dr hab. inż. Grzegorz Wiczyński
Politechnika Poznańska
Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej
Zakład Metrologii i Optoelektroniki
ul. Piotrowo 3A
60-965 Poznań

Poznań, dnia 10 kwietnia 2017 r.

WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY
DZIEKANAT
Wpł. 10 -04- 2017
DZIEKAN
Wydziału Elektrycznego
Politechniki Poznańskiej
dr hab. inż. Zbigniew Nadolny, prof. PP

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Dariusza Prokopa

pt.: **Zastosowanie wieloczujnikowego optoelektronicznego systemu pomiarowego do badania przebiegów fali tętna**

Przedmiotem recenzji jest w/w rozprawa doktorska mgra inż. Dariusz Prokopa. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Anna Cysewska-Sobusiak. Przewód doktorski jest prowadzony przez Radę Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej. Recenzja została opracowana na prośbę Dziekana Wydziału Elektrycznego dra hab. inż. Zbigniewa Nadolnego, prof. PP (pismo DE-564/2017 z dnia 30 stycznia 2017 roku).

Tematyka pracy

Wielowątkowa tematyka pracy zawiera się w obszarze elektrotechniki łącząc zagadnienia z zakresu metrologii elektronicznej i optoelektronicznej, inżynierii biomedycznej i przetwarzania sygnałów. Dotyczy biopomiarów mających na celu pozyskanie fali tętna człowieka z sygnału fotopletyzmograficznego (PPG). Sygnał PPG powstaje w wyniku oddziaływania tkanek na propagowane przez nie promieniowanie optyczne (o odpowiednio dobranych parametrach) a jego pozyskiwanie odbywa się w optoelektronicznym czujniku pomiarowym. Wyodrębnienie przebiegu fali tętna z sygnału PPG odbywa się w procesie wieloetapowego przetwarzaniu sygnału z czujnika pomiarowego. W pracy zastosowano wariant odbiciowy czujnika pomiarowego. Umożliwiło to skuteczną detekcję sygnału PPG w miejscach, dla których nieskuteczna jest detekcja w wariancie transmisyjnym. Tematyka pracy jest aktualna, nowoczesna i rokująca pozyskanie nowej wiedzy.

Aktualne trendy rozwojowe w inżynierii biomedycznej obejmują m.in. zagadnienia nieinwazyjnych pomiarów umożliwiających pozyskiwanie informacji o działaniu organizmu człowieka. Przebieg fali tętna wyodrębniony z sygnału PPG umożliwia ocenę hemodynamiki

człowieka. Należy zauważyć, że nie jest to możliwe na podstawie standardowo wykonywanych badań EKG. Natomiast dokonując jednocześnie rejestracji fali tętna obwodowego i sygnału elektrokardiograficznego można otrzymać informacje o aktywności bioelektrycznej serca i właściwościach hemodynamicznych organizmu człowieka. Obecnie w klinicznie wykonywanych pomiarach sygnału PPG stosuje się układy pomiarowe z pojedynczymi czujnikami w wariancie transmisyjnym a przebieg fotopletyzmograficzny wyświetlany jest na ekranach pulsooksymetrów jako obraz fali tętna generowanej przez napływającą krew. Rozpatrywany w pracy wielokanałowy system pomiarowy z czujnikami odbiciowymi, w porównaniu do jednoczujnikowych rozwiązań transmisyjnych, znacznie poszerza zakres pozyskiwania sygnału PPG i analizy jego parametrów.

Autor sformułował główny cel pracy w następujący sposób: „*opracowanie i konstrukcja wieloczujnikowego systemu pomiarowego do nieinwazyjnej detekcji, rejestracji i analizy sygnałów fotopletyzmograficznych za pomocą czujników optoelektronicznych, które mogą być umieszczone w różnych miejscach na powierzchni ciała człowieka*". Tak sformułowany cel narzuca wielowątkowość pracy, a każdy wątek jest oddzielnym złożonym zadaniem. Uwzględniając treść rozprawy można wyróżnić następujące wątki:

- nieinwazyjna detekcja sygnału PPG za pomocą czujnika optoelektronicznego,
- rejestracja sygnałów z wielu czujników optoelektronicznych z zastosowaniem wirtualnego systemu pomiarowego ,
- analiza zarejestrowanych sygnałów PPG mająca na celu wyodrębnienie fali tętna, wyznaczenie parametrów tej fali oraz porównanie przebiegów czasowych z różnych punktów pomiarowych.

