

Łódź, 2 lipca 2025 r.

prof. dr hab. inż. Michał Strzelecki
Instytut Elektroniki Politechniki Łódzkiej
Al. Politechniki 8, 93-590 Łódź,
michal.strzelecki@p.lodz.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marka Czerwia
**„Autonomiczny, mobilny system nadzorowania rehabilitacji kardiologicznej w oparciu
o rejestrację EKG oraz parametry oddechowe przy wykorzystaniu nowatorskiej
koszulki tekstronicznej”**
promotor dr hab. inż. Paweł Kostka, prof. PŚ

Podstawą niniejszej recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna Politechniki Śląskiej z 17 kwietnia 2025 r. powołująca mnie na recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia doktora mgr. inż. Markowi Czerwiowi, prowadzonym w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria biomedyczna.

Choroby układu krążenia, takie jak nadciśnienie tętnicze, miażdżyca, zawały serca czy udary mózgu, od lat stanowią główną przyczynę zgonów w Polsce. Według danych Narodowego Instytutu Zdrowia Publicznego odpowiadają one za ponad 40% wszystkich zgonów w kraju. Wysoki odsetek zachorowań wiąże się m.in. z niezdrowym stylem życia, brakiem aktywności fizycznej, niewłaściwą dietą, paleniem tytoniu oraz stresem. Dodatkowo problemem pozostaje ograniczony dostęp do lekarzy specjalistów i opóźniona diagnostyka, co utrudnia wczesne wykrycie i leczenie tych chorób. W walce z tym zagrożeniem coraz większą rolę odgrywa telemedycyna. To nowoczesne podejście do opieki zdrowotnej, które umożliwia zdalne konsultacje lekarskie, monitorowanie parametrów zdrowotnych oraz szybki dostęp do specjalistów. Dzięki urządzeniom takim jak np. ciśnieniomierze z funkcją przesyłu danych czy opaski monitorujące pracę serca, pacjenci mogą regularnie kontrolować swój stan zdrowia w domu, a lekarze otrzymują bieżące informacje na temat ich wyników. W ten nurt wpisuje

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Rada Dyscypliny Inżynieria Biomedyczna

wpłynęło dnia 02.07.2025

nr 143 zał. 1

się recenzowana rozprawa, której celem jest opracowanie systemu zdalnego nadzorowania rehabilitacji kardiologicznej z użyciem sygnału EKG oraz parametrów oddechowych. Tematykę pracy uważam za bardzo ważną i aktualną, ze względu na przyszłą możliwość wykorzystania jej wyników w praktyce klinicznej. W rozprawie sformułowano dwie następujące tezy:

Przy wykorzystaniu tekstronicznej koszulki z nadrukowaną siecią połączeń i biosensorami wraz z miniaturowym rejestratorem sygnałów biomedycznych, możliwe będzie opracowanie oraz walidacja autonomicznego systemu skutecznie wspomagającego hybrydową rehabilitację kardiologiczną.

Opracowanie skutecznego systemu do nadzoru hybrydowej rehabilitacji kardiologicznej umożliwi także aplikacyjność rozwiązania do potrzeb diagnostyki kardiologicznej oraz monitorowania w oparciu o telemedycynę.

Rozprawa została podzielona na 10 rozdziałów oraz bibliografię. Pierwszy rozdział ma charakter wprowadzający w tematykę rozprawy, zawiera omówienie problemu badawczego, cel, zakres oraz tezy pracy. W rozdziałach 2. i 3. omówiono znaczenie, modele i zasady prowadzenia rehabilitacji kardiologicznej, zastosowania telemedycyny dla takiej rehabilitacji oraz zawarto krótki przegląd systemów i technik tamże stosowanych. Zabrakło jednak wniosków z przeprowadzonego przeglądu. Nie zidentyfikowano ograniczeń istniejących systemów, co stanowiłoby uzasadnienie dla podjęcia zaplanowanych w rozprawie badań.

