

dr hab. inż. Sebastian Budzan, prof. Pol. Śl.  
Politechnika Śląska,  
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki,  
Katedra Pomiarów i Systemów Sterowania  
ul. Akademicka 16,  
44-100 Gliwice

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: Wykorzystanie termografii aktywnej do estymacji wybranych parametrów materiałowych obiektu  
Autor rozprawy: mgr inż. Mirosław Lasar  
Promotor rozprawy: dr hab. inż. Sławomir Zator, prof. PO  
Dziedzina: nauki inżyniersko-techniczne  
Dyscyplina: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne

Niniejsza recenzja została przygotowana na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Opolskiej.

### 1. Cel i zakres rozprawy.

Przedstawiona praca doktorska jednoznacznie wpisuje się w obszar dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Obejmuje ona zagadnienia z zakresu automatyki, pomiarów i metrologii.

Tematyka pracy związana jest bezpośrednio z zagadnieniem diagnostyki technicznej, w szczególności lokalizacją miejsc nadmiernej degradacji ekranów kotłów energetycznych. Doktorant zaproponował odmienne od dotychczasowych rozwiązań podejście, bazujące z jednej strony na wykorzystaniu termowizji aktywnej, a z drugiej na wykorzystaniu podstawowych modeli zdefiniowanych w rozprawie jako M1, M2, M3 do między innymi opisu zjawisk rozchodzenia się ciepła w badanym obiekcie. W efekcie zaproponowane rozwiązanie pozwoliło na szacowanie grubości badanej rury i tym samym lokalizację potencjalnego miejsca jej degradacji.

W rozprawie postawiono następującą tezę:

*Na podstawie pomiarów dynamicznych rozkładu temperatury na powierzchni obiektu oraz aproksymacji zjawisk ciepło-przepływowych można zdiagnozować grubości ścianki kanału osiowo-symetrycznego.*

Została ona uzupełniona o trzy tezy pośrednie:

1. *Zmiany w czasie temperatury na powierzchni obiektu, uzyskanych metodą termowizyjną, które zostaną wzbudzone zmianą temperatury medium*

*przepływającego poprzez wnętrze kanału osiowo-symetrycznego pozwalają na wyznaczenie parametrów, aproksymując zjawiska ciepłno-przepływowe.*

2. *Na podstawie przyjętego prostego modelu zjawisk ciepłno-przepływowych możliwe będzie wyznaczenie miejsc o zmniejszonej grubości ścianek.*
3. *Wykorzystując aproksymację- uzyskanych wyników możliwe będzie oszacowanie grubości ścianek w kanale osiowo-symetrycznym.*

Postawione tezy i charakter pracy wymagały od Doktoranta opracowania stanowiska badawczego, które jak sam wspomina na stronie 54 rozprawy było modyfikowane w trakcie prac badawczych kilkakrotnie. Należy przy tym zwrócić uwagę na konieczność przeniesienia na stanowisko badawcze cech obiektu rzeczywistego w postaci ekranu kotła energetycznego składającego się z zestawu rur. W badaniach ograniczono się do rury o średnicy nominalnej 50 mm wraz z trzema szlifami o grubościach 0,5 mm, 1,0 mm oraz 1,5 mm.

Zaproponowane przez Doktoranta wykorzystanie termowizji aktywnej pociągnęło za sobą konieczność wykonania szeregu prac dodatkowych związanych ze stanowiskiem badawczym tj. wybór stosowanych czujników do pomiaru kontaktowego temperatury oraz miejsc ich montażu, oprogramowanie modułów akwizycji danych pomiarowych w środowisku LabVIEW. Wykonano również prace dodatkowe związane bezpośrednio z zastosowaniem kamery termowizyjnej, tj. redukcję zniekształceń geometrycznych, kalibrację kamery termowizyjnej oraz wykorzystano algorytmy łączenia termogramów dla uzyskania wyższej rozdzielczości.

Biorąc pod uwagę powyższe, należy podkreślić praktyczny aspekt pracy i możliwość wdrożenia zaproponowanego rozwiązania w warunkach przemysłowych.

