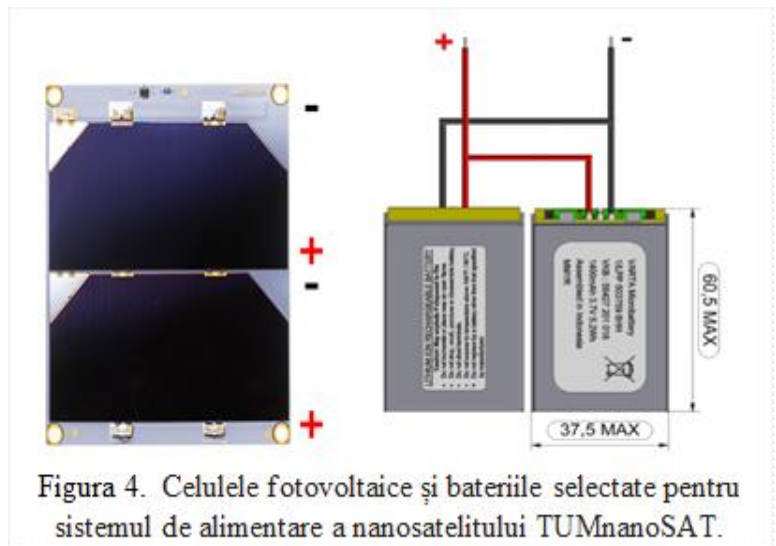
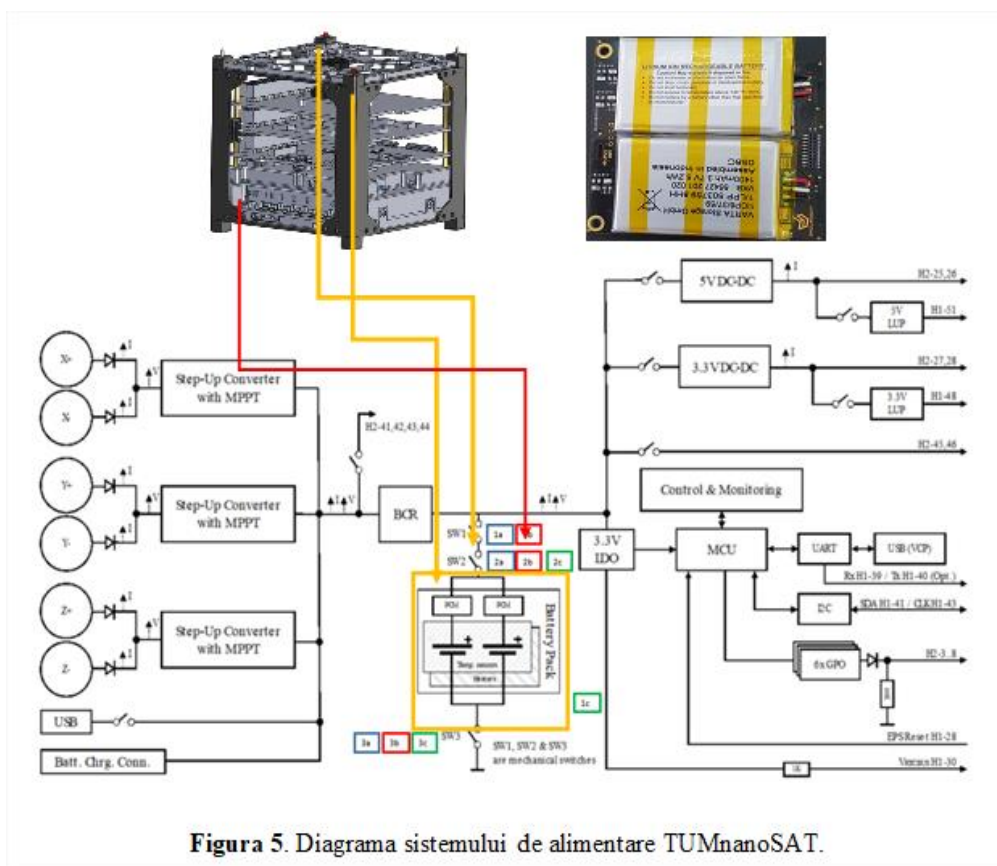


Figura 4. Celulele fotovoltaice și bateriile selectate pentru sistemul de alimentare a nanosatelitului TUMnanoSAT.



Bateria sistemului de alimentare CubeSat este integrată cu electronica sistemului de alimentare. Tensiunea bateriei este dimensionată astfel, încât tensiunea să fie compatibilă atât cu tensiunea minimă a panourilor solare, cât și cu tensiunea minimă de intrare la reglatoarele de 5V și 3,3V. Pentru a asigura compatibilitatea, a fost propusă o baterie cu două serii de celule polimer-litiu. Bateria integrată cu două celule polimer-litiu asigură o capacitate minimă de $2 \times 3,6 \text{ V} \times 1 \text{ Ah} = 7,2 \text{ Wh}$. Ea poate servi ca o soluție și pentru o putere mai mare la CubeSat (2/3U) cu 2, 3 sau 4 sisteme de alimentare CubeSat, fiind utilizate în paralel pentru a crește capacitatea până la nivelul necesar. Prin urmare, cu 6 interfețe MPPT pe o singură placă PCB, există suficiente intrări pentru a asigura compatibilitatea cu un CubeSat cu panouri fotovoltaice de 2,5 W, toate cele cinci fațete. În cadrul acestui modul sunt încorporate sursele de alimentare pentru toate sistemele nanosatelitului, precum și sistemul de stocare a energiei provenite de la panourile fotovoltaice în acumulatori (fig. 4).

Pentru a asigura succesul misiunii, este necesar să fie prevăzute toate scenariile posibile de desfășurare a acțiunilor, astfel fiind reduse la minim riscurile de apariție a unor situații imprevizibile sau/și a unor defecțiuni ireversibile. Testarea sistemului de alimentare real în toate condițiile posibile de exploatare fiind imposibilă, apare necesitatea de realizare a unui model al sistemului în mediu de simulare computerizată pentru testarea funcționării acestuia în cele mai diverse regimuri și condiții

Modelul sistemului de alimentare (fig. 6) a fost creat în mediul de simulare Simulink. Pentru simplificarea modelului, elementele sistemului de alimentare au fost înlocuite cu module funcționale echivalente sau asemănătoare. A fost simulată perioada de expunere a panourilor fotovoltaice la lumina solară pe parcursul mișcării satelitului pe orbită. Jumătate din perioada orbitală, nanosatelitul se va afla în umbra sau semi-umbra Pământului, el fiind alimentat din energia acumulată în baterii. Cealaltă jumătate, panourile fotovoltaice vor fi expuse la lumina solară, alimentând nanosatelitul și suplinind resursele bateriei care au fost epuizate în semiperioada umbră.

Am propus să simulăm conversia energiei de la panourile fotovoltaice ca să fie realizată utilizând cunoscutul algoritm MPPT, iar nanosatelitul să fie orientat mereu în direcția optimă față de Soare, astfel putem considera că pe perioada expusă la lumină vom obține de la panourile

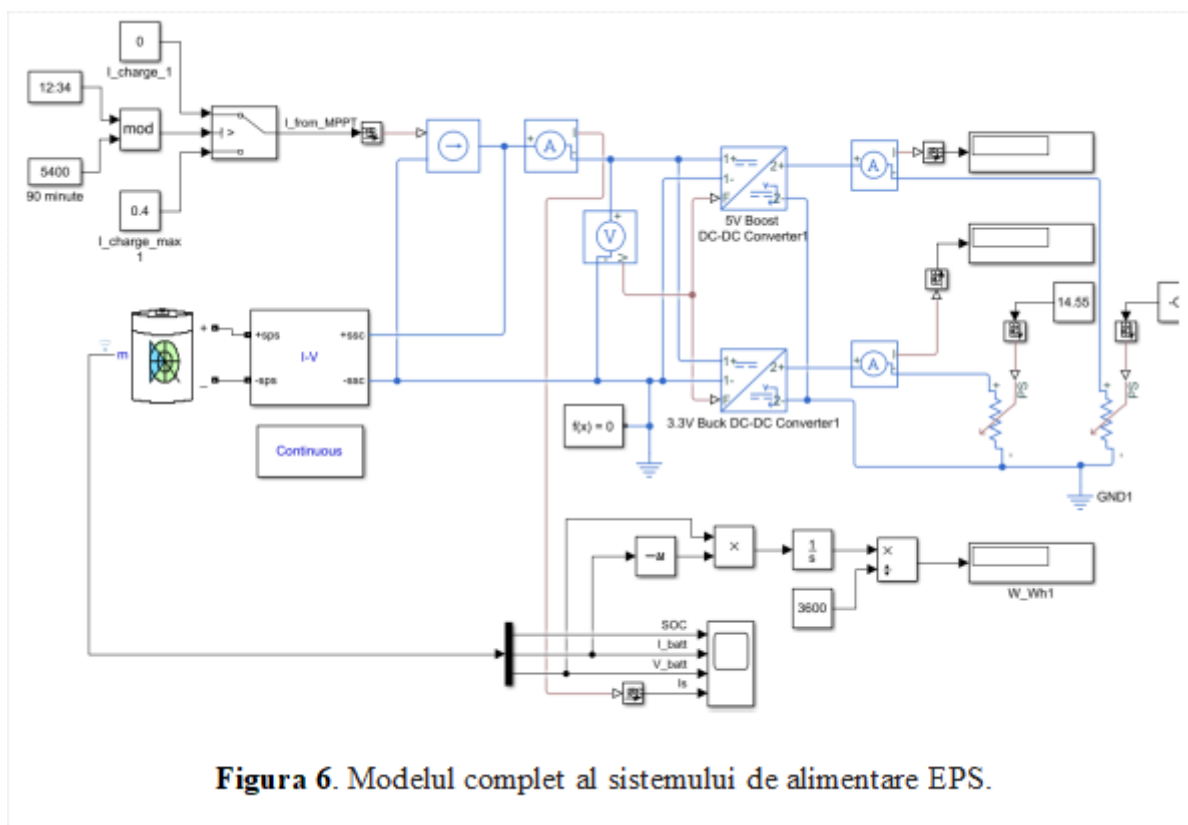


Figura 6. Modelul complet al sistemului de alimentare EPS.

fotovoltaice mereu puterea maximă posibilă. Motivația este că acestea sunt excepții care pot apărea doar în perioadele de tranziție, dar durata acestora este destul de mică și poate fi neglijată. Aceasta simplifică considerabil modelul sistemului fără a se introduce mari erori. Astfel, panourile fotovoltaice pot fi înlocuite cu o sursă de curent constant, activă timp de jumătate din perioada orbitală.

În acest proiect, toate subsistemele nanosatelitului necesită o tensiune nominală stabilizată de 3.3 V sau 5 V pentru funcționare normală. De aici apare necesitatea de a utiliza convertoare stabilizate de tensiune. Tensiunea pe baterie poate varia în intervalul 3.5 V – 4.2 V, astfel pentru obținerea tensiunii de 3.3 V va fi utilizat convertorul DC-DC cu topologia Buck (Step-Down), iar pentru 5 V – convertorul DC-DC cu topologia Boost (Step-Up). Pentru simulare, am propus să fie implementate modelele convertoarelor din librăria standard Simulink.

Fiind luate în considerație toate particularitățile sistemului, a fost elaborat modelul complet al sistemului de alimentare împreună cu toate instrumentele de măsură necesare pentru

monitorizarea stării sistemului în întregime. Parametrii modelului pot fi configurați pentru a reflecta parametrii sistemului real în condiții reale de exploatare, ceea ce asigură o flexibilitate ridicată și permite testarea sistemului în diverse scenarii.

