Prof. dr hab. inż. Bożena Kostek, prof. zw. PG
Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Lab. Akustyki Fonicznej

14. 08. 2018 r.

Opinia nt. rozprawy doktorskiej mgra Marcina A. Grochowiny

pt.: „Automatyczne wspomaganie diagnostyki przetoki tętniczo-żylnej na podstawie sygnału akustycznego", wykonanej pod kierunkiem dr hab. Lucyny Leniowskiej, prof. UR.

Cel, zawartość rozprawy, tezy, metodyka rozwiązywania problemów

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgra inż. Marcina A. Grochowiny. Recenzowana rozprawa doktorska ma charakter eksperymentalno-implementacyjny, obejmuje 171 stron tekstu i składa się z ośmiu rozdziałów, w tym wykazu ważniejszych skrótów i oznaczeń, Wstępu obejmującego przegląd dotychczasowych rozwiązań, motywację, tezy oraz zakres rozprawy, podstaw teoretycznych zastosowanych klasyfikatorów oraz oceny jakości klasyfikatorów, ekstrakcję i selekcję parametrów wektora cech, eksperymentalną weryfikację i dyskusję uzyskanych wyników, opisu implementacji zaprojektowanego rozwiązania, Podsumowania oraz wykazu bibliografii i trzech Dodatków, zawierających informacje dotyczące analizowanego problemu (tj. przetoki tętniczo-żylnej, wariantów rozwiązań głowicy, analizy zaproponowanych rozwiązań oraz uzasadnienia wyboru wariantu konstrukcyjnego głowicy pomiarowej), zestawienia szczegółowych wyników selekcji cech oraz zestawienia wskaźników jakości wyboru parametrów.

Problematyka i główny cel rozprawy doktorskiej dotyczą diagnostyki przetoki tętniczo-żylnej, w szczególności potrzeby jej bieżącego monitorowania, tworzenia zapisu historii badań i oraz możliwości wskazania podejrzenia wystąpienia procesu patologizacji. Diagnostyka przetoki tętniczo-żylnej w przypadku osób leczonych hemodializą określana jest jako "linia życia", odgrywa bowiem wysoce istotną rolę w skutecznym zabiegu dializy. Pomimo prowadzonych intensywnych badań na przestrzeni kilku dekad w obszarze analizy sygnałów medycznych, wciąż brakuje jednolitej propozycji metodyki badania sygnałów pochodzących z przetoki tętniczo-żylnej. Istotność tematyki wynika również z liczby osób, które poddawane są dializie i możliwych konsekwencjach zdrowotnych, w tym groźnych dla zdrowia i życia powikłań w przypadku braku drożności przetoki tętniczo-żylnej.

WPŁYNĘŁO
28. SIE. 2018
KIEROWNIK ADMINISTRACYJNY
Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
mgr inż. Renata Fularska

Zawartość rozprawy:

We Wstępie doktorant w pierwszej kolejności odnosi się do postępu technologicznego, który nastąpił w różnych obszarach przetwarzania informacji i technik obliczeniowych. Podrozdział zatytułowany „Przegląd dotychczasowych rozwiązań" – nie do końca zgodnie z tytułem tego podrozdziału – przedstawia historię algorytmów decyzyjnych oraz zakres ich stosowalności w zależności od danych wejściowych. Podany następnie został krótki, ogólny przegląd badań odnoszących się do diagnostyki sygnałów generowanych przez organizm człowieka, ich akwizycji i analizy oraz przykłady rozwiązań diagnostycznych w kontekście oceny stanu organizmu na podstawie sygnałów: fonokardiografii kondycji mięśnia sercowego, układu oddechowego, chorób krtani, układu kostnego, dźwięków emitowanych przez jelita, stanów depresyjnych i wreszcie przetoki tętniczo-żylnej. Przytoczone badania wskazują z jednej strony na różnorodność stosowanych metod ekstrakcji cech diagnostycznych z sygnału akustycznego oraz algorytmów klasyfikujących, jednak – jak podaje doktorant – metody te, dotyczące tematu rozprawy - najczęściej dotyczą binarnej oceny stanu przetoki tętniczo-żylnej, nie pozwalając na jej ciągłe monitorowanie. W kolejnym podrozdziale doktorant przywołuje rozwiązania własne w zakresie oceny przetoki tętniczo-żylnej, wykorzystujące urządzenie mobilne z systemem operacyjnym Android.

