

Prof. dr hab. inż. Waldemar Minkina
Politechnika Częstochowska
Wydział Elektryczny
Katedra Automatyki, Elektrotechniki i Optoelektroniki
Al. Armii Krajowej 17
42-200 Częstochowa
e-mail: minkinawaldemar@gmail.com
Tel. +48 608-018-803

Częstochowa, dnia 26.06.2023 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Mirosława Lasara pod tytułem
„Wykorzystanie termografii aktywnej do estymacji wybranych parametrów materiałowych obiektu”

Uwagi wstępne

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Sławomir Zator, prof. PO. Przewód doktorski jest prowadzony przez Radę Dyscypliny „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne” Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne” dr hab. inż. Andrzeja Waindoka pismem RE00ST0016/D/2023 z dnia 05.06.2023 r.

Praca recenzowana jest zgodnie z zapisami § 3 ust. 1 pkt 2 rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. „*W sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora*” (Dz. U. z dnia 30 stycznia 2018 r. poz. 261), zaś ocena dotyczy dyscypliny: *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne* zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Edukacji i Nauki z dnia 11 października 2022 r. w „*sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych*” (Dz. U. z dnia 25 września 2018 r. poz. 1818).

Tematyka pracy dotyczy opracowania alternatywnej metody lokalizacji miejsc nadmiernej degradacji ekranów kotłów energetycznych wymagających wymiany. Założono, że metoda ta będzie szybka, niewymagająca montażu rusztowania oraz pozwalająca na sprawdzenie całej powierzchni ekranu. Dotychczas stosowane metody wymagają ręcznego sprawdzania wybranych rur ekranu. Metoda opracowana przez Doktoranta wykorzystuje modyfikację termografii aktywnej, polegającą na tym, że wymuszenie strumienia ciepła odbywa się z wykorzystaniem cieczy płynącej wewnątrz ekranu, czyli z wykorzystaniem wewnętrznego wymuszenia cieplnego. Badania przeprowadzono w oparciu model układu osiowo-symetrycznego w postaci rury, na której wykonano kontrolowane zmniejszenie grubości jej ścianek. Głównym celem jest zastosowanie tej metody do ekranów cieplnych kotłów energetycznych, gdzie nie można zastosować klasycznej termografii aktywnej. Nowością pracy jest wykazanie, że na podstawie pomiarów dynamicznych rozkładu temperatury na powierzchni obiektu oraz aproksymacji zjawisk cieplno-przepływowych, można zdiagnozować grubość ścianki kanału osiowo-symetrycznego.

W pierwszej części pracy zostały zaprezentowane poszczególne etapy związane z opisem metod diagnostyki termowizyjnej w badaniach nieniszczących oraz obecny sposób diagnostyki ekranów kotłów energetycznych. Uwzględniając wady dotychczasowych metod diagnostycznych, Doktorant zaproponował własne metody diagnostyki, budowę i kalibrację stanowiska oraz wytworzenie oprogramowania do akwizycji danych, synchronizacji uzyskanych danych z czujników i kamery termowizyjnej. Na tej podstawie Doktorant opracował trzy modele służące do wyznaczenia stałych czasowych, aproksymacji funkcji na podstawie

otrzymanych i przetworzonych danych oraz wyznaczeniu grubości ścianki kanału osiowo-symetrycznego. W ostatnim rozdziale pracy przedstawiono najważniejsze wnioski z przeprowadzonych prac badawczych, podsumowanie dotyczące właściwości opracowanych przez Doktoranta modeli dla wszystkich serii, ograniczenia związane z wykorzystaniem opisanych metod oraz nieuwzględnione w pracy, możliwe kierunki dalszych badań.

Opiniowana praca liczy 117 stron, zawiera 101 rysunków oraz 13 tabel, 5 załączników i została podzielona na 10 rozdziałów głównych. 11 rozdział, to bibliografia.

