

Kraków, 28.04.2026 r.

dr hab. n.med. inż. Klaudia Proniewska-van Dam, prof. UJ
Centrum Medycyny Cyfrowej i Robotyki
Uniwersytet Jagielloński Collegium Medicum
ul. Kopernika 7E, 31-034 Kraków

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Sebastiana Wildowicza

*pt. „Modelowanie czynności elektrycznej serca oraz
rozwijanie rekonstrukcji stanu źródła sygnału”*

1. Charakterystyka ogólna rozprawy

Rozprawa doktorska pana mgr inż. Sebastiana Wildowicza dotyczy analizy zagadnień diagnostyki chorób sercowo-naczyniowych, podejmując ambitną próbę połączenia metod fizyki medycznej, analizy sygnałów biomedycznych oraz nowoczesnych technik uczenia maszynowego w celu opracowania nowego podejścia do interpretacji sygnału elektrokardiograficznego. Tematyka pracy wpisuje się w nurt badań nad nieinwazyjnym obrazowaniem czynności elektrycznej serca oraz rozwiązywaniem problemu odwrotnego elektrokardiografii, a więc obszaru o dużym znaczeniu zarówno poznawczym, jak i potencjalnie aplikacyjnym w zastosowaniach klinicznych. Rozprawa doktorska posiada rozbudowaną, logiczną i przejrzystą strukturę, typową dla dojrzałej pracy badawczej o charakterze interdyscyplinarnym. Układ treści jest spójny i prowadzi czytelnika od zagadnień wprowadzających, przez część teoretyczną i metodologiczną, aż do wyników, dyskusji oraz wniosków końcowych. W rozdziałach początkowych Autor przedstawia motywację badań, cel pracy oraz tezy rozprawy, co pozwala jasno określić zakres problemu badawczego. Szczególnie pozytywnie należy ocenić obszerne wprowadzenie obejmujące zarówno aspekty medyczne, jak i techniczne. Rozdział trzeci zawiera szeroki przegląd wiedzy dotyczącej budowy serca, fizjologii układu krążenia, elektrofizjologii kardiomiocytu oraz podstaw elektrokardiografii, co tworzy solidne zaplecze merytoryczne dla dalszych analiz. Najbardziej rozbudowaną i merytorycznie kluczową część pracy stanowi rozdział czwarty „Materiały i metody”. Autor

przedstawia w nim autorski model rekonstrukcji sygnału EKG, oparty na podstawach fizycznych, modelowaniu potencjałów epikardialnych, modelach kardiomiocytów oraz metodach numerycznych i uczenia maszynowego. Zakres tej części świadczy o dużej samodzielności badawczej oraz szerokich kompetencjach Autora. Rozdział piąty zawiera wyniki badań eksperymentalnych dotyczących rekonstrukcji zespołu QRS oraz załamek T, opartych na rzeczywistych danych klinicznych. Ich prezentacja jest uporządkowana i obejmuje zarówno ocenę jakościową, jak i ilościową. Istotnym walorem pracy jest rozbudowany rozdział dyskusyjny, w którym Autor analizuje ograniczenia modelu, porównuje wyniki z literaturą oraz przedstawia potencjalne zastosowania kliniczne. Końcowe rozdziały poświęcone podsumowaniu, wnioskowi oraz dalszym kierunkom badań wskazują, że Autor dostrzega rozwojowy charakter swojej pracy i potrafi wskazać kolejne etapy badań. Na uwagę zasługuje również obszerna bibliografia oraz dodatki, świadczące o dużym nakładzie pracy.

2. Cel pracy i jego realizacja

Celem rozprawy było opracowanie nowej metody analizy sygnału elektrokardiograficznego, umożliwiającej identyfikację cech zapisu EKG oraz bezpośrednie powiązanie aktywacji elektrycznej mięśnia sercowego z generowanym przez niego potencjałem powierzchniowym. Zamierzeniem Autora było stworzenie narzędzia pozwalającego na rekonstrukcję fali aktywności serca na podstawie standardowego, nieinwazyjnego 12-odprowadzeniowego elektrokardiogramu, co mogłoby stanowić alternatywę lub uzupełnienie dla obecnie stosowanych metod diagnostycznych wykorzystujących EKG. Realizacja tego celu została przeprowadzona w sposób konsekwentny i metodycznie uzasadniony. Autor zaproponował fizycznie motywowaną projekcję sygnału EKG, opartą na założeniach Molekularnej Teorii Biopotencjałów, a następnie zintegrował ją z algorytmami głębokiego uczenia trenowanymi na dużych, publicznie dostępnych bazach danych PTB, PTB-XL oraz MIMIC. Takie podejście pozwoliło połączyć interpretowalność modelu fizycznego z wysoką efektywnością metod sztucznej inteligencji.

