

dr hab. inż. Artur Klepaczko, prof. ucz.
Instytut Elektroniki
Politechniki Łódzkiej

Rada Naukowa Dyscypliny
INFORMATYKA TECHNICZNA
I TELEKOMUNIKACJA
Sekretariat
Data wpływu 7.09.23r.
Numer.....

31 sierpnia 2023 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY DYSCYPLINY NAUKOWEJ INFORMATYKA TECHNICZNA I
TELEKOMUNIKACJA W POLITECHNICE WARSZAWSKIEJ

Tytuł rozprawy: Zastosowanie statystyk opartych na różnicach między kolejnymi odstępami RR w detekcji migotania przedsionków z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego

Autor rozprawy: mgr inż. Szymon Buś

Promotor: dr hab. inż. Konrad Jędrzejewski, prof. ucz.

I. Ocena układu rozprawy, w tym informacja o jej poszczególnych częściach składowych. Czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej?

Przedłożona do recenzji rozprawa obejmuje 6 rozdziałów oraz bibliografię. Układ rozdziałów jest przejrzysty. Autor w sposób spójny wyjaśnia cele, motywację, zastosowany aparat badawczy oraz wyniki kolejnych etapów badań. We wprowadzeniu zamieszczonym w rozdziale 1. jasno sformułowano problem naukowy, jakim jest znalezienie optymalnych parametrów HRV (ang. *heart rate variability*) do wykrywania migotania przedsionków w zapisie EKG. Tutaj też sformułowano tezy badawcze oraz określono w sposób syntetyczny wkład własny autora do dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja. Wkład ten potwierdzają zamieszczone w kolejnych rozdziałach wyniki badań.

Rozdziały 2. i 3. zawierają teoretyczne podstawy przeprowadzonych badań, jak również opis metod zastosowanych do wykonania postawionych zadań. Rozdziały 4. i 5. zawierają wszechstronną i wnikliwą prezentację uzyskanych wyników. W rozdziale 6. zamieszczono podsumowanie badań wraz z krytyczną oceną rezultatów i wskazaniem możliwych kierunków dalszych prac. Zarówno zawartość merytoryczna rozprawy, jak i jej logiczny układ świadczą o osiągnięciu przez Autora umiejętności do samodzielnego prowadzenia prac naukowych oraz pozyskania odpowiedniej wiedzy w dyscyplinie, w której realizowany jest doktorat, czego uzasadnienie zamieszczam w kolejnych sekcjach niniejszej recenzji.

II. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Tematyka badawcza podjęta w recenzowanej rozprawie doktorskiej koncentruje się wokół zagadnienia rozpoznawania migotania przedsionków w zapisie elektrokardiograficznym (EKG) rytmu serca z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego. Migotanie przedsionków (ang. *atrial fibrillation*, AF) jest z jednej strony najczęstszym zaburzeniem rytmu serca polegającym na

szybkich, chaotycznych skurczach przedsionków. Według dostępnych statystyk problem ten dotyczy ok. 1% populacji przed 65 oraz 4-10% populacji powyżej 65 r.ż. Z drugiej strony choroba ta często przebiega w sposób bezobjawowy. Dlatego oraz ze względu na fakt, że migotanie przedsionków może prowadzić do groźnych powikłań zakrzepowo-zatorowych, wszelkie badania zmierzające do wytworzenia metod wspomagających diagnostykę tej arytmii mają duże uzasadnienie. Do tego celu autor rozprawy zastosował podejście oparte na klasyfikacji na podstawie pojedynczych parametrów lub wektorów cech wyznaczonych z sygnału EKG.

Opisane zagadnienie badawcze zostało dostatecznie jasno sformułowane przez Autora we wstępnej części rozprawy. W ramach pracy zaprojektowano algorytmy do ekstrakcji cech z sygnału EKG oraz przeprowadzono szereg eksperymentów klasyfikacji wektorów tych cech, których celem było potwierdzenie następujących tez badawczych:

1. Możliwe jest wyznaczenie progu zliczania x parametru $pRRx$ (procent odstępów RR różniących się od poprzedniego odstępu RR o co najmniej x ms) innego niż 50 ms ($pRR50$) pozwalającego na uzyskanie lepszych właściwości diagnostycznych w wykrywaniu migotania przedsionków niż parametr $pRR50$.
2. Możliwe jest wyznaczenie progu zliczania $x\%$ parametru $pRRx\%$ (procent odstępów RR różniących się od poprzedniego odstępu RR o co najmniej $x\%$ jego długości) pozwalającego na uzyskanie lepszych właściwości diagnostycznych w wykrywaniu migotania przedsionków niż parametr $pRRx$ o najlepszych właściwościach.
3. Zastosowanie parametrów $pRRx$ i $pRRx\%$ jako cech w modelach uczenia maszynowego pozwala na poprawę miar efektywności detekcji migotania przedsionków lub na zmniejszenie liczby cech w modelu przy zachowaniu podobnych miar efektywności detekcji migotania przedsionków.

Rozprawa ma charakter teoretyczno-doświadczalny, w której Autor najpierw scharakteryzował istniejące algorytmy ekstrakcji cech sygnału EKG służące do wykrywania migotania przedsionków, następnie na podstawie przeprowadzonej analizy wywiódł podstawy teoretyczne do zdefiniowania parametrów optymalnych z punktu widzenia detekcji migotania przedsionków, zaś postawione tezy wykazał na drodze doświadczeń przeprowadzonych dla danych pozyskanych z dwóch niezależnych i publicznie dostępnych repozytoriów sygnałów EKG.

III. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy, świadczący o dostatecznej wiedzy autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

W rozdziale 2. rozprawy p.t. *Wykrywanie migotania przedsionków* Autor omówił podstawy fizjologiczne pracy mięśnia sercowego, w tym przede wszystkim scharakteryzował aktywność elektryczną jego komórek będących źródłem sygnału elektrokardiograficznego, jak również samą metodę pomiaru tego sygnału za pomocą 12-odprowadzeniowego urządzenia stacjonarnego lub urządzeń przenośnych o mniejszej liczbie odprawień (tzw. holterów). Zwraca uwagę zwięzły aczkolwiek kompetentny opis cyklu pracy serca decydujący o takim, a nie innym przebiegu sygnału EKG, w którym wyróżnia się charakterystyczne wychylenia, tzw. załamki P, Q, R, S i T. Obecność tych załameków, a przede wszystkim ich oznaczenie w przebiegu sygnału ma istotne znaczenie diagnostyczne. Zasadniczą część pracy, zarówno w zakresie teoretycznym, jak i doświadczalnym, opiera się na prawidłowym wykryciu załamka R, będącego najwyższym punktem zespołu QRS odpowiadającego depolaryzacji komór. W podrozdziale 2.2 opisano

ponadto objawy migotania przedsionków oraz konsekwencje tej arytmii dla zdrowia człowieka. Co najistotniejsze z punktu widzenia rozprawy, w sposób przekonujący uzasadniono potrzebę automatyzacji i komputerowego wspomagania diagnostyki migotania przedsionków opartej o wielogodzinne zapisy EKG pozyskane przy pomocy urządzeń o mniejszej niż 12 liczbie wprowadzeń.

Podrozdział 2.3 zawiera opis podstawowej metody analizy sygnału EKG opartej o ilościowe miary zmienności rytmu serca. Znajdują się tu definicje parametrów statystycznych HRV stosowanych do oceny prawidłowości pracy mięśnia sercowego. Spośród wymienionych parametrów najważniejsze są miary $pRRx$ i $pRRx\%$, które oznaczają odpowiednio udział par kolejnych odstępów RR różniących się od siebie o x ms oraz $x\%$ długości w ogólnej liczbie odstępów RR w badanym fragmencie przebiegu EKG. Definicje oraz znaczenie tych miar wyjaśniono w sposób rzetelny, ułatwiając zrozumienie dokonania Autora.

Niedosyt pozostawia podrozdział 2.4, w którym Autor przechodzi do przeglądu literatury w zakresie metod detekcji migotania przedsionków w sygnale EKG. Podrozdział ten został podzielony na 2 części odpowiadające z jednej strony metodom, w których analizie poddawany jest jednocześnie cały sygnał EKG, w pełnym zmierzonym zakresie, z drugiej strony zaś metodom wykorzystującym parametry HRV. Pierwsza część obejmuje więc algorytmy, które z definicji stanowią inny kierunek badań niż przyjęty przez Autora, m.in. głębokie sieci neuronowe. Uczenie głębokie stanowi jednakże intensywnie rozwijaną technologię, co odzwierciedlone jest w znaczenie większej liczbie doniesień naukowych niż 3 pozycje (o nr 60-62) zamieszczone w spisie literatury. Bardzo pobieżna kwerenda w 2 czasopismach z wydawnictwa Elsevier zwraca kilkanaście artykułów odnoszących się do tej tematyki (kilka przykładów załączam poniżej).