Rozdział 4 przedstawia przegląd i porównanie wybranych metod pomiarowych służących do nieinwazyjnego wyznaczania parametrów oddechowych. Omówiono cztery główne techniki: metodę rezystancyjną, piezoelektryczną, indukcyjną oraz bioimpedancyjną, analizując ich zasadę działania, dokładność, podatność na zakłócenia oraz potencjalne zastosowania w systemach mobilnych. Szczególną uwagę poświęcono komfortowi użytkownika oraz możliwości integracji technik pomiarowych z odzieżą tekstroniczną. Oceniono także jakościowo przydatność każdej z metod w kontekście ciągłego, ambulatoryjnego monitorowania oddechu w warunkach domowych i rehabilitacyjnych. Wstępne badania i analiza funkcjonalna słusznie wskazują na największy potencjał metody indukcyjnej, ze względu na wysoką czułość, zgodność z mobilną rejestracją sygnałów biomedycznych oraz dobre właściwości adaptacyjne w kontekście projektowanego systemu nadzoru kardiologicznego.

Celem rozdziału 5 było przedstawienie wyników badań eksperymentalnych dotyczących opracowanych czujników oddechu, w tym ich modeli oraz prototypów przeznaczonych do pracy w warunkach rzeczywistych. Skoncentrowano się na ocenie skuteczności działania, powtarzalności sygnału, odporności na zakłócenia oraz komforcie użytkowania. Przeprowadzono porównanie wybranych technologii pomiarowych, a następnie dokonano jakościowej weryfikacji w warunkach codziennego ich użytkowania przez pacjentów. Walidacja metody indukcyjnej potwierdziła jej wysoką użyteczność praktyczną oraz zgodność z wymaganiami mobilnych systemów nadzoru biomedycznego. Wyniki badań umożliwiły wybór optymalnej konfiguracji czujników do dalszej integracji z koszulką tekstroniczną. Zaproponowano też ogólną strukturę budowanego systemu.

Rozdział 6 opisuje założenia projektowe oraz ewolucję koncepcji autonomicznego systemu rejestracji sygnału EKG. Przedstawiono wymagania techniczne i funkcjonalne dotyczące elektrod EKG ze szczególnym uwzględnieniem ich biogodności, trwałości oraz

możliwości integracji z odzieżą tekstroniczną. Omówiono proces opracowywania dwóch prototypów koszulki z nadrukowanymi ścieżkami przewodzącymi i suchymi elektrodami, które umożliwiają skuteczną, bezżelową rejestrację sygnału EKG. Pierwszy prototyp pozwolił na identyfikację ograniczeń związanych z rozmieszczeniem elektrod i komfortem noszenia. Druga wersja, udoskonalona konstrukcyjnie, uzyskała pozytywny certyfikat biozgodności, co umożliwiło jej dalsze wykorzystanie w badaniach z udziałem użytkowników. Szczególną uwagę poświęcono minimalizacji gabarytów oraz łatwości użytkowania – projekt zakładał rozwiązanie typu „załóż i włącz”, dostosowane do codziennego użytku. Ostateczna wersja koszulki tekstronicznej integruje elektrody, przewodzące ścieżki oraz złącza z miniaturowym rejestratorem, tworząc spójny i funkcjonalny system do mobilnej rejestracji EKG w rehabilitacji kardiologicznej i zdalnej diagnostyce.

W rozdziale 7 skoncentrowano się na projektowaniu i budowie rejestratora sygnałów biomedycznych. Zdefiniowano wymagania funkcjonalne i parametryczne urządzenia, uwzględniające mobilność, niskie zużycie energii, miniaturyzację oraz możliwość ciągłej rejestracji sygnałów EKG i oddechowych. Opisano architekturę systemu CardioGuard, integrującą moduły akwizycji danych, transmisji bezprzewodowej z użyciem standardu Bluetooth Low Energy oraz przechowywania danych. W dalszej części przedstawiono autorską aplikację mobilną, umożliwiającą odbiór, wizualizację i przesyłanie danych do platformy medycznej. Aplikacja ma zapewnić intuicyjny interfejs użytkownika, automatyczną synchronizację z rejestratorem oraz opcję wypełniania ankiet klinicznych. Całość rozwiązania ma być ukierunkowana na łatwość obsługi i kompatybilność z systemem odzieży tekstronicznej, tworząc kompletny zestaw do zdalnego nadzoru kardiologicznego i rehabilitacyjnego.

