Warszawa 10.07.2013

prof. dr hab. inż.
Mieczysław Szustakowski
Instytut Optoelektroniki
Wojskowa Akademia Techniczna

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Grzegorza Koniecznego
pt. ”Nowe metody pomiarowe wyznaczania objętości chwilowej części krwistej w pulsacyjnej komorze wspomagania serca”

promotor: prof. dr. hab. inż. Tadeusz Pustelny
promotor pomocniczy: dr. inż. Zbigniew Opilski

1.Ogólna charakterystyka rozprawy:

1.1) Geneza koncepcji pracy.

Tak się złożyło, że w czasie pracy nad recenzją pojawiły się dwa doniesienia medialne o wprowadzeniu do użytku w Polsce w Ośrodku Kardiochirurgii w Zabrzu dwóch sztucznych serc do prób klinicznych. Jedno sztuczne serce jest produkcji amerykańskiej zewnątrz-ustrojowe, drugie wewnątrz-ustrojowe jest opracowane przez ośrodek francuski kierowany przez prof. Alaina Carpientera. Przewidywane wdrożenia sztucznego serca wewnątrzustrojowego (wszczepionego zamiast serca naturalnego) przewiduje się w 2014 roku. Jak ważne jest to wydarzenie w medycynie potwierdzają liczby - w Polsce w ubiegłym roku na przeszczep serca czekało 400 osób a serce otrzymało tylko 79 osób. A zatem przeszczep sztucznego serca to ratunek dla wielu chorych.

Prace nad sztucznym sercem podjęto przed około 20 laty w kilku ośrodkach badawczych w świecie. Jak wiadomo w Polsce badania nad sztucznym sercem od wielu lat prowadzi Fundacja Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrzu teraz im. Prof. Zbigniewa Religi. Badania te w ostatnim okresie były prowadzone m.in. w ramach Programu Zamawianego „Polskie Sztuczne Serce”. W realizacji tego Programu uczestniczyła (bo, program zakończył się 31.12.2012 roku) także Katedra Optoelektroniki kierowana przez prof. hab. inż. Tadeusza

Pustelnego. Doktorant – mgr inż. Grzegorz Konieczny - autor niniejszej rozprawy uczestniczył w tym Programie. Uczestniczył w nim także z istotnym udziałem merytorycznym dr inż. Zbigniew Opilski – promotor pomocniczy w tej rozprawie.

Pan mgr Grzegorz Konieczny w ramach realizacji swojej rozprawy doktorskiej prowadził badania nad opracowaniem czujników do pomiaru objętości krwi w komorze wspomagania serca.

W/g cytowanego doniesienia prasowego wyścig miedzy ośrodkami badawczymi wydaje się, że wygrywają ośrodki zagraniczne. Prace każdego ośrodka mają jednak unikatową wartość, zarówno dla kadry medycznej, jak i zespołów technicznych tworzących i realizujących własne rozwiązania podzespołów jak i całe urządzenie. Sądzić należy, że wybór ośrodka w Zabrzu do testowania pierwszych egzemplarzy wszczepialnego sztucznego serca jest dowodem uznania dorobku naukowego, medycznego i technicznego zarówno Ośrodka Kardiochirurgii w Zabrzu, jak i uczestników realizujących Programu „Polskie Sztuczne Serce". Można stwierdzić, że - w tym dorobku autor ninjszej rozprawy doktorskiej - mgr. inż. Grzegorz Konieczny ma swój udział.

Cechą charakterystyczną recenzowanej rozprawy doktorskiej jest tworzenie urządzenia od podstaw, znając jedynie wymagania funkcjonalne, zarówno w odniesieniu do całości konstrukcji jak i poszczególnych jego podzespołów.

Doktorant zajmuje się pomiarem objętości krwi w części krwistej komory serca w danej chwili czasu (on line).

Ideą przewodnią rozprawy jest teza „*Możliwy jest dynamiczny pomiar objętości krwi w pulsacyjnej komorze wspomagania serca…*", którą rozwija się w dwie tezy, charakteryzujące metodykę realizacji tezy głównej:

-…*metodą akustyczną z wykorzystaniem teorii rezonatora Helmholtza*;

-…*metodą optycznego pomiaru, z zastosowaniem metod rozpoznawania wzorców*.

Obie metody realizacji tezy głównej rozprawy są oryginalnym pomysłem zapewne zespołu z udziałem autora rozprawy. Obie metody zostały opatentowane.

1.2) Ogólna charakterystyka rozprawy.

