

dr hab. inż. Tomasz Pander, prof. PŚ  
Politechnika Śląska  
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki  
Katedra Cybernetyki, Nanotechnologii i Przetwarzania Danych  
ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice

Gliwice, 30 stycznia 2023 r.

**Recenzja**  
rozprawy doktorskiej mgr inż. Radosława Dzika

pt. „**Automatyczna klasyfikacja sygnałów migotania przedsionków serca przy użyciu hybrydowych metod sztucznej inteligencji**”

promotor: prof. dr hab. inż. Ewaryst Tkacz

opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna, prof. dr hab. inż. Marka Gzika (pismo nr: RDIB.002.75.2022)

**1 Przedmiot recenzji. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora?**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pt. „Automatyczna klasyfikacja sygnałów migotania przedsionków serca przy użyciu hybrydowych metod sztucznej inteligencji”, której autorem jest mgr inż. Radosław Dzik. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Ewaryst Tkacz.

Rozprawa liczy 87 strony tekstu zawartego w 14 numerowanych rozdziałach, z czego pięć pierwszych rozdziałów (od strony 4 do strony 56) to najistotniejsza merytorycznie część rozprawy, pozostałych dziewięć rozdziałów, to spisy rycin, tabel, skrótów i oznaczeń, bibliografia oraz załączniki zawierające listę publikacji Doktoranta, CV oraz streszczenie w wersji polskiej i angielskiej.

Publikacje mgr inż. Radosława Dzika (zamieszczone w Załączniku 1 – lista publikacji) to dwie publikacje w czasopiśmie, w których Doktorant jest współautorem oraz dwie publikacje konferencyjne, w których: w jednej publikacji jest pierwszym współautorem, a w drugiej drugim współautorem. Wymienione publikacje są umieszczone w bazie ORCID, jednak tylko jeden z wymienionych artykułów dotyczy bezpośrednio tematów związanych z rozprawą doktorską, aczkolwiek w bibliografii rozprawy (strony od 78 do 83) nie został on uwzględniony.

Rozdział 1 to wprowadzenie w tematykę rozprawy i opisuje podstawy elektrokardiografii (część medyczna) od strony 4 do strony 27. Zawiera informacje o odprowadzeniach stosowanych w rejestracji sygnału elektrokardiograficznego (EKG). Szeroko przedstawiony jest mechanizm pobudzenia mięśnia sercowego a szczególnie akcent położono na zagadnienia rytmu serca i zjawiska migotania przedsionków (ang. atrial fibrillation - AF). Przedstawiono także wykorzystanie sztucznej inteligencji w klasyfikacji zaburzeń rytmu serca. Nacisk jednak położono tylko na sztuczne wielowarstwowe, sieci neuronowe. Przedstawiono wykorzystanie sztucznej inteligencji do detekcji AF i ogólnie do detekcji i klasyfikacji przy przetwarzaniu i analizie sygnału EKG.

Rozdział 2 to postawienie celu i tezy pracy (jedna strona).

Przedmiotem i głównym celem dysertacji było wykazanie prawdziwości tezy:

POLITECHNIKA ŚLĄSKA  
Rada Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna

wpłynęło dnia 01.02.2023.....

nr 12 ..... zał. 1 .....



*„Hybrydowy model sztucznej inteligencji oparty o układ WNN (Wavelet Neural Network) może być wykorzystany jako algorytm automatycznej i szybkiej klasyfikacji sygnałów migotania przedsionków serca”*  
oraz

*„Połączenie narzędzi analizy częstotliwościowo-czasowej sygnału (ciągła transformata falkowa) i stworzenie własnych falek oraz wykorzystanie sieci neuronowej jest skutecznym i niewymagającym pod względem zasobów narzędziem pozwalającym szybko dokonać klasyfikacji sygnału migotania przedsionków”*  
i ich eksperymentalne zweryfikowanie.