W głównym celu pracy nie narzucono detekcji sygnału PPG w wariancie odbiciowym. Także w tytule rozprawy nie narzucono tego wariantu. Jednak w celu pracy zasugerowano wariant odbiciowy poprzez założenie detekcji „sygnałów fotopletyzmograficznych ... w różnych miejscach na powierzchni ciała człowieka". Należy podkreślić, że cel pracy jest spójny z wynikami badań literaturowych oraz prac własnych Autora rozprawy w zakresie wirtualnych systemów pomiarowych i czujników optoelektronicznych. W pracy postawiono następującą tezę:

„Zastosowanie wielokanałowego systemu pomiarowego z wykorzystaniem zestawu optoelektronicznych czujników odbiciowych umożliwia ocenę przebiegów fali tętna jako głównej składowej sygnałów fotopletyzmograficznych pozyskiwanych jednocześnie z odpowiednich miejsc na powierzchni ciała".

W celu potwierdzenia tezy sformułowano osiem celów szczegółowych. Realizacja tych celów przez Doktoranta umożliwiła udowodnienie postawionej tezy oraz dostarczyła nowej wiedzy w obszarze tematycznym rozprawy. Złożoność problematyki, typowa w pomiarach biomedycznych, i związane z tym trudności w eksperymentalnej weryfikacji wyników badań są widoczne w treści pracy. Przyjęty główny cel pracy i postawiona teza są ważne z poznawczego i praktycznego punktu widzenia. Wielokanałowe symultaniczne pomiary sygnału PPG w wariancie odbiciowym, w tym fali tętna, powinny być pomocne w poznawaniu działania organizmu człowieka, w szczególności procesów hemodynamicznych.

Układ pracy

Opiniowana rozprawa jest obszerna i liczy łącznie 205 stron. Składa się ze strony tytułowej, spisu treści (str. 2-4), streszczeń w języku polskim (str. 5) i angielskim (str. 6), wykazu ważniejszych wybranych oznaczeń i skrótów (str. 7-8), wstępu (str. 9-13), 5 rozdziałów merytorycznych z wieloma podrozdziałami (str. 14-174), podsumowania (str. 175-177), wykazu literatury (str. 178-187) oraz rozdziału nazwanego „Dodatek" (str. 188-205) i zawiera 152 rysunki oraz 30 tablic. We wstępie określono problematykę rozprawy oraz sformułowano cele główny i szczegółowe oraz postawiono tezę. W rozdziałach 2 i 3 przedstawiono podstawy nieinwazyjnego pozyskiwania fali tętna obwodowego oraz pozyskiwania sygnału fotopletyzmograficznego. Sposoby opisu sygnałów (wykorzystane w dalszej części rozprawy) omówiono w rozdziale 4. Najbardziej obszerny jest rozdział 5 (str. 40-138). Zawiera on opis wieloczujnikowego systemu akwizycji sygnałów PPG i składa się z sześciu głównych podrozdziałów, w których zaprezentowano przykładowe systemy pomiarowe, przedstawiono strukturę wykonanego analogowo-cyfrowego systemu pomiarowego, opisano zbudowane optoelektroniczne czujniki do bezinwazyjnej detekcji sygnału PPG w wariancie odbiciowym wraz z wynikami badań laboratoryjnych tych czujników oraz omówiono testy laboratoryjne całego systemu. Obszerny jest także rozdział 6 (str. 139-174), w którym przedstawiono wyniki przykładowych badań laboratoryjnych przy wykorzystaniu wykonanego systemu. W trakcie tych badań zarejestrowano sygnały PPG z palców obu rąk oraz z innych wybranych miejsc organizmu (skroń, kolano, nadgarstek, ramię, paluch nogi i płatek ucha). Skuteczne przeprowadzenie badań w wybranych miejscach człowieka było możliwe dzięki odbiciowemu wariantowi detekcji sygnału PPG. Zarejestrowane sygnały fotopletyzmograficzne poddano

