

Lublin, dnia 12 listopada 2024 r.



**POLITECHNIKA
LUBELSKA**

Prof. dr hab. inż. Oleksandra Hotra
Katedra Elektroniki i Technik Informatycznych
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
ul. Nadbystrzycka 38 A
20-618 Lublin
e-mail: o.hotra@pollub.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej
Pana mgra inż. Mirosława Chylińskiego pt.:**
**„Metoda przetwarzania linii izoelektrycznej z wykorzystaniem filtracji
Savitzky’ego-Golaya oraz wybranych metod modulacji amplitudowej oraz
częstotliwościowej przebiegu EKG do wyznaczenia częstości oddechowej”**

Promotor: dr hab. inż. Mirosław Szmajda, prof. PO
Promotor pomocniczy: dr hab. n med. Jerzy Sacha, prof. PO

Recenzja została przygotowana na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Naukowej
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Opolskiej
z dnia 26 września 2024 r. w sprawie powołania mnie na recenzenta
rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora
mgr. inż. Mirosławowi Chylińskiemu

Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 173 stron, zawiera 10 rozdziałów, bibliografię oraz 18 dodatków (dodatki A - S). Rozdziały 4 - 5 rozprawy kończą się podsumowaniem (co oceniam pozytywnie), a w rozdziale 8 zawarta jest dyskusją uzyskanych wyników. Rozprawa zawiera 85 rysunków oraz 18 tabel. Pracę poprzedza streszczenie w języku polskim i angielskim. Spis skrótów zamieszczony na początku rozprawy znacznie ułatwia jej czytanie.

Struktura rozprawy jest logiczna i prawidłowa, a jej podział na 10 rozdziałów - właściwy.

W Rozdziale **1. Wstęp** Autor wprowadza w tematykę metod wyznaczania częstości oddechowej, przedstawia badania prowadzone w tym zakresie oraz uzasadnia ważność podjętego tematu.

W rozdziale **2. Cel, zakres i teza pracy** Autor formułuje cele, zakres oraz tezę pracy.

W rozdziale **3. Specyfika fali oddechowej oraz jej częstości** Autor przedstawił przykładowe przebiegi fal oddechowych, ich analizę jak również zakresy prawidłowych wartości częstości oddechowych, charaktery i typy oddechu.

W rozdziale 4. **Systematyka metod pomiarowych częstości oddechowej** są przedstawione bezkontaktowe i kontaktowe techniki pomiaru częstości oddechowej. Autor przeanalizował bezkontaktowe metody pomiarowe z wykorzystaniem kamer, czujników zbliżeniowych oraz kontaktowe metody pomiaru na podstawie impedancji zmiennoprądowej, sygnałów fotopletyzmoграфicznych, z wykorzystaniem czujników przepływu powietrza, czujnika dźwięku, temperatury, wilgotności, piroelektrycznych czujników podczerwieni, piezorezystancyjnych czujników ciśnienia oraz belek tensometrycznych. Szczegółowo zostały przeanalizowane metody wykorzystujące pomiary EKG w celu wyznaczeniu częstości oddechowej. W Podsumowaniu do rozdziału 4 na podstawie przeprowadzonej analizy wyżej wymienionych metod Autor określa kryteria, które powinny spełniać metody, aby umożliwić udowodnienie postawionej w dysertacji tezy, oraz uzasadnia kierunki podjętych przez niego badań w celu opracowania metody do wyznaczenia częstości oddechowej.

Rozdział 5. **Implementacja filtracji w przetwarzaniu sygnału EKG – ekstrakcja izolinii** zawiera opis standardowych filtrów (filtry Butterwortha, Bessela, Chebysheva I oraz II stopnia, Eliptycznego) oraz cyfrowych filtrów wygładzających (filtr medianowy, ze średnią ruchomą oraz Savitzky'ego -Golaya). Autor przeprowadził szczegółową analizę porównawczą filtrów, w tym Butterwortha oraz Savitzky'ego i Golaya, które są najczęściej używane w przetwarzaniu sygnałów biologicznych. Autor uzasadnia wybór filtra Savitzky'ego i Golaya użytego do analiz przeprowadzonych w rozprawie.

W rozdziałach 6 i 7 zostały przedstawione algorytmy modulacji amplitudowej (EDR) oraz zaimplementowanego programu wyznaczenia częstości oddechowej metodą modulacji częstotliwościowej (RSA).

