

Warszawa, dn. 15.03.2025 r.

Dr hab. inż. Mirosław Seredyński, prof. PW
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska
00-665 Warszawa

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Artura Jurkowskiego

**„Opracowanie systemu zarządzania ciepłem
dla układów elektronicznych w małych satelitach”**

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą opracowania recenzji było Pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, Pana prof. dr. hab. Krzysztofa Labusa w uchwale nr 94/2024 z dnia 24 października 2024 r. w sprawie wyznaczenia recenzentów w postępowaniu o nadanie stopnia doktora p. mgr. inż. Arturowi Jurkowskiemu, do którego dołączono egzemplarz monografii. Podstawą prawną sporządzenie recenzji jest ustawa z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

2. Uwagi ogólne – tytuł, struktura pracy, piśmiennictwo

Praca została napisana pod kierunkiem dra hab. inż. Adama Klimanka, prof. PŚ, sprawującego funkcję promotora w postępowaniu doktorskim oraz dra inż. Sławomira Śładka, pełniącego funkcję promotora pomocniczego.

Rozprawa została wydana w formie monografii napisanej w języku polskim. Tytuł rozprawy brzmi: „Opracowanie systemu zarządzania ciepłem dla układów elektronicznych w małych satelitach”. Rozprawa jest zatytułowana nieco zbyt ogólnie. Już w tezie pracy pojawia się zapis o pasywnym sposobie zarządzaniem ciepłem, więc ten element powinien znaleźć się w tytule pracy, nie przesądzając o tym, że będzie analizowane rozwiązanie wykorzystujące materiał zmiennofazowy. Cała rozprawa doktorska została przedstawiona łącznie na 147 stronach, na które składają się kolejno: streszczenie w języku polskim i angielskim, spisy treści, rysunków oraz tabel, sześć rozdziałów o charakterze merytorycznych i bibliografia. Praca zawiera 82 rysunki, 9 tabel, odwołuje się do 105 pozycji bibliograficznych, w tym 3 prace dyplomowe magisterskie, jedna praca doktorska, 5 monografii. Znaczna część cytowanych artykułów, raportów i publikacji konferencyjnych pochodzi z ostatnich 6 lat. Można też znaleźć kilka publikacji z lat 50 – 80 poprzedniego wieku, nie jest to zarzut, czasem warto spojrzeć nieco dalej wstecz, w celu uzyskania szerszego obrazu podjętych dotąd badań.

Elementy przeglądu literatury pojawiają się w rozdziale drugim oraz na początku rozdziałów trzeciego, czwartego i piątego.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Artura Jurkowskiego zawiera w swojej strukturze prawie wszystkie niezbędne elementy. Na podstawie przedstawionych motywacji, została zdefiniowana teza oraz problem badawczy, poparty odniesieniami do literatury. Przedstawione

zostały zastosowane metody badawcze oraz zakres wiedzy zdobytej podczas realizacji pracy. Po rozdziale wprowadzającym w tematykę pojawiają się trzy rozdziały poświęcone trzem głównym zagadnieniom, z których każde cechuje się znaczną złożonością. Stanowią one zamknięte części z dedykowanym wstępem teoretycznym, przeglądem literatury, opisem metodyki badawczej, wynikami i wnioskami. Praca doktorska domknięta jest podsumowaniem i wnioskami oraz omówione jest potencjał wdrożeniowy. Brakującym elementem jest spis oznaczeń.

3. Wybór tematyki, uzasadnienie podjęcia tematyki pracy

Tematyka pracy doktorskiej związana jest ze stabilizacją termiczną układów elektroniki mikrosatelity. Tematyka rozprawy jest bardzo aktualna, związana z eksploracją przestrzeni kosmicznej, zyskującej coraz większe znaczenie gospodarcze i strategiczne. Pomimo braku krajowych firm oferujących wyniesienie mikrosatelitów w przestrzeń kosmiczną, w Polsce powstaje wiele satelitów naukowych, konstruowanych przez studentów (koła naukowe) czy firmy komercyjne. Wykorzystanie przestrzeni kosmicznej staje się coraz bardziej popularne z uwagi na malejące koszty wyniesienia 1 kg ładunku na niską orbitę, pojawienia się coraz większej liczby firm oferujących wyniesienie ładunku, miniaturyzacji układów zbierania i przetwarzania danych i rosnącej liczby zastosowań w wielu sektorach: telekomunikacji, rolnictwie, obronności, geodezji, nawigacji, badaniach środowiskowych i wielu innych. Satelity coraz bardziej naszpikowane są elektroniką i sprzętem pomiarowym, a wiele operacji obróbki danych może być wykonywanych na orbicie, zmniejszając wydatnie ilość danych transferowanych na Ziemię. Efektywne układy zarządzające optymalnym sterowaniem wymagają coraz większych mocy obliczeniowych. W warunkach kosmicznych niezawodność podzespołów ma kluczowe znaczenie z uwagi na niemożność wprowadzenia zmian konstrukcyjnych i bardzo ograniczone możliwości ingerencji z zewnątrz. Jakakolwiek awaria w praktyce oznacza fiasko wielomiesięcznych przygotowań i ogromne straty finansowe. Dlatego odpowiednie przygotowanie misji jest niezwykle istotne i musi spełniać najwyższe standardy niezawodności.