Innym ważnym podejściem do analizy sygnałów EKG jest technika wykorzystująca transformatę falkową. Jest on stosowana zarówno w kontekście analizy całych zapisów EKG (jako metoda ekstrakcji cech), jak też do analizy zmienności rytmu HRV (np. do wstępnego przetwarzania sygnału czy jego filtracji). Transformata falkowa posiada poza tym szerokie zastosowanie w analizie sygnałów biomedycznych i wydaje się, że dyskusja nad jej potencjalnym wykorzystaniem do detekcji migotania przedsionków w sygnale EKG byłaby oczekiwana.

Również część rozdziału poświęcona metodom analizy HRV jest rozbudowująca. Ten fragment rozdziału ogranicza się jedynie do wskazania odniesień literaturowych (10-20), w których zastosowano parametry HRV. Brakuje tu szerszej dyskusji nt. tego, które parametry wykorzystano w poszczególnych badaniach, jakie zastosowano metody klasyfikacji, czy i w jaki sposób poddawano dane wejściowe przetwarzaniu wstępnemu, jakie są wady i zalety kolejnych podejść. Te informacje pozwoliłyby lepiej zweryfikować dokonania Autora rozprawy. W pewnym stopniu braki te rekompensuje podsumowanie zawarte w tabeli 2.3, jednak jest ono zbyt ogólne, skrótowe i ostatecznie wymagające od czytelnika samodzielnego wykonania syntezy stanu wiedzy. Poza tym na podstawie wykonanego przeglądu literatury nie można ocenić, czy analiza HRV posiada jakieś przewagi na pierwszą grupę metod opartych na analizie całych zapisów EKG i odwrotnie. Pozostaje pytanie, dlaczego ostatecznie Autor zdecydował się na drugie podejście, a odrzucił np. kierunek związany z metodami uczenia głębokiego.

Przykładowe propozycje dodatkowych pozycji do przeglądu literatury:

1. Yongjian Li et al. *Diagnosis of atrial fibrillation using self-complementary attentional convolutional neural network*, Computer Methods and Programs in Biomedicine, Volume 238, 2023, pp. 107565.

2. Sen Liu et al., MGNN: *A multiscale grouped convolutional neural network for efficient atrial fibrillation detection*, Computers in Biology and Medicine, Volume 148, 2022, pp. 105863.
3. Xianjie Chen et al. *Atrial fibrillation detection based on multi-feature extraction and convolutional neural network for processing ECG signals*, Computer Methods and Programs in Biomedicine, Volume 202, 2021, pp. 106009.
4. D.U.S. Duranta et al., *Enhancing Atrial Fibrillation detection accuracy: A wavelet transform filtered single lead ECG signal analysis with artificial neural networks and novel feature extraction*, Machine Learning with Applications, Volume 12, 2023, pp. 100472.
5. Pandey, S.K., et al. *Detection of Arrhythmia Heartbeats from ECG Signal Using Wavelet Transform-Based CNN Model*. Int. J. Comput. Intell. Syst. 16, 80 (2023).