Niewątpliwie najważniejszym elementem tego rozdziału jest motywacja tematu oraz podanie tez, celu i zakresu rozprawy. Dla czytelności niniejszej opinii tezy zostały przywołane poniżej:

1. Zastosowanie fonoangiografii w połączeniu z algorytmami klasyfikacyjnymi umożliwi stworzenie metody wiarygodnej oceny stanu przetoki tętniczo-żylnej.
2. Istnieje możliwość zbudowania urządzenia implementującego algorytmy oceny stanu przetoki w celu udostepnienia pacjentom narzędzia do samodzielnego wczesnego wykrywania patologii.

W oparciu o sformułowane tezy wyłania się główny cel rozprawy, którym jest budowa narzędzia wspomagającego pacjentów oraz lekarzy w procesie bieżącej oceny stanu tętniczo-żylnej. W ramach podrozdziału: Struktura pracy doktorant zawarł schemat blokowy procesu realizacji badań, obejmującego: akwizycję sygnału, ekstrakcję cech, budowę zestawu cech, klasyfikację (i jej ocenę), realizację celu głównego, czyli stworzenia narzędzia diagnostycznego oraz krótko opisał zakres rozprawy.

W rozdziale drugim, zatytułowanym: „Podstawy teoretyczne zastosowanych klasyfikatorów", autor rozprawy dokonał podziału klasyfikatorów, podając definicję klasyfikatora, a następnie przedstawiając pokrótce: klasyfikatory probabilistyczne, klasyfikatory oparte na regułach decyzyjnych, sieci neuronowe, klasyfikatory

minimalnoodległościowe, klasyfikator SVM. Szczególnie istotna i wartościowa jest dyskusja na temat wpływu i doboru parametrów klasyfikatorów na wynik klasyfikacji. Kolejnym przedstawianym zagadnieniem jest problem klasyfikacji wielu klas, omówiony w kontekście klasyfikatora SVM. W podsumowaniu tego rozdziału doktorant podał, które z przedstawionych algorytmów zostaną wykorzystane w badaniach, a mianowicie autor rozprawy wybrał do dalszej eksploracji: algorytm k-NN (klasa algorytmów minimalnoodległościowych) oraz SVM (klasa algorytmów maksymalnoodległościowych).

Kolejny rozdział przywołuje metody oceny jakości klasyfikatorów zwracających wartość oszacowania wyniku w postaci liczby rzeczywistej z zadanego przedziału, w których dąży się do minimalizacji błędu tego oszacowania, podając podstawowe wskaźniki statystycznej analizy błędu oszacowania. Przywołuje następnie definicje miar stosowanych do oceny klasyfikatorów kategorycznych (oraz rozmytych). Bardzo istotna w kontekście analizy uzyskanych wyników jest dyskusja na temat przestrzeni ROC (ang. *receiver operating characteristics graph*) i przyporządkowania klasyfikowanych przypadków (na podstawie wektora parametrów) do jednej z klas. Doktorant omawia też przypadek oceny jakości klasyfikacji wieloklasowej. W podsumowaniu tego rozdziału doktorant na podstawie przedstawionych rozważań zaproponował ocenę jakości zastosowanych klasyfikatorów na podstawie następujących miar i wskaźników:

- *precyzja* - wskaźnik określający, w jakim stopniu rozpoznawana klasa została w procesie klasyfikacji „zanieczyszczona" wektorami innych klas,

- *zwrot* - wskaźnik określający odsetek prawidłowo sklasyfikowanych wektorów badanej klasy,

- *F-miara* - skumulowany wskaźnik jakości rozpoznawania danej klasy łączący w sobie *precyzje* i *zwrot*.