Rozprawa doktorska wpisuje się w rozwój technologii kosmicznych. Podjęte zostały badania podstawowe i wdrożeniowe, eksperymentalne i numeryczne w zakresie wymiany ciepła, stąd rozprawa wpisuje się również w zakres zagadnień związanych z Dyscypliną Naukową, Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, do której jest przypisana.

4. Zawartość pracy

W rozdziale pierwszym mgr inż. Artur Jurkowski bardzo krótko przedstawił motywacje stojące za podjęciem się badanego tematu a następnie zaprezentował **tezę rozprawy doktorskiej**. Brzmi ona następująco: *„Istnieje rozwiązanie techniczne, które w sposób pasywny pozwoli osiągnąć niższe od nominalnych wartości amplitud temperatury pracy jednostki obliczeniowej małego satelity, przy zachowaniu jej pierwotnej lub wyższej wydajności obliczeniowej oraz przy jednoczesnym utrzymaniu zgodności rozwiązania ze standardem SpaceVPX”*.

Następnie został sformułowany problem badawczy a znalezienie rozwiązania sugerowanego w tezie rozprawy powinno rozwiązać przedstawiony problem z uwzględnieniem sztywnych ograniczeń narzuconych przez standard przemysłowy SpaceVPX.

Doktorant przedstawił również element nowości proponowanego rozwiązania oraz zaproponował metody badawcze służące temu celowi. Pod koniec rozdziału pierwszego został podany również zakres pracy.

W rozdziale drugim została przedstawiona ogólna tematyka systemu zarządzania ciepłem w małych satelitach orbitujących na LEO z uwzględnieniem: składników bilansu energii satelity, cyklicznych warunków pracy na orbicie, struktury systemów satelity oraz budowy układów elektronicznych.

Następnie Doktorant wymienił aktywne i pasywne systemy zarządzania ciepłem. Na tej postawie przyjął do dalszej analizy układy pasywne z uwagi na ich prostotę, niezawodność i wystarczającą skuteczność w przypadku małych satelitów. W rozdziale tym została wybrana metoda pasywnego zarządzania ciepłem.

W rozdziale trzecim, bardzo obszernym, omówiono modelowanie jednostki przetwarzania danych przeznaczonej dla satelity Intuition-1, obejmujące opis modelu matematycznego, krótki opis geometrii i siatki, moc generowaną w elementach elektronicznych układu, przykładowe wyniki, analizę wrażliwości siatki, walidację modelu przez porównanie temperatur w 22 punktach pomiarowych. Dodatkowo, w ramach tego rozdziału przedstawiono założenia, procedurę analizy wrażliwości i jej wyniki. Na tej podstawie, zostały określone (skwantyfikowana) wrażliwość odpowiedzi modelu na parametry wyjściowe, co pozwoliło na określenie tych zmiennych, których wartość ma wystarczającą istotny wpływ na wartości (zmienne wyjściowe – temperatury procesora, radiatora i pamięci RAM) i w konsekwencji na zredukowanie ich liczby. Pozwoliło to na przeprowadzanie procedury kwantyfikacji niepewności, czyli określenia rozkładów prawdopodobieństwa zmiennych wyjściowych, wynikającą ze zmienności zmiennych wejściowych. Rozdział został zakończony podaniem listy wniosków.

W kolejnym rozdziale (czwartym) przedstawiono numeryczną i eksperymentalną analizę pracy zbiornika zawierającego PCM w kontekście potencjalnej możliwości redukcji wartości temperatur ekstremalnych układu elektronicznego podczas jego cyklicznej pracy na pokładzie małego satelity. Eksperyment został przeprowadzony w termiczno-próżniowej. Pomiary temperatury dokonano za pomocą rezystancyjnych czujników temperatury PT1000. Określone zostały również warunki brzegowe oraz procedura testowa. Zamiast elementu generującego ciepło zastosowano grzałkę kaptonową. W ramach tego rozdziału przedstawiono również model numeryczny (geometria badanego obszaru, siatka dyskretyzacji, model matematyczny, warunki brzegowe). Przeprowadzone zostały obliczenia numeryczne odzwierciedlające warunki eksperymentu. Zostały porównane temperatury zmierzone w trzech kluczowych położeniach i wyznaczone numerycznie dla nominalnych parametrów modelu. W ramach symulacji przeprowadzono analizę wpływu niektórych parametrów na przebiegi temperatury w wyróżnionych miejscach. Badano więc wpływ oporu kontaktowego na interfejsie zasobnik-przewodnice mocujące, konwekcji naturalnej (model uproszczony), zakresu temperatury przemiany fazowej oraz temperatury tła. Powyższe analizy były podyktowane obserwacjami poczynionymi podczas eksperymentów i wyciągniętymi z nich wnioskami.