Cele szczegółowe, prowadzące do osiągnięcia celu głównego były następujące:

- stworzenie hybrydowego układu WNN (ang. Wavelet Neural Network) opartego o:
- analizę sygnału przy pomocy ciągłej transformaty falkowej (CWT),
- układ sieci neuronowej (ANN) pozwalającej na klasyfikację sygnału w oparciu o wyodrębnione faleki,
- rozpoznanie możliwości implementacji nowo opracowanej metody w ramach niniejszej rozprawy,
- przeprowadzenie porównania z istniejącymi wiodącymi metodami.

Przedstawione cele szczegółowe zostały zrealizowane. Zastosowano typową metodę badawczą stosowaną w naukach technicznych, która zawierała: przegląd literatury, zidentyfikowanie problemów, przyjęcie założeń, opracowanie metody, wyznaczenie wektorów cech, dokonanie weryfikacji eksperymentalnej.

Uważam, że teza, cel rozprawy i zadania szczegółowe są istotne ze względów poznawczych oraz aplikacyjnych. Zostały one jasno sformułowane przez Autora. Ponadto, działania podjęte przez Doktoranta są aktualne.

Rozdział 3, „Wykorzystywane materiały i metody”, prezentuje wykorzystywane materiały i metody, wprowadzenie w zagadnienia automatycznej klasyfikacji sygnałów EKG, pokazuje schemat oceny (ryc. 18) sygnału EKG zastosowany w niniejszej rozprawie doktorskiej, analizowane sygnały EKG (pobrane z publicznie dostępnej bazy danych Physionet) zawierające dane referencyjne (ang. annotations). Autor następnie wprowadza w zagadnienia przekształcenia falkowego (ciągła transformata falkowa) oraz sztucznych sieci neuronowych.

Rozdział 4, „Wyniki badań oraz dyskusja” opisuje sposób przeprowadzenia badań zaproponowanego rozwiązania hybrydowego łączącego ciągłe przekształcenie falkowe i sztuczną sieć neuronową. Autor prezentuje również dwa zestawy falek reprezentujących migotanie przedsionków. A w kolejnej części, Autor przedstawia tzw. falkową sieć neuronową, która używa faleki jako funkcji aktywacji zamiast klasycznej rodziny sigmoidalnej oraz metodykę badań zaproponowanego klasyfikatora. Badania przeprowadzono dla różnej liczby warstw ukrytych (1 warstwa lub 9 warstw, każda warstwa składa się z 15 neuronów) falkowej sieci neuronowej (ang. wavelet neural network - WNN) oraz różnych kombinacji przygotowanych zestawów falek. W efekcie dało to razem 6 grup wyników. Aby porównać otrzymane wyniki wykorzystano środowisko Pythona i framework TensorFlow uruchomione na komputerze NVIDIA Xavier z serii Jetson NX. W tym celu zmodyfikowano kod publicznie dostępnego skryptu zawierającego wielowarstwową, konwolucyjną sieć neuronową z tzw. warstwami „poolingowymi” (spłaszczającymi) zmniejszającymi wymiary map cech, dostosowując go do potrzeb niniejszej pracy. W obliczeniach wykorzystano bibliotekę Theano, co pozwoliło przeprowadzić obliczenia z wykorzystaniem jednostki GPU.

Przedstawione wyniki eksperymentalne były wystarczające, aby potwierdzić poprawność zaproponowanej metody detekcji migotania przedsionków, zgodnie z przyjętymi założeniami rozprawy.

Postawione zadanie było poważnym zadaniem naukowym. Problem skutecznej detekcji migotania przedsionków jest wciąż aktualnym zadaniem i wielu naukowców nad nim pracuje. Dlatego zastosowane opracowanej przez Doktoranta metody może mieć zastosowanie praktyczne w obszarach ochrony zdrowia.

