

Prof. dr hab. inż. Piotr Jasiński
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji
i Informatyki
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Waltera
pt. „Opracowanie technologii wytwarzania sensorów rozciągnięcia technikami elektroniki
drukowanej do zastosowań telerehabilitacyjnych”

Uchwałą nr 770/II-IM/2024 Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej z dnia 9.10.2024 r. zostałem powołany na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Waltera pt. „Opracowanie technologii wytwarzania sensorów rozciągnięcia technikami elektroniki drukowanej do zastosowań telerehabilitacyjnych”. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Małgorzata Jakubowska, zaś promotorem pomocniczym dr inż. Daniel Janczak.

Rozprawa jest napisana po polsku i składa się z ośmiu numerowanych rozdziałów - w sumie 218 stron wydanych w formie skryptu w rozmiarze B5. Rozdział 1 (10 stron) jest bardzo ogólnym wprowadzeniem do tematyki rozprawy. Rozdziały 2 (13 stron) i 3 (10 stron) opisują odpowiednio sensory rozciągnięcia na bazie materiałów piezorezystywnych oraz cel pracy. Rozdział 4 (22 strony) opisuje zaproponowane przez Doktoranta rozwiązanie sensora rozciągnięcia w oparciu o wytłaczane włókna piezorezystywne. W rozdziale 5 (63 strony) opisano zasadnicze rozwiązanie technologiczne Doktoranta – sitodruk kompozytowych warstw piezorezystywnych. Rozdział 6 (16 stron) i 7 (17 stron) przedstawia odpowiednio wyniki charakteryzacji otrzymanych warstw oraz rozwiązanie układowo-programowe do śledzenia ruchu stawu. W rozdziale 8 (6 stron) znajduje się podsumowanie rozprawy. Ponadto, rozprawa posiada bibliografię, spisy ilustracji i tabel, spis treści, streszczenie po polsku i angielsku oraz załącznik w postaci listu opinii.

Przedmiot rozprawy, cel i tezy

W rozdziale 3 (strona 34) pracy doktorskiej Autor pisze, że celem rozprawy „... jest opracowanie nowatorskiego sensora rozciągnięcia opartego na kompozycie piezorezystywnym, który posłuży do pomiaru ruchu stawu w zastosowaniach telerehabilitacyjnych”. Doktorant nie postawił tez pracy, które można w podsumowaniu uznać za udowodnione. Ustawodawca nie zmusza Doktoranta do postawienia takiej tezy, ale do dobrych praktyk nie tylko wzorowych Doktorantów należy wykonanie wysiłku ich postawienia. Postawienie tez w pracy z pewnością zwiększyłyby walory tej pracy.

Konkludując, problem naukowy rozprawy jest jednoznacznie postawiony i związany z opracowaniem sensora rozciągnięcia na potrzeby rehabilitacji stawu kolanowego.

Podejście Autora do osiągnięcia celów pracy

Autor podszedł do osiągnięcia celów w sposób projektowo-konstrukcyjny oparty na:

- wyselekcjonowaniu technologii wytworzenia warstwy piezorezystywnej. Ze względu na niepowodzenia związane z wytworzeniem wytloczonych włókien kompozytowych, Doktorant skupił się na wytworzeniu dedykowanych past do sitodruku;
- wyselekcjonowaniu nośników dla past sitodrukowych z wykorzystaniem termoplastycznych poliuretanów oraz wielu innych materiałów. Jedynie termoplastyczne poliuretany spełniały wymagania na potrzeby sensorów rozciągnięcia;
- wyselekcjonowaniu wsadów przewodzących dla past sitodrukowych – w wyniku prac Doktorant zdecydował się na wykorzystanie sadzy technicznej;
- opracowaniu pasty dielektrycznej na bazie termoplastycznych poliuretanów na potrzeby warstwy buforowej pomiędzy dzianiną a warstwami przewodzącymi;
- przeprowadzaniu pomiarów charakteryzujących najlepsze sensory rozciągnięcia. Między innymi Doktorant przeprowadził badania rezystancji warstw (rezystywności powierzchniowej, przewodności) w funkcji ich grubości, rezystancji (względnej zmiany rezystancji) oraz czułości sensora rozciągnięcia (parametr GF) w funkcji rozciągnięcia próbek oraz czasu;
- przeprowadzenie testów z układem elektronicznym do zdalnych pomiarów rozciągnięcia na opasce stabilizującej;
- zastosowania modeli uczenia maszynowego do określenia kąta ugięcia stawu kolanowego i weryfikacja poprawności ich działania.

