

Recenzja

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pana magistra inżyniera Aleksandra Sobotnickiego zatytułowana: "*Metoda estymacji objętości wyrzutowej sztucznej komory serca z wykorzystaniem techniki elektroimpedancyjnej*". Recenzja jest sporządzona na zlecenie Dziekana Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej, prof. dr hab. Natalii Golnik, przedstawione pismem WMt521.11.2019 z dnia 6.05.2019. Recenzowana rozprawa została napisana pod kierownictwem pana dr hab. inż. Adama Gacka, profesora Instytutu Techniki i Aparatury Medycznej w Zabrze w 2019 roku.

1. Zawartość rozprawy

Przedłożona rozprawa składa się z Wstępu, Wprowadzenia, Omówienia celu pracy, rozdziału poświęconego pomiarowi ciśnienia krwi w zewnętrznej komorze wspomagającej pracę komór serca (*External Ventricular Assist Device, ExVAD*), rozdziału opisującego bioimpedancyjny pomiar objętości wyrzutowej komory wspomagającej oraz rozdziału dotyczącego badania badań eksperymentalnych in vivo na zwierzęciu. Rozdział siódmy podsumowuje rozprawę i zawiera wnioski końcowe. Treść rozprawy uzupełniona jest przez bibliografię, streszczenie w języku polskim i angielskim, spis rysunków, spis tabel oraz spis oznaczeń.

Po krótkim wstępie autor przechodzi do wprowadzenia, w którym opisuje układ sercowo-naczyniowy, sztuczne pompy służące do wspomagania naturalnego serca (skupiając większość uwagi na pompach pneumatycznych) oraz zagadnienia dotyczące pomiarów bioimpedancyjnych. Następnie autor przedstawia cel pracy oraz jej tezę w brzmieniu: *Metody bioimpedancyjne umożliwiają elektryczną estymację objętości wyrzutowej sztucznej komory serca*. Kolejny następuje rozdział czwarty poświęcony pomiarowi ciśnienia w komorze wspomagającej. Rozdział ten należy zaliczyć do obszarów wiedzy zastanej przez doktoranta, ponieważ jego rzeczywistym autorem jest inny badacz, współpracownik doktoranta w projektach, pan magister inżynier Jan Mocha. Kolejny rozdział (piąty) poświęcony jest zagadnieniom bioimpedancyjnego pomiaru objętości wyrzutowej komory wspomagającej i stanowi główny wkład koncepcyjny i eksperymentalny doktoranta. W dwóch podrozdziałach rozdziału 5 opisany jest eksperymentalny moduł pomiarowy oraz zagadnienia związane z wyznaczeniem rzeczywistej zmiany impedancji i parametrów objętościowych. W szczególności zmiany te przedstawione są dla naturalnego serca oraz dla odpowiadającego mu urządzenia technicznego służącego do wspomagania serca. W tym też rozdziale autor przedstawia zasadnicze elementy opracowanego przez siebie algorytmu służącego do detekcji charakterystycznych punktów zapisu bioimpedancyjnego (elektroreograficznego). W rozdziale szóstym opisane są badania eksperymentalne przeprowadzone na zwierzęciu: konstrukcja układu pomiarowego, przygotowanie protokołu pomiarowego oraz walidacja metody pomiaru objętości i przepływu krwi. Omówiono też ograniczenia zastosowania metody impedancyjnej do pomiaru objętości wyrzutowej komory wspomagania. Spis bibliograficzny zawiera 157 pozycji, wśród których 7 jest publikacjami współautorskimi doktoranta, a dodatkowe 3 są patentami krajowymi, w przygotowaniu których doktorant brał udział. Publikacje te to głównie konferencje krajowe i podrzędne czasopisma z lat 2010-14, brak natomiast publikacji w czasopismach z listy A.