Simularea s-a efectuat pe diferite perioade de timp. În calitate de exemplu, a fost simulată o misiune cu durata de 30 de zile cu modulele nanosatelitului, care necesită puterea electrică, de exemplu, 750 mW. Parametrii sistemului au fost setați în corespundere cu parametrii tuturor subsistemelor nanosatelitului proiectat. În stare inițială, bateria este încărcată până la nivelul de 50%. Curentul maxim generat de panourile fotovoltaice este setat la nivelul 400 mA. Știind că altitudinea orbitei nanosatelitului va fi de 400-450 km, a fost aleasă perioada orbitală de 90 de minute, în care jumătate din timp satelitul este umbrat de către Pământ, iar în cealaltă jumătate este expus la lumină solară.

Prezentăm doua cazuri de simulare a consumului de energie. În primul caz, s-a

simulat consumul mediu al tuturor subsistemelor nanosatelitului. Conform calculelor, consumul mediu de energie este de 0.75 W pe linia 3.3 V. Sunt monitorizați următorii parametri: nivelul de încărcare al bateriei, curentul de încărcare/descărcare al bateriei, tensiunea pe baterie și curentul consumat de la panouri solare. Rezultatele simulării pentru cazul de consum 0.75 W sunt reprezentate în fig. 7, din care se poate observa că curentul generat de panourile fotovoltaice este suficient pentru a alimenta toate modulele nanosatelitului și concomitent de a încărca bateria. În fiecare ciclu de umbră/insolație, nivelul de încărcare al bateriei crește, ceea ce demonstrează că în această configurație toate subsistemele nanosatelitului vor fi alimentate

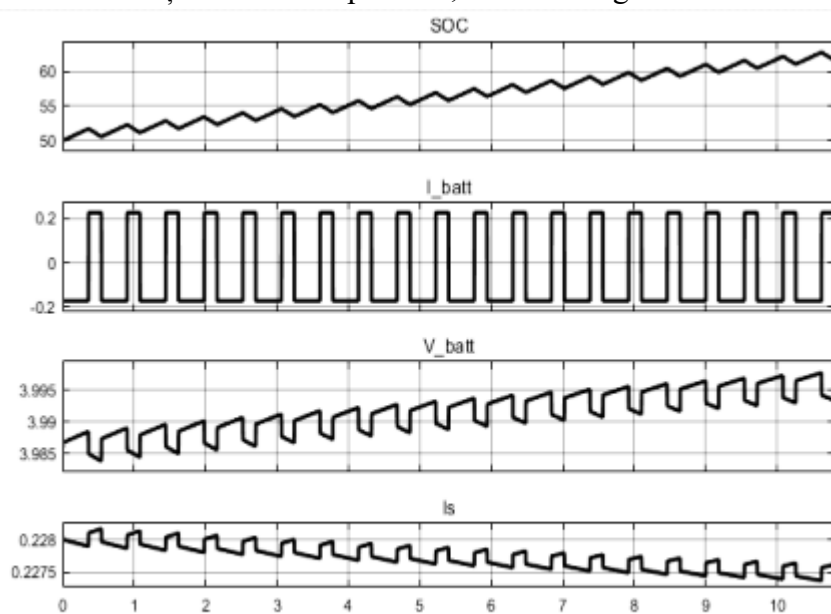


Figura 7. Rezultatele simulării în cazul de consum 0.75 W.

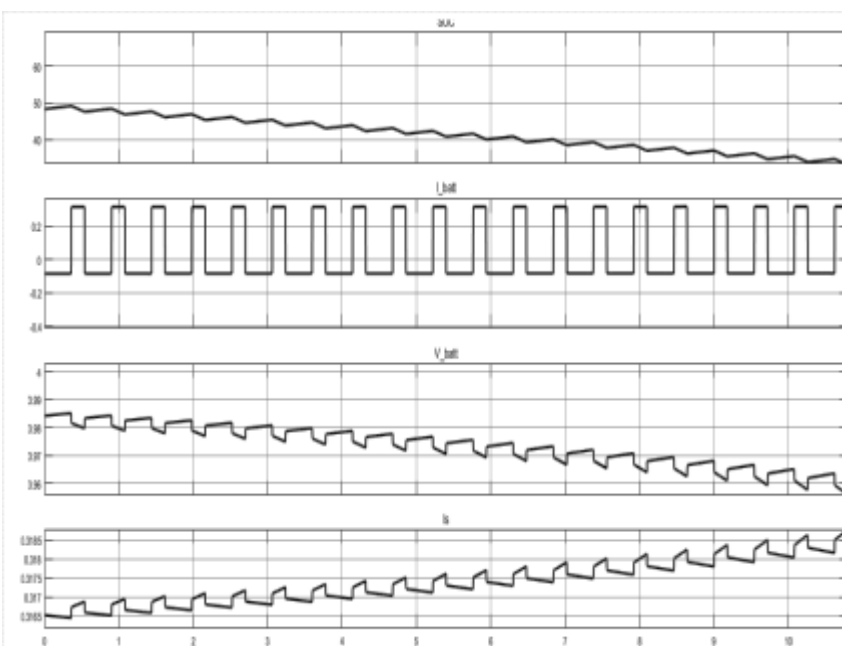


Figura 8. Rezultatele simulării în cazul de consum 1.5 W.

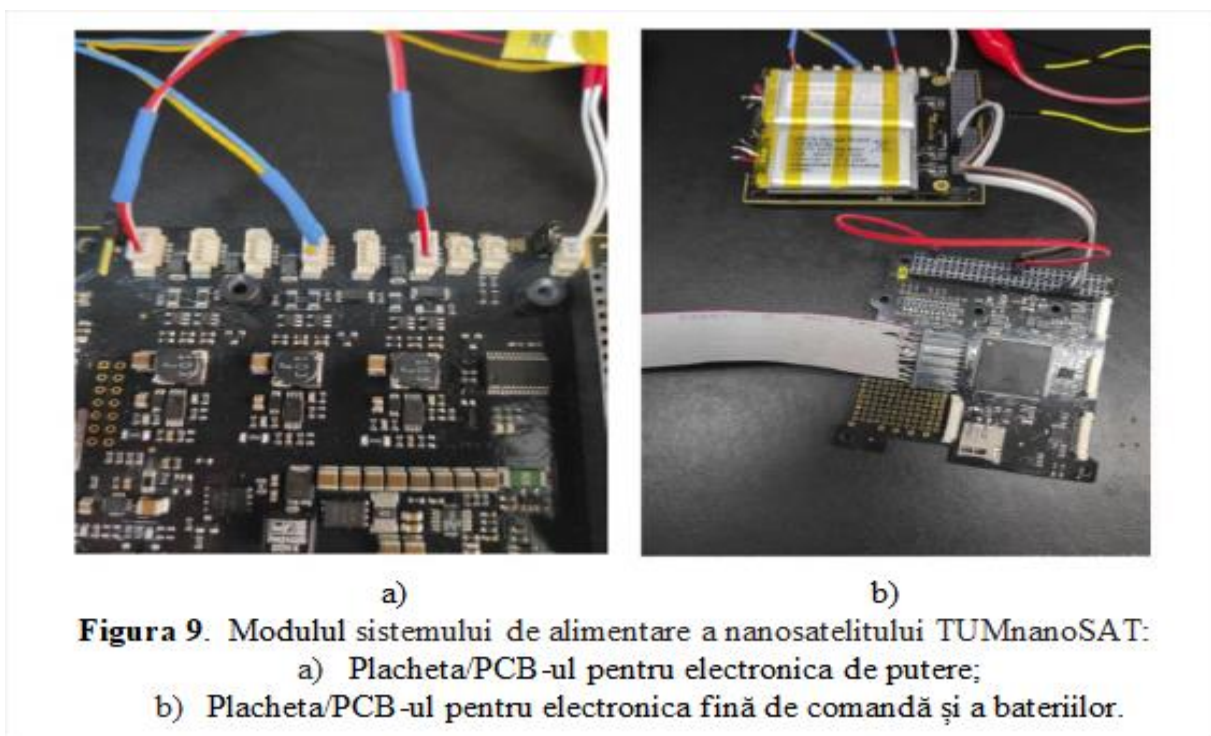
suficient fără perturbații pe o perioadă oricât de lungă, până la degradarea panourilor fotovoltaice, a bateriei sau apariția unor defecțiuni în sistemul de control.

În al doilea caz analizat, puterea medie consumată de către subsistemele nanosatelitului a fost ridicată până la nivelul de 1,5 W pe linia 3.3 V. Rezultatele simulării pentru al doilea caz de consum sunt reprezentate în fig. 8, din care se poate observa că curentul generat de către panourile fotovoltaice este insuficient pentru a suplini complet resursele bateriei, epuizate în perioada de umbră. În primul grafic din figură poate fi observată scăderea cu timpul a nivelului de încărcare al bateriei, ceea ce arată că nanosatelitul va putea funcționa neîntrerupt doar o perioadă limitată de timp, până la epuizarea completă a energiei din baterie. Această variantă de consum nu este favorabilă, deoarece realizarea ei necesită planificarea mai riguroasă a misiunii și nu permite vreo rezervare.

Modelul sistemului de alimentare al nanosatelitului conține toate elementele necesare pentru simularea diverselor scenarii de alimentare și consum cu configurațiile care reflectă parametrii componentelor reale ale subsistemelor satelitului. Simularea sistemului de alimentare EPS ne-a asigurat o înțelegere intuitivă a sistemului și oferit valori de referință, necesare la etapa de proiectare a algoritmilor de control ai acumulării și distribuției energiei electrice [15, 17].

Modulul EPS a fost realizat în conformitate cu structura sistemului de alimentare a nanosatelitului, prezentată în fig. 5. Acest modul a fost creat din următoarele componente (fig. 9):

- placheta PCB pentru electronica de putere (convertoarele DC-DC și cheile de comutare);
- placheta/PCB-ul pentru electronica fină de comandă (microcontroler, interfețe);



- placheta/PCB-ul pentru bateriile EPS.

2.4 Subsistemul de comunicare al nanosatelitului

Comunicarea eficientă a nanosatelitului TUMnanoSAT cu stațiile terestre este una din cele mai importante misiuni, care ar pune baza teoretică și practică pentru elaborarea modelelor următoare de nanosatelți. Această misiune necesită căutarea de soluții optime (mai bine-zis, raționale) la următoarele probleme:

- Căutarea parametrilor și caracteristicilor subsistemului de comunicare al nanosatelitului, analizând diverse intervale și benzi de frecvență, metode de modulare a semnalelor, tipuri de antene, rate de comunicare, puteri de emisie, sensibilități ale recepției și calculul bugetului de comunicare pentru orbita stabilită și cu toate condițiile ei reale;

- Proiectarea subsistemului de comunicare al nanosatelitului cu parametrii și caracteristicile obținute (partea de hardware);

- Elaborarea și realizarea modurilor de comunicare, schemelor de interacțiune "satelit – stația terestră", a protocoalelor de comunicare, comenzilor de comunicare;

- Verificarea eficienței subsistemului de comunicare în condiții terestre, dar apropiate de cele reale.

Ocolind detaliile de proiectare, vom descrie subsistemul de comunicare TUMnanoSAT. S-a analizat o gamă de module RF de comunicație, criteriile principale de selecție fiind [13.14.18.19]:

- posibilitatea realizării schemei de comunicație propusă, adică asigurarea protocolului de comunicare AX.25 și implementarea unui alt protocol propriu;

- consum minim de energie electrică;

- cost rațional.

