

Prof. dr hab. Tadeusz PISARKIEWICZ
Instytut Elektroniki
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Kraków 30.05.2024

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY DYSCYPLINY NAUKOWEJ AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA,
ELEKTROTECHNIKA I TECHNOLOGIE KOSMICZNE
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ**

Tytuł rozprawy:

***Zminiaturyzowany ładunek użyteczny (payload) do prowadzenia badań
biologicznych na niskiej orbicie okołoziemskiej z wykorzystaniem
nanosatelitów w standardzie CubeSat***

Autor rozprawy:

mgr inż. Adrianna Graja

1. Analiza stanu wiedzy związanej z przedmiotem rozprawy

Wpływ warunków kosmicznych na istoty żywe stał się istotnym aspektem poznawczym wraz z rozwojem technologii kosmicznych. Wiodącą rolę odegrały tu badania prowadzone przez załogi na pokładach stacji kosmicznych. Niezależnie z początkiem lat dwutysięcznych zaczęto wysyłać w przestrzeń kosmiczną miniaturowe laboratoria na pokładach nanosatelitów z zadaniem prowadzenia badań biologicznych, jednak liczba tych misji biologicznych jest jak do tej pory stosunkowo niewielka, rzędu kilkunastu. Jako orbity okołoziemskie wybierane są tzw. orbity niskie (*ang. Low Earth Orbit LEO*) poniżej 2 tys. km nad powierzchnią Ziemi, co związane jest ze stosunkowo niskim kosztem wyniesienia ładunku oraz relatywnie łatwym prowadzeniem łączności radiowej. Należy jednak brać pod uwagę istnienie szczątkowej atmosfery ziemskiej, zmienne warunki termiczne w mikrolaboratorium, promieniowanie kosmiczne o różnym pochodzeniu i składzie, co ma wpływ na wysłaną w kosmos aparaturę badawczą i materię ożywioną.

Oprócz obserwacji wpływu środowiska kosmicznego na ludzi, prowadzone były badania z wykorzystaniem modelowych organizmów jedno- i wielokomórkowych takich jak przykładowo bakterie *Escherichia coli* czy drożdże. Szybki wzrost i krótkie cykle życiowe tych organizmów pozwalają na ocenę wpływu środowiska kosmicznego często w ramach jednej misji. Podobne zalety wykazują badania niewielkich modelowych roślin. Organizmy modelowe w przestrzeni kosmicznej wymagają ponadto wsparcia procesów życiowych

RDN AEETR/90/2024

poprzez zapewnienie odżywiania, odpowiedniej temperatury czy atmosfery ze strony dedykowanej infrastruktury.

Recenzowana praca jest związana z opracowaniem i zbudowaniem subminiaturowego laboratorium biologicznego, zwanego *payloadem*, z zadaniem równoległego badania dwu różnych obiektów biologicznych. W tym przypadku były to zarodniki grzybów (*Fusarium culmorum*) oraz ziarna rzeżuchy (*Lepidium sativum*). Praca ta jest efektem realizacji projektu, „Bio-nanosatelita wykorzystujący zminiaturyzowane instrumenty lab-on-chip oraz metodologia prowadzenia badań biomedycznych z jego wykorzystaniem w warunkach mikrogravitacji”. Projekt powyższy był finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, w ramach programu Operacyjny Inteligentny Rozwój na lata 2014-2020. W realizacji projektu brało udział konsorcjum naukowo-przemysłowe, gdzie oprócz Politechniki Wrocławskiej – jednostki odpowiedzialnej za opracowanie *payloadu*, brały udział: Uniwersytety Medyczny oraz Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Immunologii i Terapii Doświadczalnej im. Ludwika Hirszfelda PAN – jednostki odpowiedzialne za badania nad obiektami biologicznymi, firma SatRev – jednostka odpowiedzialna za dostarczenie platformy nanosatelitarnej w standardzie CubeSat, przygotowanie nanosatelity do wyniesienia na orbitę oraz za realizację usługi komunikacji naziemnej.