2. Znaczenie dokonań Autora dla rozwoju dyscypliny

Tematyka podejmowana przez autora należy do niszowych, ale bardzo interesujących rozwiązań wspierających wspomaganie pracy komór serca. Pomiary przepływu krwi w sztucznej komorze serca umożliwiają adaptację i wydajności na bieżąco w zależności od zmieniającego się zapotrzebowania ze strony krążenia obwodowego. Wprawdzie tematyka pomiarów bioimpedancyjnych jest chętnie podejmowana przez różne zespoły badawcze, ale zwykle prace te dotyczą krążenia systemowego człowieka. W tym miejscu należy zauważyć, że pomiar bioimpedancyjny wprowadzany jest jako alternatywa dla tradycyjnego pomiaru objętości i przepływu metodą ultradźwiękową. Oczekiwane jest więc osiągnięcie podobnej dokładności i niezawodności pomiaru przy jednocześnie znacznie niższych kosztach i możliwości prowadzenia pomiarów w sposób ciągły.

Oceniana rozprawa zawiera szereg nowatorskich rozwiązań przyczyniając się do rozwoju inżynierii biomedycznej, a także przynosząc praktyczne realizacje układu pomiarowego i oprogramowania. Do oryginalnych osiągnięć autora zaliczam:

- opracowanie elektrod pomiarowych wykorzystujących tytanowe pierścienie zastawek wlotowej i wylotowej mających bezpośredni kontakt z krwią,
- laboratoryjne przebadanie metody bioimpedancyjnej pomiaru objętości wyrzutowej komory wspomaganie serca przeprowadzone przy użyciu krwi zwierzęcej,
- badania eksperymentalne wykorzystujące model mechaniczny niewydolnej komory naturalnego serca (za pomocą drugiego urządzenia VAD) i zbadanie jej boczniującego wpływu na pomiar impedancyjny objętości wyrzutowej komory wspomagającej,
- zaproponowanie i przetestowanie algorytmu przetwarzającego sygnał bioimpedancyjny oraz wykorzystującego synchronizujący znacznik pochodzący z elektrokardiogramu do wyznaczania charakterystycznych punktów krzywej bioimpedancyjnej,
- implementację tego algorytmu do komercyjnego systemu nadzorującego ORTO-LBNP służącego do badań w warunkach niedotlenienia niedokrwiennego oraz stresu ortostatycznego,
- opracowanie autorskich kryteriów decyzyjnych dla numerycznej identyfikacji fal na przebiegach sygnału bioimpedancyjnego oraz sygnału ciśnienia w króćcu wylotowym komory wspomaganie,
- opracowanie protokołu pomiarowego i przeprowadzenia eksperymentu na zwierzęciu sprawdzającego zachowanie układu pomiarowego przepływu metodą bioimpedancji w warunkach zastosowania komory wspomagającej w rzeczywistym systemie krążenia,
- zbudowanie prototypowego urządzenia pomiarowego którego układ elektroniczny jest montowany bezpośrednio na czaszy pneumatycznej komory POLVAD EXT.

Osiągnięcie tych celów szczegółowych doprowadziło do wykazania poprawności postawionej tezy twierdzącej, że *metody bioimpedancyjne umożliwiają efektywną estymację objętości wyrzutowej sztucznej komory serca.*

Przedstawione rozprawa ma charakter przede wszystkim inżynierski i aplikacyjny, a działania podjęte w celu udowodnienia prawdziwości tezy wykorzystywały metodykę symulacyjną i eksperymentalną. Kandydat jest więc przede wszystkim konstruktorem, który konsekwentnie dąży do spełnienia określonych założeń technicznych, w tym przypadku dotyczących urządzenia przeznaczonego do wspomaganie terapii krążenia. O poważnym podejściu praktycznym świadczy także znajomość i uwzględnienie norm dotyczących bezpieczeństwa aparatury medycznej. Przykładowo: dbałość o zabezpieczenie pacjenta przed porażeniem poprzez zastosowanie bariery galwanicznej oraz dbałość o zabezpieczenie prototypowego urządzenia przed impulsem defibrylatora. Istotnym elementem prac badawczych, choć może mniej podkreślonym w treści rozprawy jest fakt, że doktorant przygotowując ją pracował w projekcie Polskie Sztuczne Serce, w którym zetknął się z wieloma zagadnieniami praktycznymi dotyczącymi wspomaganie krążenia.