Struktura pracy jest poprawna. Podano cel pracy oraz jej tezę. Teza jest sformułowana prawidłowo i nosi pewne nowości, aczkolwiek pewne prace w zakresie ilościowego wyznaczenia głębokości defektów (czytaj tutaj wyznaczania grubości ścianki kanału wymiennika ciepła) opisano w zacytowanych pracach [DS 10 oraz DS 13] oraz w monografii:

Dudzik S.: „Wyznaczanie głębokości defektów materiałowych z zastosowaniem aktywnej termografii dynamicznej oraz sztucznych sieci neuronowych” Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2013, ISBN 978-83-7193-572-5. Dobrze by było, aby Doktorant podczas obrony odniósł się do tego materiału.

Standardowo, na początku pracy doktorskiej powinno się podać też ograniczenia pracy (np. znam dany problem, ale go nie rozwiązuję, gdyż jest on bardzo szeroki). Tego nie podano, a szkoda, gdyż wtedy możnaby uniknąć ewentualnych uwag recenzentów dotyczących braków pewnych analiz i eksperymentów.

Drobne uwagi w tym zakresie opiszę w dalszej części niniejszej recenzji. Praca napisana jest dobrym językiem naukowo – technicznym. Należy stwierdzić na tej podstawie, że Autor rozprawy wykazał się dobrą umiejętnością pisania prac o charakterze naukowym.

Ocena tematyki oraz celu rozprawy

Celem niniejszej pracy doktorskiej jest opracowanie metody, która pozwoliłaby na wstępną lokalizację w rurze osiowo-symetrycznej miejsc o zmniejszonej grubości ścianek, (poprzez wstępne oszacowanie grubości) na podstawie jednorazowego eksperymentu wykorzystującego wymuszenie zmiany jej stanu termicznego. Zaproponowana przez Doktoranta metoda opiera się na termografii aktywnej, w nieco innej formie niż jest ona powszechnie stosowana. W tym przypadku wymuszenie cieplne odbywa się od wnętrza obiektu, poprzez przewodzenie, a nie poprzez dostarczenie energii w postaci promieniowania cieplnego poprzez promieniowanie na zewnątrz badanego obiektu. Wynika to głównie ze specyfiki i rozmiarów docelowego obiektu, jakim jest ekran cieplny kotła energetycznego, w którym nie można zastosować wersji klasycznej termografii aktywnej. Należy tutaj jednak zaznaczyć, że rozwiązania dotyczące wewnętrznego wymuszenia cieplnego dotyczące aktywnej termografii w badaniu termowizyjnym innych obiektów są często stosowane, choćby w przypadku zastosowania prądów wirowych, czy wymuszeń zmęczeniowych służących do podgrzewania badanego materiału. Znane są także rozwiązania metody aktywnej, gdy wymuszenie cieplne następuje z drugiej, przeciwnej strony badanego obiektu. **Jednak, w tym przypadku, ze względu na kształt i rozmiar badanego obiektu, Doktorant nie mógł zastosować innej metody. Takie podejście nosi cechy nowości, a zastosowana metodyka badawcza zasługuje na uznanie.**

Aby zrealizować podane wyżej cele należało opracować odnośne metody umożliwiające uzyskanie termogramów o większej rozdzielczości. W związku z powyższym Doktorant opracował trzy metody. Pierwsza z nich polegała na łączeniu pojedynczych termogramów w jeden o większej rozdzielczości. Takie rozwiązania oferują niekiedy firmy produkujące kamery termowizyjne, np. firma FLIR dla kamery T1020. **Druga metoda polegała na konwersji plików z danymi temperaturowymi do postaci jawnej, następnie połączenie ich w jeden plik i powrót do postaci pliku termograficznego. To rozwiązanie jest oryginalnym pomysłem Doktoranta i wymagało stworzenia autorskiego oprogramowania w środowisku graficznym LabVIEW.** Trzecia opracowana metoda polegała na mikro przesunięciach kamery na silni-

kach krokowych tak aby uzyskać termogramy wysokiej rozdzielczości. Takie rozwiązanie także stosują niektórzy producenci kamer termowizyjnych, w celu „wirtualnego” zwiększenia rozdzielczości geometrycznej matrycowych detektorów.