Rozdział 5 („Podsumowanie”) stanowi krótkie 3-stronicowe podsumowanie przeprowadzonych badań, w których Doktorant przedstawił w syntetyczny sposób wykonane prace i uzyskane rezultaty. Pozwoliły one Doktorantowi na udowodnienie tezy pracy. Nie zabrakło też krótkiego stwierdzenia dotyczącego możliwości prowadzenia dalszych badań. W tym przypadku jest to rozbudowanie systemu o poszukiwanie dodatkowych danych do tworzenia własnych falek, co mogłoby mieć wpływ na optymalizację zaproponowanego hybrydowego systemu do automatycznej klasyfikacji sygnałów migotania przedsionków.

Rozprawę uzupełniają dodatek (rozdział 6) zawierający tabele z wynikami cząstkowymi, spis rycin (7), spis tabel (8), spis skrótów i oznaczeń (9). Rozprawę uzupełnia Bibliografia (10) a także załącznik 1 – lista publikacji (11), załącznik 2 – Curriculum Vitae (12), streszczenie po polsku (13) i angielsku (14).

## **2 Ocena wyboru tematyki rozprawy. Jaka jest przydatność rozprawy Autora z punktu widzenia nauk technicznych, czy założenia przyjęte przez Autora są uzasadnione?**

Migotanie przedsionków jest jedną z najczęściej spotykanych zaburzeń rytmu serca. Szacuje się, że cierpi na nią ok. 33-34 mln ludzi na całym świecie. Charakteryzuje się nieskoordynowanymi pobudzeniami przedsionków serca, co skutkuje wysoce nieregularną i zwiększoną częstością akcji serca (ang. heart rate - HR). Migotanie przedsionków wiąże się z kilkoma innymi chorobami układu sercowo-naczyniowego w tym udarem mózgu, przewlekłą niewydolnością serca i ostrym zespołem wieńcowym. W przypadku udaru mózgu, AF jest uważane za czynnik wysokiego ryzyka, gdzie prawie 20% wszystkich udarów mózgu występuje u pacjentów z AF. Z oczywistych względów wymieniono tylko kilka chorób. Zakładając stopniowe rozpowszechnianie się AF na świecie, w najbliższej przyszłości leczenie może stać się poważnym wyzwaniem ekonomicznym i terapeutycznym. Dlatego kluczowe znaczenie ma wczesne i dokładne rozpoznanie AF. Standardowym podejściem do wykrywania AF jest pomiar i ręczne badanie długotrwałych (zwykle 24-, 48- lub 72-godzinnych) zapisów EKG, co jest niezwykle uciążliwe i czasochłonne, co wymusza potrzebę opracowania automatycznych systemów wykrywania migotania przedsionków.

Autor dokonując przeglądu literatury, wykorzystał istniejące metody cyfrowego przetwarzania sygnałów oraz metody sztucznej inteligencji. Dzięki czemu połączył te dwa obszary proponując metodę klasyfikacji sygnałów migotania przedsionków. Świadczy to o realizacji celów pracy i uzasadnionym, poprawnym przyjęciu założeń.

Uważam, że hybrydowa metoda opracowana przez Doktoranta, łącząca przekształcenie falkowe i sztuczne sieci neuronowe, jest istotna z punktu widzenia poznawczego jak i ochrony zdrowia, co ma także uzasadnienie ekonomiczne. Ponieważ nie istnieje idealne rozwiązanie problemu detekcji migotania przedsionków, każde zaproponowane rozwiązanie przybliży nas do celu jakim jest wczesna diagnostyka tej choroby. Jednocześnie uważam, że realizowany przez Doktoranta temat jest aktualny i bardzo ważny. Ma to odzwierciedlenie w tytule, który zrozumiale i czytelnie określa zawartość rozprawy. Zarówno przeprowadzona analiza teoretyczna oraz wyniki zaprezentowane w rozprawie mogą być pomocne w opracowywaniu nowych metod detekcji migotania przedsionków.