3. Zagadnienia do dyskusji

Rozprawa jest przedstawiona dość starannie pod względem edytorskim, niewiele w niej błędów literowych. Zawiera starannie wykonane rysunki, stanowczo jednak brak tabel przedstawiających rezultaty ilościowe. Wraz z wybiórczym przedstawieniem danych na niektórych wykresach (np. na 5.25a przedstawiono tylko wyniki eksperymentów 3, 6, 7 i 12) powoduje to wrażenie obniżające wartość naukową otrzymanego wyniku. Podczas lektury znalazłem kilka też zagadnień niewyjaśnionych lub dyskusyjnych na które warto byłoby odpowiedzieć podczas obrony. Chciałbym zatem poprosić doktoranta o skomentowanie następujących zagadnień:

- str. 46 jeśli komora jest całkowicie wypełniona krwią i wraz z jej objętością zmienia swój kształt, to można powiedzieć, że droga prądu pomiędzy elektrodami (rys 2.18) jest w całości wypełniona krwią niezależnie od fazy cyklu komory; jaka jest więc zasada fizyczna pomiaru?
- str. 47 jaka jest zależność przewodnictwa krwi od orientacji przestrzennej erytrocytów? jak ta orientacja zmienia się podczas cyklu komory? Str. 60 rozumiem, że erytrocyty uporządkowane mają niższą impedancję, czy ma znaczenie kierunek przepływu prądu (prostopadły, równoległy) w stosunku do orientacji erytrocytów?
- str. 56 szkoda, że porównanie charakterystyk czujników ciśnienia zostało dokonane jedynie jakościowo, a prezentacja składa się z dwukolorowych wykresów, można było wykorzystać funkcje typu korelacji wzajemnej i podać wynik ilościowy np. w zależności od ciśnienia.
- str. 67 wyniki eksperymentów są przedstawione w sposób opisowy, a nie ilościowy, przedstawiona jest naprawdę tylko dyskusja będąca autorskim komentarzem, interpretacją nieujawnionych wyników liczbowych.
- str. 80 jaka jest dokładność zaprezentowanego algorytmu w porównaniu z punktami B, C, X wskazanymi przez eksperta?
- str. 81 autor stwierdza, że zbudował bazę sygnałów rejestrowanych wspólnie, ale brak specyfikacji technicznej: ile sygnałów, jak mierzonych, i od pacjentów w jakim stanie baza zawiera,
- str. 83 stwierdzenie: '*Korekcja sposobu... wpłynęła na uzyskanie coraz dokładniejszych wyników*' jest nieuprawnione: (1) ew. uzasadnienie znajduje się później, (2) czy chodzi o punkty B, C, X? (3) pomiar referencyjny (rys. 5.21) odnosi się do objętości, a nie do położenia punktów, (4) na czym polegała korekcja?
- str. 91 poproszę o wyjaśnienie dlaczego '*...dla małych wartości objętości wyrzutowej występuje 'zwiększony wpływ turbulencji przepływu*'.
- str. 95 poproszę o wyjaśnienie dlaczego schemat (rys. 6.1) zawiera cztery torry pomiarowe ciśnienia, natomiast tabela 6.1 zawiera wyniki pomiaru trzech torów.

W rozprawie znalazłem jeszcze dość sporo nieścisłości które utrudniają czytanie niekiedy wprowadzając czytelnika w błąd lub powodując niejednoznaczną interpretację tekstu. Przykładowo:

- str. 41 co oznacza stwierdzenie: '*pojemność jest idealną pojemnością*'.
- str. 48 teza nie może być formułowana na podstawie badań, klasycznie teza jest przypuszczeniem, a jej prawdziwość weryfikowana w toku badań,
- str. 49 przedstawianie treści rozprawy w niemal połowie jej objętości jest niecelowe,
- str. 58 struktura tekstu rozdziału 4 jest wadliwa: jedynym podrozdziałem jest 4.1, a jego podrozdziałami niższego rzędu: 4.1.1. i 4.1.2.,
- str. 59 jak rozumieć zdanie nt.: '*sinusoidalnego prądu o stałej amplitudzie*'? na str. 46 była mowa o metodzie stałoprądowej, opis na str. 60 ponownie dotyczy metody stałoprądowej, a na dalszych jest wymieniana częstotliwość prądu,
- str. 64 brakuje specyfikacji jaka była rozdzielczość i zakres pomiarowy układu po modyfikacji,