W rozdziale 8. **Badania** Autor scharakteryzował grupę badaną, opisał przebieg oraz stosowane przez Autora metodologie badań: ogólna, z wykorzystaniem filtracji Savitzky'ego i Golaya, EDR, RSA. Procedura badań obejmująca: 1) badania spirometryczne, 2) jednoczesną rejestrację fali oddechowej za pomocą urządzenia referencyjnego i przebiegu EKG za pomocą Holtera EKG, 3) obróbkę danych w środowisku LabView - została wyczerpująco opisana. Przedstawione w tym rozdziale stanowisko laboratoryjne obejmujące układ rejestracji oddechu, Holter EKG, spirometr oraz układ do synchronizacji sygnałów biomedycznych. Zaproponowane przez Autora urządzenie, synchronizujące sygnał oddechowy, pochodzący z rejestratora oddechu, oraz sygnał EKG (stanowiące przedmiot prac nad zgłoszeniem patentowym) umożliwiło przeprowadzenie badań w celu wyznaczenia częstości oddechowej z sygnału elektrokardiograficznego. Po przeprowadzeniu analizy wyników badań zależności pomiędzy skutecznością wyznaczenia częstości oddechowej z zapisu EKG a parametrami fizjologicznymi (BMI, FEV1, FVC i TV) oraz numerem odprowadzenia Autor określił parametry mające największy wpływ na skuteczność wyznaczenia częstości oddechowej. Podsumowanie najważniejszych wyników i wnioski wynikające z przeprowadzonych przez Autora badań zawiera podrozdział 8.6.6.

W rozdziale 9. **Dalsze prace rozwojowe** Autor proponuje możliwe kierunki badań do realizacji w tematyce wyznaczenia częstości oddechowej, które są obiecujące i poparte przeprowadzonymi przez Autora dodatkowymi badaniami, co jest atutem rozprawy doktorskiej. Kierunki te dotyczą między innymi modyfikacji metodyki pomiaru (np. położenia elektrody przedsercowej), układu rejestracji oddechu, w którym Autor proponuje wykorzystać belkę tensometryczną.

W rozdziale 10. **Podsumowanie** zostały przedstawione najważniejsze wyniki zrealizowanych przez Autora badań oraz wymienione elementy autorskie pracy.

Bibliografia obejmuje 147 pozycji literaturowych. Dobór źródeł literaturowych jest właściwy. W bibliografii wymienione są cztery publikacje, których współautorem jest mgr inż. Mirosław Chyliński:

[68] Szmajda M., **Chyliński M.**, Sacha J., Mroczka J. *Three Methods for Determining the Respiratory Waves from ECG (part I)*, *Metrol. Meas. Syst.*, 2023 30(4), 821–837.

[128] Szmajda M., **Chyliński M.**, Sacha J., Mroczka J. *Three Methods for Determining the Respiratory Waves from ECG (part II)*, *Metrol. Meas. Syst.*, 2024 31(1), 51–71.

[129] **Chyliński M.**, Szmajda M. *Design and Implementation of an Embedded System for Respiratory Rate Examinations*, *IFAC-PapersOnLine*, 2019, 341–346.

[130] **Chyliński M.**, Szmajda M., Sacha J., Mroczka J. *The way of ECG signal obtaining from the respiratory wave by Savitzky-Golay filtration*, 2021 6th International Conference on Nanotechnology for Instrumentation and Measurement (NanofIM), 2021, Opole, Poland, 1–4.

W dwóch z czterech publikacji mgr inż. Mirosław Chyliński jest pierwszym autorem, a w kolejnych dwóch – drugim. Należy zwrócić uwagę, że wyniki prowadzonych przez Autora badań z zakresu tematyki rozprawy doktorskiej zostały opublikowane w 2 artykułach w renomowanym czasopiśmie “Metrology and Measurement Systems” (punktacja MEiN: 100) oraz były zaprezentowane podczas konferencji naukowej 2021 IEEE 6th International Conference on Nanotechnology for Instrumentation and Measurement (NanofIM).

Ogólna liczba cytowań 4 publikacji naukowych Autora powiązanych tematycznie z rozprawą doktorską wynosi: 7 cytowań (wg Bazy Web of Science) oraz 8 cytowań (wg Bazy Scopus), a jego indeks Hirsha wynosi 2. Niewysoka liczba cytowań oraz indeks Hirscha mogą być związane z krótkim okresem czasu, który minął od opublikowania artykułów (2023 r. i 2024 r.).