analizie w sposób omówiony w rozdziale 4, a następnie zestawiono wnioski z przeprowadzonych badań laboratoryjnych. W Podsumowaniu wyliczono najważniejsze osiągnięcia zdaniem Autora oraz wskazano potencjalne kierunki dalszych badań. Bibliografię stanowi zbiór 177 cytowanych przez Autora pozycji, w którym zawarto 8 współautorskich publikacji Doktoranta. Należy zauważyć, ze 57 pozycji literatury dotyczy prac opublikowanych w roku 2012 i po nim. Z drugiej strony warto podkreślić odwołanie do publikacji z 1847 oznaczonej „[46] Harvey W., Willis R., The Works of William Harvey ... London, Sydenham Society". Można zatem sądzić, że zdobyte przez Doktoranta rozeznanie w uprawianej tematyce jest rozległe i uwzględnia najnowszy stan wiedzy. Na końcu rozprawy zamieszczono rozdział nazwany Dodatek zawierający tabele z wynikami badań w postaci numerycznej (w postaci graficznej zostały przedstawione we wcześniejszych rozdziałach).

Ocena wyników naukowych

Przedmiotem pracy jest detekcja, rejestracja i analiza sygnałów fotopletyzmograficznych. Założonym wynikiem analizy sygnału PPG jest przebieg czasowy fali tętna oraz wartości wybranych parametrów tego przebiegu. Do uzyskania fali tętna z różnych miejsc ciała człowieka niezbędny jest wielokanałowy system pomiarowy współpracujący z czujnikami optoelektronicznym pracującymi w wariancie odbiciowym. Ze względu na niedostępność odpowiedniego systemu pomiarowego i czujników optoelektronicznych Doktorant opracował i wykonał niezbędne narzędzie pomiarowe, które umożliwiło przeprowadzenie badań w warunkach laboratoryjnych. W pracy zamieszczono liczne przebiegi czasowe zarejestrowanych sygnału PPG i fali tętna oraz ich parametry. Poza zakresem rozprawy jest poszukiwanie związku pomiędzy kształtem i parametrami fali tętna a stanem zdrowia człowieka.

Przedstawione wyniki badań laboratoryjnych dowodzą, że sformułowane w pracy cele zostały osiągnięte w założonym zakresie, a postawiona teza – udowodniona. Zawartość rozprawy dowodzi umiejętności zaplanowania i zrealizowania przez Doktoranta złożonych zadań analitycznych, konstrukcyjnych i doświadczalnych.

Do zalet pracy należą w szczególności praktyczne aspekty symultanicznych pomiarów fali tętna w odpowiednich miejscach ciała, które mogą wykorzystane w diagnostyce klinicznej. Szczegółowo przedstawiono kolejne etapy analiz i badań laboratoryjnych, podsumowując ich wyniki szczegółowymi wnioskami. Udokumentowaniem rezultatów są zamieszczone w pracy liczne wykresy z przebiegami czasowymi fali tętna oraz tabele

prezentujące wartości parametrów. Wykorzystanie cytowanych źródeł jest poprawne, a wnioski z analizy są wyciągane i formułowane w prawidłowy sposób.

