

dr hab. inż. Maciej Sibiński, prof. uczelni,
Wydział Elektrotechniki Elektroniki Informatyki i Automatyki
Politechnika Łódzka
ul Stefanowskiego 18
90-537 Łódź

Łódź 19.11.2023

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Piotra Waltera

Opracowanie technologii wytwarzania sensorów rozciągnięcia technikami elektroniki drukowanej do zastosowań telerehabilitacyjnych

Promotor:

prof. dr hab. inż. Małgorzata Jakubowska

Promotor pomocniczy:

Dr inż. Daniel Janczak

1. Aktualność i oryginalność tematyki oraz teza i cel rozprawy.

Przedstawiona do oceny dysertacja naukowa dotyczy niezwykle intensywnie rozwijanej dziedziny wytwarzania elastycznych czujników drukowanych, wykorzystywanych w diagnostyce, monitoringu funkcji życiowych oraz rehabilitacji zdalnej (tzw. telerehabilitacji). Dynamiczny rozwój technologii materiałowej jak również bezprzewodowych metod komunikacji wraz ze zwiększonym zapotrzebowaniem na dostęp do zdalnych usług medycznych prowadzi do wzrastającej potrzeby opracowania elementów aktywnych i sensorów zdolnych do integracji z odzieżą codzienną, ochronną oraz opatrunkami, bandażami i opaskami medycznymi. Elementy takie wchodzą w zakres aplikacji smart textiles, określanych również mianem tekstroniki.

Pomimo dotychczasowego wykorzystywania zminiaturyzowanych czujników elektronicznych jak np. czujniki temperatury, nacisku czy rozciągania do badania parametrów życiowych oraz postępów leczenia pacjentów, aplikacje tekstylne stwarzają zupełnie nowe pole badawczo-wdrożeniowe w tej dziedzinie. Poprzez stawiane wymagania elastyczności, bio-kompatybilności, powtarzalności wyników w pomiarach dynamicznych jak również ze względu na występowanie zmiennych narażeń środowiskowych opracowanie tego typu urządzeń narażone jest na niejednokrotnie znacznych trudności. Jednocześnie w celu pomyślnej realizacji kompleksowego rozwiązania elastycznych czujników parametrów mechanicznych wymagana jest

rozległa i interdyscyplinarna wiedza naukowa i zdolności inżynierskie co dodatkowo ogranicza liczbę badaczy i grup naukowych podejmujących ww. tematykę. Z tego powodu temat przedstawionej dysertacji należy ocenić jako aktualny i ważny z punktu widzenia rozwoju dyscypliny inżynierii mechanicznej.

Cel pracy został określony na wstępie jej trzeciego rozdziału w sposób jednoznaczny jako opracowanie nowatorskiego sensora rozciągnięcia opartego na kompozycie piezorezystywnym, który posłużyć powinien do pomiaru parametrów ruchu stawu w zastosowaniach telerehabilitacyjnych. Sformułowano również w sposób precyzyjny wymagania odnośnie projektowanego elementu i sposobu jego funkcjonowania w układzie pomiarowym. Teza pracy nie została sformułowana wprost jednak na podstawie opisu przyjętej metodologii można przyjąć, że Autor wnioskuje możliwość wykonania funkcjonalnego czujnika elastycznego, spełniającego postawiony cel na bazie materiałów piezorezystywnych nakładanych na podłoża elastyczne metodą sitodruku i termotransferu.

Podsumowując należy podkreślić, że przyjęta tematyka pracy jest atrakcyjna i oryginalna naukowo, wpisuje w obecnie występujące kierunki badawcze a zdefiniowany cel pracy w sposób jasny i precyzyjny określa kierunek prowadzonych badań.