## **3 Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?**

W pracy pokazana jest ocena stanu wiedzy w dyscyplinie naukowej oparta na analizie bibliografii. W przedstawionej do recenzji rozprawie Doktorant uwzględnił 98 pozycji literaturowych. Literatura przedmiotu zawiera pozycje książkowe, konferencyjne oraz publikacje czołowych pism światowych.

Bazując na dostępnych pracach Autor przeprowadził analizę stanu wiedzy w zakresie tematyki rozprawy. Zakres analizowanej bibliografii oraz sposób przedstawienia stanu wiedzy w pracy wskazuje na znajomość dyscypliny naukowej oraz elementów technicznych prezentowanego w pracy zagadnienia. Sposób przeprowadzenia analizy źródeł jest odpowiedni dla rozprawy i należy uznać go za właściwy i szczegółowy.

## **4 Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienie i użył właściwej metody?**

Autor rozwiązał zagadnienie postawione w pracy i użył do tego właściwej metody. Metodologia, która została zastosowana sprowadza się do następujących etapów: przegląd naukowej literatury światowej, zdefiniowanie

problemu badawczego i założeń, przegląd metod analizy, propozycja rozwiązania postawionego problemu, przeprowadzenie badań, porównanie uzyskanych wyników z wynikami uzyskanymi metodami referencyjnymi. Takie podejście jest typowe, najczęściej stosowane przez społeczność naukową w dyscyplinie inżynieria biomedyczna. Uważam, że użyta w rozprawie metodologia rozwiązania problemu naukowego jest prawidłowa. Świadczą także o tym otrzymane rezultaty.

## 5 Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Autora?

Praca stanowi oryginalny wkład Autora do problematyki automatycznej klasyfikacji sygnałów migotania przedsionków serca. Do zasadniczych oryginalnych osiągnięć Autora należy zaliczyć:

- analizę czasowo-częstotliwościową sygnałów EKG w zakresie aktywności elektrycznej przedsionków serca charakterystycznej dla migotania przedsionków,
- opracowanie i utworzenie własnych falek odpowiadających migotaniu przedsionków,
- wykorzystanie zestawów falek reprezentujących migotanie przedsionków w sygnale EKG do zwiększenia dokładności działania klasyfikatora opartego o sztuczną sieć neuronową,
- poprawa działania tak zaprojektowanego klasyfikatora poprzez właściwy dobór ilości warstw ukrytych sieci neuronowej oraz porównanie wyników klasyfikacji z metodą referencyjną opartą o konwolucyjne sieci neuronowe.

Wymienione osiągnięcia wnoszą istotny wkład Doktoranta w rozwój dyscypliny inżynieria biomedyczna i stanowią podstawę do dalszych badań, które mogą zaowocować zwiększeniem wskaźników jakości automatycznych klasyfikatorów migotania przedsionków przy użyciu hybrydowych metod sztucznej inteligencji. Na podstawie wskazanych osiągnięć można stwierdzić, że postawione w tezie rozprawy kwestie zostały rozwiązane w sposób satysfakcjonujący recenzenta. Można także przyjąć z dużym prawdopodobieństwem akceptację otrzymanych przez Doktoranta rezultatów przez znaczną część zainteresowanego tą problematyką środowiska naukowego.