Rozdział 8 przedstawia projekt protokołu komunikacyjnego opracowanego na potrzeby bezpiecznej i niezawodnej transmisji danych biomedycznych w budowanym systemie nadzoru kardiologicznego. Omówiono strukturę paczek transmisyjnych, organizację komunikatów, metody kontroli błędów (CRC) oraz mechanizmy retransmisji. Uwzględniono także szyfrowanie danych w celu ochrony prywatności pacjentów. Protokół wspiera transmisję w technologii BLE, zapewniając energooszczędność oraz kompatybilność z aplikacją mobilną. Zaprojektowany poprawnie protokół umożliwia skalowalność systemu, jego dalszy rozwój oraz integrację z platformami telemedycznymi w zgodzie z wymogami medycznymi.

W rozdziale 9 opisano proces walidacji opracowanego systemu nadzoru kardiologicznego, obejmujący wizualną ocenę jakości rejestracji sygnałów biomedycznych oraz testy w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Zdefiniowano wymagania dla systemu jako wyrobu medycznego zgodnie z obowiązującymi normami, następnie urządzenie przekazano do akredytowanego laboratorium w Łukasiewicz-Krakowski Instytut Technologiczny. W rozprawie nie przedstawiono jednak wyników badań laboratoryjnych. Dokonano analizy jakości sygnału EKG – pod kątem stabilności, czułości oraz odporności na zakłócenia, jednak ponownie tylko w sposób jakościowy. Przeprowadzono testy funkcjonalne kamizelki z udziałem 2 użytkowników (mężczyzn), badając niezawodność działania w codziennych aktywnościach. Ocena jakościowa uzyskanych wyników potwierdziła, że kamizelka rejestruje sygnał EKG na tle fali oddechowej.

Rozdział 10 podsumowuje wyniki rozprawy. Jednym z ważniejszych elementów tego rozdziału jest tabela 10.1 porównująca parametry opracowanego systemu CardioGuard z innymi istniejącymi urządzeniami do monitorowania pracy serca. Zabrakło jednak jakiegokolwiek dyskusji dotyczącej funkcjonalności i cech tych urządzeń zwłaszcza w kontekście

kardiologicznego monitorowania i nadzoru użytkowników. Czytelnik rozprawy nie został zatem przekonany czy opracowany system charakteryzuje się jakimiś cechami świadczącymi o jego przewadze w stosunku do rozwiązań już na rynku dostępnych.

Liczący 89 pozycji wykaz literatury obejmuje najważniejsze pozycje literatury światowej dotyczące tematyki związanej z rozprawą. Brakuje jednak pozycji opisujących część rozwiązań już istniejących (patrz uwaga nr 4). Przedstawiono w nim również dwie publikacje współautorskie, jedna została zamieszczona w materiałach konferencji MIXDES, druga jest rozdziałem w książce „Teleopieka ambulatoryjna w niewydolności serca”, PZWL, Warszawa, 2021. Ponadto Doktorant jest współautorem 19 innych publikacji, przeważnie konferencyjnych, z których część jest związana z tematyką rozprawy.

Podsumowując merytoryczną ocenę rozprawy stwierdzam, że Doktorant wykazał się dużą umiejętnością projektowania i konstrukcji analogowych i cyfrowych układów elektronicznych do rejestracji i transmisji wybranych sygnałów biomedycznych. W efekcie był w stanie skonstruować tekstroniczną kamizelkę umożliwiającą akwizycję sygnału fali oddechowej i EKG. Jednak oceniając jakość przeprowadzonych badań należy stwierdzić, że w rozprawie zabrakło szeregu kluczowych elementów wymaganych w pracach naukowych. Nie zweryfikowano w sposób ilościowy jakości rejestrowanych przez kamizelkę sygnałów fali oddechowej oraz EKG, ograniczając się jedynie do oceny jakościowej. Nie wyznaczono żadnych parametrów na podstawie tych sygnałów umożliwiających wykrycie patologicznych zaburzeń pracy serca. Brak obiektywnej, ilościowej analizy zarejestrowanych sygnałów czyni opracowany system bezużytecznym w zastosowaniach monitoringu i nadzoru kardiologicznego. Opracowany system nie został również właściwie porównany z urządzeniami monitoringu kardiologicznego dostępnymi na rynku. W szczególności nie wykazano, że jego wdrożenie rozwiąże ograniczenia lub problemy dostępnych systemów o podobnym przeznaczeniu. W efekcie nie można potwierdzić, że system CardioGuard został poprawnie przetestowany oraz że spełnia założone funkcjonalności. Tezy rozprawy nie zostały tym samym udowodnione. Nie mogę zatem uznać, że praca stanowi wystarczający wkład do dyscypliny inżynieria biomedyczna, wymagany od kandydatów do stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych. Główne uwagi krytyczne dotyczące przeprowadzonych badań są następujące:

1. Jak wspomniano wyżej, w rozprawie dokonywano tylko jakościowej analizy zarejestrowanych sygnałów biomedycznych. Dotyczy to sygnału fali oddechowej uzyskanego z różnych czujników, badanego w warunkach laboratoryjnych i rzeczywistych (rozdziały 4 i 5) oraz sygnału EKG, badanego w rozdziale 6. Również testy urządzenia (rozdział 9) przeprowadzono w sposób jakościowy, oceniając wizualnie jakość sygnału i szumu wyświetlanego na monitorze komputera. Taki sposób weryfikacji sygnałów jest niewystarczający, ponieważ zabrakło ilościowego i obiektywnego pomiaru tych sygnałów, co pozwoliłoby na rzeczywistą ocenę ich jakości. Jest to ponadto podejście niezrozumiałe w świetle dysponowania przez Doktoranta odpowiednio wyposażonym laboratorium, w pełni umożliwiającym dokonanie analiz ilościowych. Niestety nie przeprowadzono ilościowej oceny zarejestrowanych sygnałów z podaniem wartości odpowiednich miar ich jakości.
2. Kolejnym niedostatkiem testów systemu jest zbyt mała grupa testowa (zaledwie dwie osoby) oraz brak udziału kobiet. Ze względu na różnice anatomiczne należało sprawdzić poprawność rejestrowanych sygnałów również dla tej płci, ponieważ jednym z poważniejszych problemów konstrukcyjnych napotykanym w systemach do

kardiologicznego monitorowania i nadzoru użytkowników. Czytelnik rozprawy nie został zatem przekonany czy opracowany system charakteryzuje się jakimiś cechami świadczącymi o jego przewadze w stosunku do rozwiązań już na rynku dostępnych.

Liczący 89 pozycji wykaz literatury obejmuje najważniejsze pozycje literatury światowej dotyczące tematyki związanej z rozprawą. Brakuje jednak pozycji opisujących część rozwiązań już istniejących (patrz uwaga nr 4). Przedstawiono w nim również dwie publikacje współautorskie, jedna została zamieszczona w materiałach konferencji MIXDES, druga jest rozdziałem w książce „Teleopieka ambulatoryjna w niewydolności serca”, PZWL, Warszawa, 2021. Ponadto Doktorant jest współautorem 19 innych publikacji, przeważnie konferencyjnych, z których część jest związana z tematyką rozprawy.

Podsumowując merytoryczną ocenę rozprawy stwierdzam, że Doktorant wykazał się dużą umiejętnością projektowania i konstrukcji analogowych i cyfrowych układów elektronicznych do rejestracji i transmisji wybranych sygnałów biomedycznych. W efekcie był w stanie skonstruować tekstroniczną kamizelkę umożliwiającą akwizycję sygnału fali oddechowej i EKG. Jednak oceniając jakość przeprowadzonych badań należy stwierdzić, że w rozprawie zabrakło szeregu kluczowych elementów wymaganych w pracach naukowych. Nie zweryfikowano w sposób ilościowy jakości rejestrowanych przez kamizelkę sygnałów fali oddechowej oraz EKG, ograniczając się jedynie do oceny jakościowej. Nie wyznaczono żadnych parametrów na podstawie tych sygnałów umożliwiających wykrycie patologicznych zaburzeń pracy serca. Brak obiektywnej, ilościowej analizy zarejestrowanych sygnałów czyni opracowany system bezużytecznym w zastosowaniach monitoringu i nadzoru kardiologicznego. Opracowany system nie został również właściwie porównany z urządzeniami monitoringu kardiologicznego dostępnymi na rynku. W szczególności nie wykazano, że jego wdrożenie rozwiąże ograniczenia lub problemy dostępnych systemów o podobnym przeznaczeniu. W efekcie nie można potwierdzić, że system CardioGuard został poprawnie przetestowany oraz że spełnia założone funkcjonalności. Tezy rozprawy nie zostały tym samym udowodnione. Nie mogę zatem uznać, że praca stanowi wystarczający wkład do dyscypliny inżynieria biomedyczna, wymagany od kandydatów do stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynierjno-technicznych. Główne uwagi krytyczne dotyczące przeprowadzonych badań są następujące:

1. Jak wspomniano wyżej, w rozprawie dokonywano tylko jakościowej analizy zarejestrowanych sygnałów biomedycznych. Dotyczy to sygnału fali oddechowej uzyskanego z różnych czujników, badanego w warunkach laboratoryjnych i rzeczywistych (rozdziały 4 i 5) oraz sygnału EKG, badanego w rozdziale 6. Również testy urządzenia (rozdział 9) przeprowadzono w sposób jakościowy, oceniając wizualnie jakość sygnału i szumu wyświetlanego na monitorze komputera. Taki sposób weryfikacji sygnałów jest niewystarczający, ponieważ zabrakło ilościowego i obiektywnego pomiaru tych sygnałów, co pozwoliłoby na rzeczywistą ocenę ich jakości. Jest to ponadto podejście niezrozumiałe w świetle dysponowania przez Doktoranta odpowiednio wyposażonym laboratorium, w pełni umożliwiającym dokonanie analiz ilościowych. Niestety nie przeprowadzono ilościowej oceny zarejestrowanych sygnałów z podaniem wartości odpowiednich miar ich jakości.
2. Kolejnym niedostatkiem testów systemu jest zbyt mała grupa testowa (zaledwie dwie osoby) oraz brak udziału kobiet. Ze względu na różnice anatomiczne należało sprawdzić poprawność rejestrowanych sygnałów również dla tej płci, ponieważ jednym z poważniejszych problemów konstrukcyjnych napotykanym w systemach do

pomiaru EKG typu kamizelka jest niestabilny kontakt elektrod pomiarowych z ciałem pacjenta.

3. W rozprawie nie znalazłem informacji, czy system CardioGuard jest zdolny przeprowadzić jakkolwiek analizy zarejestrowanych sygnałów. Nie wiadomo, czy dla tych sygnałów wyznaczono parametry umożliwiające np. wykrycie bradykardii, tachykardii, arytmii, częstoskurczów, migotania przedsionków itp. Z tabeli 10.1 wynika, że pewne stany chorobowe są wykrywane, jednak nie znalazło to potwierdzenia w treści rozprawy. Ze względu na brak estymacji parametrów sygnałów fali oddechowej i EKG umożliwiających wykrycie zakładanych zmian chorobowych opracowany system nie jest skutecznym narzędziem nadzoru i monitoringu kardiologicznego.
4. Opracowany system nie został porównany z urządzeniami monitoringu kardiologicznego dostępnymi na rynku. Przedstawiono tylko wybrane parametry takich systemów w tabeli 10.1. Doktorant nie przeprowadził jednak dyskusji na temat cech i właściwości tych systemów. Jak wspomniano przy ocenie rozdziału 10 nie wiadomo czy system CardioGuard wyróżnia się jakimiś funkcjonalnościami, które czyniłyby go skuteczniejszym lub bardziej przydatnym w zastosowaniach nadzoru i monitoringu kardiologicznego. Ponadto przeprowadzone porównanie jest niepełne, zabrakło w nim wielu istniejących rozwiązań, np. koszulki tekstylną do pomiaru EKG firmy Inovatica, koszulki NUTPro Super Sport Hero opracowanej w Wojskowej Akademii Technicznej, systemu CardioVest firm Comarch, telemedycznego systemu Cardiovice lub urządzenia Viscero ECG do monitorowania EKG zintegrowanego z ubraniem w formie t-shirta. Nie wykazano zatem żadnych zalet i przewag systemu CardioGuard w stosunku do innych opracowanych i dostępnych podobnych urządzeń.

Podsumowując, Doktorant nie rozwiązał w pełni postawionego w rozprawie problemu naukowego. Z przykrością stwierdzam, że w obecnej wersji praca „Autonomiczny, mobilny system nadzorowania rehabilitacji kardiologicznej w oparciu o rejestrację EKG oraz parametry oddechowe przy wykorzystaniu nowatorskiej koszulki tekstronicznej” **nie spełnia** wymagań stawianych rozprawom doktorskim zgodnie z ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz. U. z 2024 r. poz. 1571, z późn. zm). W związku z powyższym wnioskuje o nieprzyjęcie tej rozprawy i niedopuszczenie mgr. inż. Marka Czerwia do publicznej obrony.

Podpisał prof. Michał Strzelecki (podpis odręczny)