

Częstochowa, 21.12.2024 r.

Prof. dr hab. inż. Jarosław Krzywański
Katedra Zaawansowanych Metod Obliczeniowych
Wydział Nauk Ścisłych, Przyrodniczych i Technicznych
Uniwersytet Jana Długosza w Częstochowie

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Artura Jurkowskiego

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

A. Wprowadzenie

Wykorzystanie materiałów ze zmianą fazy PCM (ang. phase changing materials) to ostatnio intensywnie rozwijany obszar badawczy.

Badania w tym zakresie dotyczą głównie identyfikacji nowych substancji o wysokim cieple utajonej przemiany fazowej oraz odpowiednio dobranej temperaturze tej przemiany. Równocześnie poszukuje się innowacyjnych rozwiązań inżynierskich, umożliwiających praktyczną implementację tych materiałów w zróżnicowanych układach.

Materiały PCM, funkcjonując jako elementy systemów nastawionych na racjonalne wykorzystanie zasobów energii, dzięki dużemu ciepłu utajonemu, pozwalają efektywnie gromadzić energię cieplną. W rezultacie stabilizują temperaturę współpracujących układów, przyczyniając się do poprawy żywotności ich elementów, zwiększenia ogólnej sprawności energetycznej systemów oraz poprawy oszczędności energetycznej w procesach magazynowania ciepła.

Wdrażanie akumulatorów ciepła, bazujących na materiałach PCM, niesie jednak ze sobą szereg złożonych zjawisk i wyzwań technologicznych, które należy skrupulatnie uwzględnić na etapie projektowania. Zalicza się do nich m.in. kwestie dotyczące mechanizmów transportu masy i ciepła wewnątrz akumulatora, złożone właściwości reologiczne materiałów, zmienność ciepła

właściwego w funkcji temperatury czy też dobór odpowiednich surowców konstrukcyjnych, zapewniających trwałość i optymalną pracę urządzenia w wymaganych i przewidywanych warunkach eksploatacyjnych.

Biorąc pod uwagę powyższe aspekty, podjęty przez mgr inż. Artura Jurkowskiego temat wykorzystania materiałów PCM w systemie zarządzania ciepłem w układach elektronicznych niewielkich satelitów, należy uznać za istotny nie tylko z perspektywy badań poznawczych, lecz również z uwagi na potencjał aplikacyjny.

B. Zakres rozprawy

Przedłożona do oceny praca doktorska mgr inż. Artura Jurkowskiego nosi tytuł „Opracowanie systemu zarządzania ciepłem dla układów elektronicznych w małych satelitach”. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Adam Klimanek, prof. Pol. Śl., promotorem pomocniczym jest dr inż. Sławomir Śladek.

Praca liczy łącznie 128 stron, na które składa się 6 rozdziałów, bibliografia w ilości 105 pozycji (w tym 1 pozycja, w której Doktorant jest współautorem), spis rysunków i tabel.

W rozdziale 1-szym Doktorant przedstawia uzasadnienie podjęcia analizowanego problemu badawczego oraz tezę pracy. Teza jest następująca: „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”.

Rozdział 2-gi przedstawia charakterystykę systemów zarządzania ciepłem oraz wykorzystywanych pasywnych i aktywnych technologii. To pasywne systemy zarządzania ciepłem znalazły się w centrum uwagi doktoranta oraz zostały poddane analizom w kontekście spełnienia przedstawionej tezy i celów pracy. Efektem tego rozdziału było wybranie materiału PCM do dalszych badań.

W rozdziale 3-cim sformułowano model numeryczny jednostki przetwarzania danych, projektowanej dla satelity Intuition-1. Przeprowadzono

również jego walidację oraz globalną analizę wrażliwości i kwantyfikację niepewności.

Analizę zaproponowanego rozwiązania, czyli komory z materiałem PCM pracującego w systemie zarządzania ciepłem przedstawiono w rozdziale 4 pracy. Scharakteryzowano tam przeprowadzone eksperymenty w cyklach grzania oraz chłodzenia układu oraz omówiono model numeryczny, uwzględniający materiał zmiennofazowy w kontekście proponowanego rozwiązania, który następnie poddano walidacji.