## 6 Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

### 6.1 Uwagi do dyskusji, wymagające uzasadnienia (nie muszą to być słabe strony rozprawy)

1. W pracy można dostrzec pewną nieproporcjonalność, mam tu na myśli bardzo dokładne wyjaśnienie zjawisk zachodzących na poziomie komórkowym w sercu (od strony 4 do strony 20, na której rozpoczyna się podrozdział *Rytm serca* i później *Migotanie przedsionków* do strony 23, czyli blisko 19 stron) w stosunku do omówienia wykorzystania sztucznej inteligencji w klasyfikacji zaburzeń rytmu serca (od str. 23 do str. 27, co zajmuje już 4 strony wraz z rysunkami). A przecież to drugie powinno być szczególnie dobrze opracowane. Autor ogranicza się do omówienia przede wszystkim metod wykorzystujących sztuczne sieci neuronowe i przekształcenie falkowe. Inne metody są wspomniane dość oszczędnie.
2. str. 33, 4 linia od dołu – brakuje rysunku z kilkoma cyklami sygnału elektrokardiograficznego z narysowanymi liniami, które orientacyjnie pokazują przyjęty przedział analizy dla pojedynczego cyklu R-R.
3. str. 34, 9 linia od góry – sformułowanie „stosując filtr Daubechies (...)” jest pewnym uproszczeniem. A nie powinno być, że stosując przekształcenie falkowe z falką Daubechies (db4) dokonano dekompozycji itd.. Proszę Autora o ustosunkowanie się.
4. str. 45, 13 linia od dołu „Po podstawowej redukcji szumu wykonano segmentację rytmu EKG. W tym kroku ciągły sygnał EKG został przetworzony na indywidualne odcinki QRS, przybliżona szerokość jednostki (bitu) to 780-980 próbek danych.” Na czym polega segmentacja rytmu EKG? Co oznaczają indywidualne



odcinku QRS i jak jest wykorzystano? Od czego zależy szerokość „jednostki (...) 780-980 próbek danych”? Proszę Autora o ustosunkowanie się.

5. str. 45, 5 linia od dołu. Utworzono dwa zestawy falek (1 i 2). Proszę wyjaśnić jakimi kryteriami kierowano się podczas tworzenia własnych falek z pomocą przekształcenia falkowego? Dlaczego w zestawie nr 1 jest 12 własnych falek, a w zestawie 2 jest 10 własnych falek?
6. str. 48, 6 linia od góry: „Nauka: 4024 segmentów z migotaniem przedsionków” – a ile w zbiorze treningowym było segmentów z rytmem zatokowym? Czy wzięto pod uwagę niezrównoważenie (ang. imbalanced dataset) danych treningowych i testowych?
7. str. 51, 2 linia od dołu: „Zbiór AF liczący 4949 próbki...” został użyty przez algorytm głębokiego uczenia. Czy w zbiorach treningowym, walidacyjnym i testowym wzięto pod uwagę niezrównoważenie danych (ang. imbalanced dataset)? Proszę Autora o komentarz?

## 6.2 Uwagi szczegółowe

1. str. 24, 3 akapit od góry, wspomniana jest praca „Gülera et al.”, ale takiej brakuje w bibliografii,
2. str. 33, 3 linia od dołu: „... cykl bicia serca i ma długość ok. 1,2 s...” czy przyjęcie takiego czasu trwania nie jest zbyt optymistyczne? Ponieważ w trakcie migotania przedsionków rytm serca jest nieregularny, może znacząco przyspieszyć, to może się okazać, że w tym okresie zmieściły się 2 lub 3 załamki R. Proszę Autora o komentarz?
3. str. 37, reprezentacja wektorów w wyrażeniu (13) i (14) czy chodzi o te same wektory? Tu są różne wielkości parametru  $x$ ? Przyjęło się, że wektory są oznaczone pogrubionym krojem pisma  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{X}$ .
4. str. 40, 5 linia od dołu: „... twierdzenie to (Kołomotowa)...”. Czy może chodziło o Kołmogorowa? Proszę Autora o wyjaśnienie.
5. str. 41, równanie (25), co oznacza litera  $j$  nie występująca w indeksie błędu  $\epsilon_j j(n)$ ?

## 7 Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy Autora i znajomości współczesnej literatury z zakresu dyscypliny naukowej, jakiej rozprawa dotyczy?