Docelowym przedmiotem pracy Doktoranta było opracowanie i zbadanie w strukturze komory sztucznego serca czujnika mierzącego z założoną dokładnością (lepszą niż 10%) chwilową objętość krwi. Przy czym, czujnik miał spełniać określone założenia techniczne, w tym: nieinwazyjność względem krwi, małe gabaryty a również mały pobór mocy elektrycznej.

Autor rozprawy zaproponował dwie wyżej wymienione metody pomiaru: akustyczna i optyczna, obie działające na podobnej zasadzie pomiaru wychylenia powierzchni membrany, oddzielającej część pneumatyczną komory (gdzie osadzone są czujniki) od części krwistej komory.

Obie metody są podobne jako falowe metody penetracji przestrzeni części pneumatycznej komory. Fala akustyczna i fala optyczna generowane i odbierane przez nadajniki i odbiorniki wbudowane w obudowę komory sztucznego serca penetrują pneumatyczną części komory od obudowy do membrany.

Ale obie metody różnią się istotnie: zasadą konstrukcji, akwizycją danych pomiarowych oraz sposobem przetwarzania informacji, w celu otrzymania użytecznych wyników pomiaru objętości części krwistej.

Charakterystyczna jest metodyka realizacji koncepcji czujnika zarówno akustycznego jak i optycznego. Autor dochodzi do końcowej wersji założonej koncepcji czujnika realizując kolejne etapy rozwoju urządzenia i badając je w wersji statycznej na modelu w laboratorium Katedry Optoelektroniki.

Dopiero dopracowaną technicznie i metodycznie wersję Doktorant bada w dynamicznym reżimie pracy na modelu pulsacyjnej komory sztucznego serca z użyciem płynu o konsystencji krwi w Laboratorium Fundacji Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrzu.

W obu metodach pomiaru Autor stosuje po kilka etapów badań i kilka kolejnych usprawnień konstrukcyjnych oraz zmian metodyki pozyskiwania i przetwarzania otrzymywanych wyników pomiarów.

1.3) Redakcja rozprawy

Rozprawa zwiera 150 stron, w tym 10 stron spisu literatury - 97 pozycji oraz wyszczególniony publikacyjny dorobek Doktoranta. Doktorant jest łącznie współautorem 17 publikacji i wystąpień konferencyjnych, w tym 7 publikacji w czasopismach z listy filadelfijskiej. Prace, z współudziałem Autora cytowane były kilkanaście razy w artykułach opublikowanych w czasopismach o międzynarodowej cyrkulacji. Jak na początek drogi naukowej jest to dorobek bardzo wartościowy.

Merytoryczna część rozprawy zawarta jest w sześciu rozdziałach. Rozdziały 1, 2 oraz 3 (razem 47 stron) dotyczą literaturowej analizy klinicznie stosowanych i doświadczalnych urządzeń wspomagania serca - pulsacyjnych i niepulsacyjnych (Rozdział 1). Na podstawie

powyższej analizy Doktorant stawia tezę, że możliwy jest dynamiczny pomiar objętości chwilowej krwi w komorze wspomagania serca.

W Rozdziale 2 Doktorant opisuje istniejące metody monitorowania krwi w sztucznych komorach badanych doświadczalnie jak i testowanych klinicznie.

W Rozdziale 3 Autor opisuje dorobek Programu Zamawianego „Polskie Sztuczne Serce". Przedstawia konstrukcje i sposób pracy polskiej pulsacyjnej zewnątrzustrojowej komory wspomagania pracy serca.

Na podobnej, jak badana w rozprawie, komorze Polvad-Mev, Autor rozprawy testował końcową wersję opracowanych i wykonanych w Katedrze Optoelektroniki dwóch układów czujników mierzących chwilową objętość krwi w komorze wspomagania.

Pomiarowi metodą akustyczną poświęcony jest Rozdział 4 rozprawy (46 stron) zaś badaniom metodą optyczną - Rozdział 5 (47 stron).

Te dwa rozdziały i Podsumowanie stanowią własny, oryginalny dorobek Autora rozprawy, wsparty zestawieniem publikacji współautorskich oraz dwóch dyplomów, wyróżniających prezentowane prace na konferencjach międzynarodowych, a także potwierdzenie przyjęcia zgłoszenia dwóch patentów z prac opisanych w Rozdziałach 4 i 5.