În consecință, a fost selectat modulul de comunicație tip SI4463 de la compania Silicon Labs cu puterea maximă de emisie de 2 W, satisfăcătoare pentru TUMnanoSAT, și cu posibilitatea de aplicare a unui protocol propriu.

Acest modul transceiver UHF operează în banda de frecvență pentru amatori 430 până la 440 MHz (în ambele moduri Tx/Rx) și asigură rate de date configurabile, care pot fi modificate în timp ce satelitul este pe orbită (fig. 10). Puterea de ieșire poate fi, de asemenea, reglată pentru a maximiza bugetul conexiunii în funcție de altitudinea orbitală, performanța stației de la sol și unghiul minim de elevație dorit pentru comunicare. Puterea tipică de ieșire este de 1 W (30 dBm), dar sistemul permite creșterea puterii până la 2 W (33 dBm).

Modulul transceiver UHF dispune de un port de tip COM, care permite conectarea OBC-ului pentru monitorizare și configurare. Modulul este proiectat să se încadreze într-un CubeSat. Modulul folosește popularul protocol de date AX.25 pentru mesaje periodice: telemetrie și baliză și este complet încapsulat într-o cutie de aluminiu care este proiectată să disipeze căldura de la amplificatorul de putere, să reducă EMI și EMC și să protejeze electronica de radiație.

Cele mai importante caracteristici sunt:

- Gama de frecvență (Tx/Rx): 430 până la 440 MHz

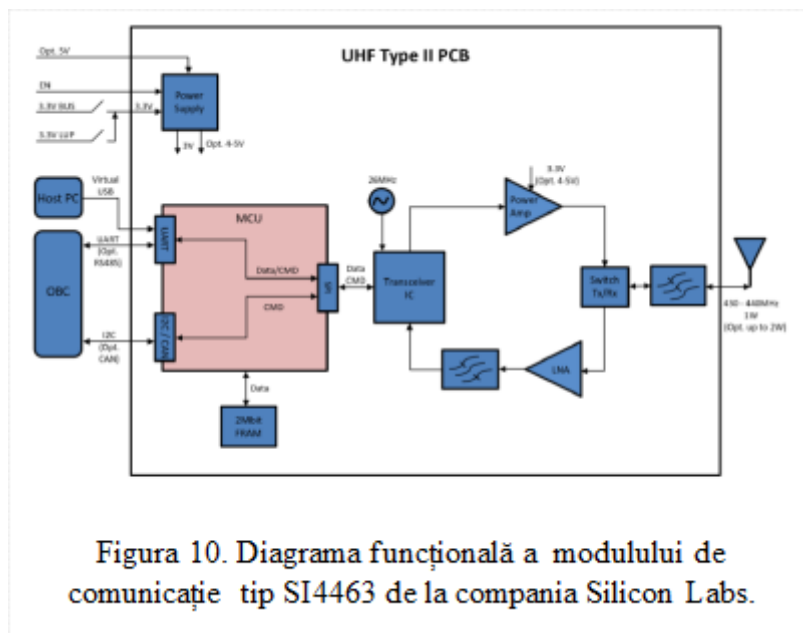


Figura 10. Diagrama funcțională a modului de comunicație tip SI4463 de la compania Silicon Labs.

- Modulație: OOK, GMSK, 2FSK, 4FSK și 4GFSK sunt opționale, 2GFSK (în mod implicit)
- Corecție automată a frecvenței
- Difuzare de baliză și telemetrie configurabilă în formatul AX.25
- Protocoale: AX.25, transparent (repetă protocolul utilizatorului),
- Putere maximă de transmisie: 1 W (personalizat până la 2 W)
- Alimentare: 3,3 V (personalizat la 5 V)
- MCU de putere ultra-săzută cu FRAM, care poate fi reprogramat de utilizator;
- Consumul de curent tipic în timpul modului de recepție (mod inactiv) (Rx): 25 mA @ 3.3V
- Stabilitatea frecvenței: +/- 2,5 ppm
- Rata de transfer de date în aer: de la 2400 până la 19,2 kbps (opțional până la 100 kbps);
- Sensibilitate: până la -121 dBm
- Interfețe de comunicare: UART / I2C / USB (VCP) / RS485 (opt.) / CAN (opt.)
- Actualizare firmware securizată locală și de la distanță (în timpul zborului).

Transceiver-ul RF funcționează în mod half-duplex cu rata de date configurabilă și tipul de modulație setat. Are opțiunea de a transmite un semnal de baliză cu informații predefinite. Interfețele implicite de date și comandă sunt UART și I2C. Nucleul modulului RF prezintă un transceiver IC de înaltă performanță. În partea transmițător a dispozitivului, există un amplificator de putere RF de înaltă eficiență, care este alimentat implicit cu 3,3 V, oferind o putere de ieșire de până la 1 W. Dacă se utilizează o magistrală de 5 V, puterea de ieșire poate fi mărită cu până la 2W.

S-au efectuat experimente reale în condiții terestre cu asistența SNFR la distanța de circa 70 km (modulul cu emițătorul în zona Nisporeni, iar receptorul în Chișinău) în mod special la puteri mai mici de 100 și 500 mW. Rezultatele sunt foarte reușite: nivelul ICEM al semnalului scade doar cu 5 dBμV/m la micșorarea puterii de 5 ori, iar diagrama spectrală a transmițătorului este bine conturată (fig. 11). În partea receptorului, un amplificator cu zgomot redus cu o cifră de zgomot (NF) maximă de 0,9 dB îmbunătățește performanța generală a receptorului în ceea ce privește sensibilitatea, care este specificată până la -121dBm.

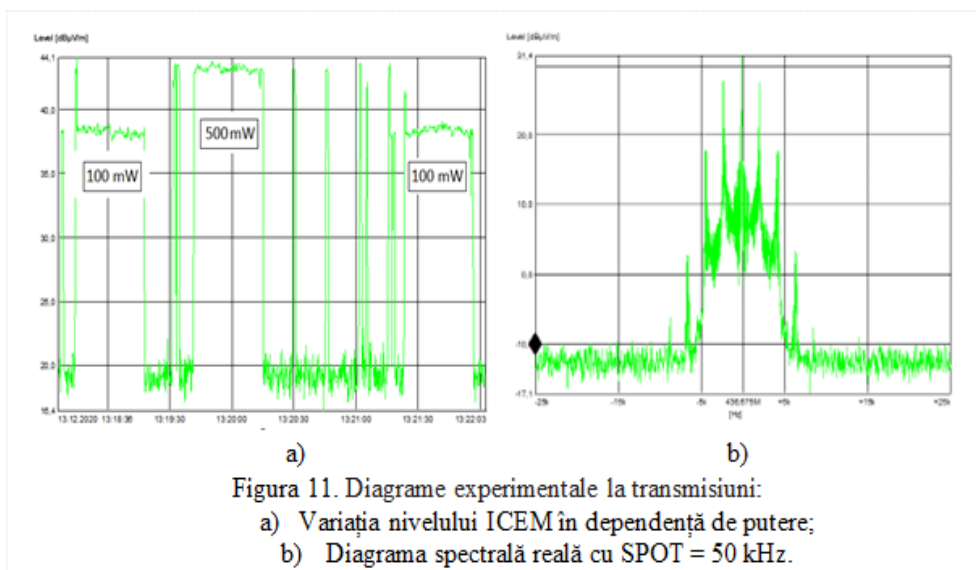


Figura 11. Diagrame experimentale la transmisiuni:

- Variația nivelului ICEM în dependență de putere;
- Diagrama spectrală reală cu SPOT = 50 kHz.

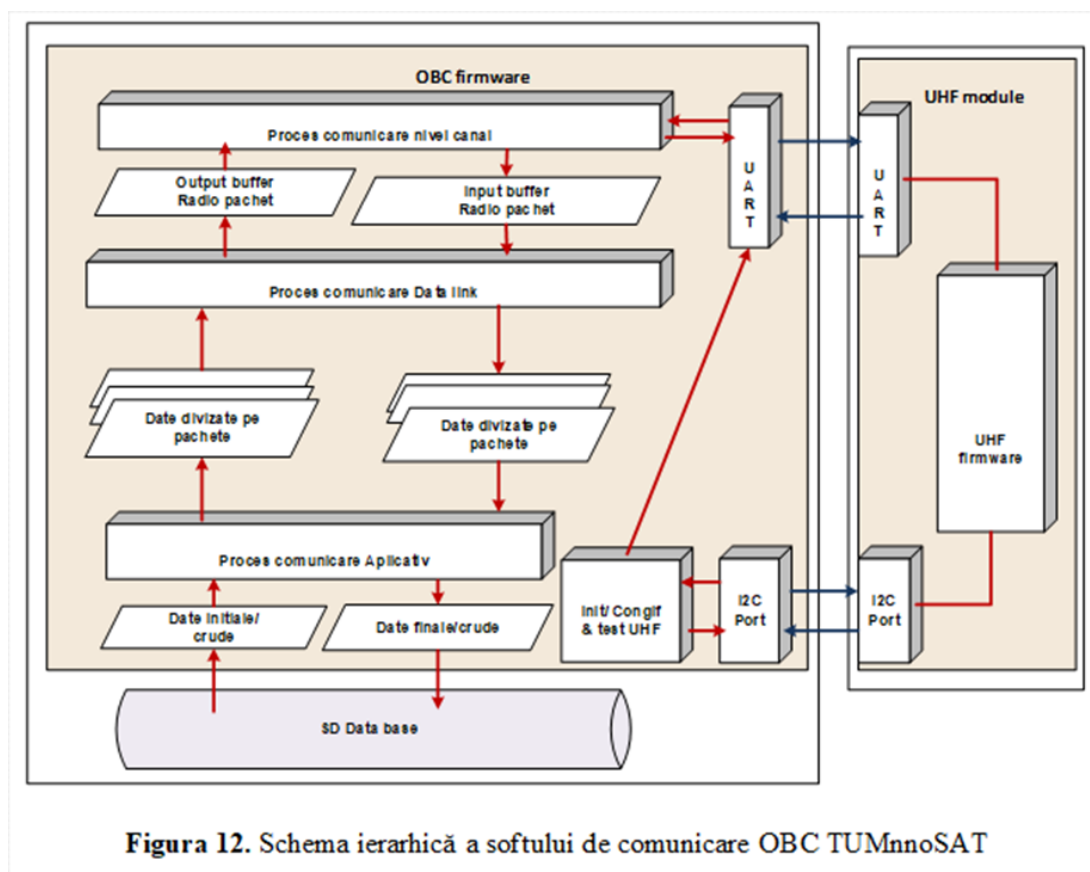


Figura 12. Schema ierarhică a softului de comunicare OBC TUMnoSAT

Eficiența comunicației nanosatelit - stația terestră depinde de modul de distribuție a funcțiilor nivelurilor pe componentele satelitelui. S-a propus ca comunicarea să nu fie realizată de un singur proces/task, ci de un proces de bază și două subprocese auxiliare în conformitate cu modelul simplificat de comunicare, prezentat în fig. 12, cu următoarea distribuție a funcțiilor nivelurilor:

- Nivelul fizic este realizat de către modulul RF: emisia/recepția concomitent modulația/demodulația semnalelor radio, în caz particular AFSK a datelor furnizate sau acumulate de microcontrolerul local al modului de comunicație.
- Nivelul de încapsulare/decapsulare a datelor în conformitate cu protocolul AX.25 se realizează pe calculatorul de bord (OBC) al nanosatelitelui;
- Nivelul de aplicație este realizat pe calculatorul de bord (OBC) al nanosatelitelui, care cuprinde achiziționarea datelor de la senzorii de bază, inclusiv a datelor de la sarcina utilă și captarea imaginilor.