W rozdziale piątym, doktorant zaprojektował, wraz z zespołem projektowym firmy KP Labs, pasywny system zarządzania transportem ciepła wykorzystujący zasobnik materiału zmiennofazowego, dla układu elektronicznego dedykowanego do małego satelity. Dodatkowo autor uczestniczył w badaniach eksperymentalnych oraz przeprowadził symulacje numeryczne. Celem było ograniczenie amplitud temperatury pomiędzy wartościami szczytowymi. Przeprowadzony został eksperyment polegający na przeprowadzeniu jednego cyklu nagrzewania układu i chłodzenia do momentu uzyskania równowagi termicznej

z otoczeniem. Na podstawie wniosków z porównania wyników pomiarów i symulacji wytypowano parametry, które mogą być nieprecyzyjnie określone i wykonano analizę wrażliwości modelu na ww. parametry.

W rozdziale szóstym zostały przedstawione ogólne wnioski oraz plan dalszych badań.

5. Metodyka badawcza

W rozdziale drugim, w celu wyboru właściwej technologii, Autor rozprawy zaproponował szereg kryteriów (rozmiar, masa, koszt, złożoność, akumulacja i niezależność) i trójstopniowy system oceny każdej z wymienionych technologii. Jako główne kryterium została przyjęta zdolność do akumulacji ciepła. Wątpliwości budzi uwzględnienie kilku technologii o zupełnie odmiennych charakterze niż główne kryterium, takich jak materiały termoprzewodzące czy radiatory, ponieważ ich zadanie jest zupełnie inne, nie mają możliwości akumulacji ciepła. Jedne i drugie i tak powinny być zastosowane, w celu minimalizacji oporów kontaktowych czy intensyfikacji transferu energii na drodze radiacyjnej do przestrzeni kosmicznej. Ponadto, zastosowanie trójstopniowego kryterium oceny jest również dyskusyjne, ponieważ w tej ocenie punkt punktowi nierówny. Niektóre kryteria są krytyczne (rozmiar, masa) inne mało istotne (koszt) w zastosowaniach kosmicznych.

W efekcie Doktorant przedstawił wyniki oceny w tabeli i wybrał metodę opartą na magazynowaniu energii w materiale zmiennofazowym. Wybór tej metody jest w pełni uzasadniony.

Doktorant podzielił zakres dalszych prac badawczych na trzy części, odnoszą się one do różnych układów. Szeroki zakres badań, zarówno eksperymentalnych, teoretycznych (analiza wrażliwości i kwantyfikacja) jak i numerycznych, z wykorzystaniem różnych środowisk obliczeniowych, dla trzech różnych układów, sprawia, że prezentacja zagadnień, procedur, postaw teoretycznych, wyników itd., jest spłycona i w wielu miejscach niejasna. Poniżej odniosę się do metodologii badań każdej z trzech części badawczych.

Rozdział 3 – Zakres rozdziału jest bardzo szeroki, obejmuje zarówno badania eksperymentalne jak i numeryczne (weryfikacja i walidacja), globalną analizę wrażliwości oraz kwantyfikację niepewności. Można powiedzieć, że zawartość tego rozdziału byłaby wystarczająca na materiał pracy doktorskiej. Ocena metodologii pracy jest utrudniona z uwagi na znaczną skrótowość opisu i unikanie podawania szczegółów przez doktoranta.