2. Analiza merytoryczna rozprawy.

2.1) Znajomość literatury przedmiotu badań

Autor rozprawy przedstawia 95 pozycji literatury z ostatnich 12 lat, w tym 11 publikacji współautorskich. Treść przywołanych publikacji dotyczy opisu konstrukcji pracy komór wspomagania serca, w tym - opis sześciu komór oraz jednej komory do wspomagania serca dzieci.

Syntezę danych literaturowych Autor przedstawił w Rozdziałach 1, 2 i 3, włącznie z opisem polskiego sztucznego serca.

Zestawienie cytowanej literatury i treść rozdziałów analizy literaturowej wskazują na bardzo dobrą znajomość przez Autora przedmiotu badań i pełne rozumienie wagi prowadzonych przez siebie prac dotyczących, monitorowania chwilowej objętości krwi w procesie automatyzacji pracy komór wspomagania, zwłaszcza komór wewnątrz-ustrojowych.

Uwaga: W związku z cytowanym we wstępie recenzji sztucznym sercem prof. A. Carpentiera nie znalazłem w spisie literatury ani jednej publikacji z nazwiskiem Profesora lub z informacją dotyczącą ośrodka francuskiego. Dlaczego?

2.2) Badania własne Autora rozprawy

Autor rozprawy w szerokiej problematyce badawczej „Polskie Sztuczne Serce”, podejmuje rozwiązanie problemu monitorowania chwilowej objętości krwi w komorze wspomagania serca. Komora wspomagania serca, to niewielkiej pojemności owalne naczynie, podzielone elastyczną membraną na część komory napełnianą krwią i część powietrzną komory.

Pompka powietrzna, zmieniając ciśnienie w części powietrznej poprzez ruch membrany, powoduje zasysanie lub wyrzucenie cieczy z części krwistej. Doktorant założył możliwość pomiaru ruchu membrany metodami „falowymi”. Stosuje dość prostą metodykę pomiaru: generator (nadajnik) fali penetrującej komorę powietrzną i detektor (odbiornik) fali odbitej od powierzchni membrany. Pomiar sygnału „zwrotnego” dawał możliwość określenia położenia membrany w przestrzeni komory. Ideowo problem jest dość prosty. W praktycznej realizacji sprawdzanej bezpośrednio na funkcjonalnym modelu i porównywalny z pomiarem cieczy przez przepływomierze, problem okazuje się bardzo złożony.

Autor rozprawy problem monitorowanej chwilowej objętości krwi w komorze wspomagania serca rozwiązuje dwoma metodami:

1) Metodą akustyczną (Rozdział 4), gdzie stosuje falę akustyczną o częstotliwości ok. 1000 Hz i wykorzystuje fizykę rezonatora Helmholtza dla podwójnej komory powietrznej. Doktorant buduje elektryczny układu zastępczy rezonatora akustycznego, żeby uzyskać zadawalającą dokładność około 10% oszacowania objętości krwi.
2) Metoda optyczna (Rozdział 5) gdzie układ diod nadawczo-odbiorczych wbudowany w pokrywie komory powietrznej pozwala wypracować sposób realizacji pomiaru położenia membrany i oszacowania objętości krwi z podobną dokładnością, około 10%.

Ideowo jest to prosty układ pomiarowy i zapewne realizatorzy układu nie spodziewali się napotkanych w jego realizacji aż takich trudności. Membrana dzieląca komorę na część krwistą i pneumatyczną zamocowana na brzegach na sztywno w miejscu złożenia dwóch części owalnych odkształca się niejednorodnie i przypadkowo, dając pofalowaną pomiarową powierzchnię odbijającą po stronie pneumatycznej, przy napełnianiu cieczą po stronie krwistej. W efekcie, pomiar w różnych punktach powierzchni membrany po stronie pneumatycznej daje różne wyniki, zależne od aktywnej objętości części krwistej.

Czyli, jednoparametrowy efekt objętości krwi w danej chwili w części krwistej komory daje wieloparametrowy efekt odpowiedzi w części pneumatycznej komory.

Natomiast, użycie wyników pomiaru do automatyzacji działania komory wspomagania wymaga uzyskania jednej wartości napięcia elektrycznego układu pomiarowego, jako odpowiedzi dla jednej wartości objętości cieczy w danej chwili czasu.

Właściwie, problem naukowy niniejszej rozprawy polega na sprowadzaniu wieloparametrowej odpowiedzi układu pomiarowego ruchu membrany do jednoparametrowej odpowiedzi, możliwej do zastosowania w określaniu chwilowej objętości komory wspomagania serca.