2. Ocena przyjętego układu oraz poprawności edycyjnej rozprawy doktorskiej.

Przedstawiona praca posiada układ właściwy dla dysertacji doktorskich. Jej podział umożliwia jasną prezentację celu, przyjętej metodyki badawczej, przebiegu eksperymentów a wreszcie analizy i interpretacji uzyskanych wyników. Praca opatrzona jest załącznikiem w postaci opinii eksperckiej na temat opracowanego w trakcie dysertacji sensora jak również obszerną bibliografią, liczącą ponad 400 pozycji a także spisem prezentowanych ilustracji. Użyty język jest na ogół poprawny a sformułowania precyzyjne i jednoznaczne. Jakość zamieszczonych ilustracji jak również formatowanie zamieszczonych tabel i rysunków jest zadowalająca. Jednak ze względu na bardzo szeroki, interdyscyplinarny i przekrojowy zakres pracy, pomimo jej wysokiej wartości merytorycznej pojawiają się pewne błędy techniczne oraz drobne braki i niedociągnięcia metodologiczne. Do grupy uwag technicznych i formalnych zaliczyć można następujące zagadnienia:

1. W pracy pojawiają się drobne, lecz liczne błędy edycyjne, gramatyczne, powtórzenia itp. (przykłady zaczerpnięte wyłącznie z rozdziału 1 Wprowadzenie):
 - a. Str. 11, rozdział 1.1. : *Obejmuje zarówno diagnostykę, leczenie, konsultacje jak i monitorowanie bez konieczności ich (kogo?) osobistej wizyty w placówce medycznej.*
 - b. Str. 12, rozdział 1.1: *Dzięki swojej formie pozwalają one na ciągły (lub częsty, periodyczny) ocena funkcji fizjologicznych przez długi okres...*

- c. Str. 18, rozdział 1.2: *a dodatkowe układy mechaniczne obniżają komfort użytkowania ...*
- d. Str. 19, Tabela 3: *Podatność na błędy wynikających z przesunięcia sensorów na ciele badanego*
- e. Str. 19, rozdział 1.2: *Kinezyterapia kończyn zwykle nie przekracza zwykle okresu kilku miesięcy...*
- f. Str. 20, rozdział 1.2: *Co więcej, doniesienia w tej dziedzinie ograniczają się one do badań podstawowych...*

Tego typu usterki powinny zostać usunięte na etapie korekty rozprawy przed jej ostateczną publikacją. Należy również unikać w pracy naukowej określeń żargonowych jak np.: *wyjście na układ typu FPC*.

2. Rozdział 4.1, str 46 – w zdaniu:

W przypadku kompozytów mieszanych, do zawiesiny dodano proszek grafitowy, tak by stosunek wagowy grafenu i nanorurek węglowych w zawieszynie odpowiadał stosunkowi Gr : CNT w docelowym kompozycie (tabela 8).

znajduje się omyłka. Prawdopodobnie Autorowi chodziło tutaj o stosunek wagowy grafitu i nanorurek węglowych.

- 3. W pracy Autor wielokrotnie posługuje się stwierdzeniami: zdecydowano się (12 razy), opracowano (14 razy), przygotowano (12 razy) uzyskano (4 razy) itp. Może budzić to wątpliwości odnośnie osobistego wkładu Autora w planowanie i przeprowadzenie opisywanych eksperymentów, oraz odnośnie własności intelektualnej otrzymanych wyników.
- 4. Nie ma powodu umieszczać w pracy naukowej niewiele wnoszących wykresów i zdjęć. Przykładowo Rys 48 przedstawiający dwa zdjęcia miernika w trakcie wykonywania pomiarów może zostać z powodzeniem zastąpiony podaniem odczytu wartości zmierzonych we właściwym tekście pracy.
- 5. Zachodzi poważna wątpliwość, czy rozdział 3 rzeczywiście, zgodnie ze swoim tytułem dotyczy wyłącznie celu pracy, czy też nie powinien on raczej nosić tytułu Cel i zakres pracy oraz przyjęta metoda naukowa?.
- 6. Na Rys 71 (Rozdział 6) Przedstawiono 11 wariantów nadruków elementów piezorezystywnych, jednak zamieszczona tabela podaje wymiary geometryczne jedynie czujników 1-8. Dane pozostałych elementów powinny zostać uzupełnione nawet jeśli są to tylko nadruki testowe.

Tego typu drobne błędy techniczne nie umniejszają znaczenia prezentowanych wyników, lecz nie powinny mieć miejsca w publikowanej rozprawie doktorskiej.

3. Rozwiązanie postawionego zadania – metody badawcze i samodzielność autora.

Autor w przedstawionej dysertacji prezentuje właściwą metodykę i sposób prowadzenia badań naukowych, zakładając możliwość różnych rozwiązań postawionego problemu, nie przyjmując a-priori ustalonych koncepcji realizacji a także wykazując otwartość na samo-kształcenie poprzez wnioskowanie z popełnionych błędów i porażek technologicznych.