Rozdział 4. podaje uzasadnienie konieczności stosowania ekstrakcji cech oraz charakterystyczną własność wektora cech, jaką jest powtarzalność wartości dla obiektów tej samej klasy oraz możliwość rozróżnienia obiektów należących do różnych klas. Wartościowe jest zestawienie badań, które odnoszą się do ekstrakcji cech sygnału emitowanego przez przetokę prawidłową oraz cech wskazujących na postępującą patologizację. Przeprowadzona dyskusja wskazuje m.in. na fakt problematycznego pozyskania cech w dziedzinie czasu i jednoczesnym braku odniesień w literaturze na temat stosowalności potencjalnych parametrów charakterystycznych dla stanu przetoki tętniczo-żylnej w tej dziedzinie. W wyniku powyższych obserwacji doktorant przyjął pasmo częstotliwości 300 Hz÷700 Hz jako najbardziej interesujące w kontekście szczegółowej analizy w dziedzinie częstotliwości.

Kolejny podrozdział (4.2) jest pierwszym z rozdziałów, w którym przedstawione są prace własne doktoranta, dlatego jest on bardzo istotny z punktu widzenia dokonań autora rozprawy. Rozdział ten dotyczy rejestracji sygnałów emitowanych przez przetokę i problemów z tych związanych. Ze względu na potrzebę użycia głowicy, która pozwalałby na powtarzalną akwizycję sygnału w warunkach domowych, a także w przypadku niewykwalifikowanego personelu, rozdział ten zaowocował w sformułowaniu założeń konstrukcyjnych takiej głowicy, a następnie w przygotowanym projekcie (opis zawarty w rozdziale 4.2.1) oraz prototypie urządzenia (Dodatek A). Dodatkowym aspektem implementacyjnym są przygotowane przez doktoranta narzędzia programowe w celu usprawnienia akwizycji sygnałów. Oprogramowanie to zostało napisane w języku C++ w systemie operacyjnym Linux. Interesującym i jednocześnie bardzo praktycznym rozwiązaniem jest możliwość pobierania dwóch próbek dźwiękowych: sygnału użytecznego oraz próbki szumu w celu sprawdzenia jakości sygnału rejestrowanego przez głowicę. Dodatkową funkcjonalnością jest możliwość odsłuchu sygnału rejestrowanego przez mikrofon za pomocą opcji „monitor" włączającej wbudowana w kartę dźwiękową funkcję pętli zwrotnej przekazującej dźwięk z mikrofonu do słuchawek.

W podrozdziale 4.2 zawarty został opis przygotowania akwizycji sygnałów zebranych od 38 pacjentów w stacji dializ Szpitala Miejskiego nr 2 w Rzeszowie. Praca z pacjentami była możliwa dzięki uzyskaniu zgody lokalnej Komisji Bioetycznej Okręgowej Izby Lekarskiej w Rzeszowie. Sumarycznie pozyskanych zostało 156 nagrań pochodzących z kilku serii, z których wyodrębniono 2670 wektorów cech. Doktorant przedstawił uwarunkowania związane z akwizycją sygnałów akustycznych pochodzących z przetoki tętniczo-żylnej. Kolejne fragmenty rozdziału 4. odnoszą się poszczególnych etapów przetwarzania pozyskanych danych, tj. potrzeby wprowadzenia normalizacji lub standaryzacji danych, opisu budowania wektora cech i wreszcie wstępnej weryfikacji materiału badawczego. Niezbyt mocno został uwypuklony fragment opisu, w którym doktorant przedstawił ideę nadania etykiet związanych ze stanem przetoki tętniczo-żylnej, a jest on bardzo istotny w kontekście możliwości obiektywnej weryfikacji wyników klasyfikacji. Należy zauważyć, że przypisanie poszczególnych pacjentów do określonych klas dokonane zostało na podstawie subiektywnej oceny personelu medycznego stacji dializ oraz wyników badań obrazowych USG. Niezwykle interesująca jest wizualizacja wstępnych wyników, która pozwoliła na wstępną ocenę badanego zestawu cech, a mianowicie:

- klasy tworzą w przestrzeni cech hiperpas,

- w jego obrębie klasy ułożone są w kolejności odpowiadającej porządkowi zmian jakości przetoki tętniczo-żylnej,

- sąsiednie klasy częściowo zazębiają się, co pozwala na unikniecie powstawania obszarów pozaklasowych w przestrzeni cech.