Wyniki końcowe pomiaru chwilowej objętości krwi w obu metodach Autor przedstawia w formie charakterystyk na wykresach X-Y, czyli napięcia mierzone w mV w funkcji objętości krwi w komorze w ml.

Autor stara się uzyskać funkcję zbliżoną do liniowej, ale uzyskanie monotonicznego wzrostu funkcji jest również zadawalającym wynikiem.

W celu uzyskania wieloparametrycznych wyników pomiaru jednoparametrowej odpowiedzi układu pomiarowego Autor rozprawy stosuje metody dostosowane do używanej metody pomiarowej.

W metodzie akustycznej, Autor wstępnie stosuje zastępczy układ elektryczny, odpowiadający rezonatorowi Helmholtza i uzyskuje zamianę częstotliwości rezonatorowej układu, jako parametr zależny od chwilowej objętości krwi w części krwistej komory.

W metodzie pomiaru z wykorzystaniem fali optycznej, Autor szuka koncepcji parametryzacji wyników pomiaru z wbudowanych w pokrywę części pneumatycznej 32 optycznych diod nadawczych i 12 diod odbiorczych ułożonych przemiennie. Bada odpowiedzi fotodiod przy oświetleniu membrany z różnych diod nadawczych, przy stosowaniu dość skomplikowanej metodologii porównywania obrazów. Autor selekcjonuje wyniki w końcowym etapie badań z zestawionych par dioda- fotodioda dla ich odpowiedniej lokalizacji, z których otrzymuje zadawalający efekt pomiarowy w postaci wykresu mV napięcia powierzchni w funkcji ml cieczy w części krwistej.

W obu metodach pomiaru akustycznej i optycznej Autor rozprawy stosuje podobną metodykę opracowania układu pomiarowego. Określa założenia konstrukcyjne metody pomiarowej, opracowuje analizę danych pomiarowych, wykonuje układ pomiarowy i bada opracowaną metodykę w laboratorium Katedry Optoelektroniki, jako układ statyczny przy określonym dawkowaniu objętości cieczy. Następnie, przetestowany układ jest implementowany w

modelu komory wspomagania i testowany pod kątem przydatności do pomiaru w realnych warunkach użycia komory w laboratorium metrologicznym Fundacji Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrzu.

Różne warianty rozwiązań konstrukcyjnych różnych etapów testowania kolejnych wersji układów pomiarowych są istotnym dorobkiem naukowym Doktoranta. Stosowane metody analizy danych pomiarowych są istotnie odmienne w obu metodach pomiarowych.

W obu metodach pomiarowych Autor stosuje komputerowe przetwarzanie wyników, realizowane z wykorzystaniem własnego programu.

Na szczególne podkreślenie zasługuje opanowanie przez Doktoranta metod rozpoznawania wzorców, w tym metody głównych składowych PCA (Principal Component Analysis) i wykorzystanie jej w obróbce wyników pomiarów w metodzie optycznej a także jej implementacji w układzie pomiarowym.

Końcowym efektem dowodzącym poprawność uzyskanych wyników pomiarów opracowanymi metodami pomiarowymi są wykresy porównawcze pomiarów chwilowej objętości krwi mierzone przepływomierzem i opracowanym układem pomiarowym. Autor przedstawia porównawcze wyniki pomiarów dla metody akustycznej na Rys. 50 str. 91 i dla metody optycznej Rys. 43 str. 136. Ta końcowa seria pomiarów jest dowodem spełnienia założonej funkcji pomiaru chwilowej objętości krwi w komorze wspomagania serca. Stwarza ona podstawy do rozważania sposobu zastosowania opracowanych metod pomiarowych w konstrukcjach komór użytkowych.

Ponadto przedstawione wykresy porównawcze są dla recenzenta dowodem spełniania założonych tez doktoratu i dowodem poprawności konstrukcji modeli pomiarowych. Są dowodem poprawności przeprowadzonej analizy oraz dowodem poprawności przetwarzania wyników pomiarowych, których uzyskanie innymi metodami byłoby bardzo trudne.

3. Uwagi krytyczne

3.1. Z analizy treści rozprawy wynika, że praca ma dwa etapy:

- konstrukcyjny, polegający na opracowaniu urządzenia pomiarowego (dwóch urządzeń pomiarowych) oraz
- analityczny, polegający na opracowaniu analizy wyników i ich obrazowego przedstawienia w formie wyników końcowych.