Na podkreślenie zasługuje opracowanie i przedstawienie już na wstępie jasnego, wielowariantowego schematu przebiegu realizacji pracy, co zwłaszcza w przypadku badań eksperymentalnych w sposób znaczący ułatwia organizację i ewaluację częściową otrzymanych wyników pracy.

Autor na podstawie przeglądu literatury oraz własnych doświadczeń eksperymentalnych wyselekcjonował i przebadął grupę materiałów oraz grubowarstwowych technologii nakładania o potencjalnie korzystnych właściwościach w aplikacjach piezorezystywnych. Po opracowaniu i walidacji składu fazy funkcyjnej pasty oraz możliwych typów nośników przeprowadził również szeroko zakrojone eksperymenty dotyczące właściwej formy oraz efektywnej metody integracji elementu piezorezystywnego ze strukturą tkaniny uciskowej opaski stabilizującej staw kolanowy.

Znaczącym wkładem w rozwój opracowanej technologii są badania Autora dotyczące procesu wytwarzania pasty piezorezystywnej o zadanych właściwościach ze szczególnym uwzględnieniem fazy funkcjonalnej kompozytu na bazie grafitu i nanoform węglowych. Przeprowadzone eksperymenty dotyczyły zarówno właściwości piezoelektrycznych różnych mieszanin materiałów z uwzględnieniem otrzymywanych wartości progu perkolacji jak również parametrów mechanicznych warstw wykonanych na bazie szerokiej gamy materiałów osnowy.

Właściwą dyspersję fazy funkcyjnej uzyskano między innymi dzięki zastosowaniu odpowiednio dobranego polarnego rozpuszczalnika DMF. W trakcie tych prac otrzymana została nie tylko właściwa kompozycja materiałowa pasty lecz również jej pożądane właściwości reologiczne poprzez dobór i obróbkę odpowiedniego nośnika poliuretanowego. W dalszym toku prac otrzymano optymalną strukturę czujnika wykonanego metodą sitodruku i termotransferu z wykorzystaniem innowacyjnej, odpowiednio zaprojektowanej pasty dielektrycznej, służącej do otrzymania stabilizującej warstwy pośredniej w strukturze sensora. Ponadto zaprojektowano i wykonano właściwe testowe wzory sit drukarskich oraz dobrano parametry procesów nadruku i termotransferu.

Do ważnych, oryginalnych osiągnięć Autora należy zaliczyć również metodę wytwarzania kontaktów dla czujników na tkaninach poprzez niecałkowity termotransfer pól kontaktowych z folii polimerowej. Tego rodzaju połączenie nie wymaga wprowadzania dodatkowych kroków technologicznych a jednocześnie zapewnia zarówno poprawny kontakt elektryczny, poprawną hermetyzację jak i właściwą wytrzymałość mechaniczną i może być z powodzeniem stosowane w szeregu zastosowań tekstronicznych.

Dużą wartość aplikacyjną pracy podkreśla kompleksowe przebadanie opracowanych elementów i budowa w pełni funkcjonalnego prototypu wraz z elektronicznym układem odczytu, przetwarzania i transmisji danych a także dedykowaną aplikacją mobilną. Świadczy to również o przekrojowej wiedzy Autora z zakresu technologii materiałowej, konstrukcji układów elektronicznych, analizy numerycznej sygnałów, programowania a także projektowania i eksploatacji układów pomiarowych. Warto również zauważyć wykorzystanie modelu uczenia maszynowego do opracowania poprawnej metody filtracji odczytywanego sygnału i modeli regresji w celu kompensacji histerezy sensora.