W pierwszej kolejności zostały przeprowadzone obliczenia numeryczne. Model dyskretny transportu ciepła zastosowany w oprogramowaniu ESATAN-TMS został bardzo pobieżnie przedstawiony w postaci ogólnego równania bilansu energii dla przypadku ustalonego (wzór 3.1). Zostały przedstawione warunki brzegowe odpowiadające warunkom prowadzonego eksperymentu, jednak trudno przypisać komponenty elektroniczne (tab. 3.1) konkretnym układom na płytce (np. rys. 3.2), nie zostało określone ich położenie. Należy jednak podkreślić, że Autor przeprowadził weryfikację modelu w zakresie analizy wrażliwości rozwiązania (rozkładu temperatury) na gęstość siatki dyskretyzacji. Analizowane były trzy gęstości siatki dyskretyzacji przestrzennej (rys. 3.3). Wyniki symulacji wskazują na zbieganie się wartości temperatury do pewnej granicznej wartości przy rosnącej liczbie węzłów obliczeniowych (rys. 3.7). Na tej podstawie Doktorant wybrał do dalszych obliczeń siatkę o średniej gęstości z uwagi na konieczność przeprowadzenia wielokrotnych symulacji w ramach dalszej analizy SA i UQ i związaną z tym potrzebę ograniczenia czasu obliczeń. Przeprowadzona analiza wrażliwości siatki jest poprawna, dostarczyła wymaganych informacji dotyczących poprawności modelu oraz wytycznych do dalszych obliczeń.

W kolejnej części rozdziału 3 (3.1.7), Doktorant przedstawił opis walidacji modelu. Jest to kluczowy element analizy obliczeniowej, pozwalający na określenie poprawności modelu obliczeniowego i procedury rozwiązywania zagadnienia dyskretnego. Zostały przedstawione warunki prowadzenia eksperymentu, wraz z listą punktów pomiaru temperatury, w sumie ponad dwudziestu. Pomiary te prowadzone były z wykorzystaniem rezystancyjnych czujników temperatury PT1000. W pracy można również znaleźć zapewnienie, że w modelu został uwzględniony wpływ czujników i przewodów pomiarowych. Zebrane wyniki pomiarów temperatury wykazywały bardzo dobrą zgodność z wartościami uzyskanymi na drodze symulacji, maksymalna różnica nie przekraczała $5,2^{\circ}\text{C}$. Biorąc pod uwagę znaczną rozpiętość temperatur w układzie i otoczeniu, odpowiednio $49,2^{\circ}\text{C}$ i -170°C , błąd nie przekraczał 2,5% (tabela 3.2). Można więc stwierdzić, że model został poprawnie zwalidowany. Co jest zdumiewające, zdawkowy opis eksperymentu przedstawiony jest tylko w kontekście walidacji (podrozdział 3.1.7), bez podania wielu szczegółów dotyczących stanowiska, układu pomiarowego (np. sposobu zamocowania termopar), materiałów, przyjętej metodologii badań, itd. tym bardziej, że eksperyment był przeprowadzony z wykorzystaniem unikalnej aparatury, wymagał znacznych nakładów finansowych i pracy, długiego czasu przygotowania, dużej wiedzy i umiejętności prowadzenia eksperymentów.

W dalszej części rozdziału 3 (3.2) przeprowadzona została analiza wrażliwości (SA) i kwantyfikacja niepewności (UQ). Obliczenia SA i UQ zostały wykonane z wykorzystaniem oprogramowania DAKOTA do zasadniczej analizy wyników oraz ESATAN do obliczeń systemu w poszczególnych przypadkach. Sterowanie przebiegiem analizy zostało przeniesione do autorskiego programu napisanego w języku Python, który wywoływał programy DAKOTA i ESATAN i nadzorował przesyłanie informacji pomiędzy programami. Pozwoliło to na zoptymalizowanie procesu obliczeniowego i pełną nad nim kontrolę. Przeprowadzono globalną analizę wrażliwości całego układu. Doktorant wybrał zestaw zmiennych wejściowych (14 przewodności kontaktowych, 7 emisyjności powierzchni oraz 1 temperatura ścianki komory). Niepewności nadanych wartości tych parametrów zostały podzielone na dwie grupy, aleatoryczne (nieredukowalne) i epistemiczne (redukowalne) i na tej podstawie zostały im przypisane rozkłady prawdopodobieństwa, odpowiednio normalne i jednostajne. Określone zostały również wartości wyjściowe, temperatury czterech najważniejszych komponentów układu. Wybór parametrów podlegających analizie jest uzasadniony. Nie wiadomo jednak, na jakiej podstawie zostały określone nominalne i graniczne wartości zastępczych cieplnych przewodności kontaktowych oraz przewodności cieplnych (tab. 3.3), trudno więc stwierdzić czy wszystkie wypisane w tej tabeli są poprawne. Wybór 14 zmiennych niezależnych i 4 wartości wynikowych sprawiają, że analiza wrażliwości staje się bardzo czasochłonna. W celu ograniczenia liczby badanych przypadków Doktorant wykorzystał próbkowania typu latin hypercube sampling (LHS) zamiast metody Monte Carlo, dzięki temu zredukował liczbę przypadków do 1000. Na podstawie linii trendu pokazanych na rys. 3.10-3.13 wyraźnie widać, które zmienne mają istotny wpływ na wartości kluczowych temperatur. W celu dokładniejszej analizy Doktorant wyznaczył współczynniki korelacji i współczynniki częściowej korelacji między zmiennymi. Na podstawie założonej a-priori wartości granicznej, 0,2, wybrał 7 zmiennych o największym wpływie i wybrał je do dalszej analizy, kwantyfikacji niepewności. Powyższe procedury (SA) są uzasadnione i prowadzą do znacznego uproszczenia modelu i odrzucenia małoistotnych zmiennych.