Rozdział 5. można traktować jako jeden z głównych rozdziałów eksperymentalnych, aczkolwiek część tego rozdziału przybliża teoretyczne podstawy kryteriów i metod selekcji cech wektora parametrów. Doktorant zawarł bardzo wartościową dyskusję dotyczącą poszczególnych kryteriów selekcji cech wraz ze schematycznym zestawieniem metodologii (rys. 5.1). Wybór metod selekcji wykorzystanych w eksperymentach uwzględnia możliwość ich zastosowania niezależnie od klasyfikatora, jak również w połączeniu z danym klasyfikatorem. W dalszej części tego rozdziału doktorant przedstawia wyniki zastosowanych metod selekcji. Widoczne jest bardzo systematyczne podejście do doboru najlepszych cech (tj.: korelacja cech z klasą, liniowa sieć SVM, transformacja PCA, przeszukiwanie w przód oraz dołączanie parami). Istotne z punktu widzenia praktycznego zastosowania zaproponowanego rozwiązania są tabele 5.1 i 5.2, w których doktorant dokonał analizy zapotrzebowania na czas porównywanych metod selekcji cech (klasyfikator k-NN i SVM). Wynikiem bardzo dogłębnych analiz selekcji cech jest ranking cech zaprezentowany przez doktoranta w formie tabel i wykresów, zaś szczegółowe wyniki zostały zamieszczone w Dodatkach. Na uwagę zasługuje wykonanie bardzo rzetelnych analiz oraz podanie na tej podstawie wniosków pozwalających na klasyfikację z wykorzystaniem starannie wyselekcjonowanych wektorów parametrów. Ta część eksperymentu badawczego została wykonana z użyciem oprogramowania WEKA.

Ostateczna ocena zdolności klasyfikacyjnej zestawów cech wraz z określeniem optymalnej liczby cech w wektorze parametrów została przeprowadzona z użyciem wybranych klasyfikatorów (k-NN i SVM) i zaprezentowana w rozdziale 6. Rozdział ten dotyczy przede wszystkim analizy, ale i też syntezy uzyskanych wyników, co ze względu na liczbę testowanych wariantów wektorów cech jest wysoce zasadne. Porównanie te obejmują wygenerowane dla każdego zestawu cech 22 podzbiory zawierające kolejno od 2 do 23 cech oraz dwa klasyfikatory, a mianowicie k-NN oraz SVM. Cechy były dołączane do podzbiorów w kolejności wskazanej rankingiem.

W pierwszym podejściu doktorant wybrał metodę 10-krotnej walidacji krzyżowej, która z założenia powinna umożliwić uzyskanie wiarygodnego wyniku testów, zapewniając jednocześnie równomierne wykorzystanie wszystkich danych zgromadzonych w zbiorze wejściowym. Podział zbioru na 10 części wykorzystanych podczas walidacji krzyżowej dokonany został w sposób losowy. Niezadowalające wyniki testów skłoniły Autora rozprawy do opracowania własnej metody podziału zbioru danych na część testową i treningową, które zostały przedstawione w rozdziale 6.2. Wnioski dotyczące wstępnej części klasyfikacji zawierają stwierdzenie, że nie było możliwe uzyskanie znaczących (statystycznie) różnic w wynikach, a więc wyłonienie klasyfikatora, który w lepszym stopniu spełniałby zadane założenia

eksperymentu. Interesująca jest uwaga, w której autor rozprawy odnosi się do wysokiego wyniku klasyfikacji (95%), stwierdzając, że wysoka jakość klasyfikacji oceniona za pomocą wskaźnika *F-miara* na poziomie powyżej 0,95 była zbyt optymistyczna i sugerowała konieczność przeprowadzenia dodatkowych testów weryfikujących poprawność przeprowadzonych badań. Warto zauważyć, że w tego typu testach dodatkowym problemem staje się wybór nastaw i parametrów algorytmów klasyfikacyjnych. Autor rozprawy sprawdził i udokumentował poszczególne opcje nastaw klasyfikatorów, zachowując pełną systematykę kolejnych podejść.