Przedstawiając w rozdziale 5 analizy funkcjonowania układu, składającego się z elektronicznej jednostki obliczeniowej, wyposażonej w dedykowany układ zarządzania ciepłem, zawierający materiał zmiennofazowy, zwrócono uwagę na aspekty związane z dostosowaniem projektowanego urządzenia do standardu SpaceVPX.

Pracę zamyka rozdział 6, zawierający szczegółowe zebranie i podsumowanie wyników pracy. W rozdziale poruszono też problemy badawcze, wymagające dalszych analiz, odniesiono się również do potencjału wdrożeniowego zaproponowanego w pracy rozwiązania.

C. Ocena rozprawy

1. Podjęta w rozprawie problematyka jest nie tylko interesująca, lecz również wpisuje się w najnowsze światowe nurty badawcze w obszarze dyscypliny naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Struktura pracy została podzielona na spójne rozdziały, co świadczy o przemyślanej organizacji treści. Jej przygotowanie wymagało od Doktoranta dobrego opanowania zagadnień teoretycznych, obejmujących zarówno techniki pomiarowe jak i podejścia modelowe.
2. Omówione badania eksperymentalne i modelowe mgr inż. Artur Jurkowski przeprowadził na obiekcie w skali przemysłowej (elektroniczna jednostka obliczeniowa (DPU) wyposażona w układ FPGA (ang. Field Programmable Gate Array firmy AMD Xilinx (model Kintex Ultrascale)), w nowoczesnym laboratorium spółki KP Labs Sp.z o.o. z Gliwic – przedsiębiorcy zajmującego

się tworzeniem oprogramowania pokładowego, urządzeń do obrazowania hiperspektralnego, algorytmów sztucznej inteligencji oraz wysokowydajnych komputerów.

W kontekście aspektów aplikacyjnych fakt ten podnosi wartość rozprawy.

3. Badania modelowe zrealizowane zostały w zespole naukowym o niekwestionowanej renomie, co w kontekście modelowanych obiektów dużej skali również podnosi wartość pracy.
4. W pracy zaproponowano autorskie, innowacyjne rozwiązanie, bazujące na wykorzystaniu akumulatora ciepła PCM. Jest to pierwsze takie wdrożone rozwiązanie, zaadaptowane do przemysłowego standardu SpaceVPX.
5. Opracowany, zgromadzony i przeanalizowany w pracy materiał badawczy cechuje się wysokim potencjałem publikacyjnym, odpowiadającym wymogom czasopism naukowych o zasięgu międzynarodowym.

D. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

- Na stronie 36 Doktorant pisze: „W badaniach wykonanych w ramach tej pracy przeprowadzono analizy dla stanu ustalonego z uwagi na krótsze czasy obliczeń”. Takie podejście pozwala na uchwycenie istotnych elementów procesu, poznanie go i formułowanie na tej podstawie właściwych wniosków, zwłaszcza z uwagi na długi czas obliczeniowy w przypadku stanów nieustalonych. Prowadząc badania naukowe należy mieć jednak na uwadze rzeczywiste warunki pracy układów i stąd pojawia się pytanie jaki wpływ mogą mieć dynamiczne aspekty omawianych procesów na wyniki przeprowadzonych analiz.
- Na stronie 38 Doktorant pisze: „Ponieważ w tej pracy zaplanowano przeprowadzenie analizy wrażliwości rozwiązania od gęstości siatki, wygenerowano trzy siatki w celu zbadania wpływu rozmiaru siatki na wyniki i szybkość obliczeń. Siatka rzadka składała się tylko z 1680 węzłów, siatka średnia z 7048 węzłów a siatka gęsta z 34902 węzłów. W pracy brakuje uzasadnienia dla zastosowanego podziału.