Przyjęty główny cel pracy i postawiona teza są ważne z praktycznego i poznawczego punktu widzenia. Do wartościowych wyników pracy można przede wszystkim zaliczyć:

1. Dokonanie szczegółowego przeglądu literatury w zakresie przyczyn powstawania i właściwości fali tętna i sposobu jej detekcji oraz propozycja definicji fali tętna.
2. Odwołując się do informacji literaturowych, wyjaśnienie powstawania sygnału fotopletyzmograficznego ze szczególnym uwzględnieniem cech optycznych transiluminowanych tkanek oraz powiązanie składowych sygnału PPG, m.in. fali tętna, z ich znaczeniem diagnostycznym.
3. Opracowanie i budowa wielokanałowego analogowo-cyfrowego systemu pomiarowego do symultanicznej akwizycji i rejestracji wielu sygnałów PPG oraz wyodrębniania fali tętna z zastosowaniem opracowanego zestawu procedur cyfrowego przetwarzania sygnałów.
4. Wykonanie optoelektronicznych obiciowych czujników PPG w różnych konfiguracjach i ich badania laboratoryjne.
5. Ocena metrologiczna wykonanego systemu pomiarowego uwzględniająca jego specyfikę.
6. Przeprowadzenie badań laboratoryjnych z udziałem ochotników polegających na pozyskiwaniu sygnału PPG i fali tętna z wykorzystaniem wykonanego systemu pomiarowego.

W opinii recenzenta **na szczególne wyróżnienie zasługują eksperymentalnie wyznaczone zależności sygnału PPG od: siły nacisku czujnika, odległości fotoemiter-fotodetektor i ich wzajemnego usytuowania oraz natężenia promieniowania z fotoemitera. Na takie wyróżnienie zasługują także wyniki symultanicznych wieloczujnikowych pomiarów sygnału PPG oraz ich analizy**. Wyniki badań wpływu wybranych czynników na sygnał PPG i symultanicznych wyników pomiarów fali tętna są oryginalne. Dlatego uzasadnione jest opracowanie tych badań w postaci publikacji i zgłoszenie do renomowanego czasopisma.

Ocena wieloczujnikowego optoelektronicznego systemu pomiarowego do diagnostyki przebiegów fali tętna będzie pełniejsza w połączeniu z efektami zastosowania w badaniach klinicznych. Dlatego warto podjąć wysiłek modyfikacji systemu do postaci umożliwiającej wykonanie badań klinicznych we współpracy z lekarzami zajmującymi się problematyką hemodynamiki.

Uwagi szczegółowe

Na podstawie wnikliwej analizy pracy mogę stwierdzić, że nie nasuwają się zasadnicze uwagi krytyczne o charakterze merytorycznym. Z punktu widzenia celów i postawionej tezy przedstawiona do recenzji rozprawa została zrealizowana poprawnie i ma nieliczne słabe strony. Układ pracy jest właściwy a Doktorant w poszczególnych rozdziałach uwypukla własne dokonania. Rozprawa jest napisana poprawną polszczyzną w sposób zapewniający łatwość czytania. Należy podkreślić, że treść i forma rozprawy świadczy o dojrzałości badawczej Doktoranta. Ze względu na obszerność i wielowątkowość pracy możliwe, a nawet zasadne, jest sformułowanie uwag zachęcających do dyskusji. Dlatego warto zwrócić uwagę na następujące kwestie:

1. Na stronie 11 zamieszczono dwa zdania o charakterze definicji: „Przebieg fotopletyzmograficzny PPG (PhotoPlethysmoGraphic), którego główną składową jest fala tętna, uzyskuje się w sposób prześwietleniowy lub odbiciowy." oraz „Fala tętna – fala formowana w efekcie sprężystego odkształcania ścian naczyń tętniczych ...". Z tych definicji wynika, że sygnał PPG i fala tętna wyodrębniona z tego sygnału to nie to samo. Dlatego zasadne jest podjęcie próby odpowiedzi na pytanie: kiedy można uznać, że wyodrębniony z sygnału PPG przebieg czasowy to fala tętna ?

2. Jak należy przedstawiać przebieg czasowy fali tętna ? W rozprawie przyjęto konwencję powszechnie występującą w literaturze. Jednak jak powiązać przebieg czasowy fali tętna z sygnałem PPG ? Czemu odpowiada maksimum przebiegu czasowego fali tętna ? A czemu minimum ?