Przeprowadzone a kolejnym etapie kwantyfikacja niepewności, dla dwóch zmiennych epistemicznych i pięciu aleatorycznych. Należy zauważyć, że biorąc pod uwagę znaczny koszt obliczeniowy związany z pojawianiem się w modelu zmiennych epistemicznych, Doktorant przeprowadził dodatkowe badania mające na celu zredukowanie niepewności związanych z jedną ze zmiennych (C3 FPGA HS), korzystając z faktu, że jest ona zależna od dwóch

zmiennych aleatorycznych. Dzięki temu została ona zakwalifikowana jako aleatoryczna z określoną wartością średnią i (znacznym) odchyleniem standardowym.

Doktorant zastosował metodę Polynomial Chaos Expansion w celu redukcji liczby symulacji potrzebnych do przeprowadzenia kwantyfikacji niepewności, dzięki temu udało się ograniczyć ich liczbę ponad ośmiokrotnie. Nie zostały jednak przedstawione dokładniejsze informacje, np. postać użytych wielomianów i współczynniki rozwinięcia. Autor poprawnie przeprowadził analizę wyników i zaproponował dalsze badania mające na celu zmniejszenia niepewności, ponadto wyciągnął poprawne wnioski. Wyniki analizy wykazały spełnienie wymagań cieplnych badanych obiektów z uwzględnieniem założonego marginesu bezpieczeństwa.

Rozdział 4 – Doktorant zaproponował układ magazynowania ciepła dostosowany do wymiarów i sposobu zamontowania w satelicie, zawierający materiał zmiennofazowy n-eicosane o masie 36g. W układzie zamontował grzałkę kaptonową w celu precyzyjnego generowania ciepła w układzie oraz szereg termopar umieszczonych we właściwych miejscach. Doktorant przedstawił warunki prowadzenia eksperymentu oraz właściwości fizyczne wykorzystanych materiałów. Przeprowadził również symulacje numeryczne z wykorzystaniem programu Simcenter FloEFD, opartego na metodzie objętości kontrolnych. Przeprowadzona walidacja modelu wykazała dość dobrą zgodność wyników symulacji i eksperymentu, także potwierdziła zasadność przyjętych założeń. Autor rozprawy przeprowadził również analizę wrażliwości rozwiązania na niektóre parametry (np. opór kontaktowy, zakres temperatur przemiany fazowej) oraz możliwość występowania konwekcji. Występowanie tej ostatniej zostało zaobserwowane podczas eksperymentu.

Rozdział 5 – Doktorant przeanalizował eksperymentalnie i numerycznie układ elektroniczny, z zamontowaną grzałką kaptonową, symulującą działanie procesora wraz z magazynem ciepła zawierającym materiał zmiennofazowy, nie przedstawił jednak wszystkich niezbędnych informacji dotyczące eksperymentu, tj. warunków brzegowych. Wyniki symulacji zostały porównane z wynikami eksperymentu i porównano rozbieżności w wartościach temperatur pod koniec etapu nagrzewania. W dalszej części przeprowadzono analizę parametryczną modelu (wpływ oporów kontaktowych), mającą na celu zniwelowanie wymienionych różnic. Procedura tuningu (dopasowania) modelu jest dopuszczalna w przypadku pozytywnie zweryfikowanych i zwalidowanych modeli. Można stwierdzić, że w tym przypadku była uzasadniona. Doktorant przeprowadził również symulacje cyklicznego obciążenia cieplnego układu dla kilku mocy grzałki symulującej układ elektroniczny i dobrał moc zapewniającą pełne wykorzystanie możliwości stabilizacji temperatury materiału zmiennofazowego. Autor rozprawy przeprowadził również porównanie profili temperatury dla układu z zastosowanym zasobnikiem pcm-u oraz bez tego zasobnika, z płytką aluminiową. Wykazał, że w tym przypadku występuje istotna redukcja temperatury maksymalnej ukł. elektronicznego, o około 10°C, oraz redukcja amplitudy temperatur o około 17°C. Oba te wyniki stanowią potwierdzenie tezy postawionej na początku rozprawy doktorskiej. Można więc stwierdzić, że założenia pracy zostały spełnione.