- str. 73. jak rozumieć: 'cykl pracy naturalnego serca i komory wspomagającej będą zsynchronizowane oraz fazy wyrzutu nie będą się czasowo pokrywały' ? (specyficzne użycie pojęcia 'synchroniczny' jeszcze dwukrotnie później! str. 91 i 201),
- str. stwierdzenie, że *wyniki Natkani i in. nie są wiarygodne ani właściwe* nie zostało wystarczająco uzasadnione,
- str. 74 struktura tekstu podrozdziału 5.1 jest wadliwa: jedynym jego podrozdziałem niższego rzędu jest 5.1.1.,
- str. 80 brak analizy konsekwencji opóźnień wyznaczania załamek PQRST na działanie algorytmu wyznaczającego B, C, X. W jakim celu wyznaczane są załamki PQST, skoro wykorzystywany jest tylko (znacznie łatwiejszy do wyznaczenia) R?
- str. 89 powtórzona część podpisu rys. 5.24,
- str. 97 struktura tekstu podrozdziału 6.1 jest wadliwa: jedynym jego podrozdziałem niższego rzędu jest 6.1.1.,
- str. 98 brak opisu modułu pomiarowego EKG (schemat 6.1 nie zawiera takiego toru),
- str. 101 opis celów badań powinien się znaleźć na początku, przed opisem eksperymentu na zwierzęciu.

Czytanie przedstawionej rozprawy i ocenę wpływu autora na rozwój dyscypliny utrudnia także niestandardowy układ treści rozprawy. W szczególności, raport z przeprowadzonych studiów literaturowych oczekiwany jest po zaproponowaniu metody, ale jeszcze przed jej zaprojektowaniem. Ze studiów tych bowiem wynika teza, która wyznacza kierunek prac badawczych doktoranta. Ponadto wskazane jest wyraźne rozgraniczenie wiedzy wytworzonej przez innych autorów, a stanowiącej podstawę działań doktoranta od wiedzy wytworzonej przez niego stanowiącej oryginalny wkład w rozwój dyscypliny. W przypadku tej rozprawy treść rozdziału czwartego należy do osiągnięć innego autora (co zostało wyraźnie zaznaczone). Tym niemniej dobrze, że została tutaj dokładnie opisana, ponieważ układ pomiaru ciśnienia stanowi integralną część systemu zaprojektowanego i rozwijanego w ramach przedstawionej rozprawy.

Wymienione zagadnienia dyskusyjne i drobne mankamenty w niczym nie umniejszają osiągnięcia naukowego, a moje spostrzeżenia formułuję tu wyłącznie w celu wykorzystania ich przez Doktoranta do poprawy Jego przyszłych publikacji.

4. Wniosek końcowy

Doktorant poprawnie sformułował problem naukowy, istotny z punktu widzenia ciągłego nadzorowania pracy sztucznej komory wspomagającej krążenie (pompy pneumatycznej). Praca jest interesująca naukowo i wdrożeniowo. Otrzymane rezultaty mogą stanowić punkt wyjścia do kolejnych badań np. mających na celu wykrywanie patologii krążenia systemowego lub optymalizację sterowania wydajnością w zależności od obciążenia fizycznego.

Przedstawiona rozprawa doktorska zatytułowana: „*Metoda estymacji objętości wyrzutowej sztucznej komory serca z wykorzystaniem techniki elektroimpedancyjnej*”, mimo kilku wskazanych usterek spełnia wymagania Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym (z dnia 14 marca 2003 roku, Dziennik Ustaw Nr 65, poz. 595) w zakresie stopnia doktora nauk technicznych. Recenzent wnioskuje do Komisji o **dopuszczenie rozprawy doktorskiej pana mgr inż. Aleksandra Sobotnickiego do publicznej obrony.**