

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Artura Jurkowskiego

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

1. Wybór tematu

Zainteresowanie eksploracją przestrzeni kosmicznej wpływa na gwałtowny rozwój technologii, które są niezbędne do jej realizacji, między innymi technologii związanych z małymi satelitami. Systemy zarządzania ciepłem w tych urządzeniach, ze względu na rozmiar, masę, autonomię, wysokie gęstości strumieni ciepła oraz ogólną niezawodność, odgrywają kluczową rolę. Dotychczas, w małych satelitach stosowano najczęściej pasywne metody kontroli temperatury, takie jak: paski termiczne, rurki ciepła, pokrycie powierzchni specjalnymi substancjami, izolacje wielowarstwowe czy radiatory. Pojawiła się jednak potrzeba odbioru większych strumieni ciepła i wspomniane technologie nie są już wystarczające. Proponowane przez Doktoranta rozwiązanie, wciąż należąc do pożądanych pasywnych metod, polega na zastosowaniu materiału zmiennofazowego (*Phase Change Material, PCM*), który z jednej strony ma pozwolić na odbiór zwiększonych strumieni ciepła, a z drugiej zmniejszyć amplitudę zmian temperatury głównego elementu, jakim jest jednostka obliczeniowa, podczas jej cyklicznej pracy w ruchu orbitalnym. Jest to temat nowy, ciekawy i wciąż niezbadany.

Tematyka pracy dotycząca opracowania systemu zarządzania ciepłem dla układów elektronicznych w małych satelitach, z uwagą zwróconą na wykorzystanie materiałów typu PCM, wpisuje się w aktualne trendy badawcze i może przyczynić się do rozwoju wspomnianych systemów.

2. Ogólna charakterystyka

Praca została zawarta na 128 stronach. Składa się ze Streszczeń w języku polskim i angielskim, Spisu treści, Spisu rysunków, Spisu tabel, 6 Rozdziałów oraz Bibliografii (105 pozycji).

Rozdział 1 zawiera uzasadnienie podjęcia tematu, definicję tezy i problemu badawczego oraz zakres pracy. Teza pracy została sformułowana w następujący sposób:

„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.”

i jednoznacznie wskazuje, co Doktorant zamierza udowodnić. Rozdział nie zawiera zdefiniowanego celu badań, natomiast przedstawia metody badawcze, które będą wykorzystywane w trakcie prac.

Rozdział 2 zawiera ogólne informacje dotyczące systemu zarządzania ciepłem (*Thermal Control System, TCS*), dedykowanego urządzeniom przemysłu kosmicznego. Zaprezentowano w nim bilans energii obiektu satelitarnego w przestrzeni kosmicznej, źródła ciepła oraz podstawowe pojęcia dotyczące opisu położenia obiektu na niskiej orbicie okołoziemskiej (*Low Earth Orbit, LEO*) i związanych z nim zmian temperatury podzespołów. Krótko omówiono aktywne i pasywne systemy TCS.

Rozdział 3 dotyczy zagadnień analizy wrażliwości i kwantyfikacji niepewności w odniesieniu do analizowanego układu, którym był nanosatelita Intuition-1, wyposażony w jednostkę przetwarzania danych (*Data Processing Unit, DPU*). Zostały w nim przedstawione szczegóły dotyczące modelu numerycznego, tj. geometria, podział przestrzeni obliczeniowej, warunki brzegowe, przykładowe wyniki i walidacja modelu numerycznego. Omówione zostały zagadnienia analizy wrażliwości (*Sensitivity Analysis, SA*) oraz kwantyfikacji niepewności (*Uncertainty Quantification UQ*) i zaprezentowana interpretacja wyników. Rozdział zamykają wnioski o identyfikacji kluczowych zmiennych wejściowych oraz zmiennych wyjściowych, które mają największy wpływ na transport ciepła w układzie.

W Rozdziale 4 zademonstrowano analizę systemu wykorzystującego materiał PCM, zaczynając od krótkiego przeglądu literatury. Następnie zaprezentowano opis eksperymentu przeprowadzonego w komorze termiczno-próżniowej (*Thermal Vacuum Chamber, TVAC*), dotyczącego zbiornika zawierającego materiał PCM. W kolejnym etapie omówiono model matematyczny, który odzwierciedla układ poddany analizie eksperymentalnej i warunki, w których się znajdował. Walidacja modelu numerycznego uwzględniała wpływ oporu kontaktu, naturalnej konwekcji, zakresu temperatury przemiany fazowej oraz temperatury ciała odpowiedzialnego za promieniowania tła. Przedstawiono wyniki uwzględniające skorygowane wartości wielkości związanych z wymienionymi wcześniej efektami oraz wnioski.