6. Uwagi krytyczne i pytania

- 1) Praca powstała w wyniku współpracy w zespole projektowym w ramach prac prowadzonych w firmie KP Labs Sp. z o.o. w Gliwicach. Część prac eksperymentalnych została wykonana w Centrum Badań Kosmicznych (Jak rozumiem miał Pan na myśli CBK PAN w Warszawie?). Domyślam się, że prace eksperymentalne były wykonywane w ramach współpracy w zespole badawczym. Jaki był Pana zakres prac i procentowy

udział w pracach eksperymentalnych, na ich różnych etapach, tzn.: planowania, przygotowywania, prowadzenia eksperymentu oraz obróbki i analizy wyników?

- 2) Czy prace teoretyczne i numeryczne zostały przez Pana wykonane samodzielnie czy też w ramach prac zespołu? W przypadku pracy zbiorowej, proszę określić jaki był Pana zakres prac i udział procentowy w poszczególnych zadaniach?
- 3) Badania eksperymentalne, numeryczne i teoretyczne przedstawione w pracy doktorskiej można podzielić trzy części, przedstawione w rozdziałach 3, 4 i 5. W rozdziale 3 badana jest eksperymentalnie i numerycznie, jak sądzę, jednostka obliczeniowa (DPU) Leopard (układ klasy 4/5 – rys. 5.1). Przeprowadzono weryfikację (analiza gęstości siatki) i walidację modelu obliczeniowego a także analizę wrażliwości (SA) i kwantyfikację niepewności (UQ). Na tej podstawie określono, jaki jest wpływ poszczególnych elementów układu na transport ciepła z wybranych elementów elektronicznych. W rozdziale 4 przeprowadzono analizę eksperymentalną i numeryczną zasobnika ciepła, natomiast w rozdziale 5 analizę eksperymentalną i numeryczną układu elektronicznego z zamontowanym zasobnikiem PCM. W każdym z powyższych rozdziałów badany jest inny układ. Moje uwagi, w tym punkcie, dotyczą zasadności badania, w rozdziałach 3, 4 i 5, zupełnie odmiennych układów, z wykorzystaniem różnych narzędzi numerycznych.

Mam następujące spostrzeżenia i uwagi:

- a. W rozdziale 3 jest analizowany układ klasy 4/5 a w rozdziale 5 układ klasy 3, są to zupełnie odmienne geometrie.
- b. Zasobnik PCM z grzałką kaptonową, badany w rozdz. 4, ma zupełnie inną geometrię niż ten badany w rozdziale 5. Dotyczy to szczególnie ścieżki transferu ciepła pomiędzy grzałką a zasobnikiem PCM oraz szyną mocującą, przez którą przekazywane jest ciepło do otoczenia.
- c. W rozdziale 3 mogę wyczytać, że badany eksperymentalnie satelita został zawieszony w komorze termiczno-próżniowej (str. 44), natomiast układy badane w rozdziałach 4 i 5 były przymocowane do stołu utrzymywanego w stałej temperaturze.
- d. W rozdz. 3 i 4 zastosowano odmienne programy symulacyjne, oparte na innych modelach dyskretnych, „ESATAN-TMS” (rozdz. 3), „Simcenter FloEFD” (rozdz. 4).
- e. Nie zostały przedstawione w rozdz. 3 kluczowe elementy odpowiedzialne za transfer ciepła od układu elektronicznego do radiatora. Można domyślać się, że są one zupełnie odmienne od tych zastosowanych w rozdz. 5.

Są związane z nimi następujące pytania:

- f. Dlaczego analizowane układy nie są ujednolicone w ramach całej pracy, tzn. nie są tej samej klasy, o tej samej (lub bardzo zbliżonej) geometrii, typie układu mocowania, wielkości, sposobie zamontowania w komorze, itp.?
 - g. Czy można, na podstawie wyników SA i UQ dla geometrii z rozdziału 3, wyciągać szczegółowe wnioski i stosować je dla zupełnie innej geometrii, sposobu zamocowania, sposobu transportu ciepła pomiędzy układem elektronicznym a otoczeniem, itd., z rozdziału 5?
 - h. Czy można, w oparciu o układ badany w rozdz. 4 wyciągać wnioski dla zupełnie innego układu w rozdziale 5? Tym bardziej, że jak sądzę dominujący mechanizm transportu ciepła pomiędzy grzałką a zasobnikiem PCM w obu przypadkach jest odmienny.
- 4) Porównując krzywe nagrzewania i chłodzenia przedstawione w rozdz. 4 (rys. 4.8) i w rozdz. 5 (rys. 5.9) widoczny jest krótki czas nagrzewania i długi czas chłodzenia (rys.

4.8) natomiast na rys. 5.9 sytuacja jest odwrotna, czas nagrzewania jest długi a czas chłodzenia krótki. Skąd wynika ta rozbieżność? Proszę wyjaśnić.