Za element mogący wpływać na „sztuczne" zawyżenie wskaźnika jakości wskazano możliwość występowania korelacji pomiędzy danymi w zbiorach testowym i treningowym. Doktorant uznał, że zastosowana w procesie testowania 10-krotna walidacja krzyżowa z losowym podziałem zbioru na części treningowe i testowe mogła spowodować, ze zarówno w zbiorze uczącym, jak i testowym znajdowały się dane ekstrahowane z sygnałów pochodzących od tych samych pacjentów, a więc potencjalnie silnie ze sobą skorelowanych. W celu weryfikacji uzyskanych wyników autor rozprawy przeprowadził dodatkowe testy z zapewnieniem użycia danych wzajemnie nieskorelowanych, tj. wyłączając kolejno w charakterze zbioru testowego dane pochodzące od pojedynczych pacjentów. Schemat procesu testowania został zawarty na rys. 6.5.

Efektem takiego działania było zwiększenie liczności zbioru treningowego i powiększenie go o próbki zawierające dane pochodzące od większej liczby pacjentów. Operacja ta polegała na wyłączeniu w każdej iteracji w zbiorze testowym próbki pochodzącej tylko od jednego pacjenta, dając efekt 38-krotnej walidacji krzyżowej. Uzyskane wskaźniki jakości klasyfikacji wyraźnie zmniejszyły się do wartości poniżej 0,7. Dodatkowo zestawy cech wygenerowane metodami „*dołączanie parami*" oraz „*przeszukiwanie w przód*", które przy losowym podziale na zbiory testowe i treningowe pozwoliły uzyskać najlepsze spośród badanych algorytmów wyniki jakościowe, przy podziale z użyciem walidacji kierowanej dały wyniki najgorsze. Interesujące jest również uzyskanie najlepszych wyników przez zestaw wyłoniony z użyciem metody „*korelacja z klasą*", który poprzednio dał najsłabsze wyniki. Wyniki działania obu klasyfikatorów są porównywalne.

Istotne są wnioski wynikające z tej części eksperymentów, które pozwoliły na wskazanie „optymalnego" wektora cech w połączeniu z algorytmem k-NN. Najbardziej wartościowe w procesie klasyfikacji okazały się parametry związane z energią sygnału, ekstrahowaną w dwóch pasmach częstotliwości (60÷40 Hz oraz 280÷700 Hz) podzielonych na podpasma o szerokości tercji. Doktorant zdecydował, że uzyskane wyniki są wystarczająco skuteczne, aby proces ekstrakcji cech wraz z zaproponowanym algorytmem zaimplementować w systemie wbudowanym w urządzeniu wspomagającym diagnostykę przetoki tętniczo-żylnej, co zostało przedstawione w rozdziale 7.

W rozdziale tym, w pierwszej kolejności doktorant zawarł założenia dotyczące warstwy sprzętowo-programowej podyktowane możliwością uruchomienia rozwiązań opracowanych w trakcie procesu badawczego, zapewnieniem ergonomii rozwiązania przez potencjalnego użytkownika w warunkach mobilnych. Dodatkowym założeniem był również koszt zakupu niezbędnych komponentów. Z kolei proces tworzenia warstwy programowej zakłada klasyczny warsztat programistyczny, uwzględniający możliwość szybkiej implementacji opracowanych algorytmów oraz wybór typowego systemu operacyjnego (tj. Linux). Schemat blokowy rozwiązania został przedstawiony na rys. 7.1. W odniesieniu do niego zostały podane szczegóły implementacyjne, tj. mikrokomputer z serii Raspberry Pi, 64-bitowy, 4-rdzeniowy procesor ARM wyposażony w jednostkę do obliczeń na liczbach zmiennoprzecinkowych, zaś głowica do akwizycji dźwięku wykorzystuje kartę dźwiękową USB C-media opartą na układzie CM-108. Ważnym elementem zestawu jest interfejs użytkownika (wyświetlacz LCD wyposażony w rezystancyjny panel dotykowy). Z kolei wybór systemu operacyjnego został podyktowany kilkoma istotnymi dla rozwiązania względami, m.in. brakiem potrzeby posiadania licencji komercyjnej na użytkowany system, ale przede wszystkim faktem, iż przygotowanie wcześniej do badań narzędzia zostały oparte na tym właśnie systemie operacyjnym. Struktura warstwy programowej została przedstawiona na rys. 7.2 i stanowi modułową budowę systemu, składającą się z modułu nadrzędnego oraz modułów wykonawczych. Doktorant podaje szczegóły dotyczące języków programowania w kontekście m.in. ograniczeń karty dźwiękowej, buforowania danych czy obsługi błędów. Rozdział 7.3 zawiera prezentację opracowanego przez doktoranta rozwiązania.