2. Cel rozprawy

Celem rozprawy wg. doktorantki było udowodnienie, że w ramach dostępnych w Polsce technologii, możliwe jest zbudowanie subminiaturowego, autonomicznego laboratorium, wykorzystującego układy lab-on-chip (LOC), dostosowanego do nanosatelitów w standardzie CubeSat i umożliwiającego prowadzenie eksperymentów biologicznych/biomedycznych na niskiej orbicie okołoziemskiej w warunkach mikrogravitacji.

3. Koncepcja budowy nanosatelity

Przyjęta koncepcja budowy nanosatelity bazuje na standardzie CubeSat o rozmiarze 3U, który wybrano mając na względzie obniżone koszty produkcji, montażu, testowania i wyniesienia na orbitę (jednostka 1U odpowiada sześciannemu o boku 10 cm). W skład CubeSata 3U wchodziły: jednostka 2U z przeznaczeniem na eksperyment biologiczny (*lab-payload*), 1U stanowiąca elektroniczne moduły satelitarne (komputer pokładowy, moduł radiowy, system określania i kontroli pozycji, system zasilania) oraz panele fotowoltaiczne. Integracja nanosatelity z rakieta nośną realizowana jest z wykorzystaniem urządzenia zwanego *deployerem*. Deployer poprzez wyrzucenie CubeSata z użyciem wewnętrznego mechanizmu sprężynowego realizuje umieszczenie go na orbicie.

W trakcie projektowania obiektu satelitarnego należało uwzględnić warunki środowiskowe typowe dla orbity LEO, tj. zmiany energii cieplej docierającej do satelity powodujące zmiany jego temperatury, promieniowanie jonizujące oraz obecność wysokiej próżni. Na sumaryczny strumień energii cieplnej składa się promieniowanie Słońca bezpośrednie i odbite od Ziemi oraz promieniowanie emitowane z Ziemi. Dodatkowo należy uwzględnić energię cieplną generowaną przez własne układy satelity. Na oddziaływanie radiacyjne na LEO składają się: strumienie protonów i elektronów pułapkowanych przez

ziemskie pole magnetyczne, kosmiczne promieniowanie słoneczne będące zasadniczo strumieniem protonów, wysokoenergetyczne promieniowanie galaktyczne. Skumulowana dawka promieniowania dla danej wysokości orbity zależy będzie istotnie od materiału, przez który promieniowanie przenika.

Korzystając z doświadczeń wcześniejszych misji biologicznych opracowana została koncepcja lab-payloadu umożliwiającego prowadzenie badań biologicznych na platformie satelitarnej. Podstawowy element funkcjonalny lab-payloadu to nośnik próbki, który odpowiada za hodowlę obiektu biologicznego. Kolejny element to układ detekcji danych, na podstawie których jest możliwa ocena stanu obiektu i przebieg eksperymentu. Trzeci element to układ do kontroli i podtrzymywania życia. Składa się on ze współpracujących ze sobą sensorów i aktuatorów odpowiadających za monitorowanie i kontrolę warunków środowiskowych takich jak temperatura czy doprowadzanie medium. Czwartym elementem jest układ elektroniczny zarządzania przebiegiem eksperymentu i akwizycji danych. Interfejs payload-platforma satelitarna to element piąty. Tworzy go okablowanie elektryczne i sygnałowe związane z zasilaniem lab-payloadu oraz wymianą poleceń i danych z modułami platformy satelitarnej.

4. Realizacja projektu

Istotnym elementem w realizacji projektu był tzw. czas oczekiwania CubeSata na uruchomienie na orbicie, który w tym przypadku określono na ok. 2 miesiące. W takim przypadku praca układów realizujących funkcje utrzymywania warunków odpowiednich do życia jest ograniczona. Z tego względu do dalszych badań wybrano, wspomniane wyżej, próbki zarodników grzybów oraz ziarn rzeżuchy. Obiekty te mogą pozostawać w stanie bezwodnym (w uśpieniu) przez długi okres. Zarodniki grzybów, jak wynikało z badań współpracującego w programie Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, mogą pozostawać w stanie uśpienia w temp. pokojowej przez okres ok. 8 miesięcy. Podniesienie temperatury, możliwe podczas lotu rakiety, skraca stan uśpienia i przykładowo w temp. ok. 60°C stan ten wynosi 120 min. Dostarczenie wody i rozpoczęcie wzrostu powinno przebiegać w przedziale temp. od 10°C do 35°C. W przypadku rzeżuchy zabezpieczenie próbki do czasu uruchomienia eksperymentu polega na utrzymywaniu nienawodnionego ziarna w zacienionym i suchym środowisku. Podanie wody i utrzymanie temp. w przedziale podobnie jak dla zarodników grzybów, powoduje przejście ze stanu uśpienia do wzrostu.