Rozdział 5 dotyczy analizy eksperymentalnej i numerycznej działania systemu TCS dla układu elektronicznego dedykowanego do małego satelity, opartego na jednostce DPU typu Lion. Przedstawiono w nim krótki opis eksperymentu i analizy numerycznej, wraz z prezentacją wyników. Następnie pokazano studium przydatności proponowanego rozwiązania systemu TCS do redukcji amplitudy zmian temperatury w cyklicznej pracy urządzenia w wybranych warunkach.

Rozdział 6 zawiera podsumowanie i wnioski dotyczące przedstawionych analiz, dalsze plany badawcze nad proponowanym rozwiązaniem oraz jego potencjał wdrożeniowy.

Bibliografia zawiera 105 pozycji literaturowych. Większość z nich mieści się w przedziale czasowym 2010-2024. Materiały mają różny charakter – są to artykuły, materiały konferencyjne, książki, prace magisterskie, materiały internetowe czy raporty techniczne.

3. Ogólna ocena

Zarządzanie ciepłem dotyczy większości urządzeń i systemów elektronicznych. Problemy w tym zakresie stwierdzono m.in. w Boeingu 787 Dreamliner, czy w samochodach elektrycznych. W przypadku systemów pracujących w przestrzeni kosmicznej, problem staje się poważniejszy, ze względu na brak konwekcji naturalnej. Z tego powodu tematyka rozprawy doktorskiej nabiera większego znaczenia. Proponowane rozwiązanie, tj. zastosowanie materiałów PCM, z jednej strony ma stanowić remedium na potrzebę odbioru wyższych wartości strumienia ciepła od jego źródeł, a z drugiej na zmniejszenie amplitudy zmian temperatury głównego elementu (czyli DPU).

Tematem rozprawy doktorskiej jest opracowanie systemu zarządzania ciepłem dla układów elektronicznych w małych satelitach. Opracowanie systemu oznacza drogę od etapu projektu, co niestety nie zostało pokazane w rozprawie. Rozumiem, że taki etap musiał zostać zrealizowany, aby umożliwić analizowanie systemu TCS, jak to pokazano w dalszej części pracy. Niemniej jednak, najważniejsze elementy procesu projektowania powinny zostać zawarte w pracy.

W rozprawie doktorskiej brakuje rozdziału z przeglądem aktualnego stanu badań i rozwiązań technologicznych w tym zakresie, dlatego śledząc w rozprawie postęp badań Doktoranta, nie można określić ich wpływu na ogólny rozwój tej dziedziny. Wprawdzie na początku głównych rozdziałów znajdują się częściowe informacje, ale nie dają one pełnego obrazu o stanie zaawansowania systemów TCS z materiałami PCM. Wiedząc jednak, że rozprawę doktorską realizowano w trybie doktoratu wdrożeniowego, można założyć, że badania muszą być unikatowe i mają potencjał aplikacyjny. W przeciwnym wypadku, temat nie zostałby zaakceptowany i partner przemysłowy nie byłby nim zainteresowany. Jednakże, nowatorstwo badań powinno wynikać wprost ze wstępu.

Z mojego punktu widzenia, realizacja prac została podzielona na trzy główne etapy:

1. identyfikację zmiennych, znacząco wpływających na wyniki oraz zakresu zmiennych wejściowych, które są kluczowe dla procesu projektowania i dalszej analizy cieplnej,
2. analizę eksperymentalną i numeryczną zjawiska topnienia i krzepnięcia materiału PCM w układzie uwzględniającym źródło ciepła i zbiornik wypełniony tym materiałem w warunkach ustalonych w komorze TVAC,
3. analizę eksperymentalną i numeryczną działania rzeczywistego układu z systemem TCS bazującym na materiale PCM.

Taki podział obejmuje wszystkie ważne aspekty podjętego tematu, również aspekt wdrożeniowy.