## **2. Ocena merytoryczna pracy.**

Recenzowana praca doktorska składa się z dziesięciu głównych rozdziałów, jedenasty rozdział stanowi bibliografia. Pracę uzupełniono o pięć załączników. Struktura pojedynczych rozdziałów jest klarowna i logiczna. Pod dyskusję można poddać ich kolejność. Naturalnym układem jest wprowadzenie do tematyki, postawienie tezy, umieszczenie proponowanego rozwiązania w aktualnym stanie wiedzy, przedstawienie stanowiska badawczego, opracowanych metod oraz omówienie wyników wraz z podsumowaniem. W recenzowanej pracy rozdział 3 zawiera jednocześnie podstawy teoretyczne termowizji, jak i opis wykorzystywanych w badaniach kamer termowizyjnych. Rozdział 4, który zawiera cel i tezę pracy rozpoczyna się na 26 stronie. Rozdział 5, który należało wprost powiązać ze stanowiskiem pomiarowym opisanym w rozdziale 7, tym bardziej, że kolejny rozdział 6 zawiera opracowanie teoretyczne aktualnego stanu wiedzy. Są to uwagi w dużej mierze dyskusyjne o charakterze organizacyjnym rozprawy, które jednak nie wpływają na ocenę jej poziomu naukowego.

W rozdziale pierwszym Autor wprowadza w tematykę zagadnienia, zaczynając od odniesienia się do badań nieniszczących przy wykorzystaniu termowizji, by na kolejnych stronach zaznaczyć specyfikę diagnostyki ekranów kotłów.

Rozdział drugi zawiera przedstawienie tematyki diagnostyki stanu technicznego ekranów cieplnych w warunkach przemysłowych. Doktorant opisuje procedurę techniczną, która pozwala oszacować grubość rur kotła, a tym samym wskazać te wadliwe. Biorąc pod uwagę zaproponowane podejście przez Autora opisane w dalszych rozdziałach, w tym miejscu należałoby poświęcić więcej uwagi szczegółowemu opisowi procesu degradacji rur kotła, który

jedynie został wspomniany pobieżnie. Z punktu widzenia pomiarów termowizyjnych istotnym jest poznanie natury procesu i obiektu badań, z tego względu proszę Doktoranta o uszczegółowienie tej części w trakcie obrony.

W rozdziale trzecim Autor przedstawił podstawy termowizji przywołując fundamentalne prawa fizyczne oraz podstawy pomiarów termowizyjnych skupiając się przede wszystkim na rozdzielczości matryc kamer termowizyjnych. W podrozdziale 3.2 zawarł informacje dotyczące trzech wykorzystywanych kamer, tj. VarioCAM Head, Flir E4 oraz Zenmuse XT, bazując na specyfikacjach technicznych. Wskazał na tej podstawie kamerę VarioCAM Head jako tę spełniającą wymagania. W tym miejscu nasuwa się pytanie, w jaki sposób ustalono minimalne wymagania w zakresie rozdzielczości oraz zakresu wymaganego do prawidłowej diagnostyki ekranu? Z drugiej strony Autor wspomina w tym samym akapicie o możliwości wykorzystania kamery Zenmuse XT zamontowanej na dronie. Należy doprecyzować, czy są to jedynie dywagacje Autora nt. potencjalnych badań podczas wdrażania systemu. Dopiero po lekturze pozostałej części pracy jasne staje się, która z kamer była wykorzystana.

Cel, tezę główną, tezy uzupełniające oraz zakres pracy Autor zamieścił w rozdziale 4. Teza główna jest spójna i oddaje zakres merytoryczny pracy doktorskiej. Wątpliwości można mieć jedynie do sformułowania „zdiagnozować grubości ścianki ...”. Bardziej trafnym określeniem byłoby „oszacować grubości ścianki”. Pierwsza teza uzupełniająca po głębszej analizie jest zrozumiała, wymaga jednak prawidłowej redakcji, zwłaszcza jej zakończenie „... aproksymujący zjawiska ciepło-przepływowe”.