3. Ocena merytoryczna pracy

3.1. Oryginalność i wartość naukowa

Rozprawa doktorska posiada wyraźny walor oryginalności oraz istotną wartość naukową. Autor podjął aktualne i złożone zagadnienie rekonstrukcji aktywności elektrycznej serca na podstawie standardowego 12-odprowadzeniowego zapisu EKG, proponując autorskie podejście łączące modelowanie fizyczne z metodami uczenia maszynowego. Szczególnie cenne jest oparcie modelu na Molekularnej Teorii Biopotencjałów, dzięki czemu Autor nie ograniczył się do zastosowania metod sztucznej inteligencji jako narzędzia typu „black-box”, lecz osadził proponowane rozwiązanie w fizycznym opisie zjawisk bioelektrycznych. Taka metodologia świadczy o dojrzałości naukowej oraz umiejętności twórczego integrowania wiedzy z zakresu fizyki, matematyki i nauk biomedycznych. Na uwagę zasługuje również zaproponowany podział aktywności serca na proces przejścia fali aktywacji elektrycznej oraz odpowiedź kardiomiocytów, stanowiący interesującą i wartościową koncepcję modelową. Do najważniejszych osiągnięć Autora należy opracowanie modelu umożliwiającego rekonstrukcję morfologii zespołu QRS i załamka T, identyfikację cech związanych z aktywacją prawej i lewej komory serca oraz wstępną analizę wybranych patologii kardiologicznych. Uzyskane wyniki mają znaczenie poznawcze, gdyż rozwijają wiedzę z zakresu bioelektryczności serca, a jednocześnie posiadają potencjał aplikacyjny w diagnostyce nieinwazyjnej. Praca stanowi wartościowy wkład w rozwój nauk fizycznych, zwłaszcza w obszarze fizyki medycznej, modelowania układów biologicznych oraz zastosowań metod obliczeniowych w medycynie.

3.2. Metodyka badań

Struktura części metodologicznej jest logiczna, rozbudowana i obejmuje zarówno podstawy teoretyczne, jak i implementację praktyczną proponowanego modelu rekonstrukcji sygnału EKG. Na szczególne uznanie zasługuje fakt, że Autor nie ograniczył się do wykorzystania gotowych narzędzi analitycznych, lecz poprzedził część aplikacyjną szerokim omówieniem fundamentów fizycznych i matematycznych. Podrozdziały poświęcone Molekularnej Teorii Biopotencjałów, modelowaniu potencjałów epikardium, zagadnieniu anomalnej dyfuzji czy dekompozycji potencjału świadczą o wysokiej świadomości teoretycznej doktoranta. W niniejszej rozprawie Autor konsekwentnie stara się połączyć modelowanie matematyczne

z rzeczywistą fizjologią serca. Bardzo pozytywnie należy ocenić również część dotyczącą modelowania kardiomiocytu. Uwzględnienie klasycznych i uznanych modeli elektrofizjologicznych, takich jak Luo-Rudy, ten Tusscher czy ToR-ORd, wskazuje na rzetelne przygotowanie Autora i znajomość literatury specjalistycznej. Modele te stanowią obecnie ważny punkt odniesienia w symulacjach bioelektrycznych serca, a ich omówienie wzmacnia wiarygodność dalszych analiz.