Praca dotyczy interdyscyplinarnej tematyki mieszczącej się w obszarze termodynamiki, elektroniki, automatyki i metrologii. Ściśle dotyczy więc dyscypliny naukowej „automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne”. Aktualność i ważność podjętej tematyki wynika z ciągłego rozwoju zdalnych systemów do pomiaru temperatury. Rozwój tych systemów stymulowany jest nowymi potrzebami i rosnącymi wymaganiami. Przedstawiony problem naukowy jest aktualny i ważny, szczególnie w obecnym okresie poszukiwania nowoczesnych systemów diagnostyki cieplnej urządzeń energetycznych.

Rozwiązanie postawionego problemu naukowego

Temat podjęty przez Doktoranta ma bardzo duży potencjał aplikacyjny. W zakresie tych rozwiązań mieszczą się badania, których celem jest konstrukcja nowych systemów termowizyjnych o lepszych parametrach metrologicznych. Przedstawione wyniki badań modelowych i eksperymentalnych dowodzą, że postawione w pracy zadania zostały osiągnięte w założonym zakresie, a postawiona teza udowodniona.

Bibliografię stanowi zbiór 78 cytowanych pozycji, w którym jest także jedna aktualna, ściśle dotycząca pracy doktorskiej, współautorska publikacja Doktoranta opublikowana w dobrym czasopiśmie „MDPI sensors” (punktowanym obecnie 100 punktami MEN) oraz dwie współautorskie publikacje opublikowane wcześniej w czasopiśmie naukowo – technicznym „Pomiary Automatyka Kontrola”. Jest to dorobek wystarczający dla spełnienia kryterium otrzymania stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

Uwagi ogólne i kwestie dyskusyjne

Z punktu widzenia celu i postawionej tezy, przedstawiona do recenzji rozprawa została zrealizowana poprawnie. **Recenzent nie zauważył poważnych mankamentów obniżających jej jakość.** Układ pracy jest właściwy. Doktorant, niezależnie od wypunktowania wniosków w rozdziale podsumowującym, w poszczególnych wcześniejszych rozdziałach słusznie uwypukla własne dokonania.

Pytania szczegółowe i uwagi edytorskie

W trakcie studiowania rozprawy doktorskiej nasunęły się następujące pytania i komentarze szczegółowe:

1. Str. 13/14 – warto podkreślić, że emisyjność (jako najważniejszy parametr, którego dokładność określenia ma decydujący wpływ na dokładność pomiaru termowizyjnego) zależy nie tylko od temperatury T także od długości fali λ czy kata obserwacji α . Kiedyś fundamentalne, trzytomowe dzieło ujmujące emisyjności różnych materiałów napisał Touloukian:

[1] Touloukian Y.S., DeWitt D.P.: (1970), Seria: „Thermophysical properties of matter: Thermal radiative properties – metallic elements and alloys”, Vol. 7, IFI/Plenum Data Corporation Publishing Company UM, New York – Washington.

[2] Touloukian Y.S., DeWitt D.P.: (1972a), Seria: „Thermophysical properties of matter: Thermal radiative properties – nonmetallic solids”, Vol. 8, IFI/Plenum Data Corporation Publishing Company, New York – Washington.

[3] Touloukian Y.S., DeWitt D.P., HERNICZ R.S: (1972b), Seria: „Thermophysical properties of matter: Thermal radiative properties – coatings”, Vol. 9, IFI/Plenum Data Corporation Publishing Company, New York – Washington.