Rozdział 1 i 3 opisują stan wiedzy dotyczący podstaw fizjologicznych narządu, w którym zachodzi klasyfikowane zjawisko (migotanie przedsionków) oraz podstawy teoretyczne ciągłej transformaty falkowej i sztucznej sieci neuronowej. Nie do pominięcia jest również podrozdział, w którym Autor prezentuje etap wstępnego przetwarzania (tzw. preprocessingu) sygnału elektrokardiograficznego (obejmującego m.in. redukcję zakłóceń), który to etap jest niezbędny dla prawidłowej klasyfikacji migotania przedsionków. Przedstawione w tych rozdziałach treści dowodzą, że Autor dysertacji posiada wiedzę dotyczącą omawianej w rozprawie problematyki. Doktorant jest współautorem w czterech publikacjach, z których jedna dotyczy omawianej w rozprawie tematyki.

## 8 Czy Autor wykazał umiejętność poprawnego przekonywującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonywującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników. Styl, którym posługuje się Autor, jest jasny i zrozumiały oraz posiada logiczny układ. Uważam, że dostrzeżone usterki nie mają wpływu na całokształt pracy i na ogólną, dobrą ocenę pracy.

## 9 Czy i jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżynierjno–technicznych?

Autor opracował oryginalną metodę automatycznej klasyfikacji sygnałów migotania przedsionków serca przy użyciu hybrydowych metod sztucznej inteligencji. Dodatkowo doktorant przeprowadził badania porównawcze zaproponowanej metody z wykorzystaniem algorytmów głębokiego uczenia (konwolucyjna sieć neuronalna). Jest to szczególnie istotne podczas projektowania metod klasyfikacji. Opracowana przez Doktoranta metoda stanowi unikalne narzędzie do klasyfikacji sygnałów elektrokardiograficznych z migotaniem przedsionków. Zaproponowaną metodę oraz wybrane wyniki można wykorzystać w innych pracach naukowych i badawczo-rozwojowych z zakresu detekcji migotania przedsionków.

## 10 Czy rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy?

Po zapoznaniu się z zakresem badań naukowych oraz wnioskami zawartymi w recenzowanej rozprawie uważam, że stanowi ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w oparciu o analizę i zaprojektowanie systemu automatycznej klasyfikacji sygnałów migotania serca przy użyciu hybrydowych metod sztucznej inteligencji.

Uważam, że dostrzeżone usterki mają niewielki wpływ na ogólną, dobrą ocenę pracy. Zauważone niedociągnięcia są sporadyczne i odnoszą się do użytych zwrotów językowych lub niewielkich wad edycyjnych (niektóre zmienne pisane bez kursywy lub pogrubienia, niestosowanie przecinków i kropek po wzorach lub odwołanie do bibliografii po kropce, itp.) co oczywiście nie obniża wartości rozprawy.

Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki wymaga, aby rozprawa doktorska stanowiła oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Recenzowana rozprawa według mnie spełnia to wymaganie. Zgodnie z wymogami Ustawy, Doktorant, mgr inż. Radosław Dzik, wykazał się wiedzą, umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz umiejętnością prowadzenia badań i przedstawiania ich rezultatów.

### Wniosek końcowy

Przedstawiona rozprawa doktorska mgr inż. Radosława Dzika pt. „Automatyczna klasyfikacja sygnałów migotania przedsionków serca przy użyciu hybrydowych metod sztucznej inteligencji” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wskazuje na wysoki poziom wiedzy teoretycznej z dyscypliny Inżynieria Biomedyczna, a także wskazuje na umiejętność prowadzenia pracy naukowej przez Kandydata do stopnia naukowego doktora. Przedstawione uwagi polemiczne i dyskusyjne w żaden sposób nie podważają przedstawionej oceny poziomu pracy.

Stwierdzam więc, że recenzowana praca doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z Ustawą o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. z 2017 r. poz. 1789) oraz zgodnie z Ustawą z 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1668 z póź. zm.) w dziedzinie nauk inżynierjno–technicznych, w dyscyplinie inżynieria biomedyczna, **wnoszę o przyjęcie rozprawy i jej dopuszczenie do publicznej obrony.**

Tomasz Pander