Rozdział poświęcony syntezie EKG oraz budowie modelu rekonstrukcji należy uznać za najbardziej nowatorski fragment pracy. Autor przedstawia kilka podejść obliczeniowych: metodę siłową typu brute force, optymalizację z wykorzystaniem biblioteki SciPy oraz model uczenia maszynowego. Takie zestawienie jest metodologicznie bardzo wartościowe, ponieważ pokazuje, że Autor porównuje rozwiązania klasyczne z podejściem nowoczesnym, a nie przyjmuje z góry wyższości metod AI. Świadczy to o krytycznym podejściu badawczym oraz umiejętności samodzielnego projektowania procedur obliczeniowych. Na uwagę zasługuje także osobne potraktowanie rekonstrukcji zespołu QRS oraz załamka T. Są to elementy sygnału EKG o odmiennym znaczeniu fizjologicznym i diagnostycznym, dlatego ich rozdzielenie metodologiczne jest w pełni uzasadnione. Wskazuje to na dojrzałość Autora oraz zrozumienie klinicznego sensu analizowanych danych. Pewne zastrzeżenia może budzić bardzo duża rozpiętość tematyczna rozdziału. Autor podejmuje jednocześnie zagadnienia fizyki statystycznej, modelowania elektrofizjologicznego, optymalizacji numerycznej i uczenia maszynowego. Tak szeroki zakres jest imponujący, lecz niesie ryzyko nierównej głębokości opracowania poszczególnych tematów. W recenzowanej pracy istotne byłoby szczególne doprecyzowanie, które elementy stanowią własny wkład Autora, a które są adaptacją znanych modeli literaturowych. Zastosowane metody badawcze są adekwatne do postawionych celów. Autor wykazuje dobrą znajomość warsztatu naukowego, a opis metod jest spójny i wystarczająco szczegółowy. Dobór narzędzi i modeli należy uznać za trafny.

3.3. Analiza wyników i dyskusja

Analiza wyników przedstawiona w rozprawie została przeprowadzona w sposób spójny i logicznie powiązany z założeniami metodycznymi pracy. Autor trafnie wyodrębnił dwa etapy walidacji opracowanego rozwiązania: rekonstrukcję zespołu QRS oraz rekonstrukcję załamka

T, co jest uzasadnione odmiennym znaczeniem fizjologicznym i diagnostycznym obu fragmentów sygnału EKG. Wyniki zaprezentowano zarówno dla zapisów osób zdrowych, jak i dla wybranych przypadków patologicznych, dzięki czemu możliwa jest ocena skuteczności metody zarówno w warunkach normy, jak i w sytuacjach klinicznie bardziej złożonych. Istotnym walorem pracy jest wykorzystanie rzeczywistych danych z bazy PTB Diagnostic ECG Database, obejmujących 74 088 segmentów QRS pochodzących z 549 nagrań od 290 pacjentów w wieku 17–87 lat. Do oceny grupy kontrolnej wykorzystano 10 681 segmentów z 80 nagrań uzyskanych od 52 zdrowych osób. Tak dobrana próba pozwala na wiarygodną, choć wstępną ocenę stabilności modelu dla zapisów prawidłowych. Autor słusznie zwraca również uwagę na strukturę badanej populacji, wskazując na przewagę mężczyzn (72%) nad kobietami (28%), a także na możliwy wpływ tego czynnika na interpretację wyników. Świadczy to o krytycznym i świadomym podejściu do jakości materiału badawczego. Na szczególne podkreślenie zasługują wyniki uzyskane dla przypadków patologicznych, które pokazują, że metoda może służyć nie tylko do rekonstrukcji sygnału prawidłowego, lecz także do jakościowego opisu zmian związanych z blokiem prawej odnogi pęczka Hisa, zawałem mięśnia sercowego oraz przerostem mięśnia sercowego. Autor zachowuje przy tym właściwą ostrożność interpretacyjną, wskazując konieczność dalszej weryfikacji tych obserwacji na większych i niezależnych zbiorach danych oraz we współpracy z klinicystami. Wartościowym elementem analizy jest również omówienie przypadków odstających. Autor pokazuje, że podwyższony błąd rekonstrukcji może wynikać nie tylko z ograniczeń modelu, ale również z jakości sygnału wejściowego, przykładowo z niewłaściwego kontaktu elektrody lub możliwej błędnej klasyfikacji zapisu jako normy. Takie podejście zwiększa wiarygodność pracy, ponieważ wyniki nie są interpretowane mechanicznie, lecz w kontekście realnych uwarunkowań pomiarowych. Na uznanie zasługuje także krytyczna ocena ograniczeń własnej metody. Autor wyraźnie zaznacza, że część analiz, zwłaszcza dotyczących załamka T, ma charakter wstępny i jakościowy. Wskazuje ponadto, że brak pełnej automatyzacji procedury dopasowania uniemożliwił przeprowadzenie szerokiej analizy statystycznej dla większej grupy zapisów. Autor wykorzystał aktualną i adekwatną literaturę naukową. Widoczne jest dobre rozeznanie w stanie badań oraz umiejętność właściwego osadzenia własnych wyników w kontekście istniejących prac. Rozdział poświęcony dyskusji wyników stanowi wartościowe dopełnienie części badawczej rozprawy. Autor nie ogranicza się do prostego podsumowania uzyskanych rezultatów, lecz podejmuje próbę ich interpretacji, wskazując zarówno mocne strony

zaproprowanej metody, jak i jej ograniczenia. Taki sposób prowadzenia dyskusji należy ocenić pozytywnie, ponieważ świadczy o dojrzałości naukowej oraz zdolności krytycznej oceny własnych badań.