Pytania i uwagi dotyczące rozdziału 3

- 5) Geometria układu przedstawiona na rys. 3.2 ani żaden z pozostałych przedstawień badanego obszaru nie ukazuje: (a) jak są zamocowane płytki PCB w obudowie, (b) jak są zamocowane płytki PCB do płyt bocznych obudowy (low emissivity surface, high emissivity surface), (c) gdzie są rozmieszczone elementy układu, wymienione w tabelach 3.1 i 3.2, (d) gdzie jest umieszczony węzeł obliczeniowy a gdzie „nadzorca”. Proszę o uzupełnienie tych informacji.
- 6) Skąd biorą się tak znaczne niepewności pomiaru temperatury w FPGA oraz FPGA Internal w porównaniu z innymi elementami (tab. 3.2)?
- 7) Jak określono wartości nominalne parametrów przedstawionych w tabeli 3.3 oraz ich przedziały zmienności?
- 8) Ile przypadków zostało przeliczonych na każdy z wykresów przedstawionych na rys. 3.10-3.13? Wg jakiego klucza były określone wartości zmiennych niezależnych aleatorycznych i epistemicznych potrzebnych do wygenerowania pojedynczego wykresu?

Pytania dotyczące rozdziału 4.

- 9) 4.4.2 (Str. 84) „Podczas eksperymentów zaobserwowano wizualnie powolne ruchy roztopionego materiału PCM wynikające z konwekcji naturalnej.” W jakie sposób zaobserwowano ruch PCMu skoro materiał był szczelnie zamknięty w nieprzezroczystym zbiorniku i dodatkowo umieszczony w komorze termiczno-próżniowej?
- 10) Czy konwekcja naturalna w roztopionym PCM-ie może wystąpić na orbicie? Jeśli tak, to jakie mogą być jej źródła?
- 11) Na jakiej podstawie została dobrana: (a) ilość PCMu, (b) materiał zmiennofazowy, (c) wielkość komory zawierającej PCM?
- 12) Jakie właściwości materiałowe PCMu zostały uwzględnione do oszacowania liczby Nu (str. 85 rozdział 4.4.2) i jakie były ich wartości?

Pytania dotyczące rozdziału 5.

- 13) Autor pisze (str. 103-104): „W centralnym obszarze układu umiejscowiony jest model reprezentujący analizowany układ FPGA. Brak widocznego połączenia jego struktury ze zbiornikiem PCM może być mylący, ale w rzeczywistości zdefiniowano tam połączenie pomiędzy współpracującymi powierzchniami. Główny odbiór ciepła realizowany jest poprzez płytkę PCB, a zbiornik z PCM nie ma fizycznego połączenia z interfejsem. Występuje tam niewielka szczelina i była ona celowym zabiegiem projektowym”. Nie jest jasne, gdzie są położone główne komponenty układu. Gdzie jest umieszczony zasobnik z PCMem? Proszę wskazać jego umiejscowienie na rys. 5.11. Na tym samym rysunku proszę wskazać położenie układu elektronicznego, płytki drukowanej, grzałki, szczeliny pomiędzy zbiornikiem a „interfejsem”, itd.
- 14) (str. 104) „Występuje tam niewielka szczelina i była ona celowym zabiegiem projektowym”. Jaki był powód zastosowania tej szczeliny?
- 15) Jaki program obliczeniowy wykorzystano do symulacji w rozdziale 5?
- 16) Nie określono warunków brzegowych. Proszę o opisanie ich.

17) Proszę o opisanie modelu numerycznego.

Drobne błędy merytoryczne (pojęciowe) i drobne uwagi

- Praca napisana jest w języku polskim, ale z niezrozumiałych powodów Autor wprowadził oznaczenia parametrów, punktów pomiarowych oraz opisy rysunków w języku angielskim. Można byłoby uzasadnić to, gdyby pracę doktorską poprzedzała seria artykułów w czasopismach anglojęzycznych, jednak spis literatury wykazał jedynie jeden taki artykuł.
- Odwołując się do literatury Doktorant przeważnie posługuje się podaniem wyłącznie numeru pozycji bibliograficznej. Niekiedy podaje również nazwiska autorów, pierwszego lub dwóch, zgodnie z zasadami. Moim zdaniem dobrze byłoby, gdyby system odwołań był jednolity w całej pracy, z podawaniem nazwiska pierwszego (obu) autorów.
- str. 41 podpis pod rysunkiem 3.4 „Typy warunków brzegowych w DPU użyte w symulacjach termicznych” – w sporej części to nie są typy warunków brzegowych
- str. 89 „można zaobserwować pewien brak zbieżności”, raczej „zgodności”

Drobne błędy (literówki)

- str. 33 „geometryczne”
- str. 37 „przewodnik radiacyjny”
- str. 41 na rys. 3.4 pod nazwą „low emissivity surfaces” zaznaczona jest tylko jedna powierzchnia
- str. 93 „w komorze termo-próżniowej”
- str. 107 „osateczne wyniki”

Można również znaleźć literówki/błędy w bibliografii:

- [48] – brak nazwy czasopisma
- [89] – brak roku wydania, nazwy wydawcy, czasopisma...

