

Recenzja

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pana magistra inżyniera Krzysztofa Sieczkowskiego zatytułowana: "*Metoda ciągłego monitorowania zmienności czasu propagacji fali tętna w warunkach naturalnych zakłóceń*". Recenzja jest sporządzona na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny AEE WAT prof. dr. hab. inż. Andrzeja Dobrowolskiego przedstawione pismem WYCH/N/00386/2020 z dnia 16.07.2020. Recenzowana rozprawa została napisana pod kierownictwem pana prof. dr. hab. inż. Andrzeja Dobrowolskiego w 2020 roku.

1. Zawartość rozprawy

Przedstawiona rozprawa 9 rozdziałów poprzedzonych Wprowadzeniem, Streszczeniem i Wykazem skrótów, a głównemu tekstowi towarzyszy podsumowanie i spis bibliograficzny. Wprowadzenie zawiera zwięzłe uzasadnienie podejmowanej tematyki, sformułowanie tezy i opis zawartości rozprawy. W rozdziale pierwszym Autor przedstawia metody pomiaru propagacji fali tętna. Przegląd ten jest jednak pobieżny, na przykład wśród wymienionych sygnałów biomedycznych znajduje się sygnał balistokardiograficzny i seismokardiograficzny, których użycie w pomiarach propagacji fali tętna jest dyskusyjne, natomiast zupełnie zdawkowo wspomniano jedynie o mechanicznych lub optycznych detektorach odkształceń tętnic spowodowanych falą tętna lub wideopletyzmografią. W rozdziale drugim autor koncentruje się na sygnałach elektrokardiograficznym (EKG) i fotopletyzmograficznym (PPG) przedstawiając zasady pomiarów każdego z nich. Przy okazji zwracam uwagę, że skrót EKG jest z j. polskiego (lub niemieckiego), natomiast skrót PPG jest anglojęzyczny. W zakresie dotyczącym opisu EKG chciałbym zwrócić uwagę, że sformułowanie 'odprowadzenia Einthovena' jest w elektrokardiografii rozumiane zupełnie inaczej niż przedstawia to Rysunek 21b. Zgadzam się z ze słowami Autora, że w zależności od typu urządzenia rozmieszczenie elektrod może być odmienne, ale zaprezentowane odprowadzenia ani też odprowadzenia stosowane w dalszym ciągu rozprawy przez Autora nie są odprowadzeniami Einthovena. W opisie dotyczącym pletyzmografii autor wymiennie stosuje pojęcia ciśnieniowej fali tętna, która rozchodzi się szybko i fali przepływu, która jest znacznie wolniejsza ze względu na bezwładność krwi. W dalszej części rozdziału 2. Autor opisuje rozmaite typy zakłóceń oraz parametry pozwalające zbudować indeks jakości sygnału. Niektóre z wymienionych parametrów, takie jak odchylenie standardowe skośność czy kurtoza, są elementami opisu statystycznego dowolnego sygnału, podczas gdy wskaźnik perfuzji jest parametrem specyficznym związanym z sygnałem fotopletyzmograficznym. W dalszej części Rozdziału 2. Autor dokonuje przeglądu literatury w zakresie metod wyznaczania jakości sygnałów EKG i PPG, a także metod przetwarzania tych sygnałów.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Sieczkowskiego