Prin urmare, comunicarea se va realiza prin următoarele procese, care se vor dezvolta în cadrul microsistemului de operare FreeRTOS:

- procesul aplicativ de comunicare cu stația terestră (Communication Task) ;
- procesul de transport/data link la comunicare (DataLink Task);
- procesul transmitere/recepție nivelul fizic la comunicare (Phisic layer Com Task).

Pentru ca orice radioamator să poată comunica cu nanosateliții universitari este recomandat ca sistemul de comunicații să aibă implementat protocolul AX.25 – un protocol de transfer de date la nivel de canal (al doilea nivel inferior în OSI model). Este destinat comunicării între radioamatori, motiv pentru care este utilizat pe scară largă în rețelele de comunicații radio pe bază de pachete de amatori.

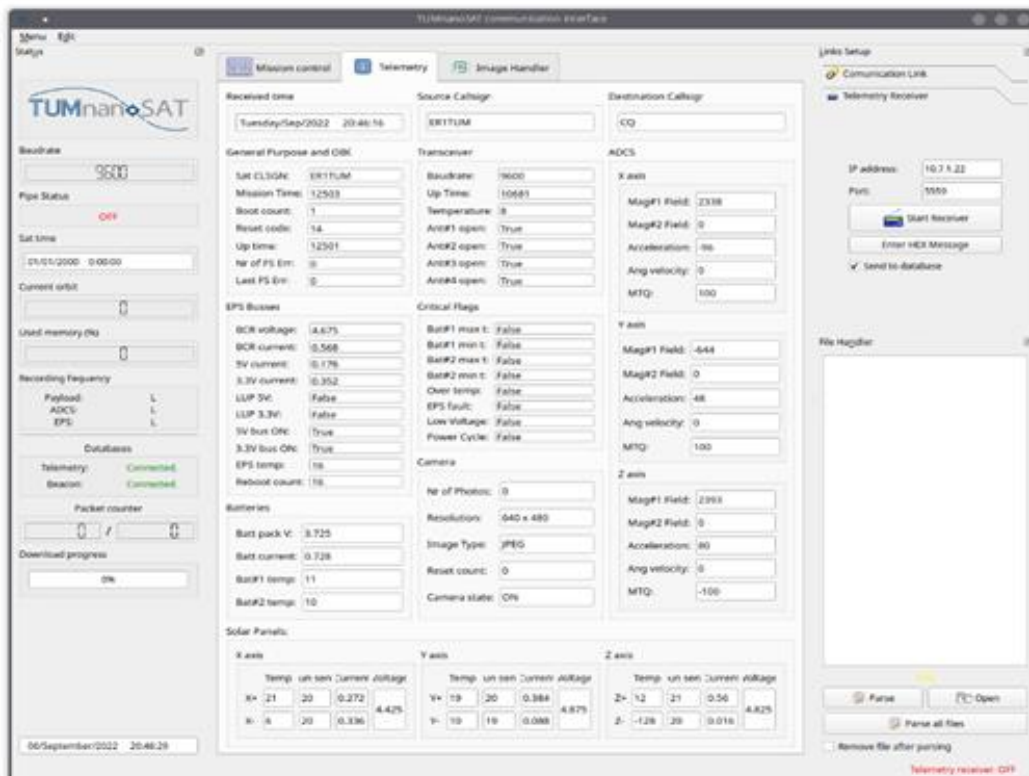


Figura 13. Decodificarea mesajelor telemetrice ale TUMnanoSAT.

Este de menționat faptul că Centrul de Tehnologie Spațială UTM are o infrastructură terestră pentru comunicații prin satelit, monitorizare și control cu o dezvoltare ulterioară a recepției datelor cu configurație flexibilă care se bazează pe tehnologia SDR. Stația de comunicație de telemetrie este dotată cu echipamente specializate pentru a asigura legăturile bidirecționale ale satelitului în zborul pe orbită cu infrastructura terestră. Antenele de telemetrie și antena parabolică sunt capabile să se orienteze pe două axe către nanosatelitul în zbor pe orbită prin driverele de acționare ale modelului Rotor BIG-RAS HR.

Stația de comunicație poate funcționa în cele două benzi principale de radioamatori pentru comunicarea cu sateliți mici. Aceste benzi sunt: banda VHF (2m) și UHF (70 cm). Antenele, montate pe catarg, sunt conectate cu cablu RF ecoflex la LNA-uri (Low Noise Amplifiers). X-Quad 70 cm și X-Quad 2 m la LNA SP70 și, respectiv, LNA SP200. Următorul nod conectat de la LNA constă din relee coaxiale care împart semnalul pentru a-l alimenta în ICOM IC-9100 și USRP B200/E310 pentru a fi procesat în continuare. Pe lângă conexiunile RF principale, există și o conexiune de linie de date de la stația PC Ground la unitățile de procesare a semnalului (ICOM și USRP) și o conexiune de linie de control la controlerul rotitor și relee.

În urma testelor de comunicare terestre și comunicărilor reale s-a confirmat că procedurile și algoritmi de comunicație care realizează dialogul diversificat cu rate de transmisie diferite, cu diferite modalități de împachetare și codare a mesajelor asigură o comunicare eficientă și fiabilă a nanosatelitelui cu stațiile terestre (fig. 13).

2.5 Subsistemul de procesare a datelor

Orice nanosatelit este format din multe subsisteme diferite care trebuie să funcționeze împreună ca un sistem integrat. Arhitectura nanosatelitului are un rol-cheie în a face acest lucru posibil, legând împreună module și echipamente de la diferiți producători și cu funcționalități variate, astfel încât toate să poată fi gestionate și operate eficient. Una dintre componentele de bază ale nanosateliților este computerul de bord (OBC) – o componentă hardware care rulează software-ul de bord și care controlează funcțiile principale de care are nevoie nanosatelitul pentru a funcționa eficient. Structura de bază OBC utilizată în mod obișnuit în CubeSats educațional încorporează atât funcționalitatea generală OBC, cât și sistemul de determinare și control al atitudinii (ADCS) pe același microcontroler (MCU).

Pentru comunicarea cu alte module de sistem, cum ar fi sarcinile utile, sistemul de alimentare electrică (EPS) și modulul de comunicație RF, se utilizează interfețe și protocoale simple încorporate, cum ar fi UART, I2C și SPI, utilizate în mod obișnuit în aplicațiile standard încorporate. Calculatorul de bord (OBC) va efectua toate calculele necesare satelitului aflat pe orbită, va achiziționa și acumula datele din setul de senzori, inclusiv camera foto, le va stoca în memoria permanentă, va comunica cu stațiile terestre pe baza protocolului AX.25 (fig. 14).

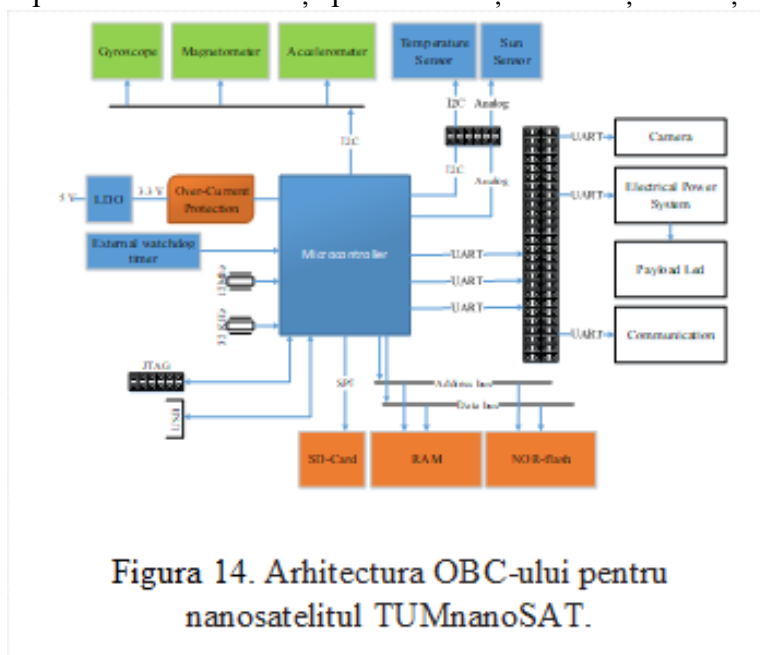


Figura 14. Arhitectura OBC-ului pentru nanosatelitul TUMnanoSAT.

În urma analizei cerințelor OBC și a performanței microcontrolerului, a fost propus pentru OBC TUMnanoSAT un MCU tip STM32F427IIT6 cu nucleu Cortex-M4F ARM, a cărui frecvență maximă de lucru este de 180 MHz, cu memorie Flash de 1MB, 196KB RAM împărțit în trei blocuri (112KB, 16KB, 64KB), 64KB RAM cuplată cu CPU (CCRAM), accesibilă numai pentru CPU prin magistrala D-Code, 2 DMA de uz general controlere, controler de memorie extern, set de interfețe de comunicație serială (SPI, I2C, UART / USART, SD, USB, CAN, Ethernet), temporizatoare pe 16 și 32 de biți (inclusiv RTC), 3xADC, 2xDAC, 2 watchdog și alte componente. În scopul detectării timpurii a erorilor cauzate de coruperea memoriei sistemului (în special, memoriile interne ale MCU principal), OBC este echipat cu un MCU auxiliar, capabil să acceseze întregul spațiu de memorie internă, precum și registrele interne prin interfața de depanare SWD a MCU principal. Între timp, MCU-ul principal monitorizează integritatea datelor din memorii și registrele de stare prin interfața SWD a MCU-ului auxiliar. Această configurație permite monitorizarea reciprocă neinvazivă a memoriilor interne și a stării de execuție fără a o întrerupe. Algoritmii de monitorizare prin interfața SWD sunt identici pentru ambele MCU. MCU auxiliar face parte din familia S32K14 și conține sectorul RAM de control al parității pentru detectarea erorilor soft de 1 bit per octet sau erori multiple impare pe octet. Pentru a fi mai compact și cu o reacție mai înaltă, am inclus pe modulul OBC 4 senzori inerțiali triaxiali: 2 accelerometre și 2 magnetometre digitale. OBC mai conține o memorie Flash NOR cu capacitate

de 1 Gb, conectată la MCU prin interfața SPI, un slot pentru card SD (interfață SD de mare viteză 50MHz, max. 12,5 MBps), precum și driverele H-bridge împreună cu conectori, dedicate pentru conectarea la bobinele magnetorquer.

În pofida experienței acumulate în elaborarea prototipurilor de nanosateți în cadrul proiectelor precedente, elaborarea software pentru nanosatelitul TUMnanoSAT ne-a creat o serie de provocări, la care a fost necesar de găsit în mod creativ soluții eficiente. În cazul nanosatelitului TUMnanoSAT puterea de calcul se concentrează pe OBC, iar microcontrolerelor subsistemelor li se repartizează funcții auxiliare. În astfel de situație e necesar de proiectat și dezvoltat structura software de tip modular, care realizează în mod concurent o serie de procese/task-uri paralele. Prin urmare, acest soft trebuie fundamentat pe un microsistem de operare RTOS, care distribuie resursele OBC-ului în timp real pentru zeci de procese cu diverse sarcini și diferite priorități. Nanosatelitul trebuie să fie prezentat ca o ”mașină” cu stări finite și să fie modelat de către software OBC-lui. Fiecare stare are un set predeterminat de acțiuni/sarcini logice de rulat, care sunt reprezentate abstract ca procese independente în memoria OBC. Tranzițiile de stări au loc prin sondarea valorilor stărilor satelitului. Totodată, întreruperile hardware trebuie implementate pe perifericele selectate, care asigură o comutare asincronă la stările de urgență pentru siguranță.