4. Uwagi krytyczne

Pomimo wysokiej wartości merytorycznej rozprawy, wskazać należy również kilka kwestii, które mogą stanowić przedmiot dalszej dyskusji i przyszłych badań. Po pierwsze, podstawowa walidacja modelu została przeprowadzona głównie na jednej bazie danych (PTB Diagnostic ECG Database), obejmującej 290 pacjentów i 549 nagrań. Choć jest to zbiór wartościowy i szeroko wykorzystywany w badaniach, dalsze analizy powinny objąć niezależne populacje oraz dane pochodzące z innych ośrodków klinicznych, co pozwoliłoby pełniej ocenić uogólnialność modelu. Pytanie do Autora: czy podejmowano próby testowania algorytmu na innych publicznych bazach danych lub materiałach wieloośrodkowych?

Po drugie, grupa kontrolna zdrowych osób była stosunkowo niewielka (52 pacjentów) oraz niezrównoważona pod względem płci (72% mężczyzn, 28% kobiet). Autor trafnie zauważa ten problem, jednak jego wpływ na parametry modelu nie został w pełni ilościowo przeanalizowany. W przyszłości wskazane byłoby przeprowadzenie systematycznej analizy różnic zależnych od płci, wieku oraz budowy ciała. Pytanie do Autora: czy wstępne analizy wskazują, że płeć lub wiek pacjenta wpływają na kształt rekonstruowanych funkcji aktywności?

Po trzecie, część wyników klinicznych ma charakter eksploracyjny i została oparta na pojedynczych reprezentatywnych przypadkach patologii, takich jak blok prawej odnogi pęczka Hisa, zawał ściany przedniej czy przerost mięśnia sercowego. Taka prezentacja dobrze ilustruje potencjał metody, lecz nie pozwala jeszcze na formułowanie silnych wniosków diagnostycznych ani ocenę czułości i swoistości rozwiązania. Pytanie do Autora: jakie są dalsze plany dotyczące przeprowadzenia badań na większych grupach pacjentów z jednoznacznie rozpoznanymi jednostkami chorobowymi?

Kolejnym ograniczeniem jest niepełna ilościowa walidacja rekonstrukcji załamka T. Autor sam zaznacza, że brak pełnej automatyzacji procedury dopasowania uniemożliwił przeprowadzenie szerokiej analizy statystycznej analogicznej do tej wykonanej dla zespołu QRS. Jest to istotne

zagadnienie, ponieważ repolaryzacja komórek i morfologia załamka T mają duże znaczenie kliniczne, między innymi w ocenie ryzyka arytmii. Pytanie do Autora: jakie modyfikacje algorytmu są planowane, aby umożliwić pełną automatyzację analizy załamka T?

Warto również zauważyć, że interpretacja fizjologiczna uzyskanych funkcji aktywności, choć przekonująca i wsparta literaturą, wymaga dalszej walidacji z wykorzystaniem niezależnych metod referencyjnych, takich jak obrazowanie serca, dane elektroanatomiczne lub modelowanie geometryczne. Sam Autor trafnie wskazuje potrzebę badań uwzględniających geometrię serca. Pytanie do Autora: które z wymienionych metod referencyjnych Autor uważa za najbardziej perspektywiczne do dalszej weryfikacji zaproponowanego modelu?

5. Ocena strony formalnej

Praca jest napisana poprawnym językiem naukowym i cechuje się logiczną strukturą. Rysunki, tabele oraz zapisy matematyczne zostały przygotowane na dobrym poziomie.

6. Wniosek końcowy

Przedstawiona rozprawa doktorska mgr inż. Sebastiana Wildowicza spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w obowiązujących przepisach. Praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych przez Autora.

Jednocześnie, mając na uwadze wysoki poziom merytoryczny rozprawy, jej nowatorski charakter, znaczną wartość naukową oraz potencjał aplikacyjny uzyskanych wyników, wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

W podsumowaniu recenzji stwierdzam, że rozprawa spełnia warunki określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z późn. zm.). Wnoszę do Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie pana mgr inż. Sebastiana Wildowicza do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

28.04.2026r. *Klaudia Prociak - van D*