Kształty kanałów hodowlanych dla badanych obiektów biologicznych zostały wybrane spośród różnorodnych rozwiązań opracowanych w Katedrze Mikrosystemów Politechniki Wrocławskiej. Do hodowli zarodników grzybów wybrano dwukanałowy chip szklany, umożliwiający obserwację rozrostu grzybnii i jej ilościową parametryzację. Lab-chip ten składa się z dwu podłoży, przy czym w podłożu dolnym wytworzone są dwa kanały. W jednym z tych kanałów przepływa ciecz (medium channel), w drugim (gas channel) prowadzona jest hodowla. Tego typu konfiguracja spełnia wymagania dotyczące hodowli zarodników grzyba zapewniając stały dopływ powietrza oraz utrzymanie wymaganej wilgotności. Szklany materiał lab-chipu umożliwia ponadto optyczną obserwację próbek.

Dla rzeżuchy wybrano chip polimerowy z gniazdem na nasiono oraz elementami umożliwiającymi wyznaczenie siły wzrostu łodygi i korzenia. Chip ten w kształcie

mikrodoniczki został wytworzony w technologii druku 3D. Otwory w gnieździe na nasiono służą zarówno doprowadzeniu i odprowadzeniu wody, jak również umożliwiają oddziaływanie łodygi i korzenia rozwijającego się ziarna na elastyczne belki, których odchylenie jest miarą działających sił. Dodatkowy duży otwór służył do wymiany gazów.

Warunki termiczne w satelicie są funkcją zarówno zmiennych zewnętrznych wynikających z parametrów procesu orbitowania, jak i zmiennych wewnętrznych będących rezultatem właściwości konstrukcji satelity i sposobu jego pracy. Optymalne warunki termiczne prowadzenia hodowli to zakres 27°C - 28°C dla zarodników grzyba i 15°C - 30°C dla ziarna rzeżuchy. Krótkotrwałe odstępstwa od tych wartości muszą się zawierać w przedziale, o którym wspomniano powyżej, t.j. 10°C - 35°C. Aby zapewnić optymalne warunki hodowli koniecznym było zatem wyposażenie payloadu w dedykowany układ grzewczy z regulatorem temperatury (w tym przypadku był to kontroler PID). Istotną rolę odegrała też pasywna część kontroli temp., którą była odpowiednio przygotowana i zamocowana obudowa lab-payloadu. Obudowa pełni ponadto funkcję osłony mechanicznej i w warunkach próżniowych utrzymuje wewnątrz powietrze o ciśnieniu ok. 1000 hPa. Jako materiał konstrukcyjny obudowy wybrano powszechnie stosowany w przemyśle lotniczym stop aluminium. Jak wykazały ponadto badania symulacyjne, wartość skumulowanej dawki promieniowania pochłanianej przez element tkanki spada znacząco już przy grubości osłony równej 1 mm. Aby dodatkowo zredukować współczynnik emisyjności promieniowania w obszarze termicznym, stop aluminium poddano polerowaniu. Badania obudowy przeprowadzone w komorze termiczno-próżniowej wykazały ponadto, że jest ona dostatecznie próżnioszczelna, co pozwoliło utrzymać ciśnienie wewnętrznego powietrza w próżni na poziomie 900 hPa przez minimum jeden miesiąc.