Podrozdział 2.5 zatytułowany "*Przetwarzanie sygnału w EKG i PPG*" nie dotyczy przetwarzania, a jedynie jest kontynuacją opisu metod poprawiania jakości sygnału. Autor koncentruje się tutaj na filtracji lub przetwarzaniu statystycznym zdawkowo tylko wspominając o metodach takich jak filtracja adaptacyjna czy wykorzystanie sztucznej inteligencji. W końcowej części Rozdziału 2. znajduje się jednostronicowy przegląd literatury związany z metodami wyznaczania czasu propagacji fali tętna. Rozdział 3. rozprawy zawiera opis stanowiska badawczego. Zawiera dość dokładnie rozpisane zastosowane protokoły transmisji (których zaprojektowanie Autor zaliczył do swych głównych osiągnięć), nie znalazłem za to informacji o separacji galwanicznej toru rejestrującego elektrokardiogram. Szczęśliwie informacja taka jest w artykule opublikowanym przez Doktoranta i współpracowników w czasopiśmie *Biocybernetics and Biomedical Engineering* w 2019 roku. W rozdziale 3. Autor prezentuje jeszcze interfejs użytkownika oprogramowania do wizualizacji danych oraz schemat budowy proponowanego algorytmu do obliczania czasu propagacji fali tętna. W Rozdziale 4. Autor przedstawia trzy warianty filtracji sygnału. Pierwszy z nich polega na okienkowaniu widma sygnału, drugi zakłada użycie filtrów o skończonej odpowiedzi impulsowej, natomiast trzeci - wykorzystanie dyskretnej transformacji falkowej. W pierwszej z tych metod Autor proponuje zerowanie harmonicznych w określonych zakresach częstotliwości. Odpowiada to nałożeniu na widmo sygnału okna prostokątnego i powoduje powstawanie oscylacji w dziedzinie czasu. Druga z metod filtracji stosowana jest poprawnie, choć - jak Autor zauważa - jej wadą jest konieczność użycia filtrów znacznych rzędów (odpowiednio 600 i 150). Stosowanie filtrów o skończonej odpowiedzi impulsowej (FIR) jest słusznie uzasadnione przez Autora koniecznością zapewnienia liniowej charakterystyki fazowej. To wymaganie można jednak spełnić także za pomocą dwóch kaskadowo połączonych filtrów o nieskończonej odpowiedzi impulsowej (IIR) filtrując sygnał dwukrotnie przy wzajemnie odwróconej osi czasu. Trzecia z metod, zakładająca użycie odwracalnej transformacji falkowej, podporządkowuje dostępne częstotliwości odcięcia filtrów wartościom podwielokrotności częstotliwości próbkowania. Filtracja taka oferuje wprawdzie możliwość adaptacji charakterystyki przepustowej w czasie, ale nie jest to zaleta wykorzystywana przez Autora w proponowanym zastosowaniu. Przy okazji filtracji falkowej warto zwrócić uwagę, że starania autora polegające na zastosowanie falek o najkrótszym możliwym nośniku mają skutek uboczny w postaci mniejszej stromości charakterystyki częstotliwościowej tych falek (filtrów).

Rozdział 5. rozprawy przedstawia algorytm detekcji punktów charakterystycznych sygnału EKG. Od razu na początku przyznam, że nie znalazłem uzasadnienia dlaczego Autor nie zastosował żadnego z licznych dostępnych i sprawdzonych detektorów zespołu QRS, a zaproponował (i w bardzo ograniczonym zakresie przetestował) własny. Przedstawiona propozycja nie jest poprzedzona analizą literatury w zakresie detekcji zespołu QRS, na podstawie której można byłoby ewentualnie uzasadnić nieprzydatność opublikowanych wcześniej metod i konieczność realizacji metody autorskiej. Podobnie jest w przypadku sygnału fotopletyzmo graficznego, dla którego Autor proponuje punkty charakterystyczne w miejscach odpowiadających maksimum pierwszej i drugiej pochodnej, a następnie proponuje dość złożony sposób unikania podwójnej detekcji maksimum fali tętna. Szkoda, że w arsenale zaproponowanych metod nie znalazły się procedury aproksymacyjne polegające np. na przybliżaniu sygnału fizjologicznie uzasadnionym wzorcem. W poszukiwaniach punktów charakterystycznych Autor nie wykorzystał wzajemnej zależności wystąpienia zespołów QRS

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Sieczkowskiego

i maksimum fali tętna. Rozdział 6. przedstawia algorytm oceny jakości sygnału. Algorytm ten jest oparty na porównaniach bieżących fragmentów sygnałów EKG oraz PPG z wzorcem ustalonym adaptacyjnie za pomocą uśredniania fragmentów sygnału wybranych w oknie czasu. Porównanie jest prowadzone przez procedury testowe, które wyznaczają oceny cząstkowe przetwarzane następnie na indeks jakości. W przypadku EKG punktem synchronizacji reprezentacji kolejnych uderzeń serca jest wierzchołek załamka R, natomiast w przypadku sygnału PPG punktami charakterystycznymi są wierzchołki pierwszej i drugiej pochodnej sygnału. Wydaje się, że tworzenie wzorców przy założeniu okresowości sygnałów EKG i PPG jest sporym ograniczeniem, gdyż nie uwzględnia lokalnych zmienności interwału międzyuderzeniowego, w tym na przykład arytmii oddechowej. Ponadto w przypadku sygnału EKG, zmiana rytmu serca w różnym stopniu wpływa na wydłużenie lub skrócenie poszczególnych odcinków ewolucji serca (w przypadku załamka T istnieją dość dobrze zdefiniowane wzory korekcyjne takie jak formuła Bazetta). Zaproponowane przez Autora, siedem wskaźników jakościowych dotyczy spodziewanych parametrów sygnału takich jak: amplituda szczytu załamka R, stopień podobieństwa do wzorca elektrokardiogramu, amplituda fali skurczowej PPG, stosunek amplitud sygnału narastającego i opadającego, długość fragmentu oraz dwa warianty podobieństwa do wzorca. Dobór wskaźników jest arbitralny, Autor nie przywołuje żadnych przykładów z literatury a jedynie proponuje własne rozwiązania. Dla współczynników EPS oraz PPS oznaczających lokalne podobieństwo sygnałów elektrokardiograficznych i lokalne podobieństwo sygnałów fotopletyzmo graficznych Autor wyznacza strefy podobieństwa w sygnale (w osi amplitudy), a sygnał dzieli na sektory (w osi czasu). W przypadku sygnału EKG podział ten jest związany z załawkami Q i S (zgodnie z założeniami odprowadzeń Einthvena zawsze ujemnymi, ale nie zawsze wyraźnie zaznaczonymi), a w poszczególnych sektorach obowiązują różne wartości spodziewanego podobieństwa. W przypadku sygnału PPG granice sektorów stanowią miejsca maksimum pochodnych oraz odległości będące odsetkami długości zbocza opadającego. W tym przypadku jednak we wszystkich sektorach obowiązują te same wartości spodziewanego podobieństwa co stawia pod znakiem zapytania sens wydzielenia sektorów.