Ținând cont de aceste cerințe, precum și de structura și misiunile nanosatelitului TUMnanoSAT, s-a propus structura conceptuală a soft-ului, prezentată în fig. 16, care include o gamă de module, care efectuează achiziția continuă a datelor de către toate subsistemele satelitului, a setului de senzori, imaginilor de la camera video și stocarea acestora în baza de date. O altă serie de module efectuează procesarea datelor în conformitate cu cerințele subsistemelor și transmiterea lor către stațiile terestre, la solicitarea acestora. O altă serie de module efectuează configurarea componentelor/subsistemelor satelitului în funcție de necesitate. Această gamă de module de program rulează ca procese independente sau interdependente sub controlul microsistemului de operare RTOS. Accesul la unitățile periferice, inclusiv la subsisteme se realizează prin intermediul setului de drivere, parte componentă a RTOS.

Elaborarea softului necesită divizarea ierarhică a modulelor de program în corespundere cu teoria sistemelor de operare pentru sistemele încapsulate (embedded systems). În consecință, tot setul de procese/task-uri a fost repartizat pe trei niveluri [19]:

- *Nivelul inferior*, care interacționează nemijlocit cu partea hard a microcontrolerului, include nucleul microsistemului de operare RTOS, setul de drivere de nivel jos, care controlează toate unitățile periferice și librăriile de sistem, necesare nucleului și setului de drivere;

- *Nivelul intermediar*, conține setul de drivere complexe de interacțiune cu componentele concrete ale nanosatelitului TUMnanoSAT: toată gama de senzori, actuatori și librăriile auxiliare. De menționat că la acest nivel sunt plasate toate modulele de program ce realizează și asigură sistemul de fișiere pe micro-card SD;

- *Nivelul aplicativ* conține toate modulele care se realizează sub formă de procese/task-uri independente sau/și interdependente, inclusiv librăriile aplicative.

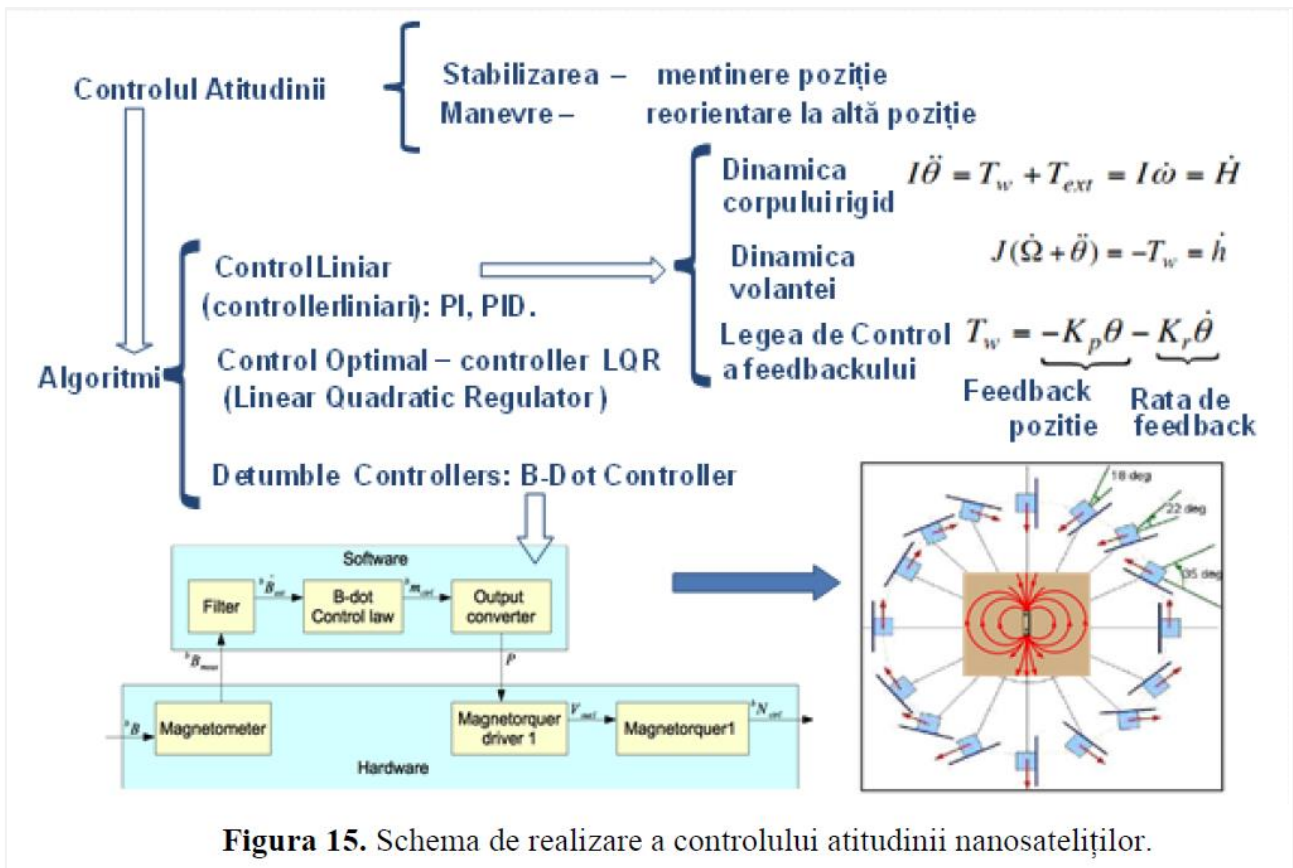
Elaborarea software pentru nanosatelitul TUMnanoSAT s-a canalizat pe crearea modulelor de program pentru nivelul intermediar și cel aplicativ, ținând cont de componența și misiunile lui. Desigur, aceste module s-au dezvoltat în concordanță cu interfețele și funcțiile nivelului inferior (RTOS).

2.6 Subsistemul de control atitudine al nanosatelitului TUMnanoSAT

TUMNANOSAT este echipat cu toate componentele necesare sistemului de determinare și control al atitudinii (ADCS). Pe lângă faptul că este utilizat pentru educația studenților, obiectivul principal al TUMnanoSAT este dezvoltarea în continuare a unui ADCS fiabil și precis pentru viitorii nanosateți, care ar fi un alt punct de hotar important pentru realizarea formațiilor de nanosateți. Viitorul sistem ADCS va permite satelitului să-și determine propria orientare în spațiu și, în limita capacităților sale de acționare, să controleze și să realizeze această atitudine.

Determinarea atitudinii se bazează pe magnetometre, senzori solari, accelerometre și microgiroscoape. Senzorii solari sunt montați pe fiecare dintre cele cinci panouri laterale ale TUMnanoSAT și măsoară poziția/direcția Soarelui. Magnetometrele primare sunt montate pe placa ADCS și măsoară vectorul câmpului magnetic al Pământului (EMF). Pentru siguranță s-au stabilit magnetometre secundare pe fiecare dintre panourile laterale, care măsoară doar o componentă a vectorului câmpului magnetic. Microgiroscoapele și accelerometrele sunt montate pe PCB-ul OBC-ului și măsoară vectorul unghiular tri-dimensional al satelitului. Sistemul de control al atitudinii al TUMnanoSAT se bazează doar pe cupluri magnetice ale magnetorquerelor (fără roți de reacție în miniatură, montate pe panourile laterale), care produc un moment magnetic ce interacționează cu câmpul magnetic al Pământului și, ca urmare, cuplul rezultat schimbă atitudinea nanosatelitului.

Schemă generală de control atitudine a nanosateților, care prevede mișcarea de stabilizare și reorientare a poziției satelitului, aplicând diferiți algoritmi de reglare liniară sau optimă a poziției, precum și de combatere a rostogolirii aleatorii a satelitului (fig. 15). În baza schemei de mai sus și luând în considerare misiunile nanosatelitului TUMnanoSAT, a fost proiectată structura software și elaborate programele respective (fig.16).



Structura soft-ului este organizată ierarhic în trei niveluri [19, 20, 21]:

- Nivelul de sus, aplicativ, care se prezintă ca procesul/task-ul de bază a sistemului de control atitudine;
- Nivelul intermediar, care întrunește un set de drivere complexe cu dispozitivele senzoriale și actuatorii sistemului ADCS;
- Nivelul de jos, nivelul fizic, de interacțiune al microcontrolerului cu dispozitivele senzoriale și actuatorii sistemului ADCS prin intermediul interfețelor acestuia.

Nivelul fizic de interacțiune al microcontrolerului cu dispozitivele senzoriale și actuatorii sistemului ADCS prin intermediul interfețelor acestuia, deși se referă la nivelul sistemului de operare, a fost necesară o optimizare a funcționării cu scopul accelerării funcționării și asigurării fiabilității prin excluderea situațiilor conflict, stabilind prioritățile întreruperilor soft și hard pentru interfețele respective (fig. 16).

Nivelul intermediar întrunește toate driverele complexe cu dispozitivele senzoriale ale sistemului ADCS: magnetometrele, accelerometrele, microgiroscoapele și senzorii de Soare.

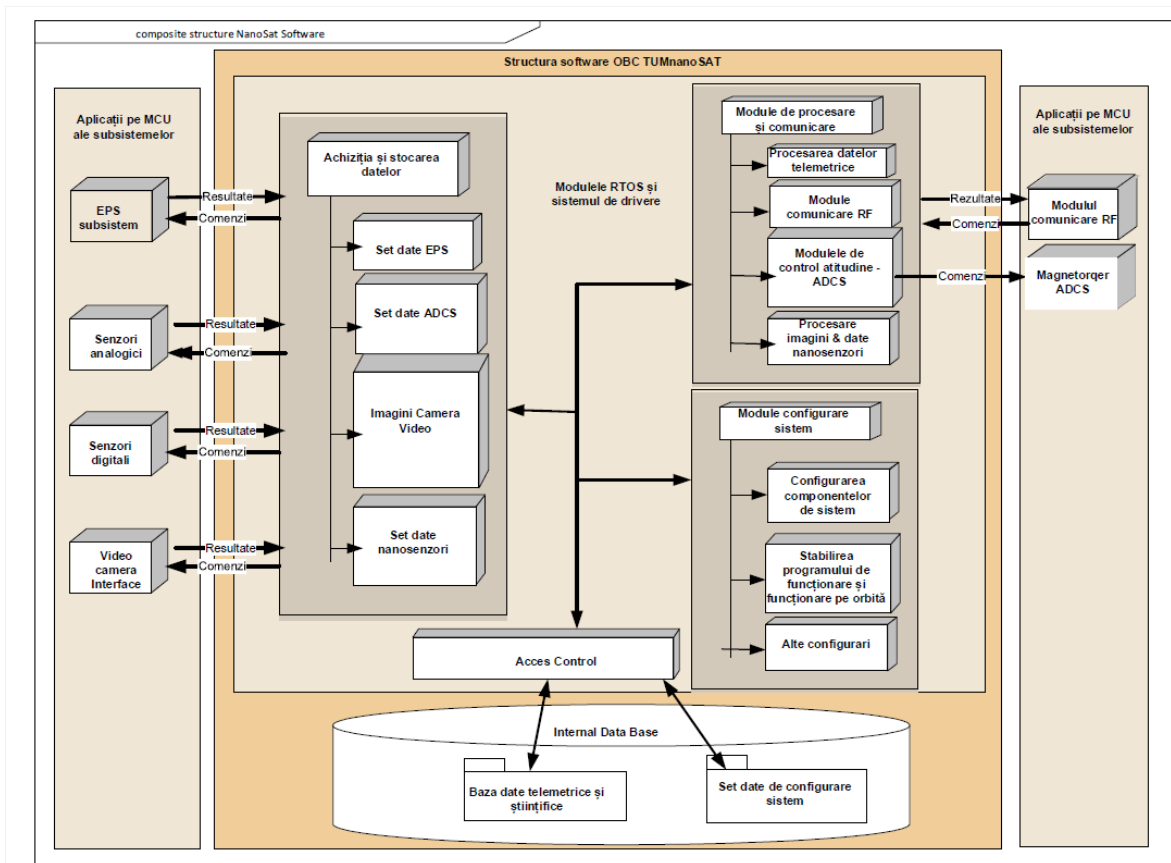


Figura 16. Structura conceptuală a software OBC TUMnanoSAT.