4. Wiedza autora z zakresu dyscypliny naukowej oraz umiejętność prezentacji wyników.

Na podstawie przedstawionych wyników pracy oraz publikacji Doktoranta można stwierdzić, że uzyskał on szeroką wiedzę z omawianego zakresu oraz następujące umiejętności badawcze:

- Poprawne planowanie i prowadzenie badań naukowych oraz dobór właściwych narzędzi badawczych z zakresu teoretycznej analizy problemu, prowadzenia procesów technologicznych oraz analizy wyników.
- Niezbędna wiedza z zakresu przebiegu procesów wytwarzania warstw przewodzących, rezystywnych i sensorycznych metodami grubowarstwowymi w różnych wariantach technologicznych jak również umiejętność projektowania przebiegu i analizy zróżnicowanych procesów technologicznych nakładania tych warstw.
- Znajomość technik charakteryzacji materiałów, warstw i elementów elektronicznych wytworzonych metodą sitodruku i termotransferu.
- Znajomość technik pomiarowych wielkości mechanicznych i elektrycznych.
- Znajomość zasad i metod projektowania układów elektronicznych na płytkach drukowanych.
- Zasady przetwarzania i analizy sygnałów analogowych i cyfrowych przy wykorzystaniu algorytmów optymalizacji oraz modeli uczenia maszynowego
- Umiejętność krytycznej analizy wyników pomiarów, oraz przygotowania publikacji naukowych.

5. Uwagi krytyczne i zastrzeżenia do treści rozprawy doktorskiej

Szeroki zakres tematyczny pracy jak również jej interdyscyplinarny charakter stawiają wysokie wymagania wobec Doktoranta i stwarzają okazję do popełnienia błędów. Do podstawowych uchybień przedstawionej pracy zaliczyć można następujące zagadnienia i wątpliwości, które powinny zostać wyjaśnione przez Autora:

1. Zachodzi wątpliwość czy we wstępie teoretycznym pracy Autor w sposób właściwy rozważył oprócz wpływu wydłużenia czujnika w trakcie jego rozciągania również wpływ jego ugięcia na rezystancję wyjściową? W rozdziałach 1-4 całkowicie brak jest takiej analizy choć autor wyraźnie wspomina, że chodzi o czujnik zgięcia stawu kolanowego już w opisie Tabeli 5,

natomiast zarówno analiza teoretyczna jak i sam tytuł pracy pomijają w zupełności ten efekt. Ma to również swoje konsekwencje w testach prowadzonych dla otrzymywanych włókien i czujników drukowanych dotyczących wyłącznie ich rozciągania a nie zginania (procedury takich testów są obecnie ustandaryzowane i łatwo dostępne). Końcowo staje się to widoczne w analizie uzyskanych wyników prototypu (rozdział 7.2). Z tego powodu pojawia się pewne zaskoczenie Autora, że wyniki uzyskane w teście prototypu nie odpowiadają w pełni wynikom testów na stanowisku laboratoryjnym opisanym w rozdziale 6.3.

2. Podobnie pominięto we wstępie analizę problemu anizotropowego (punktowego) rozciągania czujników paskowych i włóknistych w układach tekstronicznych oraz wpływu takiego rodzaju pracy na potencjalne odczyty wyników mierzonej rezystancji.
3. W opisie wymagań stawianych w rozdziale 3 wobec projektowanego sensora nie uwzględniono zmiany odczytów rezystancji w czasie wywołanej nie tyle samym starzeniem materiału ile deformacją i wydłużeniem sensora na skutek wielokrotnego użycia. Widoczny jest brak parametrów odzwierciedlających takie wymagania w Tabeli 7. Z problemem tym w postaci efektu pełzania, jak również histerezy odczytu czujników Autor jest zmuszony zmierzyć się praktycznie co zostało opisane w następnych rozdziałach pracy.
4. Nie jest wiadome jaka była prędkość wytłaczania poszczególnych włókien opisanych w rozdziale 4 (podrozdział 4.1). Pomimo zarzucenia tej metody produkcyjnej przez Autora pytanie to jest istotne z punktu widzenia technologicznego jak również potencjalnej skalowalności metody produkcyjnej. Czy podjęto jakieś próby uporządkowania ułożenia nanorurek węglowych w wytwarzanym fialmencie (np. za pomocą pola magnetycznego), czy też ich ułożenie było zupełnie przypadkowe?
5. Jak Autor odniesie się do wzrostu rezystancji odcinków włókna w0-10 wraz ze wzrostem jego średnicy? W pracy brak jest dokładniejszej analizy tego zjawiska a przedstawiona hipoteza dotycząca bardziej równomiernej dyspersji faz we włóknie wytwarzanym pod wyższym ciśnieniem nie została poparta właściwymi badaniami morfologicznymi.
6. Dane dotyczące wytrzymałości mechanicznej włókien o średnicy 0,5 mm przedstawione na Rys 13 nie pokrywają się z pomiarami przedstawionymi na rys 15. Przykładowo zgodnie z rys 13 włókno w0-10 ulega zerwaniu przy odkształceniu 100% natomiast na Rys 15 przeprowadzono pomiary do ok 140% odkształcenia. Podobnie w przypadku włókna w10-5.