Pierwszy etap, dotyczący analiz SA oraz UQ, wydaje się być czasowo absorbujący. Sam opis modelu i zastosowanych metod jest skrótowy, nie zawiera wielu informacji szczegółowych, które ułatwiłyby podążanie za myślą Doktoranta, np. opisu badań eksperymentalnych, których wyniki były wykorzystywane w analizach. Skrótowo została też potraktowana interpretacja wyników SA. Natomiast wyniki zaprezentowane na Rys. 3.10 – 3.13 wskazują na olbrzymią liczbę przeprowadzonych obliczeń dla różnych parametrów wejściowych. Z pewnością był to

czasochłonny proces. Ten etap pozwolił Doktorantowi zidentyfikować kluczowe zmienne, którymi były termiczne opory kontaktowe oraz wartości emisyjności wybranych powierzchni. Taki wybór jest słuszny i uzasadniony, biorąc pod uwagę transport ciepła w warunkach panujących w przestrzeni kosmicznej. Mankamentem jest to, że Doktorant stosując zaawansowaną analizę, pominął jej omówienie, co wpływa na trudność w ocenie wartości merytorycznej konfiguracji modelu numerycznego i analizy wyników. Podobna uwaga dotyczy analizy UQ. Dla niej także nie przedstawiono procedury konfiguracji modelu czy procedury obliczeniowej.

Należy wspomnieć, że analizowany układ nie dotyczył systemu TCS z materiałem PCM, dlatego wyniki są tylko wskazówką, co może mieć znaczenie w proponowanym systemie, a nie wyczerpywać zakresu kluczowych zmiennych.

Kolejnym etapem była analiza eksperymentalna i numeryczna modelu układu złożonego ze źródła ciepła i zbiornika wypełnionego materiałem PCM, stanowiąc w moim odczuciu część badań wstępnych, skoncentrowanych na konstrukcji modelu numerycznego i jego walidacji. Zarówno część eksperymentalna, jak i numeryczna, są przedstawione w rozprawie doktorskiej w sposób ogólny, co utrudnia ocenę wartości merytorycznej przeprowadzanych analiz i ich wyników. Niewątpliwą wartością badań eksperymentalnych jest wykorzystanie komory TVAC, pozwalającej na przygotowanie warunków zbliżonych do warunków panujących w przestrzeni kosmicznej. Dzięki temu wyniki analiz eksperymentalnych stanowią źródło informacji o zakresie osiąganych wartości temperatury, zmianach tych wartości, które odzwierciedlały także procesy przemiany fazowej oraz skali czasowej zachodzących procesów. Wyniki tych badań posłużyły do walidacji modelu numerycznego. Ze względu na występujące pewne różnice między wynikami badań eksperymentalnych i numerycznych, Doktorant przeprowadził analizę wrażliwości wpływu oporu kontaktowego między źródłem ciepła a zbiornikiem, konwekcji naturalnej, zakresu temperatury przemiany fazowej czy temperatury ciała odpowiadającego za promieniowania tła na rozkład temperatury w czasie i redukcję różnic w wynikach. W tym etapie prac została potwierdzona stabilizacja temperatury źródła ciepła z wykorzystaniem modułu wypełnionego materiałem PCM. Ponadto, dzięki analizie eksperymentalnej został zaobserwowany efekt procesu topnienia i krzepnięcia materiału PCM, który objawił się zmianą objętości tego materiału.

Ostatni etap podjętych prac badawczych stanowiła analiza działania rzeczywistego systemu TCS z zastosowaniem materiału PCM. W kontekście wdrożeniowym, ta część rozprawy doktorskiej jest bardzo ważna, choć sprawiająca wrażenie wykonywanej w pośpiechu. Opis części eksperymentalnej i numerycznej jest ogólnikowy. Przedstawione wyniki zmienności temperatury w czasie, otrzymane na drodze eksperymentalnej i numerycznej, wykazują pewne różnice, dlatego Doktorant przeprowadził dodatkowe analizy dla różnych wartości termicznych oporów kontaktowych, celem zbliżenia się do wyników eksperymentalnych. Przeprowadzono także badania zmierzające w kierunku oceny możliwości ograniczenia amplitudy zmian temperatury źródła ciepła w warunkach cyklicznej pracy systemu. Tym samym wypełniony został zakres pracy zdefiniowany w rozprawie doktorskiej. Uważam, że jest to część przeprowadzonych badań o największym znaczeniu dla realizowanego

trybu doktoratu wdrożeniowego, chociaż pozostaje pewien niedosyt ze względu na jej ogólnikowość.