Funcția de bază este achiziția datelor de către setul de senzori inteligenți și transferarea acestor date în structurile de date ale procesului de nivel înalt de control atitudine, precum și stocarea pe SD-microcard la fiecare orbită separat. La același nivel sunt și procedurile de acționare a magnetorquerelor. Din punct de vedere al tehnicii de programare, acest nivel conține două subprocese/sub-task-uri subordonate procesului de bază al controlului atitudinii.

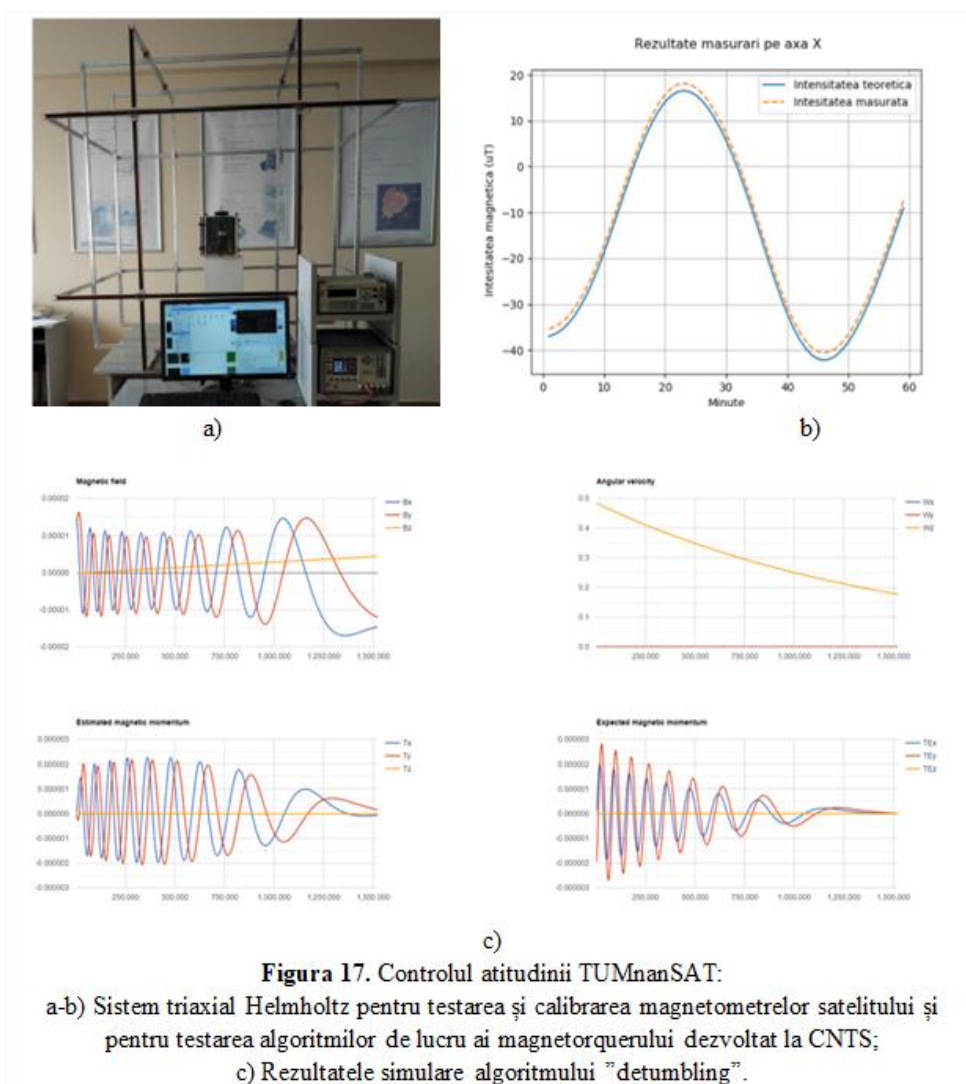
Nivelul aplicativ este cel mai complicat și este format din următoarele module de program:

- Achiziție de date de la senzorii ADCS, care activează subprocesul din nivelul intermediar în momentele necesare;
- Determinare a atitudinii curente a nanosatelitului în baza datelor achiziționate;
- Control al atitudinii nanosatelitului – reorientarea poziției actuale a nanosatelitului către o altă poziție solicitată (de referință);
- Combatere a rostogolirii aleatorii (detumbling) – stabilizarea/menținerea poziției;
- Controlul/managementul timerelor – necesar pentru determinarea poziției (punctului concret pe orbită) în baza datelor senzorilor de Soare.
- Librăriile aplicative, utilizate de modulele precedente, elaborate la Institutul de Tehnologie de la Massachusetts.

Pentru a calibra senzorii și pentru a testa magnetorquerule și algoritmi de control al atitudinii, construim o instalație pentru a simula condițiile geomagnetice pentru satelit. Verificarea algoritmilor de control al atitudinii a fost efectuată în standul de simulare a câmpului magnetic terestru. Acest stand este elaborat de CNTS și asigură în mod computerizat generarea unui câmp magnetic identic ca intensitate și direcție în orice punct al orbitei nanosatelitului [16].

Rezultatele obținute confirmă corectitudinea și calitatea orientării satelitului, care sunt parțial prezentate în fig. 17.

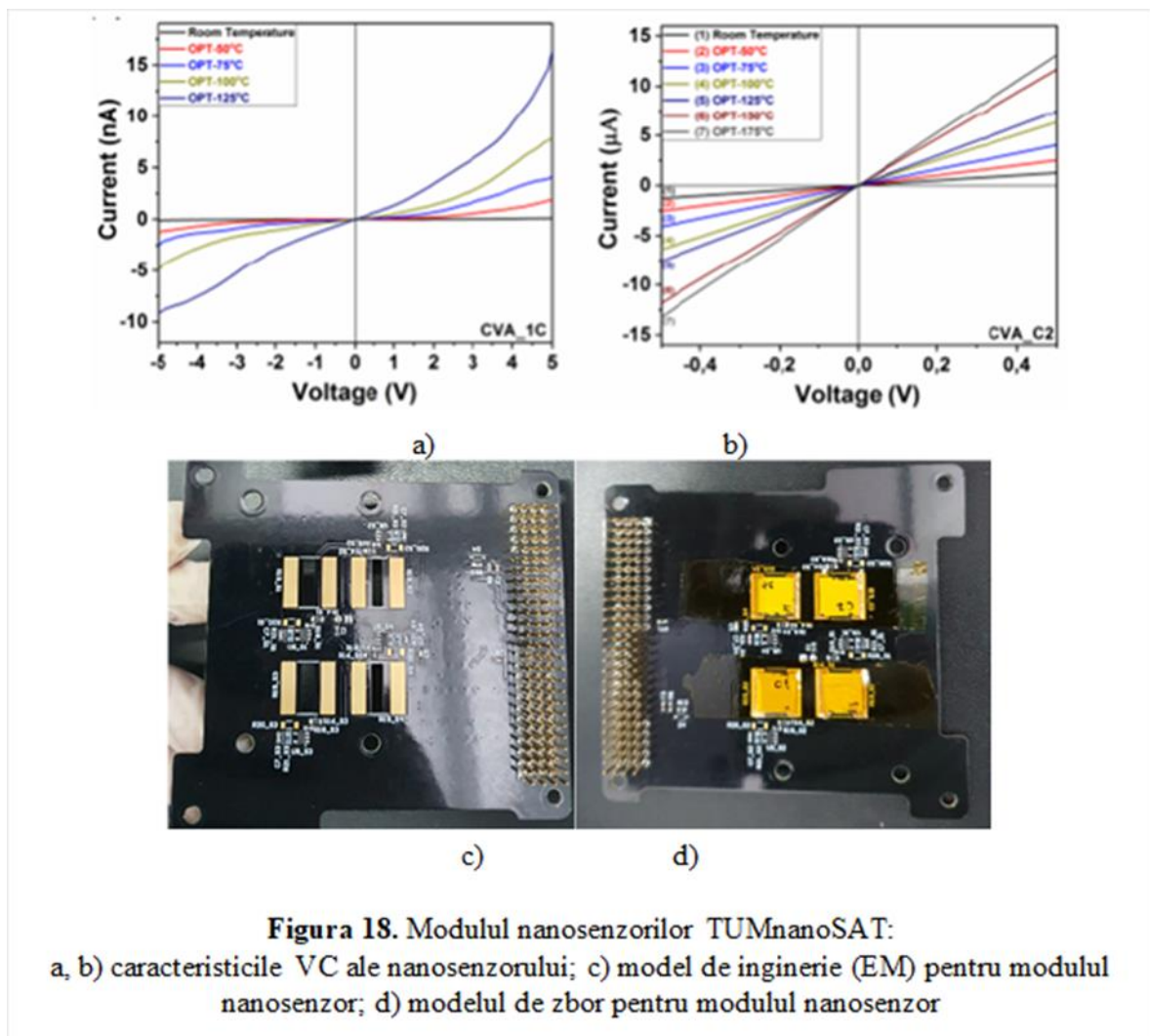
3. Sub sistemele cu sarcină utilă "TUMnanoSAT"



Subsistemele "TUMnanoSAT" cu sarcină utilă pentru realizarea acestei misiuni conțin următoarele componente.

1. Echipament de determinare a atitudinii, inclusiv MPU-9150, care combină două cipuri: MPU-6050, ce conține un giroscop cu 3 axe, un accelerometru cu 3 axe și un Digital Motion Processor™ (DMP™) integrat, capabil să proceseze complexe Algoritmii MotionFusion și AK8975, o busolă digitală cu 3 axe. Algoritmii MotionFusion pe 6 axe integrați ai piesei accesează toți senzorii interni pentru a aduna un set complet de date ale sensorului.