Rozprawa przygotowana jest na dobrym poziomie merytorycznym. Autor wykazał się dobrą znajomością tematyki, znajomością metod badawczych, dobrym przygotowaniem w zakresie metod przetwarzania sygnałów oraz umiejętnością interpretacji otrzymanych wyników.

Teza, cele i motywacja podjęcia tematu

Częstość oddechowa jest jednym z podstawowych parametrów życiowych, który dostarcza informacji o stanie układu oddechowego. Przyspieszona częstość oddechowa może być spowodowana np. infekcjami płuc, upośledzoną perfuzją tkanek i in. Natomiast zwolniona częstość oddechowa ma miejsce np. przy schorzeniach ośrodkowego układu nerwowego, zatruciach wewnątrzpochodnych (mocznicą, śpiączką cukrzycową) i zewnątrzpochodnych (substancje działające depresyjnie na ośrodkowy układ nerwowy). Częstość oddechowa jest ważnym wskaźnikiem diagnostycznym, szczególnie w podstawowej opiece zdrowotnej. Są wypadki, gdy częstość oddechowa może być jedynym dokładnym wskaźnikiem ciężkiej choroby np. u pacjentów z urazami lub ciężkimi infekcjami, mającymi prawidłowe ciśnienie krwi i tętno, u których nagle wystąpiła dekompensacja. Częstość oddechowa może być markerem prognostycznym w opiece szpitalnej, np. przyspieszona częstość oddechowa może być wykorzystana do przewidzenia zatrzymania krążenia.

Najprostszą metodą pomiaru częstości oddechowej jest metoda tradycyjna polegająca na zliczaniu poszczególnych oddechów na podstawie obserwacji ruchów klatki piersiowej wykonywana przez personel medyczny. Dokładność pomiaru w tym wypadku jest niska ze względu na element ludzki, szczególnie podczas dłuższych pomiarów. W rozprawie Autor przeanalizował również inne bezkontaktowe oraz kontaktowe metody pomiaru częstości oddechowej (np. z wykorzystaniem kamer, czujników, z sygnału PPG), omawiając zalety i wady, możliwości ich zastosowania. Spośród metod, które umożliwiają ocenę oddychania, szczególne miejsce zajmują metody, które pozwalają na rozpoznanie przebiegu fal oddechowych z sygnału EKG, z wykorzystaniem cyfrowego przetwarzania sygnałów (metody modulacji amplitudowej, modulacji częstotliwościowej i przetwarzania izolinii). Istnienie wielu badań nad uzyskaniem nowych informacji na temat częstości oddechowej oraz fali oddechowej z sygnałów EKG można wyjaśnić łatwością uzyskania sygnałów EKG oraz dostępnością i niewysokim kosztem często stosowanych urządzeń do monitorowania EKG metodą Holtera. Opracowanie jednej metody wyznaczenia częstości oddechowej z sygnałów EKG dla wszystkich osób badanych jest bardzo trudne z uwagi na różną amplitudę, kształt czy czas trwania sygnałów aktywności elektrycznej mięśni dla każdej osoby badanej oraz wpływ takich czynników jak np. ruch ciała podczas przeprowadzania badania czy czynników fizjologicznych, np. chorób z zaburzeniami ruchowymi. Autor podjął próbę opracowania optymalnej metody wyznaczenia częstości oddechowej z sygnału EKG, co jest aktualnym i ważnym zadaniem badawczym.

Tytuł rozprawy „Metoda przetwarzania linii izoelektrycznej z wykorzystaniem filtracji Savitzky’ego-Golaya oraz wybranych metod modulacji amplitudowej oraz częstotliwościowej przebiegu EKG do wyznaczenia częstości oddechowej” odzwierciedla jej treść i zakres prac badawczych.

Teza pracy została sformułowana poprawnie pod względem naukowym, jest oryginalna i brzmi następująco:

Zastosowanie metod cyfrowego przetwarzania sygnałów w przetwarzaniu przebiegu EKG, wykorzystujące algorytmy z grup: wyodrębnienia izolinii, modulacji amplitudowej, oraz modulacji częstotliwościowej, pozwolą na wyznaczenie fali oddechowej oraz jej częstości z uwzględnieniem wybranych parametrów fizjologicznych pacjenta.