W rozdziale 5 Autor przedstawił zidentyfikowane przez siebie problemy związane z użytkowaniem kamer termowizyjnych. Swoje analizy zawarł w czterech podrozdziałach. W pierwszym z nich przedstawił rozwiązanie problemu ze zdalną rejestracją termogramów poprzez opracowany moduł zasilania i transmisji światłowodowej. W kolejnej części zdefiniował problem zniekształceń geometrycznych oraz przedstawił metodę redukcji powstających dystorsji. Zwięźle przedstawił kalibrację kamery termowizyjnej, bazując na oprogramowaniu producenta. Ostatnim problemem opisanym przez Autora było zwiększenie rozdzielczości pomiarów termowizyjnych. Jest to swego rodzaju skrót myślowy, ponieważ formalnie możemy mówić o globalnym zwiększeniu rozdzielczości wynikowego termogramu, jednakże jest to uzyskane poprzez złożenie ze sobą określonej liczby termogramów o znanej rozdzielczości. Może to wprowadzać niejasność co do pojęcia rozdzielczości jako parametru specyficznego dla kamer termowizyjnych. Zapewne z tego względu Autor posłużył się określeniem rozdzielczość pomiarów termowizyjnych. Proszę w trakcie obrony jedynie o uściślenie tego zagadnienia. Podkreślić należy wkład Autora włożony w opracowanie wybranych algorytmów na tym etapie, co nie było głównym elementem rozprawy doktorskiej, a było niezbędne do realizacji głównych prac. Autor w rozdziale poruszył również problemy metrologiczne, brakuje mi natomiast odniesienia się do stabilności temperaturowej kamery termowizyjnej. Czy była ona brana pod uwagę i oszacowana podczas badań? Niewątpliwie jest to parametr, który zwłaszcza bezpośrednio po uruchomieniu kamery wpływa na wartość pomiaru temperatury i musi być brany pod uwagę. Tym bardziej, że w dalszej części badań Autor napotkał na problem z kalibrowaniem się kamery. Proszę Doktoranta o odniesienie się do tej uwagi.

Metody diagnostyki ekranów cieplnych kotłów Autor przedstawił w rozdziale 6. Spośród grup metod możliwych do wykorzystania skupił się na technikach ultradźwiękowych, magnetycznych i elektromagnetycznych, promieniowania jonizującego oraz opartych o promieniowanie podczerwone. W przeglądzie metod wskazał cechy charakterystyczne dla

analizowanych metod. Przegląd metod jest wystarczający, mając na względzie specyfikę metod diagnostyki ekranów cieplnych.

W rozdziale 7 Autor zawarł informacje dotyczące stanowiska pomiarowego, geometrii badanego obiektu, sposobu przetwarzania i analizy danych z czujników temperatury oraz poddał analizie liczbę próbek – wartości temperatur z czujników. Opis stanowiska pomiarowego jest odpowiednio szczegółowy. Zdefiniowano obszary zainteresowania wzdłuż badanej rury, w których to analizowano wartości temperatury. Warto doprecyzować sentencję ze strony 64 rozpoczynającej podrozdział 7.2, która dotyczy konieczności poprawy dokładności związanej z odległością i rozmieszczeniem czujników. Co autor miał na myśli na stronie 66 w komentarzu przed tabelą 7.2 „... do utworzenia baz danych do nauczania maszynowego”? W uczeniu maszynowym zwykle mamy do czynienia ze zbiorami danych do uczenia, walidacji i testowania. Ponadto, analizując charakter pomiarów i zjawisk zachodzących w obiekcie badań, nasuwa się pytanie, czy Autor brał pod rozwagę wykonanie symulacji w środowisku Ansys, bądź analogicznym?

W Rozdziale 8 Autor skupił się na opisie modelu fizycznego rozkładu temperatury w pojedynczej rurce, bazując na znanych źródłach literaturowych oraz opisie eksperymentu. Autor pracy skupia się w badaniach na metodzie impulsowej, natomiast bardzo skrótowo wspomina o innych metodach termowizji aktywnej, a wydaje się istotnym wskazanie cech wybranej metody, które determinują jej efektywność względem innych metod termowizji aktywnej dla badania wspomnianej wielokrotnie rury ekranu kotła. Na stronie 85 rozprawy Autor opisuje przebieg eksperymentu, który w uproszczeniu polegał na naprzemiennych podgrzewaniu i schładzaniu odcinka pomiarowego. Jak zatem można odnieść taki sposób prowadzenia eksperymentu na stanowisku pomiarowym do pomiaru w warunkach rzeczywistych?