W rozdziale 7. Autor przedstawia "zaawansowany" algorytm detekcji punktów charakterystycznych w sygnale EKG i PPG. Za cenę dodatkowej złożoności i czasu obliczeń algorytm zwraca prawidłowe wyniki nawet w obecności znacznych zakłóceń. W tym przypadku również budowany jest wzorec każdego z sygnałów, tym razem jednak Autor testuje metodę autokorelacji, a następnie w odniesieniu do sygnału EKG metodę opartą na lokalizacji maksimum załamka R, a w przypadku sygnału PPG także metodę bazującą na pierwszej pochodnej i dwie metody bazujące na synchronizacji fragmentów. Drugim elementem tego algorytmu jest blok wyznaczenia punktów charakterystycznych, którymi w przypadku elektrokardiogramu są maksima załamka R, a w przypadku sygnału PPG maksima fali tętna. Wreszcie ostatnim elementem algorytmu jest blok selekcji danych, którego zadaniem jest wybór najbardziej wiarygodnych wyników spośród położenia punktów wyznaczonych w różnych oknach przetwarzania, a więc z użyciem różnych wzorców.

Rozdział 8 przedstawia blok implementujący wyznaczenie wartości wypadkowych i obliczanie parametrów czasu propagacji fali tętna. Oba bloki korzystają z punktów charakterystycznych wyznaczonych przez algorytm podstawowy oraz zaawansowany, a także z indeksów jakości wyznaczonych przez algorytm przedstawiony w Rozdziale 6. Rozdział 8. kończy podsumowanie badań testowych, w którym autor stwierdza zerowy błąd detekcji dla

załamka R sygnału EKG oraz błąd na poziomie 0,3 ms i 0,03 ms odpowiednio dla wartości maksymalnej pierwszej i drugiej pochodnej sygnału. Rozdział 9 jest opisem badań eksploatacyjnych zaproponowanej metody, w tym poprawności działania bloku ocen jakości sygnału, dokładności wyznaczania czasu propagacji fali tętna dla sygnałów o różnej jakości oraz badania zmienności czasu propagacji fali tętna. Na podstawie wykonanych pomiarów Autor stwierdza poprawne identyfikowanie sygnałów zakłóconych oraz niewielki rozrzut wyznaczonych czasów propagacji fali tętna. W podsumowaniu autor wykazuje, że przeprowadzone badania potwierdzają postawioną we wprowadzeniu tezę, że *"możliwe jest wyznaczenie zmienności czasu propagacji fali tętna z dokładnością wystarczającą do współczesnych zastosowań aparatury diagnostycznej"*.

2. Znaczenie dokonań Autora dla rozwoju dyscypliny

Tematyka podejmowana przez Doktoranta jest niewątpliwie bardzo ważna zważywszy epidemiologiczny zasięg chorób sercowo-naczyniowych. Dodatkowo, badanie fotopletyzmograficzne jest tanie i łatwe w wykonaniu, nie budzi zastrzeżeń natury higienicznej. Możliwość wykorzystania parametrów propagacji fali tętna wykracza daleko poza zagadnienia przedstawione przez Doktoranta - obecnie wiąże się z nimi nadzieję na nieinwazyjny (a nawet bezdotykowy) pomiar ciśnienia krwi. Tematyka fotopletyzmografii jest wciąż chętnie rozwijana i wydaje się, że dość sporo białych plam na tym obszarze pozostało jeszcze do wyjaśnienia.

