

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**magister inżynier **Marii Strąkowskiej****„Modelowanie zjawisk termicznych tkanki skóry do wspomagania diagnostyki zmian patologicznych”**

Doktorantka zdefiniowała *explicite* jako **cel rozprawy** „*opracowanie nowej metody termowizyjnych badań przesiewowych stanów chorobowych skóry i tkanek wewnętrznych i weryfikację metody w warunkach klinicznych*”. Podjęła się udowodnienia dwóch tez rozprawy:

1. *Aproksymacja krzywej wzrostu temperatury skóry za pomocą kombinacji liniowej funkcji eksponentialnej i funkcji błędu umożliwia zaproponowanie modelu termicznego tkanki do estymacji parametrów termicznych i ukrwienia skóry.*
2. *Możliwe jest opracowanie metody medycznych badań przesiewowych z zastosowaniem dynamicznej termografii aktywnej w podczerwieni i wykorzystującej parametry termicznego modelu skóry do wykrywania stanów patologicznych.*

Rozprawa omawia istotne problemy nowoczesnej diagnostyki termicznej w medycynie. Postawione zadanie nie jest łatwe, gdyż problematyka modelowania i pomiarów termicznych nie jest nowa, a podstawowe pozycje literatury światowej obejmują wiele tysięcy pozycji. W efekcie Doktorantka skupiła uwagę na przeglądzie jedynie wybranych pozycji, reprezentujących nie wszystkie najważniejsze cytowania, można jednak uznać, że ograniczony wybór jest uzasadnionym rozwiązaniem, gdyż tekst rozprawy powinien być zawarty w rozsądnej objętości. Prezentowany w rozprawie przegląd literatury obejmuje 90 pozycji, w tym 10 oryginalnych, współautorskich prac własnych, z których 4 opublikowano w czasopiśmie z listy JCR, a resztę w materiałach o zasięgu światowym.

Cel pracy nie budzi wątpliwości i warty jest rozprawy doktorskiej. Teza pierwsza zawiera elementy nowości, choć aproksymacja odpowiedzi na pobudzenie skokiem jednostkowym takimi funkcjami jak zależność pierwiastkowa, funkcja eksponencjalna, funkcja błędu i kombinacja tych i paru innych zależności są od bardzo dawna dobrze znane w analizie przepływów ciepła. Niezbyt szczęśliwie natomiast zdefiniowano drugą tezę, gdyż w ogólności została ona udowodniona sporo lat temu, co jest opisane w literaturze, także polskiej. Przykładowo załączam niecytowaną w rozprawie monografię sumującą wyniki prac mojego zespołu badawczego sprzed dziesięciu lat, gdzie opisano metodologię modelowania termicznego tkanek biologicznych, w tym skóry (model trzy- a nawet pięciowarstwowy) i wykorzystania takich modeli w aktywnej termografii dynamicznej. Omówiono tam także podstawy tomografii termicznej i najbardziej oczywistej procedury rekonstrukcji numerycznej badanej struktury na drodze rozwiązania zagadnienia odwrotnego.

Wprowadzenie do tematyki pracy jest omówione na około 20-tu stronach rozdziału drugiego, zawierających opis znanych właściwości termicznych tkanek biologicznych i ich termicznych modeli zastępczych oraz metod wyznaczania charakterystyk impedancji termicznej zarówno w dziedzinie częstotliwości, jak i w dziedzinie czasu. Przegląd ten zawiera opis najważniejszych metod stosowanych dotąd w praktyce modelowania i pomiarów termicznych, a stosowanych w technicznych badaniach nieniszczących jak i w diagnostyce medycznej. Zasadnicza treść rozprawy zawarta jest w kolejnych czterech rozdziałach, które obejmują: opis nowej metody badań przesiewowych na drodze analizy charakterystyk

częstotliwościowych i czasowych impedancji termicznej i zastosowania narzędzi sztucznej inteligencji do klasyfikacji badanej tkanki jako zdrowej lub chorej; wreszcie weryfikację zaproponowanej metody w badaniach klinicznych oraz dyskusję wyników.

Doktorantka skupiła uwagę na następujących problemach:

1. Zaproponowała analizę trójwarstwowego modelu termicznego skóry; de facto jest to najbardziej typowy przypadek odzwierciedlający podstawowe warstwy anatomiczne skóry. W załączonej do recenzji monografii przypadek taki po pobudzeniu skokiem jednostkowym opisany jest wykorzystując aproksymację sumą funkcji eksponencjalnych. Jednym z rozwiązań jest rekonstrukcja badanej struktury na drodze rozwiązania zagadnienia odwrotnego. W rozprawie Autorka stosuje aproksymację sumą funkcji eksponencjalnej i funkcji błędu. Ciekawym byłoby porównanie obu procedur z punktu widzenia dokładności identyfikacji badanej struktury i szybkości obliczeń!
2. Przebadła możliwości zastosowania do rekonstrukcji badanej struktury model impedancji termicznej jako deskryptora reprezentującego właściwości czasowe i częstotliwościowe. Takie podejście jest typowo stosowane w analizie właściwości termicznych przyrządów i struktur elektronicznych, natomiast w diagnostyce medycznej nie było dotąd stosowane.
3. Opracowała narzędzia, w tym algorytmy korekcji i dopasowania obrazów oraz wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych modułu i kąta fazowego impedancji termicznej poprzez wyznaczenie widm zarejestrowanych przebiegów wymuszenia i odpowiedzi i dopasowania parametrów modelu w procedurze iteracyjnej.
4. Przeprowadziła badania symulacyjne zaproponowanego algorytmu pomiarowego i klasyfikacji diagnostycznej na bazie szeregu algorytmów sztucznej inteligencji.
5. Przeprowadziła pomiary wykazując praktyczną wartość zaproponowanej metody pomiarowej w praktyce klinicznej na pacjentach chorych na łuszczycę. Przypadek ten pozwala na łatwe wizyjne określenie obszarów zainfekowanych.

Cel pracy jest jasno zdefiniowany, a problem jest aktualny i ważny z praktycznego punktu widzenia potencjalnych aplikacji diagnostycznych metody. Zaproponowane podejście jest nowatorskie i ważne, w związku z możliwością zastosowania opracowanej metody do szybkich pomiarów tkanek biologicznych. Udowodnienie praktycznej przydatności zaproponowanej metody wystarcza z punktu widzenia uznania rozprawy doktorskiej. Przeprowadzone prace niewątpliwie mają charakter badań naukowych o charakterze doświadczalnym, popartym stosownymi rozważaniami analitycznymi. Zastosowane metody badań odpowiadają aktualnemu poziomowi prac na świecie.

Niewątpliwie szybkie metody pomiarów termicznych należą do nowoczesnej dziedziny metod diagnostycznych w medycynie i nieniszczących badań technicznych i są w ostatnich latach intensywnie rozwijane. Zastosowane środki techniczne jak i opracowane procedury okazały się efektywne i jak wykazano w części eksperymentalnej, z powodzeniem mogą być zastosowane w praktyce klinicznej. Warto podkreślić, że opracowanie aparatury, oprogramowania i wymienionych procedur testowych wiązało się z koniecznością zestawienia zaawansowanych technicznie stanowisk pomiarowych, jak i wykonania szeregu badań z użyciem zaawansowanego i nowoczesnego sprzętu. Wykonanie badań wymagało też poznania i zrozumienia procesów termicznych zachodzących w testowanych strukturach biologicznych. Dla przeprowadzenia stosownej analizy Doktorantka opracowała modele numeryczne badanych struktur i dokonała symulacji ich pracy w celu doboru zoptymalizowanych parametrów procedur testowych. Podsumowanie rozprawy obejmuje

dyskusję wyników i jest zakończone wnioskami co do praktycznej przydatności przeprowadzonych badań.

Reasumując, stosując prawidłowe metody analizy, w tym opracowane własne narzędzia, Autorka udowodniła zasadność postawionych założeń i udowodniła wartość zaproponowanego algorytmu pomiarowego, jak i możliwość praktycznej aplikacji zaproponowanej metodyki badań, a więc rozwiązała postawiony problem naukowy, który ma odniesienie do praktyki badań termicznych w diagnostyce medycznej.

Za najważniejsze osiągnięcie uważam następujące elementy rozprawy:

1. **opracowanie nowej metody wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych impedancji termicznej tkanek z zastosowaniem wymuszenia na drodze oziębienia badanego obszaru tkanki;**
2. opracowanie i wykonanie specjalistycznej aparatury pomiarowej i oprogramowania, umożliwiających przeprowadzenie badań laboratoryjnych i praktyczną weryfikację zaproponowanych algorytmów;
3. opracowanie modelu numerycznego metody i badanych struktur i przeprowadzenie symulacji komputerowych analizowanych procedur pomiarowych;
4. potwierdzenie, że możliwe jest praktyczne wykorzystanie metody do badań klinicznych;
5. określenie warunków optymalizacji pobudzeń dla pomiarów termicznych.

Warto podkreślić znaczenie praktyczne rozprawy, gdyż jej wyniki mogą być bezpośrednio wdrożone w nowoczesnych systemach diagnostycznych opartych na pomiarach termicznych.

**Warto odpowiedzieć na pytanie, czy rozprawa napisana jest poprawnie językowo i stylistycznie oraz jakie są wady i słabe strony rozprawy - uwagi krytyczne i dyskusyjne:**

Generalnie, praca jest napisana starannie, szata graficzna rozprawy jest przejrzysta, a zaprezentowane rysunki, fotografie i wykresy są starannie opracowane. Język pracy jest poprawny. Szereg drobnych błędów obejmuje drugorzędne, nieistotne literówki, czy braki interpunkcyjne itp. Zaproponowaną metodologię można uznać za prawidłową.