7. Wnioski końcowe

Jak w niemal każdej pracy doktorskiej można wymienić jej słabe i mocne strony.

Najpierw wymienię słabsze:

- Teza pracy jest postawiona bardzo zachowawczo. Z góry wiadomo, że postawione zadanie musi się powieść, znając szereg zastosowań materiałów zmiennofazowych w stabilizacji temperatury, również urządzeń elektronicznych.
- Dyskusyjna jest metodologia badań, koncentrująca się na pełnej analizie układu satelity (rozdział 3) w standardzie przemysłowym 4/5, po czym przeniesienie wniosków na układy w standardzie przemysłowym 3 (rozdziały 4 i 5), zamiast przeprowadzenia całej analizy w jednym, docelowym standardzie.
- Opisy geometrii badanych układów, położenia komponentów, założenia modeli, są opisane bardzo powierzchownie. Brakuje dokładnych opisów poszczególnych elementów na schematach. Również oznaczenia zmiennych są niejasne, tym bardziej, że nie wiadomo do których elementów układu się odnoszą.
- Oznaczenia rysunków są w języku angielskim, podczas gdy praca jest napisana w j. polskim.

Pomimo wymienionych wyżej usterek, recenzowaną pracę doktorską oceniam wysoko. Na taką ocenę składa się kilka czynników.

- Tematyka pracy dotyczy zagadnień niszowych, ale mających znaczny potencjał naukowy i aplikacyjny, związany z ciągle rosnącym zapotrzebowaniem na eksplorację przestrzeni kosmicznej i efektywne pozyskiwanie informacji tam zebranych.
- Pan mgr inż. Artur Jurkowski przeprowadził trzy kampanie eksperymentalne, w dwóch ośrodkach badawczo-naukowych, z wykorzystaniem unikalnej aparatury badawczej. Przeprowadzenie tych eksperymentów wymagało znacznej wiedzy i biegłości w prowadzeniu eksperymentów.
- Doktorant opracował trzy modele obliczeniowe, odpowiadające trzem konfiguracjom eksperymentu, z wykorzystaniem dwóch programów symulacyjnych, opartych na różnych podejściach do dyskretyzacji. Przeprowadził: analizę wrażliwości rozwiązania względem gęstości siatki, walidację modeli, analizę parametryczną oraz tuning modeli. Potrafił wyciągnąć odpowiednie wnioski z wyników symulacji numerycznych i zidentyfikować przyczyny niezgodności.
- Doktorant przeprowadził globalną analizę wrażliwości i kwantyfikację niepewności zagadnienia pasywnego chłodzenia układów elektronicznych mikrosatelity w warunkach panujących na niskiej orbicie Ziemi. Wykazał się umiejętnością przeprowadzenia tych analiz dla różnych typów zmiennych (aleatorycznych i epistemicznych) w tym wyodrębnienia istotnych, z punktu widzenia celu analizy, zmiennych niezależnych. Opracował własny program napisany w języku Python nadzorujący współpracę programów DAKOTA i ESATAN. Przeprowadził również ponowną analizę jednej ze zmiennych, C3 FPGA HS, prowadzącą do zredukowania niepewności z nią związanej i zmiany jej typu z epistemicznej na aleatoryczną. W efekcie określił zakres temperatur dla każdego z badanych obiektów i potwierdził brak ryzyka przekroczenia temperatury maksymalnej.
- Doktorant w sposób kompleksowy i twórczy rozwiązał zagadnienie techniczne wnosząc istotną innowację do istniejącego produktu, znacznie podnosząc jego cechy użytkowe.

Biorąc pod uwagę powyższe słabe i mocne strony prace mogę stwierdzić, że mgr inż. Artur Jurkowski wykazał się „ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie naukowej”, „umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej” oraz przedstawił „oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych sferze gospodarczej”, tak więc wypełnił wszystkie warunki narzucone przez Ustawę „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”.

W związku z powyższym, rekomenduję, aby Rada Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej przyjęła rozprawę doktorską mgr. inż. Artura Jurkowskiego i dopuściła go do kolejnego etapu postępowania kwalifikacyjnego.

Podpisał Mirosław Seredyński