Modelowanie obiektu w postaci modeli M1, M2, M3 Doktorant zawarł w rozdziale 9. Rysunek 9.1. wymaga skomentowania przez Autora, chociażby wskazania celowości zastosowania modeli M1, M2, M3, co, jednakże staje się klarowne po lekturze dalszych podrozdziałów, zwłaszcza podrozdziału 9.4. Model M1 w postaci inercji I rzędu z opóźnieniem został wykorzystany do poszukiwania zależności stałej czasowej  $T_1$  od odległości od źródła wymuszenia oraz grubości ścianki badanej rury. W modelowaniu M2 przebadano aproksymacje stałej czasowej  $T_1$  względem odległości od źródła wymuszenia dla określonej grubości ścianki funkcjami: liniową, kwadratową, logarytmiczną i potęgową. W ostatnim etapie wykorzystał aproksymację w postaci funkcji dwóch zmiennych, aby uzyskać miarodajną informację o grubości ścianki rury dla określonej odległości od źródła wymuszenia. Zasadniczo w tej części pracy zaprezentowano główne, reprezentatywne wyniki w postaci rysunków i tabel, które uzupełniono o załączniki 2-5. Doktorant wykazał się tutaj dobrą umiejętnością analizy i doboru narzędzi badawczych dla postawionego zadania. Wykazał w stopniu wystarczającym skuteczność przyjętego rozwiązania, biorąc pod uwagę ograniczenia stanowiska i samego obiektu badań. Proszę Doktoranta o odniesienie się do kwestii potencjalnego wykorzystania tak zaproponowanego rozwiązania w praktyce. Czy modele M1, M2, M3 w zaproponowanej formie mogą zostać wykorzystane dla całych ekranów? W tym miejscu odczuwalny jest niedosyt w związku z brakiem porównania zaproponowanego rozwiązania do innych znanych metod szacowania grubości obiektu badanego. Dodatkowo ze względu na charakter pracy warto, aby Doktorant w ramach obrony uzupełnił swoje odpowiedzi o zestaw termogramów, które pozwolą zobrazować wyciągane wnioski.



W podsumowaniu przypomniano tezę, cel i zakres pracy. Podsumowano każdą z części rozprawy, jak również nakreślono potencjalne kierunki rozwoju opracowanej metody. Autor wskazał na potencjalne wykorzystanie sieci neuronowych i głębokiego uczenia w przyszłości, jak również na przeprowadzenie badań z wykorzystaniem rzeczywistego ekranu kotła.

### 3. Ocena redakcyjnej strony rozprawy.

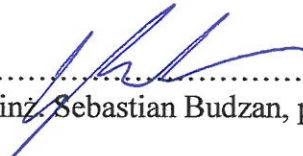
Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska w wielu fragmentach sprawia wrażenie niewystarczającej korekty językowej, sprawia wrażenie pisanej w niektórych częściach w pośpiechu. Poniżej zawarto najważniejsze, wybrane uwagi w tym zakresie:

- powtórzenia sentencji, np. „W obszarach, gdzie ...” ze strony 8 powtórzono na stronie 9,
- błędna pisownia słów, np. poprzez (strona 26) oraz skutek (strona. 71),
- częste literówki, np. strona 62, grubość ścianek w rury (zbędna litera w), strona 98 złączniku (brak a),
- błędy interpunkcyjne, nadmierne pomijanie przecinków, co utrudnia odbiór merytoryczny,
- błędy stylistyczne, np. na stronie 43 „Kamera została ona zainstalowana ...”,
- rysunek 7.10 – wykonano zrzut ekranu z MS Excel zamiast dane zaprezentować w formie tabeli,
- rysunek 7.21 jest nieczytelny,
- rysunki 7.27-7.31 zawierają jednocześnie angielskie i polskie nazewnictwo, dodatkowo polskie jest błędnie zapisane.

### 4. Podsumowanie.

Reasumując, należy zauważyć, że autor podjął się bardzo ciekawego oraz cennego z punktu widzenia praktycznego wykorzystania tematu pracy doktorskiej. Wyniki badań zostały opublikowane w 2022 roku w czasopiśmie Sensors (Zator, S.; Tomaszewski, M.; Lasar, M. A Diagnostic Method Based on Active Thermography for the Degradation Assessment of Power Plant Boiler Tubes. Sensors 2022, 22, 8401. <https://doi.org/10.3390/s22218401>). Autor wykazał się wiedzą z dziedziny nauk inżynierijno-technicznych, samodzielnie rozwiązał istotne zadanie naukowe z reprezentowanej dyscypliny naukowej. Autor wykazał się znajomością i umiejętnością zastosowania różnych metod badawczych. Udowodnił postawione przez siebie tezy poprzez prawidłowe zaplanowanie eksperymentu badawczego, opracowanie stanowiska, jak również zaproponowane rozwiązanie, w którym odniósł uzyskane wyniki do stanu rzeczywistego. Pomimo moich krytycznych komentarzy zarówno w zakresie merytorycznej strony rozprawy, jak i jej oceny redakcyjnej nie umniejsza to wkładu naukowego Doktoranta.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam zatem, że przedłożona do zaopiniowania rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Mirosława Lasara pt. „Wykorzystanie termografii aktywnej do estymacji wybranych parametrów materiałowych obiektu” spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określonym w artykule 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2018 poz. 1668 z późn. zm.) i wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

  
.....  
Dr hab. inż. Sebastian Budzan, prof. Pol. Śl.