IV. Czy autor rozwiązał poprawnie postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

W rozdziale 3 rozprawy Autor opisał metody statystyczne oraz uczenia maszynowego wykorzystane później w przeprowadzonych eksperymentach. Rozdział ten świadczy o tym, iż Autor posiada duże kompetencje w zakresie eksploracji danych oraz opanował w stopniu zaawansowanym niezbędny warsztat narzędziowy – w szczególności statystycznych metod analizy danych – do wykonania zaplanowanych badań. Opis stosowanych miar statystycznej oceny jakości i wiarygodności testów diagnostycznych wydaje się wyczerpujący. Wybór metod klasyfikacji danych jest siłą rzeczy arbitralny, chociaż zawiera grupę algorytmów należących do kanonu uczenia maszynowego. Wśród nich chętnie widziałbym dodatkowo algorytm Xgboost, który – jeśli nie liczyć metod uczenia głębokiego – do niedawna stanowił jedno z bardziej aktywnie i z sukcesem rozwijanych podejść. Najbardziej jednak uszczuplonym jest wybór metod selekcji cech. Autor zdecydował się na użycie dwóch technik, czyli MRMR (ang. *minimum redundancy-maximum relevance*) należącej do podejścia typu *filtr*, oraz SFS (ang. *sequential forward selection*) należącej do podejścia typu *powłoka* (ang. *wrapper*). Należy tutaj zwrócić uwagę na fakt, że metoda SFS jest bardzo wrażliwa na wybór pierwszej cechy, co oznacza że wybór kolejnych cech znaczących jest zdeterminowany jakością tej pierwszej. Wady tej nie posiadają algorytmy SFFS lub SFBS (ang. *sequential floating forward/backward selection*), gdzie możliwe jest usunięcie ze zbioru kandydatów pierwszej cechy w toku kolejnych poszukiwań. Taki, a nie inny wybór metody selekcji cech ma konsekwencje dla końcowych wniosków rozprawy w zakresie wykorzystania metod uczenia maszynowego do predykcji migotania przedsionków.

W części doświadczalnej pracy opisaney w rozdziałach 4. i 5., Autor przeprowadził szereg badań w celu wykazania słuszności postawionych hipotez badawczych. W podrozdziale 4.1 zostały opisane 2 bazy danych sygnałów EKG wykorzystanych w badaniach – baza LTAfDB (ang. *long-term atrial fibrillation database*), zawierająca 84 24-godzinne zapisy próbkowane z częstotliwością 128 Hz, oraz baza AFDB (ang. *atrial fibrillation database*), zawierająca 23 10-godzinne zapisy z próbkowaniem 250 Hz. Obydwie bazy są dostępne publicznie jako otwarte repozytoria. Baza LTAfDB została wykorzystana jako zbiór treningowy, natomiast AFDB stanowiła zbiór testowy. Podział ten jest prawidłowy, zarówno ze względu na licznosc obydwu baz, jak też wyższą częstotliwość (a więc potencjalnie lepszą jakość spróbkowanego sygnału) bazy testowej. Jak zaznacza Autor, w pracy wykorzystano również istniejące w obydwu bazach oznaczenia załamekóv R. Wskazano w pracy, że celowo nie wykonano własnej implementacji algorytmów do przetwarzania sygnału EKG i wykrywania poszczególnych załamekóv, aby uniknąć ewentualnych błędów na tym polu. Argumentacja ta wydaje się kontrowersyjna. Zrozumiałe jest, że Autor pragmatycznie decyduje się na wykorzystanie gotowych adnotacji, jednakże założenie,

że samodzielnie wykonany program do oznaczania załamek byłby gorszy jest jedynie spekulacją. Z drugiej natomiast strony, jeśli zakładamy, że taka implementacja może być błędna, to należy zadać pytanie, **jakie Autor podjął środki, do oceny jakości użytych oznaczeń, jaki jest ich średni błąd i jakim ryzykiem w związku z tym obarczone są uzyskane wyniki badań.**

W podrozdziałach 4.2-4.4 przeprowadzono analizę statystyczną różnych grup parametrów HRV obliczanych dla 60-sekundowych fragmentów sygnału EKG w celu oceny ich zdolności do różnicowania migotania przedsionków i normalnego rytmu zatokowego. Analizie poddano kolejno standardowe parametry HRV wymienione w podrozdz. 2.3, parametry z grupy pRRx oraz z grupy pRRx%. W każdym przypadku procedura badawcza obejmowała zastosowanie podobnego zestawu narzędzi i metryk, tj. wyznaczenie krzywej ROC, na jej podstawie optymalnego progu odcięcia wg. kryterium Youdena, obliczenie wartości AUC, dokładności klasyfikacji (za pomocą prostego klasyfikatora progowego), czułości, swoistości, wartości PPV i NPV oraz diagnostycznego ilorazu szans DOR. Ponadto w przypadku oceny parametrów zliczeniowych pRRx i pRRx% wykonano analizę rozkładów dwóch klas (rytm zatokowy i migotanie) dla szeregu zakresów różnic x i $x\%$, tak aby wyznaczyć optymalne podzakresy, w których rozkłady te są rozłączne. Wszystkie te działania wykonano bardzo rzetelnie i zgodnie ze sztuką, a wyniki zaprezentowano w sposób czytelny i przekonujący. Na tej podstawie wykazano, że:

1. W grupie tzw. standardowych parametrów HRV, najlepsze właściwości różnicujące posiada parametr pRR50, zapewniając dokładność klasyfikacji bazy LTAADB = 92,4%.
2. W grupie parametrów pRRx, najlepsze właściwości różnicujące wykazuje parametr pRR31 (dla $x = 31.25$ ms), zapewniając dokładność = 92,86%, czyli o 0,46% więcej niż parametr pRR50 (baza LTAADB), **co dowodzi słuszności tezy 1.**
3. W grupie parametrów pRRx%, najskuteczniejszym okazał się parametr pRR3.25%, zapewniając dokładność = 95,44%, czyli o 2,58% więcej niż parametr pRR31 (baza LTAADB), **co dowodzi słuszności tezy 2.**

Należy odnotować, że słuszność tez 1 i 2 stwierdzono nie tylko na podstawie pojedynczych eksperymentów klasyfikacyjnych, ale wykonano ich całą serię metodą *bootstrap* z 5000 powtórzeń. Następnie rozkłady wyników klasyfikacji dla analizowanych parametrów (np. pRR31 z pRR50, czy pRR3.25% z pRR31) porównano ze sobą za pomocą testu t-Studenta lub – w jednym przypadku – Wilcoxa, aby stwierdzić, czy obserwowane różnice dokładności są statystycznie wiarygodne. Działania te wykonano również w sposób prawidłowy, jednakże brakuje informacji **w jaki sposób przeprowadzono test normalności, czy też homogeniczności wariancji rozkładów wyników klasyfikacji, co jest zasadniczo warunkiem stosowalności testu t-Studenta.**

Wyniki analizy parametrów poddano także walidacji na zbiorze testowym AADB. Badanie te potwierdziły, że znalezione parametry pRR31 i pRR3.25% pozwalają na skuteczną detekcję migotania przedsionków. Jedynym odstępstwem od tej obserwacji są wyniki czułości parametru pRR31, która dla zbioru testowego jest mniejsza niż w przypadku parametru pRR50. **Obserwacja ta nie została jednak skomentowana w pracy.**

W podrozdziale 4.5 przebadano wpływ długości fragmentu sygnału EKG na właściwości diagnostyczne parametrów HRV, przy czym w porównaniu wzięły udział wszystkie standardowe parametry oraz parametry pRR31 i pRR3.25%. Wykonano analizy dla fragmentów o długości od 30 do 300 sekund z krokiem co 10 s. Jak się okazało, wydłużanie segmentu sygnału ma pozytywny efekt na jakość klasyfikacji, jednak wszystkie najważniejsze metryki oceny, tj. dokładność, czułość, swoistość, AUC, czy DOR są w przybliżeniu „monotonicznie” rosnące tylko dla

parametrów z grupy $pRRx$ i $pRRx\%$. **Jednakże ta część badań pozostała bez rekomendacji, jaka długość w takim razie należałoby przyjąć jako pewien standard w tego rodzaju analizach.**

W rozdziale 5. rozprawy podjęto temat zastosowania metod uczenia maszynowego do rozpoznawania migotania przedsionków. Zaletą tej grupy metod jest oczywiście możliwość przeprowadzania analizy w wielowymiarowej przestrzeni cech. Badania przeprowadzono więc w grupie standardowych parametrów HRV, którą powiększono o parametry $pRR31$ i $pRR3.25\%$. Wykonano tu szereg eksperymentów z użyciem różnych algorytmów klasyfikacji (k-NN, SVM, drzewa decyzyjne, lasy losowe, sztuczna sieć perceptronowa, komitet klasyfikatorów ADA-Boost). Wykazano, że najlepsze wyniki można otrzymać poprzez zestawienie ze sobą cech standardowych HRV z $pRR31$ albo $pRR3.25\%$. W zależności od liczby cech, dokładność klasyfikacji wyniosła od 94 do 98% na zbiorze testowym, czyli o dalsze 4% więcej niż uzyskano w badaniach z użyciem tylko parametru $pRR3.25\%$, **co dowodzi słuszności tezy 3.**