We wszystkich trzech etapach dostrzegalny jest brak wyraźnej deklaracji Doktoranta co do zakresu wykonanych prac i analiz lub jego współudziału w realizacji projektu.

Pracę podsumowano krótkim rozdziałem, w którym jest dostrzegalny brak wyraźnie sformułowanych wniosków, być może dlatego, że Doktorant na końcu każdego rozdziału zamieszczał podrozdziały zatytułowane *Podsumowanie* lub *Wnioski*. Zawierał w nich podsumowanie analiz i skrót analizy wyników, co można uznać za szczegółowe obserwacje pochodzące z danej części prac. Na koniec należało jednak sformułować ogólne wnioski, które stanowiłyby syntezę tego, co zostało osiągnięte. Doktorant przedstawił propozycję dalszych planów badawczych i ocenił potencjał wdrożeniowy wyników swoich prac.

Stwierdzam, że praca zawiera nowość badawczą w postaci opracowanego systemu TCS bazującego na materiale PCM. Jego wartość wdrożeniową potwierdzono wynikami badań eksperymentalnych i numerycznych przeprowadzonych z udziałem rzeczywistego układu w komorze TVAC. Teza pracy, w zakresie przeprowadzonych analiz, została potwierdzona.

4. Osiągnięcia

Za osiągnięcia Doktoranta uznaję:

- konstrukcję modelu numerycznego, jego walidację i przeprowadzenie analizy wrażliwości oraz kwantyfikacji niepewności dla systemu TCS małego satelity,
- konstrukcję modelu numerycznego systemu TCS z materiałem PCM, jego walidację na podstawie badań eksperymentalnych, przeprowadzenie analiz dla rzeczywistego układu, zawierającego jednostkę Lion DPU w obudowie EBOX.

Doktorant wykazał się kompetencjami w zakresie analiz eksperymentalnych i numerycznych, znajomością licznych narzędzi numerycznych oraz wiedzą z zakresu analiz statystycznych. Przeprowadzone badania eksperymentalne i numeryczne udowodniły umiejętność ich planowania, wyboru metod badawczych, definicji zadań i ich realizacji oraz analizy danych. Interpretacja wyników odśłoniła zdolność do krytycznej oceny i podejmowania działań, celem wyeliminowania różnic między badaniami eksperymentalnymi i numerycznymi, a mających duże znaczenie dla aspektu wdrożeniowego. Zakres przeprowadzonych badań wykazał duże zaangażowanie Doktoranta w realizację prac badawczych. Wymienione osiągnięcia i kompetencje potwierdzają przygotowanie Doktoranta do samodzielnej pracy naukowej.

5. Szczegółowe uwagi merytoryczne

Uwagi zostały wymienione w kolejności ich występowania w pracy.

- Brakuje przeglądu aktualnego stanu badań w zakresie tematu rozprawy doktorskiej.