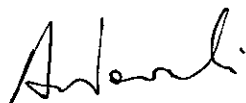
Ważniejsze uwagi merytoryczne i dyskusyjne wymieniono poniżej.

- W dynamicznych badaniach termicznych z pobudzeniem cieplnym warto podkreślić dwa problemy:
  - po pierwsze, pobudzenie musi być bezpieczne i nie powinno wpływać na badaną strukturę, a w szczególności nie może powodować degradacji termicznej badanego obszaru; innym problemem jest termiczne sprzężenie zwrotne, które może w istotny sposób wpływać na zmiany właściwości termicznych badanego obszaru w trakcie pobudzenia; doktorantka zauważyła te problemy, ale powinna poświęcić im więcej uwagi, pokazując bezpieczne granice pobudzenia;
  - po drugie, mamy do czynienia z systemem pomiarowym i przedmiotem szczegółowej analizy powinien być problem dokładności pomiaru; pojawia się tutaj w szczególności problem identyfikacji parametrów modelu zastępczego, które mogą być zmienne w czasie. Zastosowanie zespolonej impedancji termicznej wymaga szerszej dyskusji nad granicami bezpiecznego pobudzenia, ale też analizy dokładności metody. W praktyce brakuje analizy dokładności wyznaczenia tych parametrów na podstawie charakterystyk częstotliwościowych o ograniczonej dokładności ich wyznaczenia, co może być powodem podważenia wiarygodności uzyskanych wyników.

- Warto było, ale nie zdefiniowano explicite, jakie ilościowe parametry metrologiczne powinny stanowić podstawę oceny jakości zaproponowanej metody.
- Brakuje procedury kalibracji pomiaru. Zastosowany model impedancji termicznej powinien być jednoznacznie określony metodami referencyjnymi w celu wyznaczenia i opisania ilościowego jego parametrów. Przykładowo wiele wątpliwości co do dokładności modelu mogłyby rozwiązać referencyjne badania histopatologiczne.
- Kontynuując uwagi, nie poruszono w rozprawie wpływu rozdzielczości pomiaru i rozrzutu wyników na dokładność pomiarów i wiarygodność klasyfikatora. Popelniono typowe błędy „ograniczonej świadomości metrologicznej”, przykładowo dane w tabelach 5.1 i 5.2 – błędy pomiarowe parę do 27%, a liczby znaczące nawet 7!
- Recenzent czuje niedosyt w związku z brakiem konkluzji, które powinny wieńczyć rozważania kolejnych rozdziałów dysertacji. Szereg wyników pojawia się jako przykłady, ale brakuje systematycznej analizy dlatego akurat pokazane przykłady zamieszczono w rozprawie, np. strony 37-44; 55-57; rysunki – 3.26 do 3.35 itd. W szczególności brakuje podsumowania, jak powinien wyglądać algorytm postępowania diagnostycznego oferowanego klinicyście. Zastosowanie algorytmów sztucznej inteligencji powoduje, że wynik diagnostyczny pojawia się bez definiowania jednoznacznych deskryptorów diagnostycznych, mogących wspomagać w sposób oczywisty doświadczenie lekarza.
- Brakuje szczegółów pozwalających na ocenę techniczną proponowanej metody – ile czasu trwają poszczególne fazy obróbki wyników? Jakie są praktyczne ograniczenia metody?
- Pojawia się szereg pytań praktycznych, przykładowo, w badaniach oparzeń istotnym problemem jest owłosienie skóry, czy w referowanych badaniach problem ten nie występuje?
- Listę wątpliwości i problemów można by wydłużyć o parę dodatkowych pytań.

**Jednak przedstawione uwagi dyskusyjne i krytyczne mają znaczenie drugorzędne i nie wpływają na pozytywną ocenę przedstawionej rozprawy doktorskiej. Sądzę, że postawione problemy mogą być wykorzystane w kolejnych etapach badań.**

Reasumując, przedstawiona rozprawa stanowi raport z przeprowadzonych badań i pozwala na stwierdzenie, że Doktorantka wykazała, iż cel rozprawy, jakim było opracowanie nowej metody termowizyjnych badań przesiewowych stanów chorobowych skóry i tkanek wewnętrznych jest ważny i możliwy do osiągnięcia w rozwiązaniach praktycznych, a weryfikacja metody w warunkach klinicznych podkreśla praktyczną wartość rozprawy. **Rozprawę zaliczam do kategorii spełniającej wymagania stawiane rozprawom doktorskim w zakresie nauk technicznych. Biorąc pod uwagę przedstawioną powyżej, pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej Pani Marii Strąkowskiej wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**



Prof. dr hab. inż. Antoni Nowakowski