Za istotne osiągnięcia naukowe doktoranta uważam:

- opracowanie metod wyznaczenia punktów charakterystycznych w sygnałach EKG i PPG,
- opracowanie metody oceny jakości sygnałów umożliwiającej klasyfikacji odcinków w czasie rzeczywistym, a zatem interaktywne (tj. z opóźnieniem 10-20 s) poprawianie lokalizacji czujników oraz maskowanie alarmów powodowanych przez artefakty,
- istotnym osiągnięciem w którym doktorant pełnił ważną rolę jest skonstruowanie wielokanałowego rejestratora opisanego w artykule naukowym oraz pobranie za jego pomocą bazy zapisów wielokanałowych EKG i PPG.

Wymienione osiągnięcia były możliwe dzięki pracom konstruktorskim, w szczególności opracowaniu metod transmisji, archiwizacji i wizualizacji sygnałów w czasie rzeczywistym. Doktorant dał się przy tym poznać jako biegły konstruktor urządzeń elektronicznych, rozwiązań telekomunikacyjnych i programowych, a ponadto wykazał się znajomością zasad przetwarzania sygnałów cyfrowych.

Spis bibliograficzny zawiera 178 pozycji, wśród których 6 jest publikacjami współautorskimi Doktoranta. W trzech przypadkach są to publikacje konferencyjne a w trzech – publikacje w czasopiśmie. Publikacje są związane z tematyką rozprawy, te najważniejsze dotyczą budowy multimodalnego urządzenia pomiarowego, monitorowania zmian ciśnienia tętniczego i monitorowania zmienności czasu propagacji fali tętna.

3. Zagadnienia do dyskusji

Przedstawione rozprawa na moim zdaniem dwa istotne mankamenty. Pierwszym z nich jest niewystarczające rozeznanie Autora w zakresie nowoczesnych metod przetwarzania elektrokardiogramu i sygnału PPG, a także baz zapisów które służą do oceny algorytmów przetwarzających te sygnały. Wydaje się, że znaczna część pracy Doktoranta mogłaby zostać zaoszczędzona gdyby skorzystał On z gotowych algorytmów wyznaczania punktów charakterystycznych elektrokardiogramu. Jeśli jednak konstruowanie własnego algorytmu

było dostatecznie uzasadnione, należało zweryfikować jego działanie z użyciem powszechnie dostępnych i dobrze opisanych bas sygnałów dostępnych chociażby na portalu Physionet.

Przykład:

MIMIC-III Waveform Database Matched Subset: Physiological signals (including continuous ECG, PPG, ABP, and other signals) that are associated with patients in the MIMIC-III Clinical Database. <https://physionet.org/content/mimic3wdb-matched/1.0/>

Drugim z mankamentów jest prowadzenie badań w oderwaniu od danych referencyjnych. W zakresie detekcji sygnałów o niższej jakości Doktorant oparł się na opisie eksperckim, natomiast trudno powiedzieć na jakiej podstawie wnioskuje On, że średnia wartość błędu detekcji czasu propagacji fali tętna wynosi 1,27 milisekundy. Takie stwierdzenie wymagałoby przecież odniesienia do wartości pomiarów inną metodą uważaną za referencyjną.

Podczas lektury rozprawy zauważyłem sporo niedopowiedzeń dlatego poproszę Autora o komentarz do niektórych z nich podczas obrony. W szczególności:

- Na stronie 29. Autor definiuje prędkość rozchodzenia się fali tętna. Poproszę o wyjaśnienie czy dotyczy ona propagacji fali ciśnienia krwi, propagacji odkształceń ściany naczynia czy poruszania się cząsteczek krwi.
- Na stronie 39. Autor wspomina że do wyznaczania czasu PAT wymagane jest stosowanie odrębnego sensora pracy serca i w tej roli proponuje sygnał elektrokardiograficzny. Poproszę o analizę w jaki sposób użycie innych sensorów pracy serca może poprawić dokładność pomiaru prowadzonego z użyciem dwóch różnych modalności.
- Na stronie 46. Autor opisuje komunikację urządzenia pomiarowego z oprogramowaniem na komputerze PC. Poproszę o wyjaśnienie w jaki sposób obsługa portu USB w Matlabie i w wielowątkowym systemie operacyjnym wpływa na opóźnienie transmisji danych.
- Na stronie 59. Autor uzasadnia stosowanie falki o krótkim nośniku zwartym koniecznością zmieszczenia nośnika w długości reprezentacji sygnału na wysokich poziomach do kompozycji. Poproszę o analizę jakie zjawiska zachodzą wówczas gdy długość nośnika falki jest porównywalna lub większa od długości reprezentacji.
- cała procedura przetwarzania opisana w Rozdziale 5. wykorzystuje *jednosekundowy cykl przetwarzania*. Poproszę Autora o uzasadnienie takiego wyboru, który wydaje się niekorzystny wobec ciągłych wahań częstotliwości rytmu serca.
- Na stronie 80. Autor opisuje metodę wyznaczania wzorca na podstawie średniego interwału międzyuderzeniowego. Poproszę o uzasadnienie tej decyzji, która wydaje się niewłaściwa wobec znacznej zmienności rytmu serca.
- Na stronie 104. Autor definiuje kryteria wzorca sygnału PPG, w tym kryterium minimalnej amplitudy powyżej jednego nanoampera. Poproszę o wyjaśnienie jaki procent pełnego zakresu pomiarowego stanowi ta wartość.
- Na stronie 114. Autor porównuje metodę minimalnego błędu oraz metodę korelacji wzajemnej w roli detektora dopasowania sygnałów. Poproszę o wyjaśnienie – z użyciem przykładów dla których metoda *xcorr* okazała się lepsza – czy nie jest przypadkiem tak, że metoda minimalnego błędu przedstawia punktowe, a więc zwykle bardziej optymistyczne wyniki dopasowania niż metoda korelacji.

- Na stronie 131. Autor przedstawia metodę wyznaczania wzorca EKG opierającą się na synchronizacji fragmentów w punkcie występowania maksimum załamka R. Proszę o wyjaśnienie co Autor uważa za maksimum załamka R oraz z jaką dokładnością jest wyznaczane jego położenie.
- Na stronie 132. przedstawiono tabelę definiującą długości sygnału porównywanego przed i za załamkiem R. Poproszę o uzasadnienie wartości parametrów A i B.
- Na stronie 140. Autor przedstawia opis weryfikacji dokładności znajdowania punktów charakterystycznych w sygnale PPG. W opisie tym stwierdza, że *'dla każdego sygnału wyznaczono ręcznie wszystkie lokalizacje występowania w czasie maksimum pierwszej oraz drugiej pochodnej'*. Poproszę o wyjaśnienie co Autor rozumie przez maksimum pierwszej i drugiej pochodnej i z jaką dokładnością były wyznaczane ręcznie ich położenia.
- Na stronie 145. Autor pisze, że lokalizacje punktów charakterystycznych są wyznaczone za pomocą dwóch równoległe i niezależnie działających algorytmów, a ich wynikiem jest para lokalizacji. Proszę o wyjaśnienie w jaki sposób wybierana jest lokalizacja właściwa.

Pod względem edytorskim rozprawa jest dość staranna, niestety jej chaotyczny układ oraz skomplikowane nazewnictwo utrudniają czytanie. Dość liczne są błędy gramatyczne, w szczególności nadużywanie imiesłowów przysłówkowych bez jawnie wskazanego podmiotu, częste jest niewłaściwe użycie słów na przykład 'dryf' (izolinii) zamiast 'dryft', 'poddany' (na wejście) zamiast 'podany' i podobnych. Zadziwiające, ale nie polecane do naśladowania jest to, że skomplikowane procedury przetwarzania sygnałów zostały opisane bez użycia choćby jednej formuły matematycznej. Również struktura tekstu jest zbyt uproszczona, co powoduje że niektóre podrozdziały mają objętość wielu stron.

4. Wniosek końcowy

Doktorant poprawnie sformułował problem naukowy, istotny z punktu widzenia zastosowań pomiarów propagacji fali tętna i podjął próbę rozwiązania go zakończoną sukcesem. Praca jest raportem wielu eksperymentów z zakresu przetwarzania sygnałów i zawiera szereg elementów interesujących z punktu widzenia rozwoju automatycznych metod przetwarzania sygnału PPG.

Pomimo dość sporej liczby wskazanych mankamentów stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska zatytułowana: *„Metoda ciągłego monitorowania zmienności czasu propagacji fali tętna w warunkach naturalnych zakłóceń”*, spełnia wymagania Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym (z dnia 14 marca 2003 roku) oraz Ustawy Przepisy wprowadzające ustawę Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (z dnia 3 lipca 2018 roku) w zakresie stopnia doktora nauk inżynierijno-technicznych w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika. Recenzent wnioskuje do Komisji **o dopuszczenie rozprawy doktorskiej pana mgr. inż. Krzysztofa Sieczkowskiego do publicznej obrony.**

Prof. Krzysztof Sieczkowski