Podsumowując, uważam, że Doktorant powziął odpowiednie kroki dla realizacji celów rozprawy.

Aktualność tematyki rozprawy

Rozprawa dotyczy opracowania sensora rozciągnięcia na potrzeby telerehabilitacji stawu kolanowego. Tematyka rozprawy jest aktualna i doskonale wpisuje się w rozwój przyrządów elektroniki noszonej (noszonej) oraz przyrządów do zastosowań telerehabilitacyjnych. Obecnie stosowane systemy do rehabilitacji stawu kolanowego opierają się głównie na akcelerometrach, żyroskopach lub technologiach optycznych (np. kamery Kinect, systemy markerowe). Sensory rozciągnięcia to nowatorskie podejście, które pozwala na bardziej bezpośredni pomiar biomechaniki kolana. Zaletą sensorów rozciągnięcia polega na dynamicznym pomiarze zmiany napięcia i długości mięśni oraz więzadeł podczas ruchu, co daje dokładny obraz funkcjonowania stawu kolanowego. Zdalny monitoring postępów rehabilitacyjnych może znacząco obniżyć koszty rehabilitacji i pozwolić na szerszy dostęp do tego rodzaju usług. Tematyka, którą Doktorant uprawia, jest tematyką interdyscyplinarną obejmującą dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, inżynieria biomedyczna, inżynieria materiałowa oraz inżynieria mechaniczna.

Podsumowując, sensor rozciągnięcia dla telerehabilitacji stawu kolanowego to innowacyjne rozwiązanie, które łączy nowe technologie pomiarowe z rosnącą potrzebą zdalnej opieki zdrowotnej. Dzięki temu może znacząco poprawić skuteczność rehabilitacji, dostępność terapii i komfort pacjentów, a jednocześnie umożliwić lekarzom dokładniejsze śledzenie postępów leczenia.

Rozprawa na tle współczesnych doniesień literatury

W rozprawie Autor cytuje 416 pozycji literaturowych. Zdecydowana większość pochodzi z okresu ostatnich 10 lat i została opublikowana w artykułach naukowych czasopism i w wydawnictwach pokonferencyjnych. Uważam, że cytowania są właściwie dobrane i świadczą o dobrej wiedzy Autora z zakresu literatury przedmiotu dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna i pokrewnych.

Wady, słabe strony rozprawy oraz inne uwagi

Rozprawa napisana jest starannie i generalnie bez znaczących skrótów myślowych, błędów językowych i interpunkcyjnych. W pracy nie znalazłem błędów merytorycznych. Do mankamentu rozprawy zaliczam jej układ wraz wyborem prezentowanego materiału. Rozprawa zawiera materiał dotyczący wytłoczonych włókien kompozytowych, który jest wiązany z niepowodzeniami badawczymi. Ponadto znaczna część rozdziału związanego z przygotowaniem past sitodrukowych wskazuje na niepowodzenia badawcze. Jednocześnie stosunkowo niewiele miejsca poświęca się na przegląd literatury: np. w rozdziale 4 przegląd rozwiązań można znaleźć dopiero w posumowaniu rozdziału (rozdział 4.4). Odniosłem wrażenie, że Doktorant pełen wiary w swoje zdolności podszedł do prac eksperymentalnych z pominięciem systematycznego przeglądu literatury, zaś uzyskane wyniki podpierał wynikami znalezionymi w literaturze. Czy struktura pracy jest wynikiem podejścia, że wszystkie prace Doktoranta należy udokumentować w rozprawie? Czy struktura pracy mogła być inna? Bardzo ładny przegląd literatury dotyczący wsadów przewodzących znajduje się w rozdziale 5.2 i zapewne ja bym od tego, z pominięciem porażek, rozpoczął rozprawę. Również od tego miejsca można doszukać się sukcesów technologicznych. Oczywiście moja uwaga ma charakter polemiczny. Generalnie wspomniane treści są ciekawe z naukowego punktu widzenia. Mam również pytanie dotyczące warstw bazujących na sadzy technicznej:

- Doktorant w pracy podaje składy przygotowywanych kompozytów z wykorzystaniem stosunków wagowych. O ile z punktu widzenia technologa produkcji takie podejście ma sens, to z punktu widzenia wyjaśniania zjawisk jest nieużyteczne. W tabeli 9 dla struktury D4R znajdujemy, że wsad sadzy technicznej wynosi 4% wag., co odpowiada 2% vol., jednak liczby te są podane z uwzględnieniem rozpuszczalników. Jaki jest skład warstw w trakcie działania czujnika (po wysuszeniu)?
- 4% wag. to maksymalna wartość fazy przewodzącej. Czy na podstawie pomiarów dla wyników uzyskanych dla mniejszej zawartości sadzy technicznej można wnioskować, że parametry metrologiczne sensora (GF, pełzanie, histereza, stabilności na cykle rozciągnięcia) mogłyby być lepsze, gdyby technicznie udało się wprowadzić więcej sadzy technicznej niż 4 % wag.;
- Prośba o zaproponowanie bardziej technicznego opisu ze strony 166: „fenomenalne parametry mechaniczne”.

Powyższe pytania i uwagi nie wpływają na moją bardzo dobrą ocenę pracy.

Oryginalny dorobek Autora

Do oryginalnego dorobku Autora zaliczam opracowanie, wytworzenie i charakteryzację sensora rozciągnięcia do pomiaru ugięcia stawu kolanowego w zastosowaniach telerehabilitacyjnych, który bazuje na sadzy technicznej i termoplastycznych poliuretanach.

Nieodzownym wymaganiem stawianym przed kandydatem do stopnia doktora jest publikacja wyników prac w literaturze naukowej (Art. 186.3 Ustawy 2.0). Zgodnie z bazą bibliograficzną Scopus Doktorant jest współautorem 12 publikacji: 4 w materiałach pokonferencyjnych i 8 w czasopismach JCR, z czego w 4 jest Autorem wiodącym. W pracy cytowane są następujące:

- Walter, P., Podsiadły, B., Zych, M., Kamiński, M., Skalski, A., Raczyński, T., ... & Jakubowska, M. (2022). CNT/Graphite/SBS conductive fibers for strain sensing in wearable telerehabilitation devices. *Sensors*, 22(3), 800. (pozycja 153 i 222)
- Peplowski, A.; Walter, P.A.; Janczak, D.; Górecka, Ż.; Świążkowski, W.; Jakubowska, M. Solventless Conducting Paste Based on Graphene Nanoplatelets for Printing of Flexible, Standalone Routes in Room Temperature. *Nanomaterials* 2018, Vol. 8, Page 829 2018. (pozycja 295).

W mojej ocenie do powiązanych z rozprawą doktorską, oprócz publikacji wskazanych powyżej, należy uznać jedną niecytowaną pozycję:

- Podsiadły, B., Walter, P., Kamiński, M., Skalski, A., & Słoma, M. (2022). Electrically conductive nanocomposite fibers for flexible and structural electronics. *Applied Sciences*, 12(3), 941.

Podsumowując, Doktorant z sukcesem spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia doktora. Najciekawsze wyniki rozprawy doktorskiej zapewne warto opublikować.

Podsumowanie

Uważam, że rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Gdańsk, 23.02.2025 r.

Piotr Jasiński