Rozdział 8 stanowi bardzo dobrze przygotowane podsumowanie całego procesu badawczego i implementacyjnego. Doktorant w sposób bardzo staranny przedstawia kolejne etapy tego procesu i ocenia je w kontekście poziomów gotowości technologicznej (TRL – ang. *Technology Readiness Level*), a następnie przywołuje rozwiązania autorskie, ocenę uzyskanych wyników oraz kierunki dalszych badań.

W dalszej kolejności doktorant zawarł Dodatki oraz Bibliografię zawierającą ok. 150 źródeł literatury.

Ocena zawartości rozprawy i metod rozwiązywania postawionych problemów

W pierwszej kolejności należy podkreślić, że warsztat prowadzenia eksperymentu badawczego przez doktoranta, jak również umiejętność posługiwania się analizą selekcją i syntezą danych w celu uzyskania jak najlepszych wskaźników jakościowych klasyfikatorów zasługuje na uznanie. Należy też zwrócić uwagę na charakter implementacyjny przeprowadzonych badań. Rozprawa ma wyraźnie charakter praktyczny i może być szerzej wykorzystana w diagnostyce przetoki tętniczo-żylnej, nie tylko w warunkach klinicznych, ale również domowych.

Doktorant wykazał szereg autorskich rozwiązań i nie jest trudno się z nim nie zgodzić, że są one wynikiem problemów napotkanych w trakcie realizacji badań, a więc skuteczną próbą ich rozwiązania. Ponieważ są to ważne aspekty rozprawy, dlatego przywołam je poniżej:

- algorytm selekcji cech – tzw. „dołączanie parami" opracowany w celu redukcji zapotrzebowania na moc obliczeniowa przy utrzymaniu wysokiej jakości podzbiorów cech diagnostycznych,
- algorytm kierowanej walidacji krzyżowej,
- opracowanie głowicy do akwizycji sygnałów pochodzących z przetoki tętniczo-żylnej.

Rozdziały autorskie pozwoliły na udowodnienie postawionych tez przez doktoranta, dlatego można stwierdzić, że doktorant osiągnął wyniki pozwalające na stwierdzenie, że cel rozprawy został w pełni osiągnięty.

Poniżej w Uwagach zawarto kilka bardziej szczegółowych punktów dotyczących oceny rozprawy i uwag do ewentualnej dyskusji.

Uwagi ogólne:

1. Moim zdaniem uwagi wstępne w rozdziale 1 są chwilami zbyt odległe od tematu rozprawy.

Czy autor rozprawy mógłby udzielić odpowiedzi na poniższe pytania i sugestie?

2. Sądzę, że schemat blokowy z rys. 4.6 dla lepszej czytelności opisu budowania wektora cech powinien pojawić się na początku rozdziału 4.
3. Opis wektora cech (rozdział 4.4) nie jest w pełni czytelny, pomimo podania na str. 73 trzech zestawów cech. Nie jest do końca jasne czy wszystkie przedstawione wcześniej w tym rozdziale parametry czasowe (str. 71 i 74) były ujęte w wektorze/wektorach cech.
4. Nie do końca wiadome jest, ile przypadków stanu przetoki tętniczo-żylnej było przypisanych do poszczególnych klas.
5. Doktorant odniósł się do czasu przetwarzania danych (selekcja cech, tab. 5.1 i 5.2), ale warto by również podać całościowy czas przetwarzania i klasyfikacji (standardowy komputer współpracujący z zaprojektowaną głowicą oraz opracowanym oprogramowaniem, ale przede wszystkim opracowane rozwiązanie sprzętowo-programowe).
6. W przeglądzie literatury zabrakło nowszych pozycji w przeglądzie dotyczącym stanu przetoki tętniczo-żylnej (np. Yi-Chun Du and Alphin Stephanus, A Novel Classification Technique of Arteriovenous Fistula Stenosis Evaluation Using Bilateral PPG Analysis, Micromachines 2016, 7, 147; doi:10.3390/mi7090147).