3. Konfigurując układ pomiarowy w badaniach biomedycznych, na etapie prac projektowych często występuje deficyt informacji o obiekcie. Jak rozwiązano problem tego deficytu opracowując „Założenia konstrukcyjne" (podrozdział 5.3.1) ?

4. W podrozdziale 5.3.3.5 „Liczba fotoemiterów i fotodetektorów w czujniku" przedstawiono wyniki badań wpływu liczby fotoemiterów na sygnał PPG. Czy na podstawie przeprowadzonych badań możliwe jest stwierdzenie, jaka konfiguracja czujnika jest lepsza: jeden fotodetektor – wiele fotoemiterów czy jeden fotoemiter – wiele fotodetektorów ?

Oprócz powyżej sformułowanych uwag odnotowano drobne usterki oraz zauważono następujące niejasności:

- Rys. 3.6: „Zmiany długości drogi optycznej w kierunku x w fazie skurczu i rozkurczu". Jak interpretować ten rysunek ?
- Wzór (4.3): Jak go interpretować ?
- Str. 31: Jaka jest różnica pomiędzy rozstępem i wartością międzyszczytową ?
- Str. 38: „Wartość SSR bliska 1 oznacza, iż model w znacznym stopniu odwzorowuje wariancję danych pomiarowych. Inaczej mówiąc, jest to korelacja pomiędzy danymi pomiarowymi a danymi odtwarzanymi przez funkcję aproksymującą," – czy zgodność wariancji zapewnia korelację danych pomiarowych i odtwarzanych ?
- Rys. 5.16: Czy podpis pod rysunkiem jest zgodny z zawartością wykresów ?
- Rys. 5.24: Jaką diodę LED użyto do wyznaczenia zależności przedstawionych na tym rysunku ?
- Str. 72: „Poszczególne bloki w jak najmniejszym stopniu powinny wpływać na kształt sygnału fotopletyzmograficznego, będącego zbiorem informacji diagnostycznych." Czy ta uwaga powinna dotyczyć sygnału fotopletyzmograficznego czy fali tętna ?
- Rys. 5.36: „Schemat blokowy rekonfigurowalnego wykonanego układu kondycjonowania i zasilania LED" – dlaczego wskazano kierunek przepływu sygnału od karty pomiarowej do filtru dolnoprzepustowego ?
- Str. 73: „Fotodioda może pracować w trybie fotowoltaicznym lub fotoprzewodzącym. W trybie fotowoltaicznym fotodioda nie jest obciążona a sygnałem wyjściowym jest napięcie, którego wartość nieliniowo zależy od mocy padającego na nią promieniowania" – czym różni się tryb fotowoltaiczny od fotoprzewodzącego ? czy fotodioda pracująca bez napięcia polaryzującego jest nieliniowym przetwornikiem mocy optycznej na prąd ?
- Wzór (5.7): Czy w liczniku tego wzoru powinien występować tylko jeden czynnik – wzmocnienie w otwartej pętli K_{u0} ?
- Str. 80: „Układ zawiera filtry pierwszego rzędu ... o nachyleniu 20 dB/okt." – filtry pierwszego rzędu mają nachylenie charakterystyki amplitudowej 6dB/okt (inaczej 20dB/dek).
- Str. 90: „Zwiększanie rzędu filtru decyduje z jednej strony o silniejszym nachyleniu charakterystyki w paśmie tłumiącym zakłócenia, jednak z drugiej strony przesuwa realną granicę tłumienia filtru w paśmie przepustowym." – jak powiązać ten opis z zawartością rys. 5.53a ?
- Rys. 5.54: „Wykresy współczynników różnicy widm ..." – jak rozumieć określenie „różnica widm"?
- Wzór (5.13): Co oznacza „daszek " nad $z_1[n]$?
- Rys. 5.93: Czy rys. b) przedstawia falę tętna „ze skalowaniem odniesionym do największej wartości amplitudy sygnału PPG" ?
- Rys. 5.94: Jak rozumieć określenia „amplituda maksimum A", „amplituda maksimum B", itd. ? nie wystarczy określenie „maksimum A", „maksimum B" ?
- Rys. 5.98: Jak interpretować wartości osi Y wykresu b) ? jakiej wartości odpowiada $i_{fd}(t) = 0$ dB ?
- Rys. 5.99: Co wynika z zawartości tego rysunku ? czy dodawanie zer jest uzasadnione czy też nie ?
- Str. 131: W rozdziale „5.5.2.7. Wyznaczanie okresu i częstości sygnału PPG" zamieszczono opis detekcji „..kolejno występujących ekstremów ... O klasyfikacji charakterystycznych wartości minimalnych i maksymalnych sygnału PPG decyduje przebieg funkcji progującej" - jaki algorytm wykrywania ekstremów (dla różnych funkcji progowania) zastosowano ? W pracy wymieniono jedynie „zadania algorytmu procedury numerycznej".
- Tabela 5.11: „U_{AV}" i „S_U" – co to jest ? w opisie tabeli stwierdzono, że zawiera ona „Parametry sygnałów wyjściowych U1-U8"- jednak dla poszczególnych konfiguracji podano pojedyncze wartości – zatem jak interpretować zawartość tabeli ?
- Str. 140: „W badaniach uczestniczyła liczna grupa osób (ochotników w różnym wieku, kobiet i mężczyzn)" – jak liczna ?
- Tabele 6.1 i 6.2: O czym informują wartości po znaku „±" ?
- Str. 151: „Odległości między punktami pomiarowymi są niewielkie, a zatem wyznaczone przesunięcia czasowe pomiędzy sygnałami mają również małe wartości" – przykładowo, czy odległość "pomiędzy S2 palec wskazujący lewej ręki – S6 palec wskazujący prawej ręki" (różnica D8) jest niewielka ?
- Str. 172: „Współczynniki korelacji (rozdział 6.2.1.8) umożliwiły identyfikację sygnałów, których kształty najbardziej odbiegają od pozostałych, co świadczy o odmiennych właściwościach miejsc pomiaru." – czy na podstawie wartości współczynnika korelacji można wnioskować o różnicach kształtu ? przykładowo, sinus i kosinus mają taki sam kształt a współczynnik korelacji wynosi zero.