W rozdziale 2 zostały przedstawione **cele pracy**, którymi są:

1. Zaproponowanie metody lub grupy metod umożliwiających rejestrację fali oddechowej oraz obliczenie częstości oddechowej.
2. Dobór parametrów poszczególnych metod przetwarzania sygnałów.
3. Zbudowanie stanowiska laboratoryjnego do rejestracji sygnału EKG, implementacji wybranych algorytmów oraz weryfikacji za pomocą urządzenia referencyjnego.
4. Określenie wpływu parametrów fizjologicznych pacjenta na dokładność pomiarów.
5. Zaproponowanie metod, ich parametrów oraz numeru odprowadzenia EKG dla grup pacjentów o zróżnicowanych parametrach fizjologicznych.

Podsumowując, praca ma charakter interdyscyplinarny i obejmuje m.in. zagadnienia z zakresu nauk medycznych, elektroniki (przetwarzanie i analiza sygnałów), informatyki. Tematyka rozprawy jest aktualna i ma znaczenie praktyczne. Autor wykazał umiejętności samodzielnego przeprowadzenia badań, analizy uzyskanych wyników oraz formułowania wniosków. Na podkreślenie zasługują umiejętności Autora posługiwania się wiedzą z zakresu

przetwarzania sygnałów biomedycznych oraz tworzenia algorytmów w programach MATLAB oraz LabView.

Ocena oryginalności rozprawy

Rozprawa doktorska dotyczy opracowania metody przetwarzania linii izoelektrycznej z wykorzystaniem filtracji Savitzky'ego-Golaya oraz wybranych metod modulacji amplitudowej oraz częstotliwościowej przebiegu EKG do wyznaczenia częstości oddechowej i posiada elementy oryginalności w tym zakresie. Autor przedstawia nowe podejście do wyznaczenia częstości oddechowej z sygnału elektrokardiograficznego oraz wyniki badań wpływu parametrów fizjologicznych osoby badanej na skuteczność jej wyznaczania. Pilotażowe badania przeprowadzone przez Autora są oryginalne, a ich wyniki mogą stanowić podstawę do udoskonalenia aktualnych oraz opracowania nowych metod wyznaczenia częstości oddechowej.

Za najbardziej wartościowe elementy pracy uważam:

- staranne studium literaturowe oraz systematyka metod obliczania częstości oddechowych,
- przeanalizowanie różnych typów filtrów w celu ekstrakcji izoliny z sygnału EKG oraz uzyskania fali oddechowej,
- porównanie wyników, uzyskanych za pomocą różnych typów metod: EDR, RSA oraz SG w celu obliczenia częstości oddechowej,
- przeanalizowanie parametrów filtracji SG i ich wpływu na obliczenie częstości oddechowej,
- dokonanie wstępnej analizy wpływu parametrów fizjologicznych: BMI, objętości oddechowej (Tidal Volume TV), nasilonej pierwszosekundowej objętości wydechowej (forced expiratory volume in one second FEV1), nasilonej pojemności życiowej (forced vital capacity FVC) oraz wieku badanego na błędy obliczeń częstości oddechowej,
- przygotowanie stanowiska laboratoryjnego obejmującego: referencyjny układ rejestracji oddechu (własna konstrukcja), Holter EKG, spirometr oraz układ do synchronizacji sygnałów biomedycznych; zaproponowano modyfikację układu referencyjnego opartego o belkę tensometryczną.

Reasumując, rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego przyczyniając się do rozwoju metod wyznaczenia częstości oddechowej z sygnału EKG.

Uwagi krytyczne, pytania

Rozprawa doktorska nie zawiera istotnych błędów i uchybień. Wymienione poniżej uwagi krytyczne nie obniżają wartości pracy i nie wpływają na moją pozytywną ocenę merytoryczną rozprawy.

Uwagi:

1. W pracy dokonano pomiarów na niewielkiej grupie badawczej. W przypadku pomiarów medycznych zalecane są większe grupy badawcze dlatego konieczne jest

przeprowadzenie dalszych badań i dostrajania analiz w celu osiągnięcia jak największej wiarygodności wyników.