- Str.2: „Ze względu na fakt, że błędy w projektowaniu satelitów są praktycznie niekorygowalne po starcie rakiety, wymagana jest wysoka niezawodność systemów, którą można osiągnąć poprzez wdrożenie wielopoziomowej metodologii weryfikacji i testowania, takiej jak ta opisana w normie [8].” – należało przywołać z normy te elementy, które mają znaczenie dla prowadzonych badań.
- Str. 3: „Adaptacja standardu [12] znacząco wpływa na warunki brzegowe związane z wymiarami geometrycznymi opracowywanego rozwiązania,” – warunki brzegowe nie są związane z geometrią.
- Str. 8 i tekst całej pracy: wyrażenie „pojemność cieplna właściwa” nie jest stosowane – jest to po prostu ciepło właściwe.
- Str. 11, Rys. 2.4: „Analiza tych zmian prowadzi do konkluzji, że główny wpływ na zmiany tych wartości ma stosunek absorpcyjności promieniowania powierzchni satelity do jej emisyjności, przedstawiony na wykresie jako stosunek α/ϵ .” – nie zgadzam się z tym wnioskiem, ponieważ ten parametr zmienia się w małym stopniu. Parametry takie jak LTAN, wysokość, pojemność cieplna, nachylenie wykazują znacznie większe zmiany. Proszę o komentarz.
- Str. 26: „zmierzono efektywność przepływu ciepła” – w jaki sposób?
- Str. 26: jak jest definiowany poziom odgazowania?
- Str. 26: w jaki sposób określono spadek temperatury (ΔT) na połączeniu, skoro na Rys. 2.15 (lewa strona), nie ma czujników pomiaru temperatury w rejonie styku? Ponadto, umieszczenie czujników temperatury w tym układzie wymaga wyjaśnienia.
- Str. 27: „Ostatecznie podczas prowadzonych badań zweryfikowano wpływ ciśnienia docisku współpracujących powierzchni oraz ich chropowatości na przewodność kontaktową i wyznaczono charakterystyki opisujące tę zależność.” – brakuje w rozprawie doktorskiej tych charakterystyk lub funkcji je opisujących. Proszę o przykład takiej charakterystyki.
- Str. 36: zastosowana metoda analizy to „*Lumped Parameter Approach*”, czyli wprowadzająca pewne uproszczenia w analizę procesów transportu ciepła. Jakie „niepewności” obliczeniowe wprowadza ta metoda? Czy zostały one porównane z poziomem niepewności wynikających z analiz SA lub UQ?
- Str. 36: Co to jest przewodnik radiacyjny? W jaki sposób jest on wyznaczany?
- Str. 39, Tabela 3.1: Zawarte w tej tabeli informacje są niezrozumiałe, ponieważ nie wiadomo co reprezentuje słowo „znacznik”, w jaki sposób określona została moc?
- Str. 40: „Przewodności kontaktowe na interfejsach między komponentami obliczono przy użyciu empirycznego modelu Coopera i in. [60].” – informacja na temat tego modelu powinna zostać przytoczona w rozprawie doktorskiej.
- Str. 40: „Efektywną przewodność cieplną prętów oszacowano za pomocą analizy z wykorzystaniem metody elementów skończonych...” – wartości powinny zostać przytoczone.
- Str. 41: Brakuje informacji o opracowanym cieplnym modelu matematycznym, a zwłaszcza o wprowadzonych założeniach upraszczających.

- Str. 42: „zweryfikowano strumienie ciepła między kluczowymi elementami systemu. Uzyskane temperatury przedstawiono na Rys. 3.7.” – nie wiadomo, o które elementy chodzi. Brakuje schematycznego pokazania ich lokalizacji.
- Str. 43, Rys. 3.7: Jakie wartości temperatury reprezentują linie? Czy są to wartości średnie? Jeżeli tak, to w jaki sposób uśredniane?
- Str. 45: Komponenty wymienione w Tabeli 3.2 powinny zostać wyraźnie pokazane na rysunku. Brakuje informacji o układzie pomiarowym. W jaki sposób została oszacowana niepewność pomiarowa na poziomie 3.5 °C dla czujnika Pt100 dla elementu FPGA? Jeżeli w dalszej części pracy uwzględniany jest zakres temperatury przemiany fazowej równy 1 K, to w jaki sposób odnieść się do walidacji modelu numerycznego przy niepewności pomiarowej tego rzędu?
- Str. 47, Rys. 3.9: Brakuje informacji, jakie dane stanowiły dane wejściowe lub wyjściowe do/z programu Dakota i jakie dane były wymieniane pomiędzy programami Dakota i Esatan.
- Str. 49, Tabela 3.3: Brakuje informacji o lokalizacji punktów wymienionych w kolumnie o nazwie „Zmienna”. Powinny być one pokazane na rysunku. W jaki sposób oszacowano wartości określone jako Górna i Dolna wartość?
- Str. 60, Tabela 3.6 – przedstawione wartości dla C3 FPGA HS, E3 Bot Outer oraz E6 Angles charakteryzują się wysokimi wartościami odchylenia standardowego. Czym to jest spowodowane?
- Str. 60: W jaki sposób określono przewodność kontaktową C3 FPGA HS?
- Str. 63: „Zastosowana metoda analizy mieszanych niepewności epistemicznych i aleatorycznych może być kosztowna obliczeniowo...” – jak długo trwały obliczenia?
- Str. 67: „Zastosowanie TCE zmniejsza ciepło utajone urządzenia w porównaniu z czystym PCM, ale zwiększa przewodność cieplną...” – elementy TCE mogą jedynie intensyfikować transport ciepła. Przewodność cieplna jest właściwością materiału.
- Str. 71: „Ze względu na lepsze zarządzanie niepewnością badawczą, sposób podejścia do projektu produktu na tym etapie badań został uproszczony.” – Uproszczenia powinny zostać wykazane w rozprawie doktorskiej.
- Str. 74: W jaki sposób dobrany został krok czasowy?
- Str. 74: Moc elektryczna nie odpowiada żadnemu rodzajowi warunku brzegowego.
- Str. 74 – „Drugi warunek brzegowy odpowiada interfejsowi cieplnemu do struktury satelity...” – wyrażenie nie jest zrozumiałe.
- Str. 74: Czy założenie warunku brzegowego I rodzaju na powierzchni jest uzasadnione?
- Str. 76: „Entalpia topnienia/krzepnięcia” – reprezentowana jest przez wymiar charakterystyczny dla entalpii właściwej.
- Str. 77, Tabela 4.2: Tytuł tabeli jest mylący, gdyż nie zawiera ona definicji warunków brzegowych.
- Str. 83: „(Opór kontaktowy) Ten parametr był trudny do precyzyjnego określenia, jednak został oszacowany na podstawie ekstrapolacji do kontaktu wysokociśnieniowego danych pozyskanych z dodatkowych eksperymentów.” – W rozprawie doktorskiej brakuje informacji o dodatkowych eksperymentach oraz o wartościach oporów kontaktowych. Brakuje także wyjaśnienia/uzasadnienia