Autor dochodzi do poprawnych porównawczo sprawdzonych wyników końcowych drogą kolejnych usprawnień zarówno konstrukcji urządzeń jak i analizy wyników. Przy czym Autor opisuje wykryte wady kolejnych konstrukcji i analizuje sposób ich modernizacji.
W efekcie treść rozprawy przesycona jest opisem sposobu doskonalenia opracowanych urządzeń. Zdaniem recenzenta, korzystnej dla odbioru dorobku rozprawy przez czytelnika byłoby przedstawienie syntezy pracy i skupienie uwagi na modelu końcowym, jako demonstracji opracowanej techniki pomiaru rozważanego parametru w komorze wspomagania serca.

3.2. Autor rozprawy zapowiada w Wstępie (Rozdział 1) o ważności metody pomiaru chwilowej objętości krwi w komorze wspomagania. Dotyczy to, zwłaszcza procesu automatyzacji pracy komór impulsowych wewnątrz ustrojowych. Natomiast kończąc pracę nie odnosi się do tych zapowiedzi i brak jest wniosków odnośnie możliwości i sposobu aplikacji metod pomiarowych w opracowywanych rozwiązaniach Programu „Polskie Sztuczne Serce".

4. Ocena rozprawy

Wg. aktualnej klasyfikacji NCBiR wyróżnia trzy kategorie badań naukowych: przemysłowe, rozwojowe oraz podstawowe. Recenzowaną rozprawę można zaliczyć do badań rozwojowych, których celem jest określenie innowacyjnych rozwiązań, umożliwiających wytwarzanie nowych urządzeń technicznych. Celem badań przedstawionych w rozprawie było właśnie opracowanie innowacyjnych rozwiązań w konstrukcji komory wspomagania serca. Obie opisane w rozprawie metody pomiaru chwilowej objętości krwi zostały zgłoszone do opatentowania, jako rozwiązania autorskie zespołu z udziałem Autora rozprawy. W realizacji rozprawy Autor wykazał się zarówno umiejętnością opracowania oryginalnej koncepcji urządzenia pomiarowego z użyciem pól akustycznych i optycznych oraz umiejętnością analizy i przetwarzania danych pomiarowych z użyciem odpowiednich, wysoko zaawansowanych metod opracowania wyników programów.
Jako oryginale rozwiązania Autora rozprawy uznaje:
- Opracowanie koncepcji urządzeń pomiarowych chwilowej objętości krwi w komorze wspomagania serca z użyciem falowych metod pomiarowych;

- Opracowanie układów badawczych urządzeń w wersji badań statycznych w laboratorium Katedry Optoelektroniki i w wersji badań dynamicznych w układzie modelowym w laboratorium badawczym w Fundacji Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrzu;
- Udział w Programie Zamawianym „Polskie Sztuczne Serce";
- Skuteczne zastosowanie złożonych metod analizy wyników pomiarowych, metod ich przetwarzania i uzyskanie prezentacji wyników w formie używkowej do automatyzacji pracy komory wspomagania serca
- Otrzymanie poprawnych wyników pomiarowych, zweryfikowanych w pomiarach porównawczych, świadczących o poprawności dokonanych rozwiązań w realizacji rozprawy;
- Weryfikacji prowadzonych prac w środowisku naukowym w formie publikacji i wystąpień konferencyjnych;

W ramach swojej rozprawy doktorskiej pan mgr Grzegorz Konieczny rozwiązał problem pomiaru chwilowej objętości krwi w komorze sztucznego serca - problem nierozwiązany wcześniej w skali światowej przez prawie 20 lat.

5. Konkluzja końcowa

Biorąc pod uwagę cały dorobek badawczy Autora rozprawy, w tym - opracowanie oryginalnego w skali światowej urządzenia pomiarowego, z odpowiednio dostosowaną analizą i przetwarzaniem wyników pomiarów, wraz z potwierdzeniem poprawności pomiaru chwilowej objętości krwi w komorze wspomagania serca, oraz z rozpowszechnioną prezentacją wyników rozprawy w formie zgłoszeń patentowych i prezentacji w czasopismach o międzynarodowym obiegu, uznaję rozprawę mgr inż. Grzegorza Koniecznego za wyraźnie spełniającą z nadmiarem wymagania rozpraw doktorskich.

Wnoszę zatem o dopuszczenie do obrony rozprawy przed Radą Naukową Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej.

Ponieważ, recenzowana praca doktorska realizowana jest w dziedzinie - *nauki techniczne*, w dyscyplinie – *elektronika,* uwzględniając istotną wagę rozwiązanego w wyniku realizacji rozprawy problemu – wnoszę o jej wyróżnienie.