7. Sądzę, że zwieńczeniem rozdziału 7 mógłby być podrozdział dotyczący opinii użytkowników (pacjentów, jak również personelu medycznego), przygotowanej na zasadzie np. krótkiej ankiety. Szkoda, że doktorant ograniczył się do stwierdzenia, że wstępne testy z udziałem pacjentów potwierdziły poprawność działania urządzenia. Co prawda doktorant zastrzega się w Podsumowaniu, że ten etap nie stanowił już przedmiotu rozprawy, ale ten aspekt może pozostawiać niedosyt u czytającego pracę.

8. Nietypowy jest końcowa część układu rozprawy, tj. najpierw podane są Dodatki, a dopiero później Bibliografia.

Uwagi szczegółowe, redakcyjne

Rozprawa doktorska jest przygotowana wyjątkowo starannie od strony edycyjnej, język rozprawy jest również bardzo poprawny. Zdarzają się drobne usterki, a ich nieliczne przykłady podane poniżej świadczą o jakości przygotowania tekstu pracy.

str. 64 „sporymi" –> wyrażenie kolokwialne
str. 67 ddo -> od
w j. polskim słowo rysunek, tabela powinny być pisane małą literą (np. str. 71: Rys. 4.3.; (Rys. 4.4) -> rys.
str. 91 w wesji -> wersji
str. 95 -> niepotrzebny przecinek przed oraz
str. 113 – „Idąc dalej tym tropem..." -> wyrażenie kolokwialne

Podsumowanie

Tematyka rozprawy mgra inż. Marcina Grochowiny jest bardzo istotna w kontekście diagnostyki medycznej, pozwalającej na ciągłe (bieżące) monitorowanie przetoki tętniczo-żylnej. Do osiągnięć rozprawy zaliczam bardzo staranne i rzetelne przeprowadzenie analizy cech, które wynikowo zawarte zostały w wektorze parametrów. Na uwagę zasługuje umiejętność bardzo jasnego przedstawiania analizowanego problemu oraz analitycznego wyciągania wniosków. Posiłkując się z kolei stwierdzeniem z rozprawy doktorskiej doktoranta: „Implementacja wyników badań w postaci aplikacji pracującej na dedykowanym systemie wbudowanym jest zwieńczeniem procesu badawczego.", nie można się nie zgodzić z tą uwagą i należy stwierdzić, że aspekt aplikacyjny jest niewątpliwie wartością dodaną tej rozprawy.

Sądzę też, że należy też docenić zarysowanie kierunków rozwoju prowadzonych prac, co - ze względu na zdobyte – niewątpliwie bogate - doświadczenie badawcze może stanowić ukoronowanie osiągniętych przez doktoranta wyników. W

szczególności ważny jest aspekt ewentualnego wprowadzenia opracowanej metody do praktyki klinicznej.

Najbardziej oryginalny wątek stanowi niewątpliwie zestawienie wskaźników jakości rozwiązania na podstawie analiz statystycznych oraz wskaźników jakości klasyfikacji. Reasumując, mogę stwierdzić, że Autor rozprawy wykazał należyty ogólny poziom wiedzy w zakresie będącym przedmiotem rozprawy oraz biegłość w prowadzeniu eksperymentów badawczych. Doktorant udowodnił słuszność postawionych hipotez badawczych i osiągnął postawiony cel rozprawy.

W podsumowaniu stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji rozprawa p. Marcina Grochowiny spełnia wymagania stawiane w Ustawie rozprawom doktorskim i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Ze względu na aspekt implementacyjny rozprawy oraz opublikowanie wyników rozprawy w czasopiśmie z listy JCR wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.