podjętych kroków (ekstrapolacja do kontaktu wysokociśnieniowego), celem określenia wartości oporu kontaktowego.

- Str. 85: Brakuje informacji o zakresie stosowalności wybranych korelacji Globe'a i Dropkina oraz Hollandsa i in. Obie korelacje powinny zostać przytoczone w rozprawie doktorskiej.
- Str. 85: „Zwiększona przewodność cieplna, ze względu na konwekcję naturalną, znacząco wpływa na czas całkowitego stopienia PCM,...” – przewodność cieplna jest właściwością substancji a nie układu, więc konwekcja naturalna na nią nie wpływa.
- Str. 90: W jaki sposób określono PCM_min i PCM_max? Czy można dowolnie zmieniać zakres tych wartości, czy nie powinny one wynikać z właściwości materiału PCM?
- Str. 92: „Na podstawie obserwacji dotyczących kształtu PCM po zestaleniu oraz zachowania CH1, a także wyników przedstawionych na rysunku 4.20, można zauważyć, że zestalenie materiału PCM znacząco zwiększyło fizyczną powierzchnię styku z pokrywą, co nie zostało uwzględnione w symulacji. W konsekwencji, różnica w profilach temperaturowych wynika z faktu, że temperatura pokrywy jest stabilizowana przez zwiększający się fizyczny kontakt materiału PCM z pokrywą podczas przemiany fazowej.” – przedstawiona interpretacja nie jest satysfakcjonująca, ponieważ wyniki analizy numerycznej wskazują na niższą temperaturę niż w trakcie eksperymentu, a wspomniane zostało, że temperatura pokrywy jest stabilizowana przez zwiększający się fizyczny kontakt materiału PCM z pokrywą, co nie zostało uwzględnione w „symulacji”.
- Str. 94: „opracowano wraz zespołem projektowym dedykowany system odprowadzania ciepła oparty o materiał zmiennofazowy.” – jaki był udział Doktoranta?
- Str. 96: „Stosowanie standardu (SpaceVPX) wymusza dostosowywanie projektu elektronicznego do wielu wymagań technicznych.” – najważniejsze wymagania powinny zostać przytoczone w rozprawie doktorskiej, ponieważ mają one wpływ na funkcjonalności systemu TCS.
- Str. 96: Brakuje prezentacji całego stanowiska pomiarowego, systemu akwizycji danych, dokładności pomiarowych, itp. (ta uwaga odnosi się także do wszystkich wcześniejszych prezentowanych badań eksperymentalnych).
- Str. 100: „Po osiągnięciu stanu, który uznano za ustalony...” – Na jakiej podstawie uznano stan za ustalony, co było kryterium?
- Str. 100: Dlaczego przeprowadzono badania dla źródła ciepła o mocy 8 W, skoro wcześniej było 9.6 W i ogólnie obserwowany jest wzrost mocy generowanej przez układ elektroniczny w małych satelitach?
- Str. 102: „Warunki brzegowe dobrano tak, aby możliwie najwierniej oddawały eksperyment, jednak z uwagi na duży stopień złożoności modelu zaobserwowano pewne rozbieżności.” – jakie sformułowano warunki brzegowe i jakie zaobserwowano rozbieżności?
- Str. 103, Rys. 5.9: Na rysunku obserwowany jest inny charakter zmienności temperatury w czasie, niż na rys. 4.8. Czy niewielka zmiana mocy miała na to wpływ, czy przyczyny są inne?