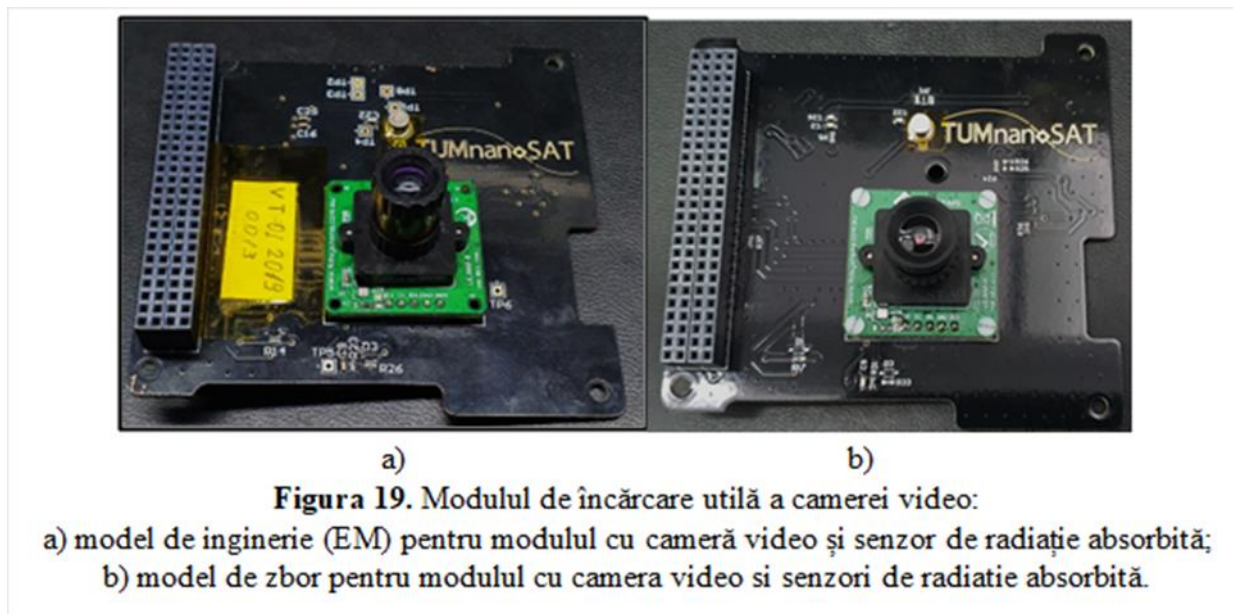
2. Testarea comportamentului nanosenzorilor în condițiile de spațiu dezvoltat de Centrul de cercetare în nanomateriale UTM în domeniile științei materialelor și nanotehnologiilor, care poate duce la modificarea caracteristicilor prezentate în figura 18. Rezultatele testării spațiale vor fi utile și concentrate pe dezvoltarea de noi nanomateriale și nanodispozitive pentru diverse aplicații, inclusiv electronică, fonică, biomedicină, detectarea radiațiilor etc. (fig. 18) [22-24].



3. Modulul de captare a imaginii include un modul de cameră serial integrat micro-CAM-II, care utilizează un senzor color CMOS VGA împreună cu un cip de compresie JPEG, de cost redus și cu putere de consum redusă. Modulul are o interfață serială integrată (TTL) care este potrivită pentru o conexiune directă la portul OBC UART. Modulul micro-CAM-II este capabil să capteze imagini în ambele formate: imagini brute cu un singur cadru cu rezoluție joasă (160x120) sau imagini JPEG cu rezoluție medie (640x480). Modulul camerei de imagine este

destinat captării imaginilor cu rezoluție scăzută ale suprafeței terenului din zona locală. Imaginile vor fi împărțite în pachete pentru a se încadra în cadrul AX.25 (fig. 19).

Captarea imaginilor joacă un rol foarte important pentru misiunile de teledetecție spațială. Problema proiectării captoarelor de imagini satelitare a fost analizată în proiectele precedente de

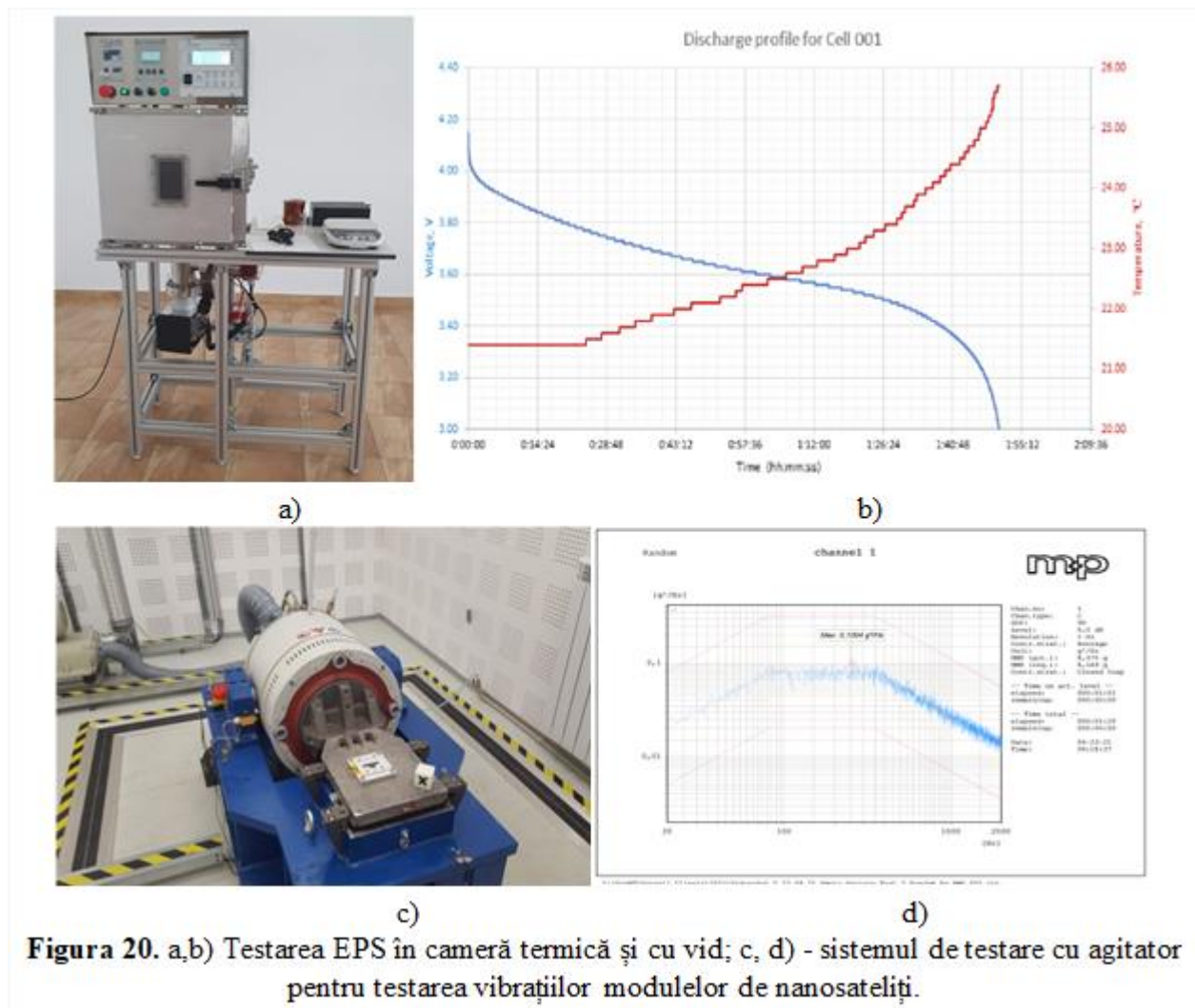


elaborare a nano/microsateliților, însă în cadrul proiectului de elaborare a nanosatelitului TUMnanoSAT s-a pus accentul nu pe obținerea de imagini cu rezoluție maximă posibilă în limita construcției satelitului, ci pe posibilitatea de obținere a imaginilor în diferite formate, precum și cu diferite rezoluții în scopul stocării acestora în memoria satelitului și transmiterea cu maximă eficiență la stațiile terestre prin aplicarea de diverse metode și algoritmi de comunicare.

În urma utilizării experienței precedente și a analizei minuțioase a unei game largi de captori și senzori de imagini, s-a recurs la realizarea experimentală a două variante de captori de imagini cu lentile încorporate, cu scopul selectării variantei care corespunde mai bine cerințelor și dimensiunilor nanosateliților din clasa CubeSat 1U. Pentru varianta finală s-a selectat modul de cameră serial integrat micro-CAM-II, în care se utilizează un senzor color CMOS VGA.

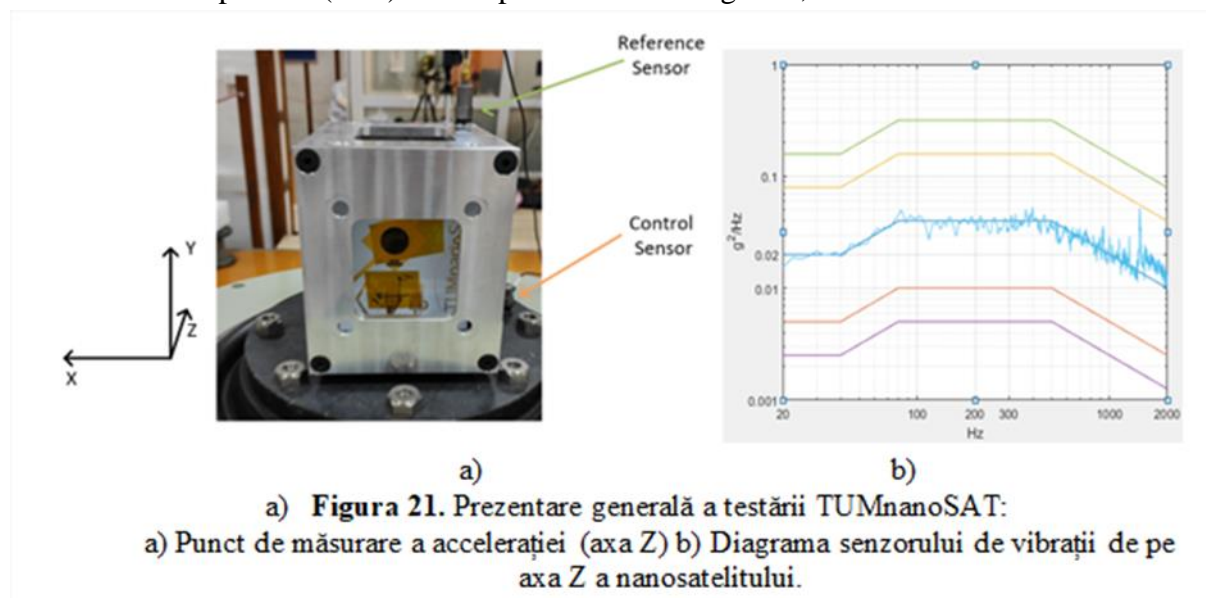
4. Testarea finală a nanosatelitului TUMNANOSAT

Proiectarea TUMnanoSAT pentru programul KiboCube a fost conformă cu cerințele de siguranță raportate în „JEM Payload Accommodation Handbook Small Satellite Deployment Interface Control Document (JX-ESPC-101133)”, în special, cele specifice legate de operațiunile din interiorul ISS, inclusiv posibilitatea să fie manipulat de astronautul de la bord. Pentru validare sunt necesare teste funcționale la nivel înalt asupra subsistemelor și ansamblurilor TUMnanoSAT. Funcționalitatea componentelor a fost verificată în diferite momente în timpul



campaniei de acceptare. Trebuie menționat faptul că testarea nanosatelitului TUMnanoSAT a fost efectuată de personalul CNTS cu infrastructura ROSA pe baza acordului de cooperare dintre TUM și Institutul de Științe Spațiale ROSA [10]. S-a folosit instalația integrată de asamblare, integrare și testare (AIT) special creată pentru sateliți mici și sarcini utile/subsisteme aferente. Facilitatea AIT este capabilă să efectueze procedurile necesare pentru sateliți până la 50 kg cu un volum care nu depășește 300x300x600mm. Centrul de Competență pentru Tehnologii Nanosatelite din România (ROST-CC) a fost înființat ca parte a Institutului de Științe Spațiale și sub supravegherea ROSA. Facilitatea AIT include integrarea următoarelor componente: cameră mare curată pentru operațiuni de integrare; camera de vid termic; sistem de testare mecanica/structurala cu agitator pentru testarea vibrațiilor; camera de compatibilitate electromagnetice; facilități suport: săli tehnice; laboratoare de prototipare rapidă mecanică și

electronică, care acoperă toate necesitățile pentru testarea nanosateliților. Secvențe de testare a modului de putere (EPS) sunt prezentate în fig. 20, în care se arată cum acest



modul supus stresului termic pe tot ciclul de încărcare/ descărcare a bateriilor.