Za przeprowadzenie doświadczenia biologicznego na orbicie odpowiada wewnętrzny układ elektroniczny lab-payloadu z wbudowanym oprogramowaniem, tzw. moduł PS (*Payload Service*). Moduł PS współpracuje z wybranymi modułami platformy satelitarnej takimi jak: moduł EHS (*Energy Harvesting System*) przetwarzający energię z paneli słonecznych, moduł BMS (*Battery Management System*) zarządzający pakietem akumulatorów, moduł APS (*Auxiliary Power System*) odpowiadający za włączanie/wyłączanie lab-payloadu i stabilizację jego napięcia zasilania. W hodowli próbek biologicznych moduł PS realizuje cykliczne dozowanie wody, pomiar i kontrolę temperatury hodowli grzybów oraz zbiorników z wodą, akwizycję i zapis zdjęć grzybów i ziarna, pomiar na żądanie wartości ciśnienia, wilgotności, temperatury i skumulowanej dawki promieniowania wewnątrz lab-payloadu oraz komunikację z modułami platformy satelitarnej po magistrali CAN.

Lab-payload zawiera w sobie strukturę nośną zwaną lab-insertem. Lab-insert odpowiednio pozycjonuje komponenty w obudowie cylindrycznej a jego strukturę tworzą cztery okrągłe dyski (poziomy) połączone dystansującymi tulejkami. Na poziomie pierwszym umieszczone są lab-chipy szklane wraz z układami grzejnym i optycznym. Poziom drugi tworzą złącza mikrofluidyczne oraz pompki zasilające obwód cieczy dla grzybów. W skład poziomu trzeciego wchodzi mikrodoniczka z układem optycznym oraz pompka zasilająca obwód cieczy dla ziarna. Na poziomie czwartym umieszczono część elektronicznego modułu lab-payloadu. Opisana struktura zwana modelem inżynierskim została poddana testowaniu w warunkach ziemskich.

5. Finalne przygotowanie nanosatelity na Ziemi i jego misja na orbicie

Pierwszym etapem we finalnym przygotowaniu nanosatelity na Ziemi był proces montażu, integracji i weryfikacji jego parametrów. Następnie nanosatelita został poddany testowi drgań losowych, co było wymaganiem odnośnie jego kwalifikacji do lotu raketowego. Nie odnotowano znaczących zmian w widmach odpowiedzi na wymuszenie sinusoidalne w trakcie narostu i spadku częstotliwości w przedziale 20 Hz -20 kHz wykonane przed i po teście drgań losowych. Po ponownym wykonaniu testów funkcjonalności nastąpiło przygotowanie LabSata do wysłania na miejsce integracji z rakieta Falcon 9 (Space X) w misji Transporter-3. Etap drugi był realizowany na miejscu przygotowywania rakiety do lotu i polegał na umieszczeniu LabSata na rakiecie i ostatecznym jej wystrzeleniu.

Po osiągnięciu zaplanowanej orbity przez drugi stopień rakiety następuje etap trzeci, polegający na odseparowaniu i rozruchu większego satelity transportującego SCV (*Satellite Carrier Vehicle*) firmy pośredniczącej D – Orbit. Po etapie rozruchu satelita SCV realizuje rozmieszczanie na orbicie mniejszych satelitów, w tym LabSata.

Etap czwarty, będący realizacją eksperymentu biologicznego, następuje od momentu wysunięcia LabSata z deployera. Etap ten poświęcony był hodowli ziarna i grzybów, z jednoczesnym prowadzeniem obserwacji wspomagających. Wg. oświadczenia doktorantki po czternastu dniach od uruchomienia tego etapu nastąpiła utrata łączności z nanosatelitą, co uniemożliwiło dalsze śledzenie procesów biologicznych. Uzyskane dane potwierdziły jednak pełne działanie zaprojektowanego i wykonanego lab-payloadu.