- Str. 106: „Dlatego przeprowadzono analizę wrażliwości modelu na wytypowane za pomocą wiedzy eksperckiej kluczowe opory na ścieżce przewodzenia ciepła.” – Gdzie one się znajdowały (skrót znajdujący się w legendzie Rys. 5.15, wymagają wyjaśnienia) oraz jakie przyjmowały wartości?
- Str. 110, Rys. 5.18: Wykres wskazuje na brak 100% powtarzalności w cyklu 2 i 3, co jest widoczne poprzez pewne przesunięcie zmienności w czasie w stosunku do zmienności źródła. Może to sugerować, że zbyt krótki okres był brany pod uwagę.
- Rys. 5.16 – 5.22: Temperatura źródła ciepła w niektórych obszarach jest niższa niż temperatura minimalna systemu TCS z PCM. Jak to wytłumaczyć?

6. Uwagi edytorskie

Poniżej zostały wymienione najważniejsze uwagi edytorskie. Pominęto uwagi o charakterze językowym (interpunkcja, błędy językowe czy składniowe).

- Brakuje wykazu symboli.
- Brakuje wykazu skrótów stosowanych bardzo często w pracy. Taka lista ułatwiłaby nawigację w pracy. Nie wszystkie skróty zostały wyjaśnione w tekście.
- Doktorant często stosuje wyrażenie żargonowe np. domenowi specjaliści, siatka podziału numerycznego, interfejsy, materiały interfejsowe, kosmos, interfejsował się układ, itp.
- Rysunki i tabele powinny być zamieszczone jak najbliżej miejsca pierwszego cytowania.
- Rysunki o tym samym charakterze powinny być spójne pod względem rozmiaru czy stosowanych czcionek i ich rozmiarów.
- W podpisach rysunków powinny być wyjaśnione symbole/oznaczenia, które są na nich prezentowane.
- Tytuły tabel powinny być umieszczone nad tabelami.
- Na rysunkach przedstawiających schematy analizowanych układów lub ich zdjęcia, powinny się pojawić opisy najważniejszych elementów czy obiektów na nich widocznych.
- Opisy rysunków powinny być w języku polskim.
- Str. 20, Rys. 2.11 (podpis) – wspomniane są przewodności cieplne, a na rysunku zaznaczone są opory termiczne.
- Rys. 4.8, 4.12, 4.13 – mylące jest użycie kolorów – występuje brak spójności w ich stosowaniu. Wyniki dla CH8 raz są przedstawiana kolorem fioletowym, później zielonym czy niebieskim. Utrudnia to analizę rysunków i interpretację wyników.
- Spis literatury nie posiada spójnego formatu, brakuje części danych bibliograficznych.
- Nie jest zrozumiała idea przyświecająca podkreślaniu pewnej części opisu bibliograficznego danej publikacji, ze względu na brak spójności w rodzaju podkreślanej informacji.

8. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Artura Jurkowskiego pt. „Opracowanie systemu zarządzania ciepłem dla układów elektronicznych w małych satelitach”

1. prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w Dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka,
2. zawiera oryginalne rozwiązanie problemu w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej,
3. dokumentuje kompetencje Doktoranta potwierdzające Jego zdolność do prowadzenia samodzielnej pracy naukowej.

Stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska spełnia wymogi zdefiniowane w Art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”.

Wniosuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej w Gliwicach o dopuszczenie Doktoranta do kolejnych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

Podpisała Elżbieta Fornalik-Wajs