Testele de vibrație reală au fost efectuate pentru nanosatelițul integral de-a lungul axelor X, Y și Z, cu acționare sinusoidală de nivel scăzut și vibrație aleatorie. Momentele cheie de verificare sunt următoarele: nicio rupere în structura principală; structura principală trebuie să satisfacă frecvența naturală specificată; frecvența naturală înainte și după teste trebuie să rămână neschimbată; nicio deschidere necorespunzătoare a antenei și nicio funcționare defectuoasă a nanosateliților; nicio rupere a materialului, cum ar fi capacul sau panourile solare; fără slăbire în toate elementele de fixare. Acționarea sinusoidală de nivel scăzut este adecvată pentru verificarea modelului de structuri simple cu componente relativ rigide, a căror flexibilitate se limitează la montarea suportului sau a hardware-ului de izolare a frecvenței.

Acest test se execută pe fiecare axă cu frecvența 20~2000 Hz și amplitudinea 0,5 G. Nivelul vibrațiilor este aleatoriu și se efectuează cu frecvența 20~2000 Hz și cu amplitudinea 02-04 [G²/Hz]. Acest nivel de vibrații corespunde cerințelor lansatorului Falcon-9 și cargoului Dragon 2 ale companiei SpaceX (în conformitate cu regulamentul JX-ESPC-101132). Acest nivel de testare a fost definit de Formularul de evaluare a controlului fracturii structurii. Unele rezultate sunt prezentate în fig. 21. După finalizarea testelor nanosatelițul a fost introdus în capsula de lansare JSSOD (JAXA), a fost transportat la Stația Spațială Internațională cu lansatorul Falcon-9 și cargoul Dragon 2 ale companiei SpaceX și plasat pe orbită din modulul Kibo al SSI pe 12 august 2022 (fig. 22).

Concluzii

Acest proiect al nanosatelitului TUMnanoSAT din cadrul programului KiboCube include mai multe misiuni. Pornind de la conceptul general, în cadrul etapei Critical Design Review a fost dezvoltat modelul 3D și toată documentația tehnică a satelitului TUMnanoSAT, s-a realizat modul de zbor și în final a fost lansat cu Falcon-9 și cargoul Dragon 2 ale companiei SpaceX și plasat pe orbită din modulul Kibo al Stației Spațiale Internaționale pe 12 august 2022. Misiunile TUMnanoSAT sunt în principal cu obiective educaționale, în realizarea cărora au fost implicați studenți și masteranzi, iar alte obiective sunt cu elemente de cercetare și verificări tehnologice.

În urma elaborării

TUMnanoSAT au fost realizate soluții concrete cu principalele caracteristici pentru modulele de bază: comunicare, control al subsistemului de alimentare, al calculatorului de bord, care asigură realizarea misiunilor planificate. Sarcina utilă TUMnanoSAT constă din trei părți componente. Prima se referă la acumularea de date pentru control al atitudinii în scopul modernizării algoritmilor respectivi pentru misiunile viitoare. A doua componentă a sarcinii utile se referă la testarea comportamentului în condiții de spațiu al nanosenzorilor elaborați de Centrul de cercetare în nanomateriale în domeniile științei materialelor și nanotehnologiilor al UTM. Rezultatele testării vor fi utile pentru dezvoltarea de noi nanomateriale și nanodispozitive pentru diverse aplicații. A treia componentă se referă la captarea imaginilor spațiale în diverse formate și transmiterea acestora către stațiile terestre.

În baza proiectului KiboCube TUMnanoSAT, Centrul Spațial al UTM a implicat în mod direct studenții la fiecare etapă a misiunilor spațiale: proiectarea, dezvoltarea și testarea subsistemelor de nanosateliti, prelucrarea și utilizarea datelor spațiale pentru a promova interesul studenților pentru inginerie și tehnologii spațiale.



Figura 22. Ultima inspecție a nanosatelitului TUMnanoSAT și introducerea lui în capsula de lansare JSSOD.

Mulțumiri

Această lucrare reflectă experiența și rezultatele dezvoltării nanosatelitului TUMnanoSAT la Centrul de Tehnologii Spațiale de la Universitatea Tehnică a Moldovei în cadrul proiectului 20.80009.5007.09 „Dezvoltarea și lansarea seriei de nanosateliti cu misiuni de cercetare de la Stația Spațială Internațională, monitorizarea acestora, post-operare și promovarea tehnologiilor spațiale”, care a fost lansat gratuit de către JAXA pe baza programului UNOOSA KiboCube în runda a IV-a.

Cu această ocazie, mulțumim Biroului Națiunilor Unite pentru afaceri spațiale și Agenției japoneze de explorare aerospațială. Acest proiect a fost posibil datorită programului KiboCUBE, programul privind lansarea TUMnanoSat de pe modulul experimental japonez Kibo al Stației Spațiale Internaționale și care a creat această oportunitate extraordinară.

Bibliografie

1. J. Farkas, CPX: Design of a Standard Cubesat Software Bus, California State University, California, USA, 2005.
2. L. Dusseau et al., CUBE SAT SACRED: a student project to investigate radiation effects, In: RADECS 2005 Proceedings, Cap d'Agde, France, 2005.
3. B. Larsen, The Montana nanosatellite for science, engineering, and technology for the AFRL/NASA university nanosat program.
4. J. Bouwmeester et al., Advancing nanosatellite platforms: the Delfi program, - In: Proceedings of the 59th International Astronautical Congress, Glasgow, Scotland 2008.
5. J. Bouwmeester, J. Guo, Survey of worldwide pico- and nanosatellite missions, distributions and subsystem technology. - Acta Astronautica 67 (2010) 854–862 pp.
6. CEOS EO handbook – catalogue of satellite missions. –In: <http://database.eohandbook.com/database/missiontable.aspx>
7. World's largest database of nanosatellites, more than 1700 nanosats and CubeSats. – In: <http://www.nanosats.eu/>
8. CubeSat Design Specification (CDS) Rev. 13. The CubeSat Program, Cal Poly SLO, 2013. – In: <http://cubesat.org>
9. TUMnanoSAT proposal for CubeSAT Mission Application for the Fourth Round in the framework of United Nations/Japan Cooperation Programme on CubeSat Deployment from the International Space Station (ISS) Japanese Experiment Module "KiboCube". – Technical University of Moldova. Chișinău, 2019. 63 p.
10. Infrastructure of the Spatial Sciences Institute (ROSA - Romania) In: http://www2.space-science.ro/?page_id=22&lang=en
11. The United Nations/Japan Cooperation Programme on CubeSat Deployment from the International Space Station (ISS) Japanese Experiment Module (Kibo) "KiboCUBE" – In: http://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/psa/hsti/kibocube_2019.htm
12. BOSTAN, I., CANTZER, V., SECRIERU, N., BODEAN Gh., CANDRAMAN, S. Research, Design and Manufacture of Functional Components of The Microsatellite "Republic of Moldova". - In: 2nd International Communication Colloquium, –Aahen, 2014, pp. 19-30.
13. Bostan I., Piso I.M., Bostan V., Badea A., Secrieru N., Trusculescu M., Candraman S., Margarint A. "Architecture of the ground stations - satellites communication network" - In: Meridian Ingineresc, 2016, Nr. 2, pp. 96 – 103.
14. Bostan V., Secrieru N., Ilco V., Melnic V., Martiniuc A., Varzaru V., TUMnanoSAT Nanosatellite and Kibocube Program, Conference on Communications COMM 2020. Ediția a 13-a, 18-20 iunie 2020, București. New Jersey, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020, pp. 503-508. ISBN 978-172815611-8.

15. BOSTAN, I., BOSTAN, V., MELNIC, V., ILCO, V., MARTÎNIUC, A., SECRIERU, N. KIBOCUBE program for the launch of the TUMnanoSAT nanosatellite. – In: The 10th International Conference on Electronics, Communications and Computing, Chișinău, Republic of Moldova, October 23-26, 2019.
16. BOSTAN, I., BOSTAN, V., MELNIC, V., ILCO, V., MARTÎNIUC, A., VĂRZARI, V. Tri-axial square helmholtz coil for testing satellite stabilization with magnetorquers . - Journal of Engineering Science (JES), Vol. XXVII (4) 2019. – <https://jes.utm.md/>. ISSN 2587-3474 / E-ISSN 2587-3482
17. BOSTAN Viorel, BOSTAN Ion, SECRIERU Nicolae, VĂRZARU Vladimir, MELNIC Vladimir, MARTINIUC Alexei, ILCO Valentin. The Experience of Preparing to Launch the TUMnanoSAT nanosatellite, - *The 12th International Conference on Electronics, Communications and Computing* , 21-22 October, 2021, Chisinau, Republic of Moldova.
18. BOSTAN Viorel, BOSTAN Ion, SECRIERU Nicolae, VĂRZARU Vladimir, MELNIC Vladimir, MARTINIUC Alexei, ILCO Valentin. Mission Monitor and Control Platform for TUMnanoSAT Ground Segment, - *The 12th International Conference on Electronics, Communications and Computing*, 21-22 October, 2021, Chisinau, Republic of Moldova.
19. MARTÎNUC, A., SECRIERU, N. Functional safety and reliability of "TUMnanoSAT" satellite on-board computer software. – In: The 10th International Conference on Electronics, Communications and Computing, Chișinău, Republic of Moldova, October 23-26, 2019
20. MELNIC Vladimir, COJUHARI Irina. Synthesis the PID Control Algorithm for Speed Control of the DC Motor based on the Genetic Algorithm, - *The 12th International Conference on Electronics, Communications and Computing* 21-22 October, 2021, Chisinau, Republic of Moldova.
21. MELNIC, V., COJUHARI I. Synthesis the PID Control Algorithm for Speed Control of the DC Motor based on the Genetic Algorithm - In: the 12th International Conference on Electronics, Communications and Computing, 21-22 October, 2021, Chisinau, Republic of Moldova.
22. LUPAN, O., Semiconducting Oxide - Based Micro- and Nano-sensors for Environmental and Biomedical Monitoring. - In: NAP, Ucraina (November, 2020) 2020 IEEE International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties - NAP 2020. Disponibil: https://nap.sumdu.edu.ua/index.php/nap/nap2020/pages/view/scientific_program
23. M. Hoppe, O. Lupan, V. Postica, N. Wolff, V. Duppel, L. Kienle, et al., "ZnAl₂O₄ - Functionalized Zinc Oxide Microstructures for Highly Selective Hydrogen Gas Sensing Applications ", *Phys Status Solidi (a)*, vol. 215, pp. 1700772, 2018.
24. O. Lupan, V. Postica, J. Gröttrup, A.K. Mishra, N.H. de Leeuw, J.F.C. Carreira, et al., "Hybridization of Zinc Oxide Tetrapods for Selective Gas Sensing Applications", *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 9, pp. 4084-4099, 2017.

Articolul este depozitat în baza de date IBN:

https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_numar_revista/26/2138

Prezentat la redacție: 30 octombrie, acceptat: 30 noiembrie 2022.