Wymienione usterki oraz zauważone niejasności i nasuwające się wątpliwości są drugorzędne i nie wpływają w istotny sposób na ogólne bardzo pozytywne wrażenie z lektury rozprawy. Jej merytoryczny zakres dowodzi, że Autor wykazał umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w rozpatrywanym interdyscyplinarnym obszarze badań, do którego wniósł swój wkład. Przedstawiona rozprawa ma charakter poznawczy i aplikacyjny. Stanowi ona bardzo wartościowe opracowanie zawierające oryginale wyniki badań Doktoranta. W zakresie rozpatrywanych zagadnień Autor wykazał się odpowiednią wiedzą i umiejętnościami, które pretendują go do uzyskania stopnia naukowego doktora.

Konkluzja

Reasumując uważam, że w opiniowanej rozprawie doktorskiej nt.: *Zastosowanie wieloczujnikowego optoelektronicznego systemu pomiarowego do badania przebiegów fali tętna* mgr inż. Dariusz Prokop samodzielnie rozwiązał postawione zadanie naukowe i wykazał się wiedzą oraz umiejętnościami wymaganymi dla uzyskania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie *Elektrotechnika*. Stwierdzam, że praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy (Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z późniejszymi zmianami) i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Jednocześnie, zważywszy na to, że praca spełnia moim zdaniem z nadmiarem wymagania stawiane rozprawom doktorskim, **wnioskuję o jej wyróżnienie**. Merytoryczny zakres rozprawy dowodzi, że Autor wykazał umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w rozpatrywanym interdyscyplinarnym obszarze badań, do którego wniósł swój znaczący wkład. Zawartość pracy jest zgodna z najnowszym stanem wiedzy w tym zakresie, a osiągnięcia własne Autora są nowatorskie.

Wiczyński

Grzegorz Wiczyński