2. Rys. 3.1 - brak źródła cytowania.

3. Str. 17. Działanie kamer termowizyjnych nie opiera się na prawie Boltzmana, tylko na prawie Plancka dla określonego pasma promieniowania podczerwonego (krótkofalowego SWB i długofalowego LWB) oraz modelu pomiarowego kamery termowizyjnej. Podane w pracy stwierdzenie, że działanie kamer termowizyjnych opiera się na prawie Boltzmana jest nieprawdziwe, lub jest to jakiś skrót myślowy, ale trudny do zrozumienia.
4. Str. 24. „W roku 2011 firma ThermaCAM przedstawiła kamerę termowizyjną PM 595, która posiada nowy rodzaj kontrastu termicznego, nazywany „kontrastem filtrowanym””. Tutaj jest coś nie tak, gdyż tę kamerę mam w zakładzie od roku 2000. Termin „kontrast filtrowany” wprowadziliśmy z prof. Grysiem w roku 2010 [GSM10].
5. Dlaczego w pomiarach nie zastosowano kamer termowizyjnych o lepszych parametrach dotyczących rozdzielczości geometrycznej, np. popularną obecnie kamerę firmy FLIR T1020. Kamera ta jest wyposażona w funkcję Multi Spectral Dynamic Imaging (MSX) umożliwiającą analizę temperaturową badanego obiektu poprzez wzajemne przenikanie termogramu i fotografii o tym samym polu widzenia? Są też dostępne kamery o rozdzielczości 4K (1920 x 1536 pikseli) np. niemieckiej firmy InfraTec z Drezna także wyposażone w funkcję MSX. Ponadto do tych kamer można zastosować dodatkową optykę praktycznie o dowolnym polu widzenia. Kamera taka jest ponadto wywzorcowana przez producenta i posiada odnośne świadectwo wzorcowania.
6. Nie bardzo rozumiem, dlaczego była potrzeba wykonywania zabiegów prowadzących do zwiększania rozdzielczości geometrycznej (ilości pikseli) matrycy detektorów – trzecia metoda zaproponowana przez Doktoranta. Dodatkowo, w pracy nie wskazano, czy przetwarzanie termogramów prowadzące do tego celu dotyczyło termogramu zapisanego jako pseudokolorowana bitmapa (lub typu: *.tif, *.gif) czy termogramu jako pełnego pliku pomiarowego. Jeżeli przetwarzano termogram jako pełny plik pomiarowy, to czy Doktorant dysponował pełnym opisem formatu tego pliku.

Uwagi drobne:

1. Zauważyłem niestaranne lub niekompletne opisy pozycji literaturowych, np. OW06, SL, STT08, itd.
2. Niektóre zdania są nieprecyzyjnie sformułowane, np. str. 26: „Zmiany w czasie temperatury na powierzchni obiektu, uzyskanych metodą termowizyjną, które zostaną wzbudzone zmianą temperatury medium przepływającego po przez wnętrze kanału osiowo-symetrycznego pozwalają na wyznaczenie parametrów, aproksymujący zjawiska cieplno-przepływowe” powinno być: „Zmiany w czasie temperatury na powierzchni obiektu, **zarejestrowane** metodą termowizyjną, które zostaną **wywołane** zmianą temperatury medium przepływającego po przez wnętrze kanału osiowo-symetrycznego pozwalają na wyznaczenie parametrów, aproksymujący zjawiska cieplno-przepływowe”.
3. W pracy znaleziono liczne błędy literowe, dlatego wymaga ona starannej korekty, np. str. 43, „pozwala na obracaniu kamerą” str. 48 „Jednym z zalet”, str. 79 „oraz błędy dopasowanie modelu”, str. 103 „Istotne jest, że nie zostanie pominięty żadne miejsce”, itd., itd.
4. Str. 57, 59, 74, 85 itd., itd. – termin „termopara” jest rusycyzmem i nie jest prawidłowym terminem metrologicznym stosowanym w polskim słownictwie technicznym. Polska Norma PN-71/N-02050 „Metrologia, nazwy i określenia” zaleca stosowanie terminu „termoelement”.
5. Tabele 7.1 i dalsze, np. 9.5, 9.6 itd. – czy zapis wyniku pomiaru aż z 5-ciomą (a nawet 6-ciomą) cyframi znaczącymi jest uzasadniony klasą użytej aparatury pomiarowej? Ponadto, nie można opisywać z różną ilością cyfr znaczących wyników uzyskanych za pomocą tej samej aparatury i z tą samą dokładnością. Uwaga ta jest o tyle znacząca, że praca doktorska jest broniona w środowisku metrologów, w tym metrologów temperatury.

6. Praca wydaje się być nieco „przeładowana” ogromną ilością charakterystyk uzyskanych z eksperymentów, przez co trudno się ją czyta i dlatego częściowo można zatracić podstawowy cel pracy postawiony przez Doktoranta.