Z punktu widzenia tematyki pracy, która koncentruje się na aspekcie inżynierii cech, bardziej istotne jest jednak to, w jaki sposób wykonano wstępne przetwarzanie danych, w tym selekcję cech znaczących. **W tym zakresie, przyjęta metoda badawcza zawiera pewne mankamenty.** Przede wszystkim, nie jest uzasadnione uwzględnienie tylko parametrów $pRR31$ i $pRR3.25\%$ z grup $pRRx$ i $pRRx\%$. Nie jest wykluczone, że inne wartości różnic x i $x\%$ dają łącznie lepsze efekty detekcji niż standardowe parametry HRV. Ponadto, jak wskazałem wyżej, działanie algorytmu SFS jest silnie zdeterminowane przez wybór pierwszej cechy. Stąd kolejno dodawane parametry mogą nie mieć wpływu na ostateczny wynik klasyfikacji. Niekiedy, mniej znaczące cechy ujawniają swoją zdolność do dyskryminacji dopiero w otoczeniu innych parametrów. Nie jest więc zaskakujące, że w badaniach autora, algorytm MRMR, który istotność danej cechy ocenia w izolacji od innych parametrów zachowuje się bardzo podobnie do algorytmu SFS. Lepszym wydaje się wspomniany też wyżej algorytm SFS. Jednakże jeśli miałyby być włączone do analizy inne parametry z rodziny $pRRx$ i $pRRx\%$, nadto wyznaczone także z różnych długości fragmentów sygnału EKG, to SFFS mógłby się okazać podejściem zbyt czasochłonnym. Wówczas należałoby zastosować jeszcze inne metody przeszukiwania przestrzeni cech, jak choćby oparte o algorytmy genetyczne.

V. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Jak zaznacza Autor, wśród obecnie wykorzystywanych parametrów w diagnostyce migotania przedsionków na podstawie sygnału EKG znajduje się tylko jeden parametr z rodziny $pRRx$, tj. $pRR50$. Autor przeprowadził więc pogłębioną analizę stosowanych parametrów HRV oraz parametrów z grup $pRRx$ i $pRRx\%$ dla szeregu różnych wartości różnic x i $x\%$, a także dla różnych długości fragmentów sygnału EKG. Wykonał także treningi modeli uczenia maszynowego do klasyfikacji wielowymiarowych wektorów cech HRV do rozpoznawania migotania przedsionków w sygnale EKG. Jako główne oryginalne osiągnięcie Autora wskazałbym przede wszystkim analizę właściwości diagnostycznych parametrów $pRRx\%$, ponieważ parametry te nie były szczegółowo badane w literaturze. Autor zauważa, że zastosowanie miar $pRRx\%$ do różnicowania migotania przedsionków i rytmu zatokowego może być korzystne ze względu na to, iż wariancja ciągów RR tylko w tym drugim przypadku jednoznacznie rośnie wraz ze wzrostem długości odstępów RR. Na tej podstawie wysnuł i potwierdził nieoczywistą hipotezę, że także sąsiednie odstępów RR różniące się o mniej niż standardowe 50 ms, lub wyznaczone w innym eksperymencie optymalne 31 ms, ale jednak o więcej niż $x\%$ długości, gdzie $x\%$ zostało wyznaczone

eksperymentalnie, stanowi przesłankę do zaklasyfikowania danego przebiegu jako potencjalnej arytmii AF. Jak zaznaczono w II sekcji recenzji, przegląd literatury światowej w tematyce rozprawy zawiera jedynie pobieżny spis alternatywnych rozwiązań bez ich pogłębionej dyskusji. Porównanie osiągnięć naukowych Autora na tle literatury światowej jest wobec tego utrudnione. Przeprowadzone badania Autor podsumował we współautorskich artykułach i referatach naukowych (w tym trzech publikacji w czasopiśmie *Journal of Clinical Medicine* o współczynniku IF=3.9) opublikowanych w latach 2020–2023.

VI. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego przedstawienia uzyskanych wyników i ich interpretacji (zwięzłość, jasność)?

Autor opisał swoje osiągnięcia badawcze na odpowiednim poziomie szczegółowości stawianym rozprawom doktorskim. Doktorant przeprowadził również szeroką dyskusję uzyskanych wyników. Tekst rozprawy, poza pojedynczymi nielicznymi błędami językowymi wskazanymi w cz. VI niniejszej recenzji, w sposób jasny, przekonujący i uporządkowany przedstawia kolejne etapy badań. Czytelnik ma duży komfort w zapoznawaniu się z osiągnięciami Autora.