6. Najważniejsze osiągnięcia autorki rozprawy

- Udział w budowie miniaturowego laboratorium biologicznego w postaci payloadu nanosatelitarnego do pracy w przestrzeni kosmicznej. Oryginalnym rozwiązaniem jest taka konstrukcja payloadu, która umożliwia równoległe badanie dwu różnych obiektów biologicznych, w tym przypadku zarodników grzybów oraz ziarn rzeżuchy.
- Wykorzystanie w konstruowaniu laboratorium biologicznego technologii laboratoriów zintegrowanych lab-on-chip z przeznaczeniem autonomicznego funkcjonowania na orbicie.
- Przeprowadzenie analizy warunków termicznych w mikrolaboratorium z wykorzystaniem aktywnego systemu grzania układów hodowlanych.
- Skonstruowanie układów pomiarowych z przeznaczeniem do pracy w payloadzie.
- Projekt i realizacja hermetycznej obudowy, mającej na celu utrzymanie w jej wnętrzu powietrza atmosferycznego o odpowiedniej wilgotności oraz zapewniającej ochronę przed radiacją kosmiczną. Konstrukcja obudowy umożliwiała wyprowadzenie okablowania i podłączenie do linii zasilania i danych na platformie satelitarnej.
- Przeprowadzenie testów naziemnych sprawdzających działanie elementów laboratorium w warunkach symulowanej mikrogravitacji.

- Wykazanie, że opracowane rozwiązanie spełnia wymagania stawiane ładunkom umieszczanym na orbicie przez raketę Falcon 9 firmy Space X. W rezultacie lot kosmiczny nastąpił 13 stycznia 2022 r i nanosatelita został umieszczony na orbicie o parametrach zgodnych z przyjętymi założeniami.

7. Uwagi krytyczne

W pracy nie dostrzeżono błędów merytorycznych związanych z tematyką rozprawy. Używany język jest poprawny, występuje niewiele drobnych pomyłek językowych. Istnieją pewne sformułowania, które są mało precyzyjne. Przykładowo na str.11 w przedostatnim zdaniu stwierdzenie, że RWV na rys.2a z jedną osią obrotu „utrzymuje obiekt w ciągłym spadku swobodnym” jest nieprecyzyjne.

W cytowanej literaturze istnieją pozycje, np. [104], [105] gdzie w spisie autorów podaje się tylko pierwszego autora i w ten sposób omija się nazwisko autorki niniejszej rozprawy. Niemniej jednak A. Graja jako współautor istnieje w pięciu cytowaniach, zasadniczo w materiałach konferencji międzynarodowych i jednej pozycji w czasopiśmie Sensors, co jest dorobkiem publikacyjnym skromnym, jakkolwiek wystarczającym w świetle obowiązującej ustawy.

Co zadecydowało, że grzejnik wykonano z miedzi a nie np. platyny, co pozwoliłoby na stosowanie mniejszych prądów grzejnych.

8. Ocena końcowa

Wymienione uwagi krytyczne nie wpływają na jakość rozprawy doktorskiej, którą oceniam wysoko. Nie zauważono błędów merytorycznych, które wymagałyby przedyskutowania.

Doktorantka brała udział w budowie miniaturowego laboratorium biologicznego w postaci payloadu nanosatelitarnego wysłanego w przestrzeń kosmiczną. Konstrukcja payloadu umożliwiała równoległe badanie dwu różnych obiektów biologicznych, w tym przypadku zarodników grzybów oraz ziarn rzeżuchy, co jest unikatowe. Skonstruowany nanosatelita został wyniesiony przez raketę Falcon 9 firmy Space X na orbitę wcześniej zaplanowaną.

Celem rozprawy było udowodnienie, że w ramach dostępnych w Polsce technologii, możliwe jest zbudowanie subminiaturowego, autonomicznego laboratorium, wykorzystującego układy lab-on-chip (LOC), dostosowanego do nanosatelitów w standardzie CubeSat i umożliwiającego prowadzenie eksperymentów biologicznych na niskiej orbicie okołoziemskiej w warunkach mikrogravitacji.

Reasumując stwierdzam, że cel pracy został osiągnięty i recenzowana rozprawa doktorska **w pełni spełnia wymagania** wynikające z Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce i wnioskuję zatem o dopuszczenie **mgr inż. Adrianny Graji** do publicznej obrony.



Prof. dr hab. Tadeusz Pisarkiewicz