2. Autor pracy nie korzystał z zewnętrznych baz danych sygnałów EKG, np. PhysioNet. Proszę o wyjaśnienie czy Autor rozprawy rozważał korzystanie z zewnętrznych baz danych sygnałów EKG?
3. W rozdziale 3.2 przedstawiono wyniki rejestracji fali oddechowej. Czy głębokość oddechów nawiązywała do normalnego oddychania w stanie spoczynku, czy też były to oddechy głębokie?
4. W metodzie ekstrakcji fali oddechowej z wykorzystaniem filtracji Savitzky'ego i Golaya, wykorzystano analizę falkową. Założono a priori parametr Threshold (Rys. 16). W jaki sposób dobierano jego wartość? Czy istnieje możliwość automatycznego, optymalnego doboru tego parametru?
5. „dla potrzeb niniejszego badania zaproponowano stanowisko laboratoryjne, składające się z badania spirometrycznego, pomiaru BMI, saturacji, rejestracji oddechu oraz badania EKG” (str. 75), „pomiar wysycenia krwi tlenem - pomiar odbywa się poprzez założenie czujnika wysycenia krwi tlenem na palec i wybranie z programu: SpO2”(str. 67). W pracy jest brak informacji na temat pomiarów saturacji krwi oraz celu ich przeprowadzenia. Proszę o wyjaśnienie celu przeprowadzenia badań saturacji.
6. „Zaletą przedstawionego układu pomiarowego jest wysoka dokładność pomiaru” (str. 74). Jaka jest dokładność pomiaru przedstawionego układu pomiarowego?
7. Warto byłoby w rozprawie zawrzeć porównanie przedstawionych przez Autora wyników z aktualnym stanem wiedzy.
8. Wydzielenie Rozdziału 4.1. Tradycyjny pomiar częstości oddechowej nie było konieczne. Treścią on odnosi się do Rozdziału 4.2. Metody bezkontaktowe i powinien być w nim zawarty.
9. 1) Dlaczego tytuł podrozdziału 4.3.6. Pomiar z wykorzystaniem analizy dwutlenku węgla? To są metody z wykorzystaniem piroelektrycznych czujników podczerwieni. Proszę o wyjaśnienie. 2) Metoda ta, jak również rysunek 10, nie zostały wyczerpująco opisane w tym podrozdziale.
10. Niepoprawny numer rysunku w treści pracy: „założenie szelek pomiarowych na klatce piersiowej zgodnie z rysunkiem nr 9” (str. 67). Czy powinien to być rysunek 35?
11. Uwagi dotyczące rysunków:
 - Rysunek 2 przedstawiający kontaktowe metody pomiarowe zawiera tekst w języku angielskim. Rysunek należałoby przedstawić w języku polskim. Dotyczy to również i innych rysunków, np. 7, 10 i in.
 - Rysunek 33: jaki rezystor pomiarowy był wykorzystany w układzie pomiarowym?
 - Projekt autorskiego układu pomiarowego wykorzystującego belkę tensometryczną przedstawiony na rysunku 71 jest niejasny ze względu na brak legendy poszczególnych jego elementów. Proszę o ich omówienie.
 - Dostrzega się brak szczegółowych komentarzy do innych rysunków, np. rys. 28 - 29.
12. Tabela 2 przedstawiająca bezkontaktowe techniki pomiaru częstości oddechowej powinna zawierać: metoda z wykorzystaniem kamery RGB (a nie Kamera RGB),

metoda z wykorzystaniem czujnika ultradźwiękowego (a nie czujnik ultradźwiękowy).

13. W pracy występują liczne błędy stylistyczne oraz zauważalna jest niekonsekwencja w nazewnictwie, np.: fala oddechowa, sygnał oddechowy; filtracja S-G, metoda SG; filtr Savitzky'ego i Golay'a, filtr Savitzky-Golay itd.
14. Występują również powielenia w literaturze, np. pozycje 98 oraz 99 w Bibliografii - to te same pozycje książkowe.

Wnioski końcowe

Podsumowując stwierdzam, że przedstawione w niniejszej rozprawie doktorskiej wyniki badań są oryginalne i mają potencjał aplikacyjny w zakresie wyznaczania częstości oddechowej z sygnału EKG. Dodatkowo, uzyskane wyniki stanowią solidną podstawę do przeprowadzenia dalszych badań w tym obszarze. Postawiona w rozprawie teza została udowodniona, a cele osiągnięte. Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Mirosława Chylińskiego jest znacząca dla rozwoju metod wyznaczania częstości oddechowej i stanowi ważny wkład w rozwój dyscypliny naukowej „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne”.

Uważam, że rozprawa doktorska mieści się w dyscyplinie naukowej „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne” oraz spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim, zgodnie art. 14 ust. 2 pkt 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2017 r., poz. 1789, z późn. zm.), w związku z art. 179 ust. 1 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. — Przepisy wprowadzające ustawę — Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669, z późn. zm.). Na podstawie powyżej przedstawionej argumentacji, stawiam wniosek do Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Opolskiej o przyjęcie ocenianej pracy oraz dopuszczenie Pana mgr inż. Mirosława Chylińskiego do dalszych etapów procesu doktoryzowania.

Oleksandra Kotra