- Na str. 72 zapisano: „Materiał PCM został dobrany w taki sposób, aby zminimalizować wahania temperatury sprzętu znajdującego się w warunkach niskiej orbity okołoziemskiej, biorąc pod uwagę inne ograniczenia związane z wymaganiami przemysłu kosmicznego”. Nie przedstawiono przy tym rankingu dedykowanych materiałów PCM, a tym samym szczegółowej procedury doboru materiału zmiennofazowego wraz z charakterystyką właściwości.
- Standardy ADHA oraz SpaceVPX, które ma spełnić proponowane rozwiązanie, na które powołuje się w pracy Doktorant, powinny być lepiej scharakteryzowane. Ten element pracy jest istotny z uwagi na rygorystyczne wymagania określone standardami, jakie ma spełniać badany obiekt, co tym bardziej podnosi wartość badań przedstawionych w recenzowanej pracy.
Częściowa realizacja tego postulatu, w odniesieniu do standardu SpaceVPX, zamieszczona na stronie 96, tj. pod koniec pracy, nie do końca więc spełnia swoją rolę, jako że Doktorant wielokrotnie wcześniej, już na stronie 1 pracy, powołuje się na ten standard.
- W rozdziale 3.2 pracy, Doktorant przeprowadził analizę wrażliwości i kwantyfikację niepewności. W kontekście analizy wrażliwości, pozwalającej na dokonanie oceny zmian wyników symulacji DPU, spowodowanych zmiennością parametrów wejściowych oraz interakcją między nimi, pojawia się pytanie o inżynierię cech (ang. feature engineering) niewspomnianej w pracy.

E. Uwagi szczegółowe

- Praca sporządzona została starannie. Drobne błędy językowe i stylistyczne nie obniżają jej walorów merytorycznych.
- Bibliografia obejmuje 105 pozycji, w ramach której Doktorant wykazał tylko jedną pracę współautorską.
- Interpretacja danych na Rys. 2.4 (str. 12) jest zbyt pobieżna.

- Spis oznaczeń, w tym licznych użytych w pracy akronimów, którego zabrakło w pracy, stanowiłby cenne jej uzupełnienie, ułatwiające lekturę.
- Tytuły tabel w pracy (np. tabeli 3.1 na str. 39 i tabeli 3.2. na str.45) umieszczono pod zamiast nad tabelą.
- Elementy wielu rysunków i tabel sporządzone zostały w języku angielskim (np. tabela 3.1, rysunek 3.4, rys. 3.9 oraz inne).
- Rysunek 3.6 powinien znaleźć się w rozdziale 3.1.5 pracy, biorąc pod uwagę miejsce w którym jest omawiany. To samo dotyczy tabel 3.5 i 3.6, do których odniesiono się już na str. 54 a znalazły się na str. 59 i 60 pracy.
- W odniesieniu do wyników symulacji przedstawionych na rysunkach 4.9 i 4.10, cennym byłoby pokazanie przebiegów temperatury dla symulacji takich jak dla pełnego eksperymentu z rysunku 4.8. Pozwoliłoby to na lepsze zobrazowanie wyników obliczeń modelowych.
- Na rys. 5.9 i 5.13 brakuje profili dla następujących punktów pomiarowych CH2, CH3 i CH6, objętych analizą, zgodnie z listą punktów zamieszczoną na str. 100 pracy.
- Na str. 104 Doktorant pisze: „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”, przy czym nie uzasadnia celowości omawianego rozwiązania ze wspomnianą szczeliną.
- Rysunek 5.10 na str. 104 przedstawia dwa przekroje przez zbiornik PCM, nie wskazano przy tym lokalizacji tych przekrojów.

F. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Artura Jurkowskiego, pt. „Opracowanie systemu zarządzania ciepłem dla układów elektronicznych w małych satelitach” zawiera oryginalne i ważne dla inżynierii środowiska i energetyki sformułowanie i rozwiązanie problemu naukowego oraz oryginalne

zastosowanie wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej, wpisujące się w aktualne światowe trendy badawcze.

Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Praca stanowi przemyślaną, logiczną i spójną całość, potwierdzającą umiejętność samodzielnego prowadzenia przez Doktoranta pracy naukowej.

Uważam, że opiniowana praca mgr inż. Artura Jurkowskiego spełnia ustawowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim w odpowiednich przepisach.

Wobec powyższego stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej.

Podpisał Jarosław Krzywański