VII. Ocena możliwości praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań.

Detekcja i predykcja migotania przedsionków, jak wskazano w niniejszej recenzji oraz w samej rozprawie, stanowi bardzo ważne zagadnienie w wymiarze społecznym. Dlatego praktyczna implementacja algorytmów detekcji opartych na zidentyfikowanych przez autora parametrach HRV z grupy pRRx i pRRx% ma potencjalnie duże znaczenie dla zwiększenia skuteczności testów diagnostycznych. Z tego względu należy bardzo pozytywnie ocenić informacje o nawiązaniu współpracy przez Instytut Systemów Elektronicznych Politechniki Warszawskiej z firmą Medea – polskim producentem rejestratorów EKG – oraz wstępne prace prowadzone przy udziale Doktoranta zmierzające do zaprojektowania przenośnego rejestratora wyposażonego w zaproponowane przez niego algorytmy detekcji migotania przedsionków. W tym kontekście na uznanie zasługuje również fakt, iż prowadzone badania były konsultowane ze środowiskiem medycznym, co jest udokumentowane we wspólnych publikacjach z zespołem prof. Przemysława Guzika z Katedry i Kliniki Intensywnej Terapii Kardiologicznej i Chorób Wewnętrznych Uniwersytetu Medycznego w Poznaniu.

VIII. Jakie są słabe strony rozprawy i ewentualnie jej główne wady?

Praca jest napisana w sposób bardzo poprawny. Do jej słabszych stron można zaliczyć:

- 1) Brak pogłębionej analizy przestrzeni cech pRRx i pRRx% w kontekście projektowania modeli uczenia maszynowego.
- 2) Brak wykonania normalizacji lub standaryzacji cech przed selekcją cech znaczących.
- 3) Brak szerszej dyskusji w przeglądzie literatury światowej.
- 4) Brak porównania wyników uzyskanych za pomocą wytrenowanych modeli klasyfikatorów z opublikowanymi pracami o podobnej tematyce.
- 5) Drobną wadą w dowodzie słuszności tezy 1 – czułość testu diagnostycznego opartego o parametr pRR31 dla zbioru testowego okazała się trochę mniejsza niż dla parametru pRR50.

Język tekstu rozprawy nie budzi zastrzeżeń i można go uznać za wzorcowy. Można doszukać się jedynie nielicznych błędów o małej wadze:

- a) s. 20: Jeśli pierwszy z nich jest dłuższy (przyspieszenie pracy serca), punkt znajdzie się poniżej linii $y = x$, zaś w przeciwnym wypadku (zwolnienie) – ponad nią. Słowo wypadek w języku polskim oznacza nagle, często nieszczęśliwe zdarzenie. Powinno być ...w przeciwnym przypadku...
- b) s. 19/20: Z tego względu w całodobowej rejestracji EKG u osoby zdrowej oczekiwane są okresy zarówno niskiej, jak i stosunkowo wysokiej częstości pracy serca. (...) również wartości HRV w migotaniu przedsionków powinny być wyższe niż w rytmie zatokowym. Przymiotniki wysoki, niski odnoszą się do wysokości (np. budynku) lub czyjegoś wzrostu. W przypadku wartości wielkości fizycznych używa się kategorii mały, duży, a zatem małej częstości, większe wartości.
- c) s. 12: **Jednak** ze względu na fakt, że w migotaniu przedsionków praca serca jest nieregularna, większość parametrów HRV przyjmuje podczas migotania przedsionków inne wartości niż podczas rytmu zatokowego. Słowo jednak najchętniej występuje wewnątrz zdania: Ze względu na fakt, że w migotaniu przedsionków praca serca jest nieregularna, większość parametrów HRV przyjmuje **jednak** podczas migotania przedsionków inne wartości niż podczas rytmu zatokowego. Podobnie s. 18, 19, 59.
- d) s. 79: Celem analiz było zweryfikowanie, czy użycie parametru pRR3.25%, **majacego** lepsze... Powinno być: **mającego**.

Wniosek końcowy

Na podstawie niewątpliwych osiągnięć badawczych Autora w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja, do której wniósł oryginalny wkład badawczy stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska spełnia wymagania Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym z 14 marca 2003 roku, Dziennik Ustaw Nr 65, poz. 595 z późn. zm. oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora. Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Szymona Busia do publicznej obrony.

Artem Ulepech