7. Dlaczego do dalszych testów otrzymanych włókien wybrano jedynie włókno na bazie w10-5? Pomimo wysokiej czułości jego charakterystyka jest wysoce nieliniowa a szeroki zakres wartości dla dużego rozciągnięcia powoduje trudności w odczycie wyników dla rozciągnięcia względnego poniżej 150%. Ponadto wybrana przez Autora aplikacja nie wymaga wydłużeń zastosowanego włókna aż o 300%, ponieważ (zgodnie ze wynikami Autora) w trakcie zginania materiał okalający powierzchnię rzepki rozciąga się jedynie do ok. 26%.
8. Wedle jakiej procedury zaprojektowano testy dynamiczne włókien zaprezentowane w rozdziale 4.2 na Rys 17 i 18? Czy podjęto próby wykorzystania standardowych procedur testowych dla rozciągania i zginania materiałów elastycznych (np. test De Mattia)? Do analizy otrzymanych wykresów pomocne byłoby określenie i porównanie wartości stałej czasowej τ .
9. Dlaczego Autor podjął próby lub rozważył wykonania pasty w osnowie TPU (rozdział 5.1.5) z fazą funkcjonalną wykonaną na bazie mieszaniny MWCNT oraz sadzy technicznej, choć prowadził analogiczne, udane eksperymenty w przypadku włókien przewodzących?
10. Czy przeprowadzono pomiary parametrów geometrycznych - analogiczne do wyników przedstawionych w rozdziałach 6.1-6.2, lecz dotyczące wymiarów warstw i elementów po procesie termotransferu na dzianinę? Wyniki dotyczące ukończonego czujnika miałyby większe znaczenie z punktu widzenia oceny całości procesu technologicznego.

6. Ocena końcowa

Pomimo przedstawionych pytań i uwag krytycznych należy podkreślić, że postawiony przez Autora dysertacji cel badawczy został w pełni zrealizowany. W efekcie analizy teoretycznej problemu, wielowątkowych eksperymentów technologicznych jak również dzięki opracowaniu dedykowanego układu odczytu i obróbki danych powstał zarówno oryginalny, specjalistyczny element sensoryczny jak również kompletny układ akwizycji i wizualizacji danych umożliwiający zdalną ocenę przebiegu rehabilitacji stawu kolanowego. Zarówno opracowany element jak i kompletny układ pomiarowy zostały zwalidowane w cyklu odpowiednio zaprojektowanych i przeprowadzonych testów parametrów technicznych. Wykorzystane procedury technologiczne i pomiarowe są zgodne z obowiązującymi standardami oraz właściwe dla zakładanej specyfiki aplikacji. Wskazują one na możliwość dalszego rozwoju i produkcji przemysłowej opracowanego rozwiązania, które jest przedmiotem zgłoszenia patentowego.

Zakres i sposób prowadzonych badań świadczą o szerokiej wiedzy, samodzielności oraz dociekliwości Autora. Publikacje wyników Autora w indeksowanych czasopismach naukowych potwierdzają zarówno wysoką wartość prowadzonych

badan jak również umiejętność formułowania komunikatów naukowych i krytycznej dyskusji uzyskanych wyników. Przedstawiona dysertacja oparta jest na szerokiej, aktualnej i właściwie dobranej bazie źródeł literaturowych.

Na tej podstawie stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymogi stawiane w art. 186 oraz 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Ponadto ze względu na wysoki poziom merytoryczny dysertacji oraz spełnienie kryteriów wyróżniania rozpraw doktorskich poprzez uzyskanie wysoko punktowanych publikacji naukowych oraz złożenie wniosku o ochronę patentową opracowanego wynalazku wnoszę o jej wyróżnienie przez Radę Naukową Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej.

Maciej Sibiński