Ocena rozprawy doktorskiej

Opiniowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Mirosława Lasara ma charakter analityczno-eksperymentalny. Dotyczy trudnego i ważnego aspektu związanego z oryginalnym wykorzystaniem metod aktywnej termografii dynamicznej. Doktorant udowodnił sformułowaną przez siebie tezę co powoduje, że Jego praca stanowi dojrzały, osobisty dorobek. Istnieje realna perspektywa wdrożenia opracowanej przez Doktoranta metodyki badawczej dla lokalizacji miejsc nadmiernej degradacji ekranów kotłów energetycznych wymagających wymiany lub do diagnostyki innych obiektów cieplnych.

W szczególności za **osiągnięcia własne Autora uznaję**: zaproponowanie nowej metody diagnostyki oraz stworzenie dedykowanego programowania w środowisku graficznym LabVIEW do pomiarów i sterowania. Przeprowadzona pozytywna, eksperymentalna weryfikacja metody daje podstawy do praktycznego wykorzystania proponowanej metody przez zespoły badawcze zajmujące się problematyką dotyczącą diagnostyki nich różnych obiektów cieplnych. Należy zaznaczyć, że Doktorant w prawidłowy sposób opisał warunki prac doświadczalnych, co jest bardzo ważną, pozytywną cechą dokumentowania badań eksperymentalnych. Na podkreślenie zasługuje staranność wykonania licznych, w większości barwnych, rysunków i wykresów, ich właściwe rozmiary i czytelność opisów.

Bibliografię stanowi zbiór 78 cytowanych pozycji, w którym jest także jedna, aktualna, ściśle dotycząca pracy doktorskiej, współautorska publikacja Doktoranta opublikowana w dobrym czasopiśmie „MDPI sensors” (punktowanym obecnie 100 punktami MEN) oraz dwie współautorskie publikacje opublikowane wcześniej w czasopiśmie naukowo – technicznym „Pomiary Automatyka Kontrola”. Najważniejsze publikacje Doktorant ma wspólnie ze swoim Promotorem. Prace te mają charakter użyteczny.

Jest to dorobek wystarczający dla spełnienia kryterium otrzymania stopnia naukowego doktora nauk technicznych

Wniosek końcowy

Z punktu widzenia celu i postawionej tezy, przedstawiona do recenzji rozprawa została zrealizowana poprawnie. Układ pracy jest właściwy. Doktorant słusznie uwypukla własne dokonania. **Na podstawie wnikliwej analizy pracy mogę stwierdzić, że nie nasuwają się zasadnicze uwagi krytyczne o charakterze merytorycznym.**

Przedstawione wyżej niewielkie uwagi krytyczne mają na celu inspirację i zachęcenie Doktoranta do kontynuowania prac w tej dziedzinie. Samą pracę doktorską oceniam jako bardzo dobrą, choćby z powodu na jej wielkie walory użyteczne.

Recenzowana rozprawa mgr inż. Mirosława Lasara pod tytułem „Wykorzystanie termografii aktywnej do estymacji wybranych parametrów materiałowych obiektu”, stanowi dobry, samodzielny wkład doktoranta w nauki techniczne, w szczególności w zagadnienia dotyczące wykorzystania aktywnej termografii dynamicznej w szeroko rozumianej diagnostyce. Uzyskane rezultaty mają istotne znaczenie zarówno poznawcze jak i użyteczne i mogą być wykorzystane w dalszych pracach badawczych w tym zakresie.

Podane w rozprawie rozważania i wyniki, mimo wykazanych uwag i zastrzeżeń, pozwalają na stwierdzenie, że Doktorant dysponuje ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie naukowej „automatyka, elektronika i elektrotechnika i technologie kosmiczne”, podjął się rozwiązania oryginalnego i ważnego zadania, rozwiązał je, stosując poprawne metody badawcze oraz wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Stwierdzam

więc, że recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Mirosława Lasara nie wymaga uzupełnień ani poprawek i spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w artykule 187 ustęp 1 i ustęp 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dziennik Ustaw z 2018 poz. 1668 z późniejszymi zmianami) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Waldemar Minkina

.....
(Waldemar Minkina)